

Magnetismus

Versuche



Lectron

Elektronik AG Ausbausystem Magnetismus

Autor
Gerd Kopperschmidt
Herausgeber
Reha Werkstatt Eschenheimer Tor
Lectron 2008
Eschersheimer Landstr. 26a
60322 Frankfurt
Tel.: +49 (0)69 90 50 12 82
Fax: +49 (0)69 90 50 12 83



| Experiment | Thema | Seite | Experiment | Thema | Seite |
|------------|---|-------|------------|---|-------|
| | Zu diesem Kasten | 4 | | Spielzeugmotore von TRIX | 29 |
| | Bausteine Magnetismus | 5 | | Lectron Drehspulinstrument | 30 |
| | Bausteine Elektronik AG | 6 | 16 | Lectron – Messinstrument an Gleich- und Wechselstrom | 31 |
| | Historisches | 7 | 17 | Lectron – Messinstrument an Wechselstrom | 32 |
| | Eigenschaften von Magneten | 7 | | Weicheiseninstrument | 33 |
| 1 | Magnetpole | 8 | 18 | Ohrhörer | 34 |
| 2 | Magnetische Ladungen | 9 | 19 | Die Pole eines Elektromagneten | 35 |
| | Magnetisierungslinien | 10 | 20 | Polabhängigkeit von der Stromrichtung | 36 |
| 3 | Magnetisieren und entmagnetisieren | 11 | 21 | Addition von Magnetfeldern | 37 |
| | Herstellung von Dauermagneten | 12 | 22 | Spannungserzeugung mit einer Spule | 38 |
| 4 | Das Magnetfeld | 13 | 23 | Das Induktionsgesetz | 39 |
| 5 | Feldlinien | 14 | 24 | Der Transformator | 40 |
| 6 | Beispiele von Feldlinienbildern | 15 | 25 | Wechselspannungsmessung mit Lectron Instrumenten | 41 |
| | Feldlinien und Magnetisierungslinien | 16 | 26 | Der Hochspannungstransformator | 42 |
| 7 | Magnetfeld und Materie | 17 | 27 | Glimmlampe an Hochspannung | 43 |
| 8 | Die Energie des Magnetfeldes | 18 | 28 | Die Induktivität | 44 |
| | Das Magnetfeld eines Elektrizitätsstromes | 19 | 29 | Die Induktivität an Wechselspannung | 45 |
| 9 | Oerstedts Versuch | 20 | 30 | Der Induktivgeber | 46 |
| | Das Magnetfeld einer Leiterschleife | 21 | 31 | Gleichstrommotor ohne Kollektor | 47 |
| 10 | Der Elektromagnet | 22 | 32 | Gleichstrommotor ohne Kollektor mit npn Transistor | 48 |
| 11 | Das Relais | 23 | 33 | Ein Synchronmotor | 49 |
| 12 | Selbsthaltung beim Relais | 24 | 34 | Wirbelströme | 50 |
| 13 | Der Wagnersche Hammer | 25 | | | |
| | Die Klingel | 26 | | | |
| 14 | Der Lectron Spulenbaustein | 27 | | | |
| 15 | Das Magnetfeld des Spulenbausteins | 28 | | | |



Zu diesem Kasten

Der Lectron Elektronik AG Experimentierkasten hat sich in Schule und Ausbildung bewährt. Er ist speziell für den Physikunterricht der 5. und 6. Klasse zusammengestellt und hat den Schwerpunkt Stromkreise. Darüber hinaus kann er wegen seiner reichhaltigen und trotzdem preiswerten Ausstattung auch im AG - Bereich für Versuche bis hin zu Logikschaltungen, wie sie in modernen Computern vorkommen, eingesetzt werden.

Wegen seines Erfolgs nach seiner Einführung hat sich Lectron entschlossen, ihn als Grundkasten für weitere aktuelle Schwerpunkte der heutigen Ausbildung in Schule und Universität zu verwenden und eine Reihe von Ausbausystemen, die wegen ihres niedrigen Preises als Klassensatz angeschafft werden können, zu konzipieren. Das erste liegt mit »Magnetismus« nun vor, »Neurophysiologie«, »Sollartechnik« und »Digitaltechnik« werden folgen.

In 34 Experimenten und zusätzlichen Erklärungen behandelt »Magnetismus« alle Erscheinungen, die mit magnetischen Feldern zu tun haben, vom Dauermagneten über den Elektromagneten mit seinen vielfältigen Anwendungen als Summer oder

Motor bis hin zum Transformator. Das Ganze geschieht - wie auch schon in anderen Lectron Experimentierkästen - auf der Basis des Karlsruher Physikkurses [1], der von der Abteilung für Didaktik der Physik an der Universität Karlsruhe entwickelt wurde.

Für die Magnetismus Experimente werden nur wenige spezielle Bausteine benötigt: Der Spulenbaustein mit 2 Rotoren, die Feldplatte, um magnetische Felder sichtbar zu machen, verschiedene Dauermagnete, das Netzgerät für Wechselspannung, sowie einige andere Bausteine; alle sind auch in anderen Versuchen universell weiter einsetzbar. Zusätzlich werden für einige Versuche einige Standardbausteine benötigt, die entweder dem Elektronik AG Experimentierkasten entnommen oder einzeln von Lectron bezogen werden können.

Vorab ein Warnhinweis: Die silber- und goldfarbenen Neodym - Magnete sind extrem stark. Wer bisher nur mit normalen Magneten gespielt hat, sollte sie nicht unterschätzen. Wir haben dem Kasten bewusst nur kleine Magnete beigelegt; trotzdem besteht bei starkem Aufprallen die Gefahr von Splintern oder Beschädigungen der Oberfläche.

Verschlucken der Magnete kann zu medizinischen Problemen führen. Bei zu kleinem Abstand können Schäden auftreten an Herzschrittmachern (Lebensgefahr), ec- und Kreditkarten, magnetischen Datenträgern, insbesondere Disketten, Monitoren und Fernsehern!

Neben dem Lectron Anleitungsbuch empfehlen wir für den Unterricht die Text- und Projektheft »Magnetismus« [2], welche ebenfalls auf Basis des Karlsruher Physikkurses am Friedrich - Schiller - Gymnasium, Marbach praxisnah entstanden sind. Beide Hefte aus der Reihe »Naturphänomene« können von dort direkt als Klassensatz bezogen werden:

Tel./Fax :07144-84580/07144-845820

www.fsg-marbach.lb.bw.schule.de

Sie enthalten weitere Versuche wie z. B. Aufbau einfacher Elektromotore, sowie Aufgaben mit Lösungen und Anregungen zum Thema Magnetismus.

[1] Der Karlsruher Physikkurs KPK

Schülerband 2 (Daten, Elektrizitätslehre, Optik)

ISBN: 3-7614-2096-X

AULIS Verlag Deubner & Co KG,

Antwerpener Str. 6-12, 50672 Köln.

Wer sich über Elektrotechnik hinaus für Physik interessiert, dem seien auch noch

die folgenden Publikationen der Abteilung für Didaktik der Physik an der Universität Karlsruhe wärmstens empfohlen: Schülerband 1 (Energie, Strömungen, Mechanik, Wärmelehre)

ISBN: 3-7614-2095-1

Schülerband 3 (physikalische Chemie, Wellen, Photonen, Atome, Festkörper, Kerne)

ISBN: 3-7614-2097-8

Unterrichtshilfen (Gesamtband) mit Lösungen aller Aufgaben der Schülerbände

ISBN: 3-7614-2098-6

alle ebenfalls AULIS Verlag Deubner & Co KG, Antwerpener Str. 6-12, 50672 Köln

Der Kurs wird laufend erweitert, auch für die Sekundarstufe II gibt es die entsprechenden Unterlagen; weitere Materialien findet man unter:

www-tfp.physik.uni-karlsruhe.de/~didaktik/kpk/material.htm

[2] Günter Offermann, »Magnetismus«, Textheft, Friedrich-Schiller-Gymnasium Marbach, 2006,

ISBN 3-9810670-5-3

Günter Offermann, »Magnetismus«, Projektheft, Friedrich - Schiller - Gymnasium Marbach, 2006,

ISBN 3-9810670-6-1



großer Rotor

| | | | | |
|--|--------|-------|--|--|
| | | | | |
| | 0,47µF | 100µF | | |

kleiner Rotor

Eisenkern

Feldplatte



2 Alnico Hufeisenmagnete



Kupfer/Messingrohr



Alnico Flachstabmagnet



Kompass



Neodym Rundmagnet



Neodym Kugelmagnet



2 Neodym Ringmagnete

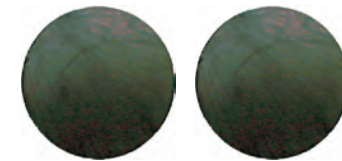


2 Lectron Rundmagnete



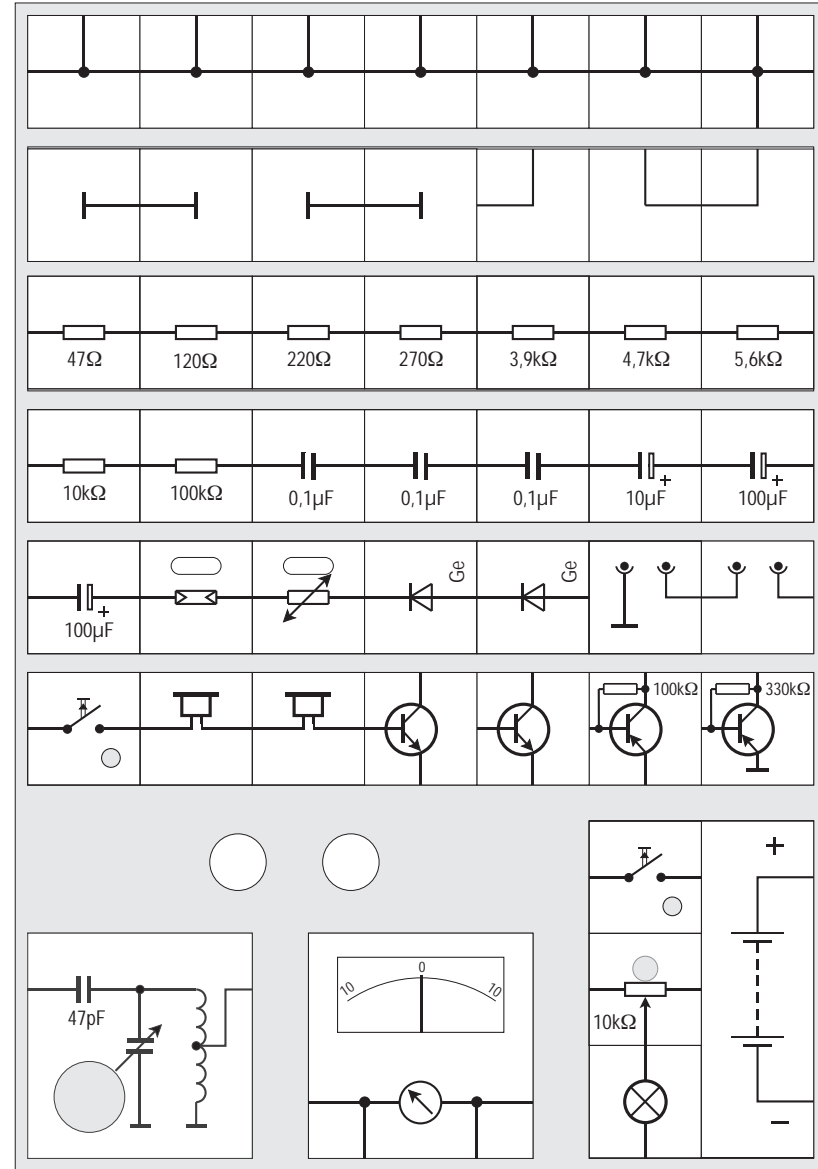
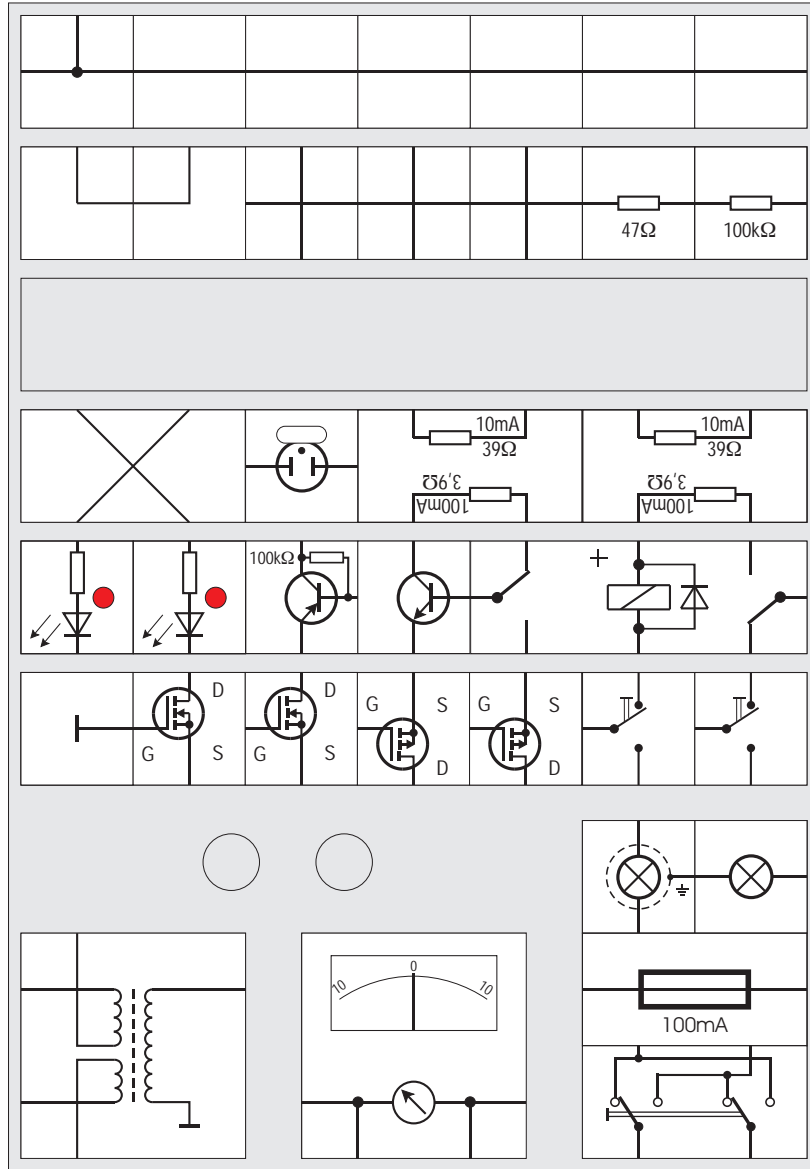
Lectron Bodenmagnet

2 Neodym Zylindermagnete



2 Ferrit Rundmagnete





Historisches

Über die Herkunft des Begriffes »Magnetismus« findet man verschiedene Geschichten:

Der römische Geschichtsschreiber Plinius der Ältere (etwa 23 - 79 n.Chr.) berichtet in seinem naturwissenschaftlichen Werk *Naturalis historia* eine griechische Legende, nach der der Hirte »Magnes« am Berge Ida auf der Mittelmeerinsel Kreta beim Hüten der Schafe die eiserne Spitze seines Hirtenstabs auf einen Stein setzte. Dieser Stein hielt die Eisenspitze so stark fest, dass er sie kaum losreißen konnte. Das Phänomen Magnetismus hat danach seinen Namen von dem Hirten Magnes erhalten, der dessen Kraft zum ersten Male bemerkte und es weiter erzählte.

Um 600 vor Christus lebte der griechische Philosoph, Naturforscher und Mathematiker Thales (der Namensgeber des »Thaleskreises«) in der Stadt Milet. Heute ist das ein Gebiet in der Türkei. In der Stadt Magnesia, die in der Nähe von Milet lag, wurde damals ein eisenartiges Erz gefunden, das Eisenteile anzog. Thales soll dieses Phänomen gekannt haben. Man vermutet daher auch, dass sich die Bezeichnung Magnet vom Namen dieser Stadt ableitet, in deren Nähe die Fundstätte für magnetisches Eisenerz lag.

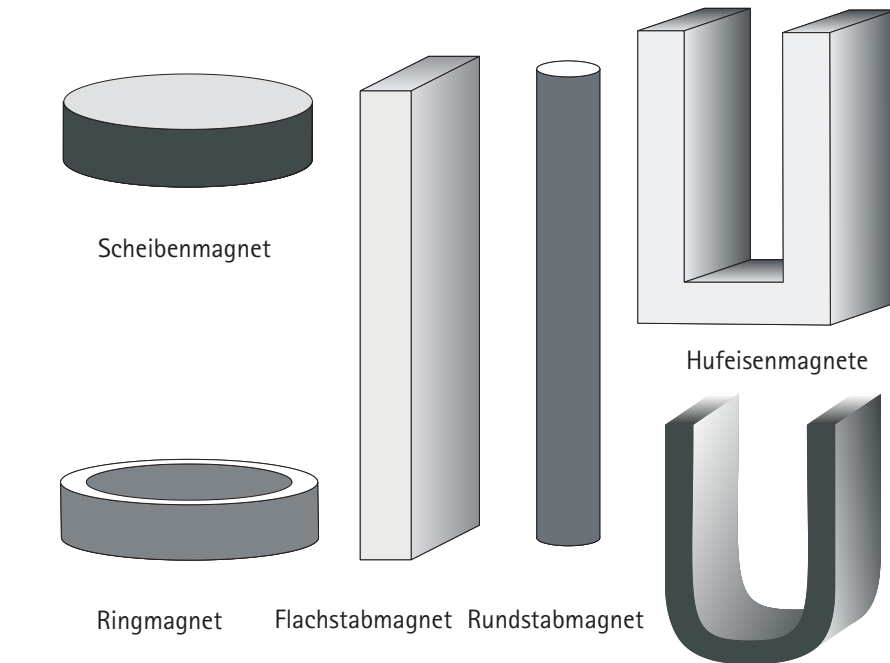
Nach gesicherten Quellen verwendeten die Chinesen bereits 200 vor Christus Mag-

nete als Kompass. Sie gehörten zur Ausrüstung von speziellen Wagen, die dem Herrscher auf seinen Fahrten durch das riesige Reich den Weg zeigten. Diese Wagen wurden »Wagen, die den Mittag anzeigen« genannt. Die Chinesen orientierten sich also an der Süd- und nicht wie wir heute an der Nordrichtung des Kompasses. In der chinesischen Bildersprache heißt Magnet »Liebender Stein« weil er Eisen so festhält, wie eine Mutter ihre Kinder um sich scharf.

Im Altertum gab es viele Geschichten um die geheimnisvollen Magnetsteine und -berge. Es wurden ihnen ungeheure Kräfte zugeschrieben, die auch Menschen festhielten, wenn diese Eisenteile mit sich trugen. Auch Sindbad der Seefahrer soll mit seinem Schiff einem Magnetberg derart nahe gekommen sein, dass sich alle Eisenteile des Schiffes losrissen und durch die Luft auf den Berg zu rasten.

Eigenschaften von Magneten

Moderne Magnete sind nun keine Berge und werden auch nicht in der Natur gefunden oder wie Eisenerz abgebaut. Sie sehen wie in der Abbildung gezeigt aus. Das Material, aus dem sie bestehen, ist Eisen, Nickel oder Kobalt. Es gibt auch spezielle Legierungen (Mischungen verschiedener Metalle) wie Alnico, aus denen man starke Magnete herstellen kann. Alnico ist eine Legierung aus den Metallen Eisen,



Aluminium, Kupfer, Nickel und Kobalt. Besonders starke Magnete werden neuerdings aus Legierungen mit den in der Natur seltenen Metallen Neodym, Samarium sowie Eisen und dem Nichtmetall Bor hergestellt.

Magnete zeichnen sich - wie allgemein bekannt ist - gegenüber anderen Gegenständen dadurch aus, dass sie Gegenstände aus Eisen, Kobalt oder Nickel anziehen.

Wir können das schnell ausprobieren: Büroklammern bestehen aus Eisen und sind selbst keine Magnete. Sie werden vom Magneten angezogen und kleben besonders an zwei Stellen des Magneten. Bei Stab- und bei Hufeisenmagneten sind das meistens die Stirnflächen. An anderen Stellen ist die Anziehung nicht so gut oder gar nicht bemerkbar. Die Stellen stärkster Anziehung heißen beim Magneten POLE.

Experiment 1 Magnetpole

Hängen wir nun einen Stabmagneten an einem Faden waagrecht wie in der Abbildung auf, so zeigt ein Pol ungefähr dorthin, wo geografisch Norden ist. Selbst wenn wir ihn von Hand um 180° drehen, pendelt er wieder in seine Ausgangsrichtung zurück. Er orientiert sich offensichtlich an einer Eigenschaft der Erde, nämlich deren Magnetfeld. Diese Eigenschaft wurde – wie beschrieben – bereits von den Chinesen ausgenutzt. Eine Kompassnadel ist letztlich auch nur ein kleiner Stabmagnet. Die beiden Pole eines Magneten unterscheiden sich also. Das Verhalten des Stabmagneten deutet darauf hin, dass die Erde selbst ein großer Magnet ist mit magnetischen Polen, die jeweils in der Nähe der geografischen Pole liegen.

Der Pol, der dorthin weist, wo auf der Erde geografisch Norden ist, heißt magnetischer Nordpol. Der andere wird magnetischer Südpol genannt. Bei Kompassnadeln ist der Nordpol meistens dunkler eingefärbt. Bei Stab- und Hufeisenmagneten ist der Schenkel, an dessen Ende der (blanke) Nordpol ist, rot angestrichen; der Schenkel mit dem Südpol ist dann grün eingefärbt.

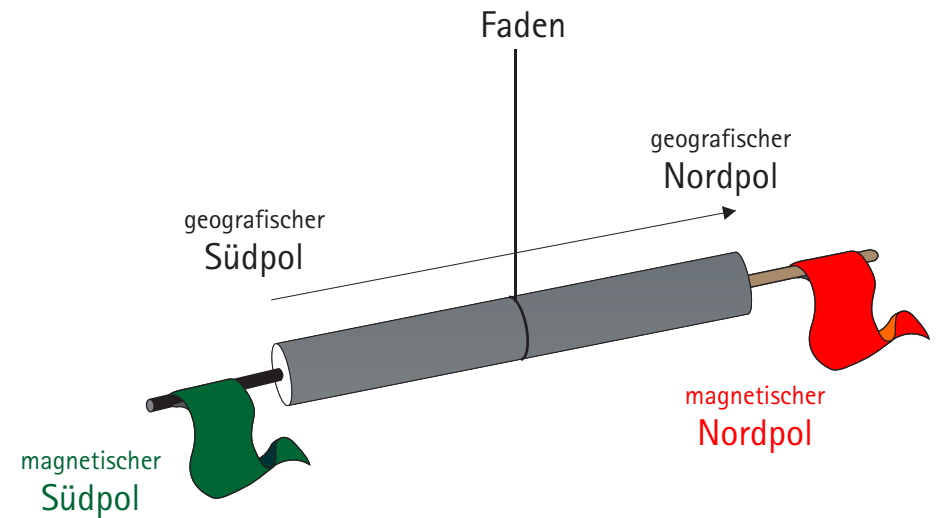
Sowohl der Süd- als auch der Nordpol ziehen Eisenteile an. Ganz anders verhält es sich mit Magneten untereinander. Man kann leicht mit Stabmagneten zeigen, dass

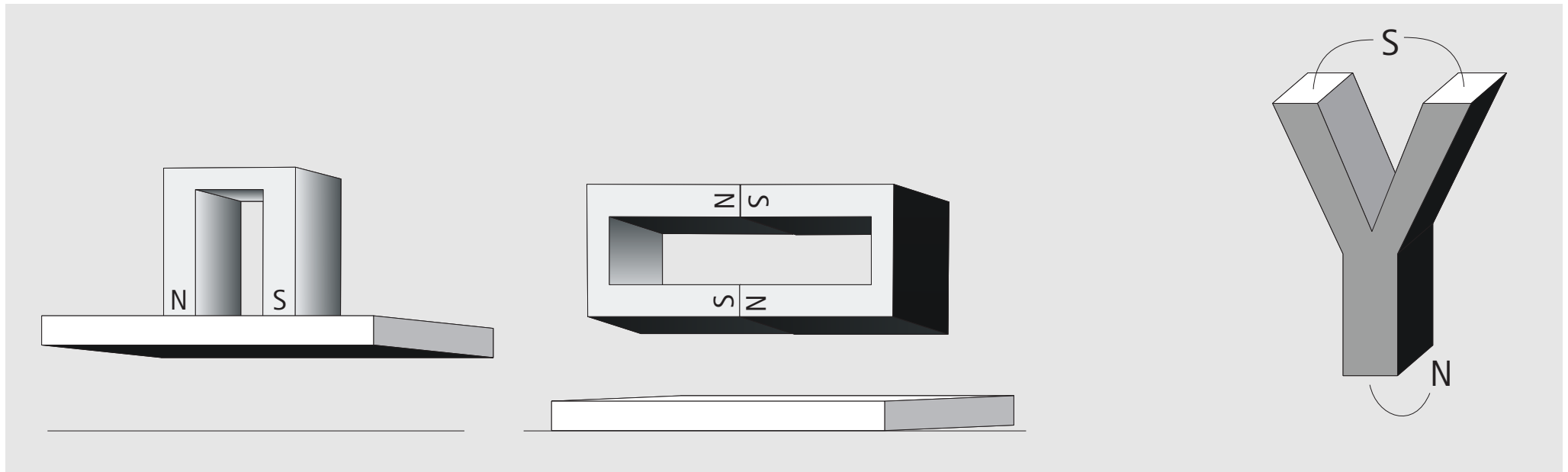
sich nur ungleiche Pole, also jeweils Nord- und Südpol kräftig anziehen, gleiche Pole sich dagegen kräftig abstoßen. Der Nordpol genannte arktische Magnetpol ist deswegen physikalisch ein Südpol.

Die meisten Magnete haben einen einzigen Nordpol und einen einzigen Südpol; manche haben auch mehrere Pole, z. B. zwei Nord- und zwei Südpole. Magnete mit nur einem einzigen Pol gibt es allerdings nicht. Beim Versuch mit dem Stabmagneten, der Büroklammern anzieht, konnten wir vielleicht beobachten, dass die Büroklammern eine Kette bilden, die vom Nordpol eines Magneten zu dessen Südpol führt. Solange ein Eisenteil an einem Magnet hängt, bildet es selber ebenfalls Pole aus, an denen sich ein weiteres Eisenteil hängen kann. Das Material, aus dem zum Beispiel ein Nagel gemacht ist, nennt man WEICHMAGNETISCH. Weichmagnetische Stoffe wie Büroklammern werden magnetisiert, wenn man sie in die Nähe eines Dauermagneten bringt. Sie verlieren allerdings ihren Magnetismus sofort wieder, sobald man sie vom Magneten entfernt.

Bei Dauermagneten ist dieses Verhalten unerwünscht, sie wären ja sonst keine Dauermagneten. Sie sind aus einem anderen Material, das man HARTMAGNETISCH nennt.

Stahl ist ein Material, das ein Mittelding zwischen hart- und weichmagnetisch ist. Entfernt man den Magneten, dann verliert Stahl seine magnetischen Pole nicht ganz.





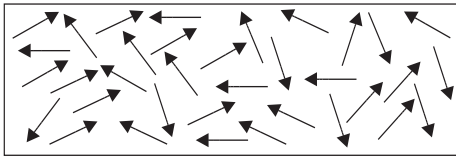
Experiment 2 Magnetische Ladungen

Wir wollen nun ein Experiment mit zwei gleich starken Hufeisenmagneten machen. Zunächst heben wir mit einem Hufeisenmagneten ein schweres Flacheisenstück. Dann bringen wir die beiden Hufeisenmagneten so zusammen, dass der Nordpol des einen am Südpol des anderen und umgekehrt liegt. Versuchen wir nun mit diesem ringförmigen Gebilde das Flacheisen hochzuheben, so wird

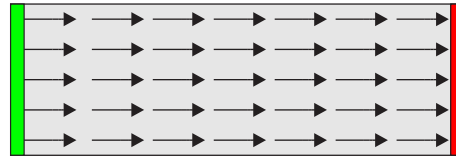
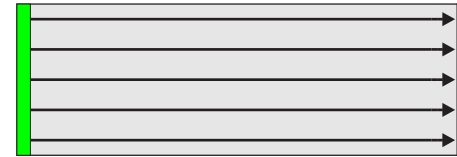
nichts passieren. Die anziehende Wirkung der Pole ist verschwunden. Wir können auch sagen, die anziehenden Wirkungen von Nordpol und Südpol haben sich aufgehoben oder kompensiert. Diese Beobachtung lässt sich dadurch beschreiben, dass wir annehmen, an den Polen befindet sich etwas, was wir **MAGNETISCHE LADUNG** nennen können. Diese Ladung befindet sich an der Oberfläche des Magneten, beim Hufeisenmagneten also an den beiden Endflächen. Weil sich die Ladungen von Nord- und Südpol aufhe-

ben, kann man annehmen, dass sie unterschiedliches Vorzeichen haben, magnetische Ladung also mit zweierlei Vorzeichen auftritt. Welche der Ladung nun positiv und welche negativ sein soll, ist zunächst willkürlich. Man hat sich darauf geeinigt, dass die Nordpolladung positiv und die Südpolladung negativ ist. Bei unserem Experiment haben wir gleich viel positive und negative magnetische Ladung zusammengebracht, so dass sie sich gegenseitig aufgehoben haben; die resultierende Ladung war also Null und übte

keine anziehende Kraft mehr aus. Wir können noch Weiteres folgern: Ein einziger Magnet enthält gleich viel positive wie negative magnetische Ladung. Wäre es nicht so, hätte man Magneten mit nur einem Pol finden müssen. Selbst bei einem so ungewöhnlichen Y-förmigen Magneten mit beispielsweise zwei Südpolen und einem Nordpol gilt, dass er gleich viele positive wie negative Magnetladungen besitzt. Hier ist die Nordpolladung gleich der Summe aus den beiden Südpolladungen.



Unmagnetisiertes Eisen

Magnetisiertes Eisen
oder
Dauermagnet

Magnetisierungslinien

Magnetisierungslinien

Zerteilt man einen unmagnetischen Eisennagel in der Mitte, so sind die beiden Teilstücke ebenfalls nicht magnetisch. Bricht man einen magnetisierten Eisennagel oder einen Stabmagneten durch, dann entstehen an der Bruchstelle des einen Teils eine Nordpolladung und eine gleich große Südpollladung an der Bruchstelle des anderen Teils. Dies gilt für jede Bruchstelle, ganz gleich, ob sie nun genau in der Mitte oder außermittig liegt.

Daraus schließen wir, dass beim Magnetisieren eines Nagels, einer Büroklammer oder ganz allgemein eines Stück Eisens nicht nur an den Enden des jeweiligen Teils - also an den Polen - etwas verändert wird, sondern im Inneren des ganzen Teils auch etwas passiert.

Eisen besteht wie jeder andere Stoff aus sehr, sehr kleinen Teilen, den Atomen.

Beim Eisen ist es nun so, dass jedes Eisenatom selbst magnetisch ist, wir haben also eine Unmenge von atomaren Magnetchen, aus denen letztlich das Eisenstück besteht. In unmagnetisiertem Eisen liegen diese atomaren Magnetchen so ungeordnet durcheinander, dass das Eisen keine magnetischen Ladungen an irgendeiner Stelle der Oberfläche hat (siehe Abbildung).

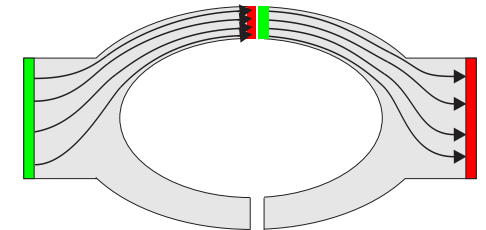
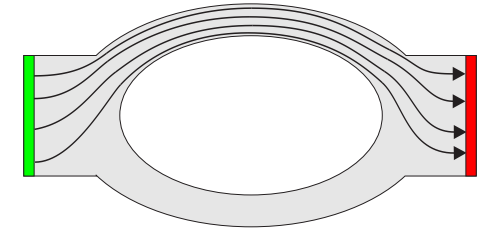
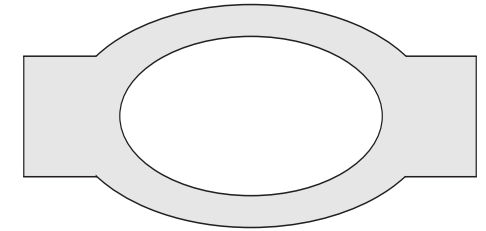
Magnetisieren wir nun Eisen mit einem Dauermagneten, so werden die winzigen Magnetchen »in Linie« gebracht, also gleichmäßig ausgerichtet. Das Innere des Eisenstücks im magnetisierten Zustand kann man sich so vorstellen, wie es die nächste Abbildung zeigt. Man erkennt leicht, dass verschiedene Ladungen an der linken und der rechten Oberfläche entstanden sind; hier befinden sich dann die Pole.

Nimmt man den magnetisierenden Mag-

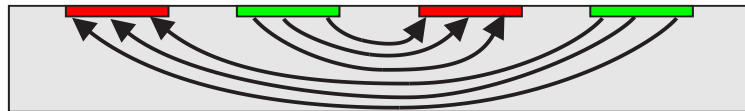
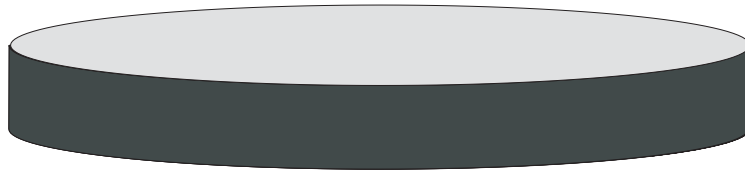
neten weg, gehen die atomaren Magnetchen aus dem schön geordneten Zustand wieder in den ungeordneten der ersten Abbildung über. Bei einem Dauermagneten sind die Magnetchen genauso geordnet wie bei einem Stück magnetisiertem Eisen und bleiben nach dem Ordnen, das beim Hersteller des Magneten passiert, auch in diesem Zustand.

Statt nun viele kleine Pfeile zu zeichnen, können wir uns die Darstellung etwas einfacher machen: Wir zeichnen durchgehende Linien vom Süd- zum Nordpol, die **MAGNETISIERUNGSLINIEN**; sie sind so gerichtet, wie vorher die geordneten Pfeile. Alle Linien bekommen eine Pfeilspitze und zwar so, dass sie am Südpol beginnen und zum Nordpol laufen (Abbildung); sie kreuzen oder berühren sich nicht.

Dieses Magnetisierungslinienbild ist sehr aussagekräftig. Es zeigt uns genau, wie die Linien laufen und wo sich die



magnetischen Ladungen - also die Pole - des Magneten befinden müssen. Anhand des Bildes können wir auch leicht voraussagen, was passiert, wenn wir den Magneten durchbrechen. Das Beispiel beim Zerschneiden eines etwas ungewöhnlichen Magneten zeigt deutlich, dass an der oberen Bruchfläche ein Paar neuer Pole entstehen muss, an der unteren dagegen nicht, weil hier keine Magnetisierungslinien vorhanden sind.



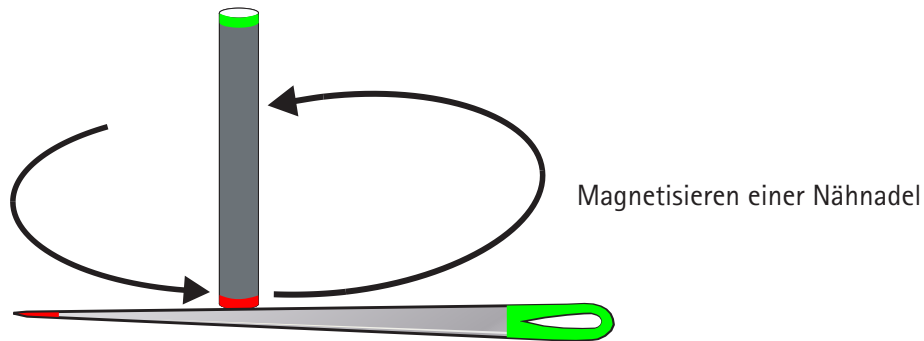
Magnetisierungslinien

Aus den Magnetisierungslinien kann man ersehen, wo ein Magnet seine Pole hat. Umgekehrt kann man aber nicht immer eindeutig aus der Lage der Pole schließen, wie die Magnetisierungslinien verlaufen: Wenn wir den ringförmigen Magneten auf der vorherigen Seite betrachten stellen wir lediglich

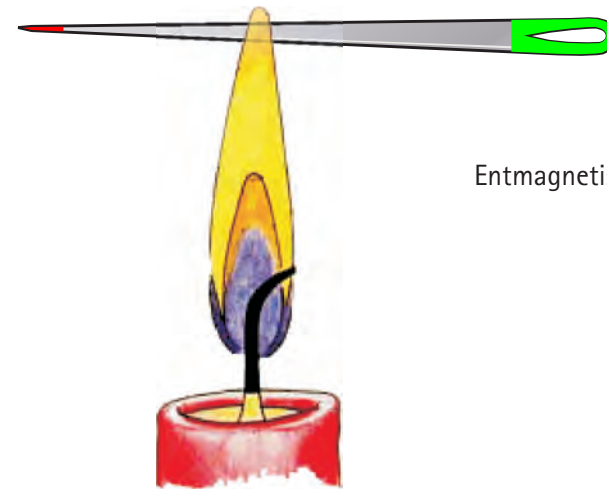
fest, dass sich links ein Südpol und rechts ein Nordpol befindet. Wie die Magnetisierungslinien im Inneren des Magneten verlaufen weiß nur der Hersteller. Erst nach dem Zerbrechen des Magneten können wir sehen, dass der untere Teil gar keine Magnetisierungslinien enthält, hier also die atomaren Magnetchen völlig ungeordnet sind. Ein weiteres Beispiel für unterschiedli-

chen Magnetlinienverlauf kann man an Magneten feststellen, wie sie für so genannte Pinwände, also große Eisentafeln, an die man mit runden Magneten Notizzettel heften kann, verwendet werden. Diese Magnete haben meistens die Pole auf einer Seite, weil dort eben die Kraft benötigt wird, und häufig sind es jeweils zwei Nord- und Südpole. Wie die Magnetisierungslinien im

Magneten bei seiner Herstellung angeordnet sind, können wir von außen nicht sehen. In diesem Fall sind zwei prinzipielle Verläufe (neben den gespiegelten, bei denen Nord- und Südpol vertauscht sind) möglich. Erst wenn wir den Magneten durchbrechen, erkennen wir den inneren Verlauf daran, ob an der Bruchstelle neue Pole entstehen oder nicht.



Magnetisieren einer Nähnadel



Entmagnetisieren einer Nähnadel

Experiment 3 Magnetisieren und entmagnetisieren

Einen Gegenstand macht man magnetisch, indem man nach unserem Modell alle atomaren Magnetchen gleichmäßig ausrichtet. Wie geschieht das praktisch?

Wir haben bereits gesehen, dass bei weichmagnetischem Eisen, z. B. einem Nagel, dieser Vorgang abläuft, wenn er von einem Magneten angezogen wird

und er daran haften bleibt. Wenn wir also mit einem Pol eines Dauermagneten mehrmals in gleicher Richtung entlang einer Nähnadel (die aus Stahl besteht und deswegen hartmagnetisch ist) streichen, werden ihre atomaren Magnetchen ausgerichtet. An ihrem einen Ende entsteht dann ein Nordpol und am anderen Ende ein Südpol. Diesen Vorgang nennt man **MAGNETISIEREN**. Er gelingt natürlich nur, wenn einerseits die Atome des Gegenstandes, den wir be-

streichen, magnetisch sind und andererseits die atomaren Magnetchen sich dauerhaft ausrichten lassen.

Den gegenteiligen Vorgang nennen wir **ENTMAGNETISIEREN**. Dabei werden die atomaren Magnetchen wieder in Unordnung gebracht. Das kann durch Erhitzen des Gegenstandes oder durch heftige Stöße geschehen. Die vorher magnetischen Gegenstände verlieren dadurch ihren Magnetismus. Beides sind recht drastische Maßnahmen, die praktisch

oft gar nicht durchführbar sind, ohne den Gegenstand nachhaltig zu beschädigen. In der Praxis bringt man deswegen die zu entmagnetisierenden Gegenstände in ein magnetisches Wechselfeld, in ein Feld also, welches ständig seine Richtung wechselt, und macht gleichzeitig die Stärke des Magnetfeldes immer kleiner bis sie Null ist. Dann sind auch die atomaren Magnetchen genügend in Unordnung gebracht, so dass kein Magnetfeld außen mehr festzustellen ist.

Herstellung von Dauermagneten

Dauermagnete, die auf die eben beschriebene Weise aus hartmagnetischen Materialien, wie Stahl, hergestellt worden sind, besitzen den Nachteil, dass wir sie nicht beliebig stark machen können und dass sie im Laufe der Zeit ihren Dauermagnetismus doch langsam wieder verlieren; besonders dann, wenn sie einem äußeren entgegengesetztem Feld ausgesetzt sind, werden solche Dauermagnete entmagnetisiert.

Moderne Dauermagnete werden heutzutage deswegen kaum noch aus Stahl hergestellt. Man verwendet dazu andere Ausgangsstoffe, die über lange Zeit gesehen ihre einmal erhaltenen magnetischen Eigenschaften beibehalten. Wir hatten bereits erwähnt, dass es starke Magnete aus AlNiCo gibt, einer Eisen-Aluminium-Kupfer-Nickel-Cobalt-Legierung. Sie können in dem weiten Temperaturbereich von -270°C bis 550°C eingesetzt werden und benötigen keine Oberflächenbeschichtung, weil sie korrosionsbeständig sind. Aber auch sie können noch unter Einwirkung eines äußeren Feldes relativ leicht entmagnetisiert werden. Ein Maß, wie gut ein Dauermagnet seine Magnetisierung behält, ist die so genannte KOERZITIVFELDSTÄRKE.

Um den Faktor 3 bis 5 besser als AlNiCo-

Magnete sind FERRITMAGNETE, die aus einem Gemisch von Eisenoxid und Barium- oder Strontiumoxid hergestellt werden. Sie können bei hohen Temperaturen eingesetzt werden und sind ebenfalls korrosionsbeständig. Ein weiterer Vorteil ist ihre geringe elektrische Leitfähigkeit, die unerwünschte Wirbelströme mit den damit verbundenen Verlusten klein hält (zu Wirbelströmen siehe Experiment Nr. 34).

Die relativ teuren Samarium-Cobalt-Magnete haben eine bis zu 14-mal höhere Koerzitivfeldstärke als AlNiCo Magnete. Sie sind bis zu 300°C einsetzbar und bieten eine hohe Energiedichte. Sie brauchen nicht groß zu sein und werden deswegen hauptsächlich in Servo- und Schrittmotoren verwendet; allerdings sind sie sehr spröde und nicht beständig gegen anorganische Säuren und Laugen.

Zur Zeit weisen Neodym Magnete die stärksten Magnetfelder auf. Sie bestehen aus den Metallen Neodym und Eisen sowie Bor (NdFeB). Ihre Koerzitivfeldstärke ist circa 17mal so hoch wie bei AlNiCo. Diese preiswerten Magnete müssen allerdings eine Oberflächenbeschichtung haben, weil die NdFeB - Legierung chemisch leicht reagiert und ohne Schutzschicht korrodiert. Eine andere Möglich-

keit besteht darin, Kunststoffe mit einzumischen; dann kann auf den Oberflächenschutz verzichtet werden.

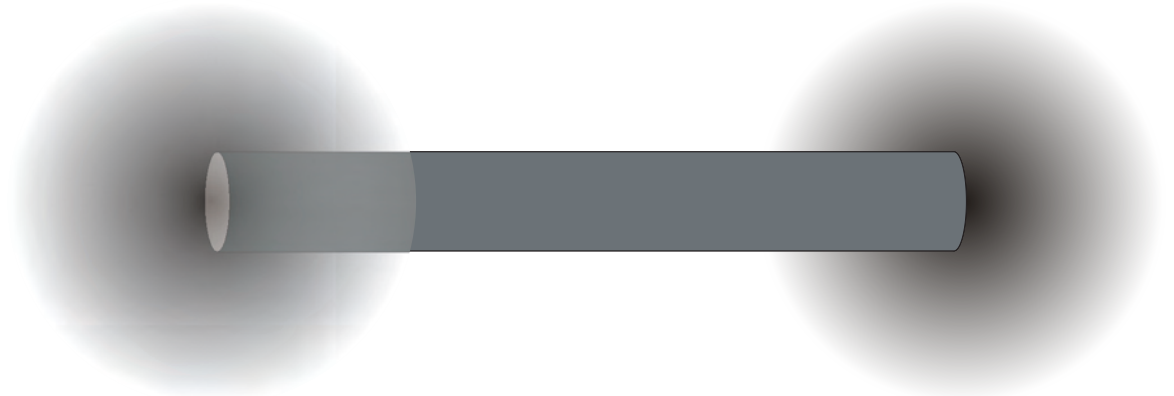
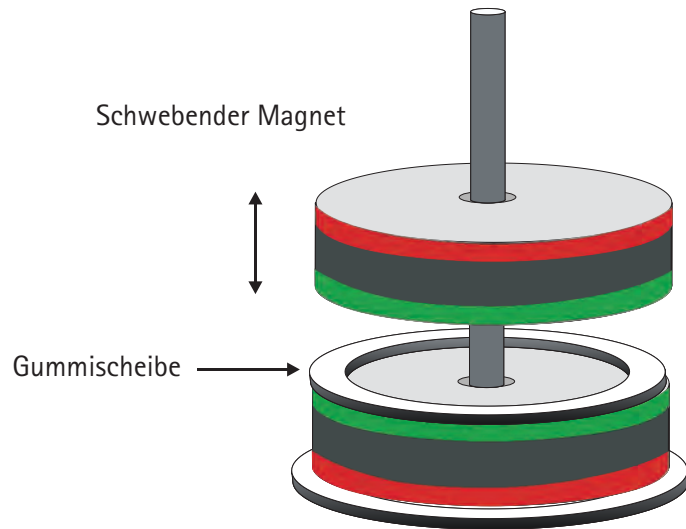
Zur Herstellung aller dieser modernen Magnete werden die Ausgangsmetalle zu Pulver gemahlen und gemischt. Bei AlNiCo gibt es auch die Möglichkeit, die Magnete zu gießen. Das Pulvergemisch kommt dann in einen Zylinder, der in einem starken Magnetfeld liegt, wodurch die Teilchen und ihre atomaren Magneten ausgerichtet werden. Das Gemisch wird anschließend unter Druck zusammen gepresst und verfestigt. Eine andere Methode besteht darin, das Gemisch durch Hitzeeinwirkung zu verbacken, was auch »sintern« genannt wird.

Aufgrund der Herstellung sind diese Magnete sehr hart, leider aber auch sehr spröde. Sie zerbrechen äußerst leicht, wenn sie auf den Boden fallen. Experimentieren wir mit ihnen, sollten wir zwei Magnete auf keinen Fall ungebremst gegeneinander knallen lassen. Durch den starken Aufprall würden sie unweigerlich zerspringen. Die umher fliegenden Splitter können uns verletzen, deswegen sollten wir vorsichtshalber eine Schutzbrille tragen. Größere Magnete, die allerdings nicht im Kasten enthalten sind, quetschen leicht unsere Finger, wenn diese zwischen sie geraten. Sie sind kein Kinderspielzeug.



Zwei Ringmagnete vor und nach unkontrolliertem Zusammenprall





Die Dichte des Magnetfeldes dargestellt durch unterschiedlich starke Graufärbung

Experiment 4 Das Magnetfeld

Wir wissen bereits, dass sich zwei Magnete anziehen oder auch abstoßen können, ohne dass sie unmittelbar miteinander in Berührung stehen müssen. Sehr gut ist dieser Effekt auch zu sehen, wenn man mit einem Magneten die Nadel eines Kompasses beeinflusst, der in einiger Entfernung aufgestellt ist. Die Kompassnadel hat keinen direkten Kontakt zum Magneten und doch muss eine - für uns unsichtbare - Verbindung zwischen beiden bestehen. So ungewöhnlich ist diese Tatsache nun nicht; es gibt viele Dinge, die für uns unsichtbar sind und trotzdem existieren, beispielsweise Luft.

Nimmt man zwei Neodym Ringmagnete in Scheibenform und steckt durch ihre Öffnung einen Holz- oder Plastikstab, dann wird der zweite Magnet über dem ersten schweben, wenn gleichnamige Pole einander benachbart sind (Abbildung). **Zwischen beide Magnete unbedingt eine Gummischeibe legen, damit sie bei versehentlich falscher Polung nicht gegeneinander knallen und zersplittern.** Wenn wir versuchen, die beiden Magnete zusammen zu drücken, spüren wir irgendetwas zwischen ihnen, das versucht, sie auseinander zu halten. Je näher sich die beiden Magnete kommen, desto mehr Kraft müssen wir aufwenden. Dieses unsichtbare Etwas, das an den

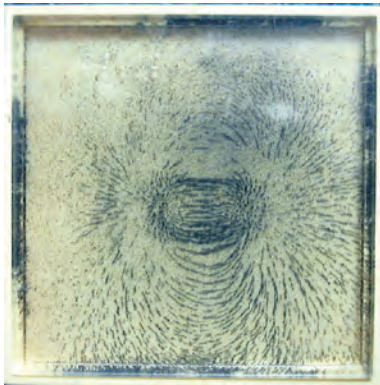
Polen »hängt«, heißt **MAGNETISCHES FELD**. Bringt man zwei unterschiedliche Pole zweier Magneten zusammen, so verhält sich dieses gesamte Feld wie eine elastische Zugfeder, die die Pole zueinander ziehen möchte. Genau wie eine mechanische Feder drücken und ziehen kann, so drückt und zieht auch ein magnetische Feld in Abhängigkeit davon, welche Pole einander nahe sind. Es gibt also keine zwei verschiedenen Sorten von Magnetfeld. Wir merken uns:

Gleichnamige Magnetpole werden von den an ihnen hängenden Feldern voneinander weggedrückt, ungleichnamige zueinander hingezogen.

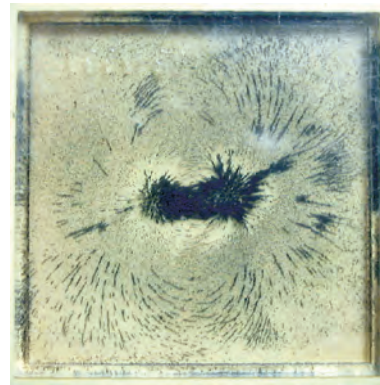
Die Wirkung eines magnetischen Feldes,

das an einem Pol hängt, wird nach außen hin, also bei größerem Abstand vom Pol, schwächer. Das liegt daran, dass die Dichte des Feldes ähnlich abnimmt, wie auch die Dichte der Lufthülle, wenn man sich von der Erdoberfläche entfernt. Am dichtesten ist es am Magnetpol. Nach außen hin hat das Feld keine scharfe Grenze oder keinen Rand, es wird einfach immer schwächer.

Da das Feld unsichtbar ist, müssen wir uns etwas ausdenken, um es trotzdem darzustellen, damit es für uns handhabbar wird. Eine grafische Möglichkeit ist es, mit Grautönen zu arbeiten: An den Magnetpolen, wo das Feld stark ist, verwenden wir eine dunkle Tönung, die mit wachsendem Abstand immer heller wird (rechte Abb.).



a) Feldplatte über Stabmagneten
in größerem Abstand



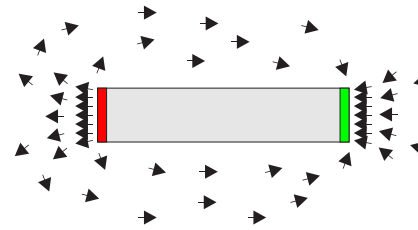
b) Feldplatte über Stabmagneten
in kleinerem Abstand

Experiment 5 Feldlinien

Die Darstellung eines Magnetfeldes mit Grautönen ist schon recht hilfreich zur Veranschaulichung des Magnetfeldes, sie lässt sich allerdings noch verbessern. Wir machen dazu ein Experiment und zwar stellen wir in die Nähe eines Stabmagneten eine Kompassnadel, also einen kleinen drehbar gelagerten Stabmagneten. Die Nadel wird in eine bestimmte, für diese Stelle stets gleiche Richtung zeigen. Die Richtung, in die die Nadel zeigt, hängt dabei davon ab, an welche Stelle - bezogen auf den Stabmagneten - wir sie stellen. Jeder Stelle des Magnetfeldes entspricht nicht nur eine gewisse Stärke (Dichte), sondern auch eine bestimmte

Richtung. Man kann auch sagen: Das Feld eines Magneten hat an jeder Stelle eine bestimmte Richtung. Dies haben wir bei der Darstellung mit Grautönen noch nicht erfasst.

Wir können die Richtungen der einzelnen Stellen eines magnetischen Feldes auf sehr einfache Art alle auf einmal sichtbar machen. Dazu gibt es bei Lectron eine so genannte FELDPLOTTE, das ist ein dünner quadratischer Kunststoffbehälter mit transparenter Abdeckung, der Eisenfeilspäne enthält. Wir klopfen zunächst gegen die waagrecht gehaltene Feldplatte, so dass sich die Eisenfeilspäne einigermaßen gleichmäßig über die Fläche verteilen. Dann halten wir die Platte weiterhin waagrecht in dichtem Abstand über einen auf dem Tisch liegenden Stab-

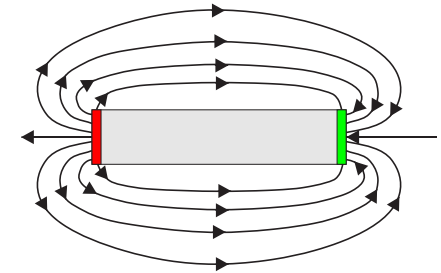


c) Pfeilchen, die für Magnetenadeln stehen,
zeigen die Richtung des Magnetfeldes an

magneten und klopfen noch einmal leicht gegen die Feldplatte. Wir sehen, dass sich die Feilspäne zu Ketten anordnen. Diese Ketten zeigen an jeder Stelle des Feldes in die Richtung, in die auch eine Kompassnadel zeigen würde. Sie zeigen also die Richtung des Feldes an jedem Punkt an (Abbildung a). Das ist auch ganz einfach einzusehen: Jedes winzige Feilspänchen wird unter dem Einfluss des Magnetfeldes selbst eine kleine Kompassnadel und stellt sich so ein, wie es auch die große tun würde.

(Anmerkung: Damit uns die Feldplatte schöne Bilder der Eisenspäne liefert, müssen wir etwas mit dem Abstand über dem Magneten experimentieren. Ist er zu klein, wie in Abbildung b, werden die Eisenspäne zu den Polen gezogen und im mittleren Bereich bleiben keine liegen).

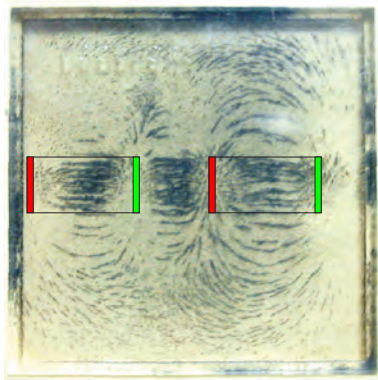
Mit dieser Erkenntnis können wir nun das



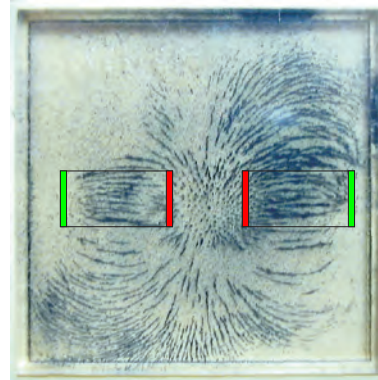
d) Magnetfeldlinien ersetzen
die kleinen Magnetenadeln

Magnetfeld noch besser darstellen. Um zusätzlich noch die Richtung anzugeben, zeichnen wir kleine Pfeile. Dort, wo das Feld dicht ist, ganz viele, wo es weniger dicht ist, nur wenige. Die Pfeilspitze kommt an die Seite, die vom Nordpol weg weist (Abbildung c).

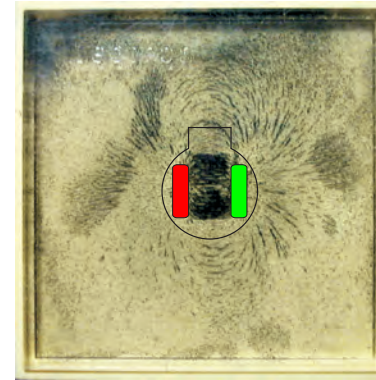
Noch bequemer ist es, FELDLINIEN zu zeichnen. Statt vieler Einzelpfeile zeichnen wir durchgehende Linien. Die Richtung gibt die Feldrichtung an. Der seitliche Abstand der Linien sagt uns etwas über die Dichte des Feldes. Ein kleiner Abstand bedeutet eine hohe Dichte, ein weiter Abstand eine kleine Dichte. Auch an die Feldlinien kommen Pfeile und zwar so, dass jede Feldlinie am Nordpol beginnt und am Südpol endet. Die Feldlinien kreuzen und berühren sich nicht (Abbildung d).



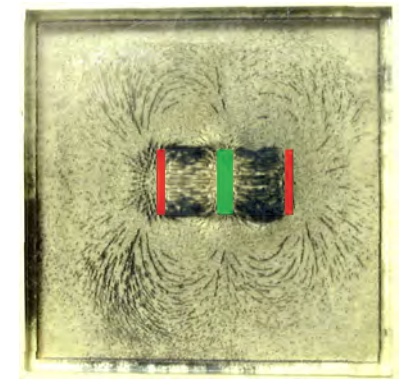
a) Feldplatte über 2 Stabmagneten
Feldverlauf bei ungleichen Polen



b) Feldplatte über 2 Stabmagneten
Feldverlauf bei gleichen Polen



c) Feldplatte über
Lectron Rundmagnet



d) Feldplatte über
großem Lectron Bodenmagnet

Experiment 6 Beispiele von Feldlinienbildern

Mit Hilfe der Feldplatte können wir uns den Feldlinienverlauf bei verschiedenen Magnetanordnungen gut ansehen. Legen wir zwei Stabmagnete dicht mit ihren Polen voreinander und hindern sie durch Festkleben an der Unterlage oder Zwischenlegen von nichtmagnetisierbarem Material (Kunststoff, Karton) daran, dass sie aneinander anstoßen, so ergibt sich der Feldlinienverlauf in Abbildung a). Man glaubt, förmlich zu sehen, wie die Zugkräfte der Felder an den verschiedenen Polen diese zueinander ziehen wollen. Es

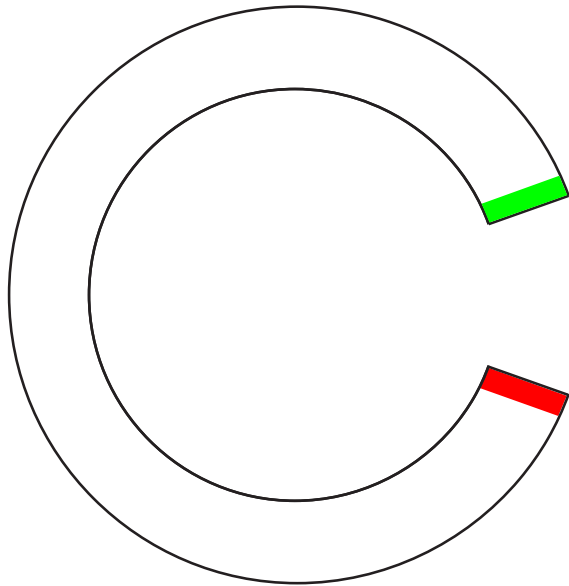
ergeben sich dadurch relativ gerade Feldlinien, übrigens auch vom Nordpol zum Südpol desselben Magneten. Da gleichzeitig quer zum Feldlinienverlauf Druckkräfte wirken, die die einzelne Feldlinie möglichst weit von ihren beiden Nachbarn wegdrücken will, ergibt sich als »Kompromiss« das Bild, wie es uns die Feldplatte anzeigt.

Sind zwei gleichnamige Pole wie in Abbildung b) gegenüber gestellt, so ergibt sich ein anderes Bild. Hier drücken die Felder an den Polen die Magnete auseinander; die Feldlinien biegen in Polnähe bereits nach oben und unten ab und man glaubt wieder, die abstoßenden Kräfte zu sehen.

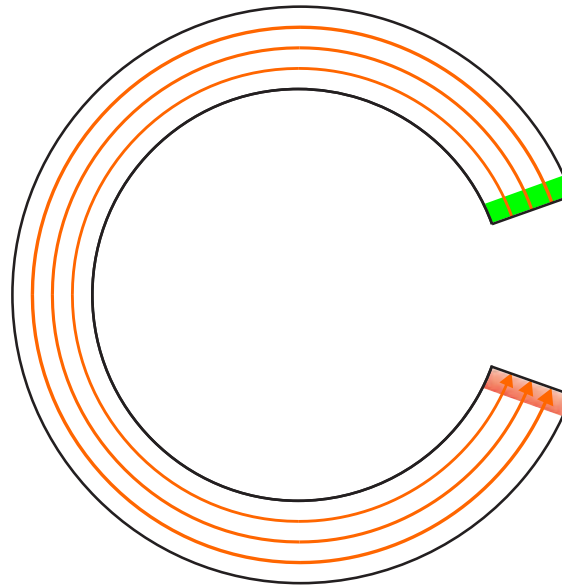
Als ein weiteres Beispiel können wir das Feldlinienbild des Lectron Rundmagneten sichtbar machen (Abbildung c); er befindet sich hinter jedem Kontaktplättchen eines Bausteins und sorgt dafür, dass sie aneinander und an der Aufbauplatte haften. Die beiden Pole liegen nebeneinander auf einer Seite der runden Scheibe. Der rechteckige Ansatz dient zur Orientierung beim Einbau in das transparente Bausteinunterteil und ist zugleich ein Schutz gegen Verdrehen. Beim Legen der Bausteine ist so gewährleistet, dass sich immer ungleichnamige Pole gegenüber stehen und die Kontaktplättchen durch die Magnetkraft fest aufeinander gedrückt werden.

Der Ansatz wird nach oben, also zur weißen Abdeckung hin in Aussparung des Unterteils eingebaut. Bei Draufsicht ist dann der magnetische Nordpol links und der Südpol rechts.

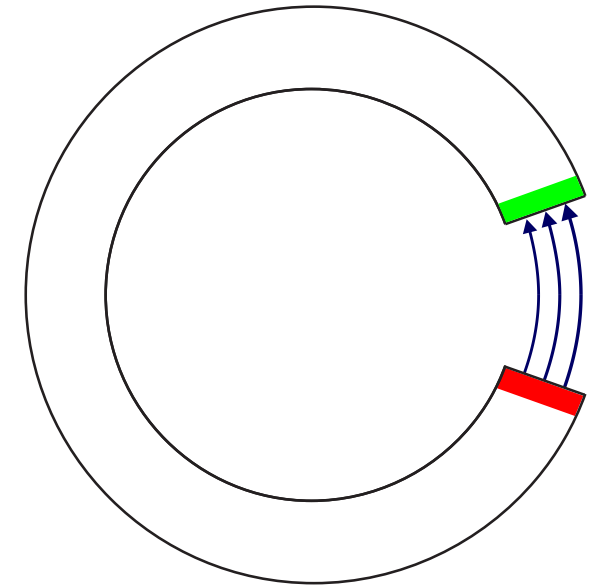
Bei größeren Bausteinen, die im Allgemeinen auch schwerer sind, wird als Bodenmagnet ein kräftigerer Rechteckmagnet verwendet. Auch bei ihm sind alle Magnetpole auf einer Seite angeordnet. Das Feldlinienbild (Abbildung d) zeigt deutlich, dass er drei Pole besitzt, einen Südpol in der Mitte und einen geteilten Nordpol links und rechts davon. Auch hier ist die Summe der magnetischen Ladungen der beiden Nordpole gleich der magnetischen



Ringmagnet



Magnetisierungslinien



Feldlinien

Feldlinien und Magnetisierungslinien

Die magnetischen Feldlinien dienen zur Beschreibung des äußeren Feldes, das an den Polen eines Magneten hängt.

Die magnetischen Feldlinien beginnen am magnetischen Nordpol und enden am magnetischen Südpol.

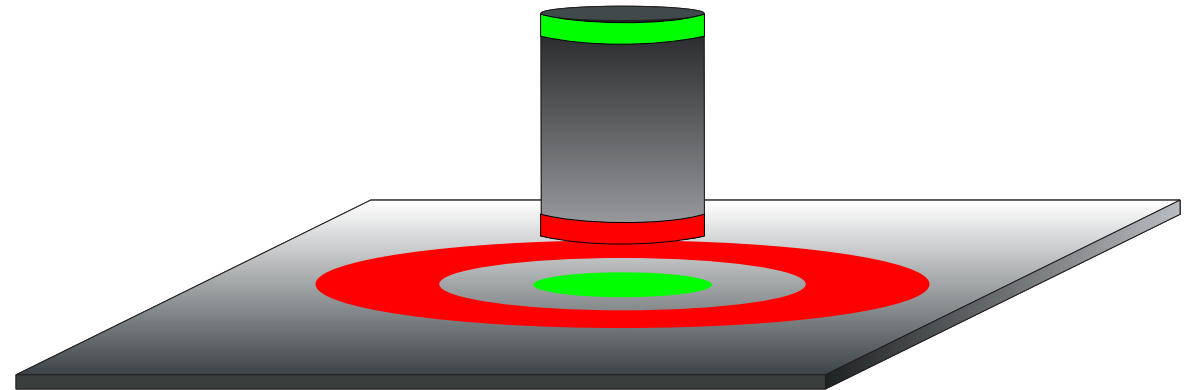
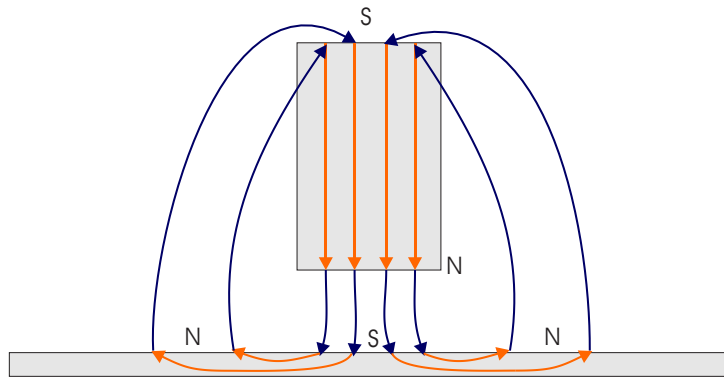
Sie haben zwar große Ähnlichkeit mit den vorher besprochenen Magnetisie-

rungslinien, wir dürfen sie aber auf keinen Fall miteinander verwechseln. Beide Linien sagen uns etwas über ausgezeichnete Richtungen: Die Magnetisierungslinien geben uns Auskunft über den Zustand des magnetisierten sichtbaren Materials eines Magneten, die Feldlinien beschreiben den Zustand des für uns unsichtbaren magnetischen Feldes.

Beide Linien können wir grafisch in einer Abbildung darstellen. Wenn wir uns dazu noch einmal an die Regeln erinnern, die wir für beide Linien festgehalten haben, werden wir erkennen:

Dort wo die Magnetisierungslinien enden, nämlich am Nordpol, beginnen die Feldlinien und dort wo die Feldlinien enden, nämlich am Südpol, beginnen die Magnetisierungslinien.

Wenn wir beide Linien in einer Zeichnung darstellen, sollten wir zweckmäßigerweise verschiedene Farben benutzen. Am Beispiel eines Ringmagneten mit den eingezeichneten Magnetisierungslinien können wir leicht erkennen, wo die Pole sein müssen und die Feldlinien so ergänzen, wie sie auch von den Eisenfeilspänchen der Feldplatte angezeigt werden.



Experiment 7 Magnetfeld und Materie

Damit unsere Feldplatte so funktionieren kann, wie sie das tut, muss das magnetische Feld das Plastikmaterial durchdringen. Das Feld durchdringt auch eine Glasscheibe, ein Stück Holz oder Papier und viele andere Dinge, wie wir leicht mit einem Magneten und der Feldplatte ausprobieren können. Auch eine Kupfer- oder Aluminiumplatte stellt kein Hindernis für das Feld dar. Die Eisenfeilspäne in der Feld-

platte zeigen immer das gleiche Bild, ganz gleich, ob diese Materialien zwischen Magnet und Feldplatte vorhanden sind oder nicht. Das magnetische Feld geht durch diese Stoffe einfach hindurch als wären sie gar nicht vorhanden.

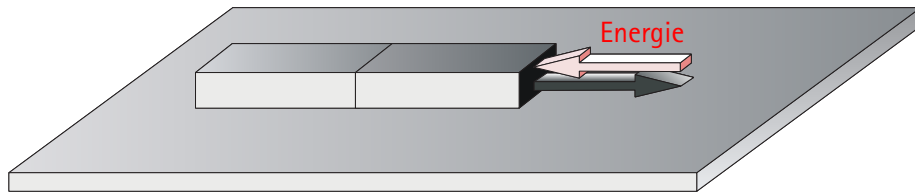
Ganz anders sieht die Sache aus, wenn wir zwischen Magnet und Feldplatte eine Platte aus weichmagnetischem Material z. B. ein Eisenblech schieben. Die Eisenfeilspäne ordnen sich nicht mehr in der bekannten Weise nach einem kurzen Klopfen gegen die Feldplatte an. Die Eisenplatte

schirmt offenbar das magnetische Feld ab, es durchdringt die Platte nicht. Mit verschiedenen dicken Eisenplatten kann man nun versuchen herauszufinden, wie dünn die Platte sein muss, damit das Feld sie noch durchdringt. Wir werden feststellen, dass das magnetische Feld nicht sehr tief in weichmagnetische Stoffe eindringen kann.

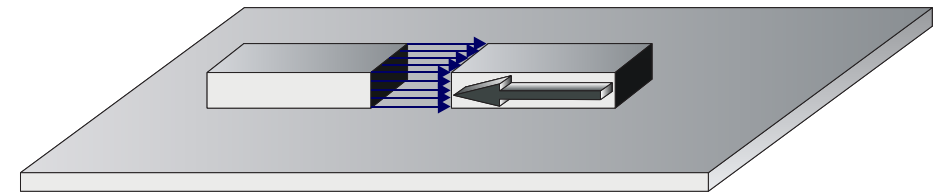
Diese Stoffe bilden unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfeldes selbst Magnetpole aus; sie reagieren auf das Einbringen in ein Magnetfeld mit einer Magneti-

sierung, die allerdings auf einen sehr dünnen Bereich unter der Plattenoberfläche beschränkt ist.

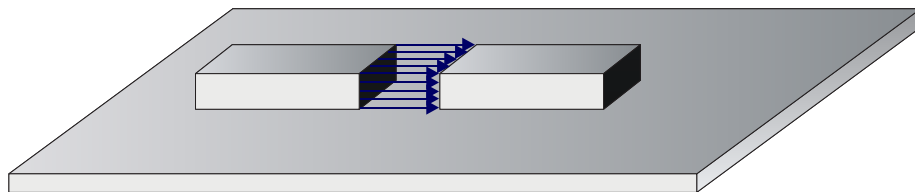
Halten wir einen zylindrischen Stabmagneten mit einem Pol, z. B. dem Nordpol, über eine waagrecht liegende Eisenplatte, so bildet sich direkt unter dem Stabmagneten in der Plattenoberfläche ein Südpol und in einiger Entfernung entsteht ein ringförmiger Nordpol, dessen magnetische Ladung stärker verdünnt ist als die des Südpols, weil seine Fläche größer ist. Die Summe beider Ladungen ist trotzdem Null.



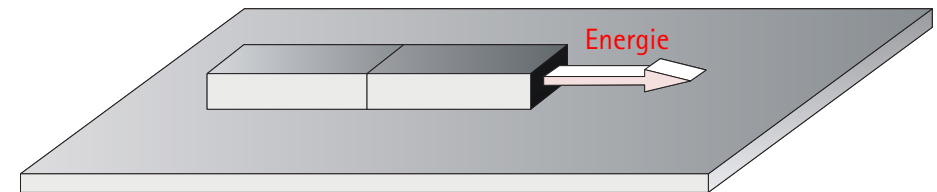
a) Kraft zieht Magneten nach rechts
Energie muss aufgewendet werden



c) rechter Magnet bewegt sich auf linken
zu und könnte etwas antreiben



b) Magnete sind getrennt, ein zusätzliches
magnetisches Feld ist entstanden



d) Magnetfeld zwischen Magneten ist
verschwunden, Energie konnte etwas antreiben

Experiment 8

Die Energie des Magnetfeldes

Wenn wir zwei starke Magneten - linker Magnet fest mit der Unterlage verbunden, rechter Magnet frei beweglich - die aneinander hängen wie in Abbildung a), voneinander trennen wollen (Abbildung b), müssen wir uns kräftig anstrengen. Wir müssen Energie aufwenden. Wo

bleibt diese Energie, da wir ja wissen, dass Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann?

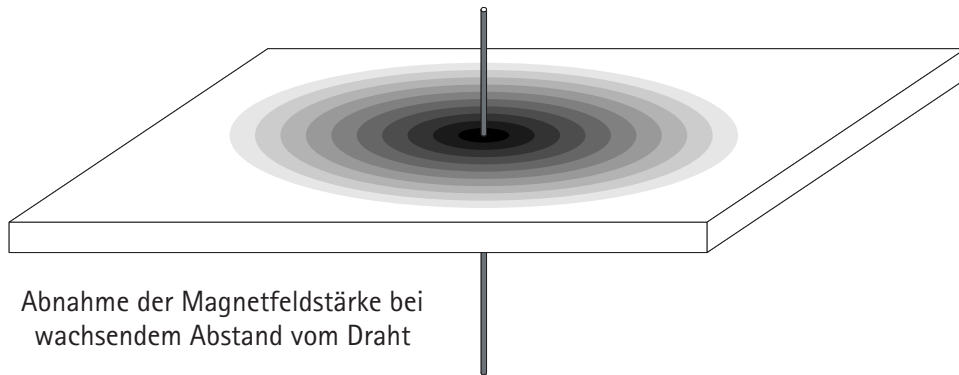
Liegen zwei Magnete nahe beieinander, (Abbildung c), so sorgen ihre an den Polen hängenden magnetischen Felder dafür, dass sie sich anziehen. Ist in Abbildung c) der linke beispielsweise am Tisch befestigt und wird nur der zweite be-

wegt, könnte man durch seine Bewegung kurzzeitig, bis die Lage in Abbildung d) erreicht ist, irgendetwas z. B. einen Dynamo antreiben. Hierzu ist im Allgemeinen Energie nötig. Woher kommt diese Energie?

Vergleichen wir beide Versuche miteinander, so werden wir bemerken, dass im ersten Fall Energie von uns aufgewendet

werden muss und anschließend ein magnetisches Feld zwischen den Magneten vorhanden sein wird. Im zweiten Fall ist zunächst ein magnetisches Feld zwischen den Polen beider Magnete vorhanden; es verschwindet, wenn die Pole anschließend aneinander kleben. Wir schließen daraus:

Ein magnetisches Feld trägt Energie.



Das Magnetfeld eines elektrischen Stroms

Ende des 17. Jahrhunderts wusste man schon einiges über elektrische Ströme und natürlich auch über Magnete. Die magnetische Kraft war schon lange Zeit vorher entdeckt worden und man vermutete, dass Blitze starke Elektrizitätsströme sind; man hielt beides aber für Erscheinungen, die wenig miteinander zu tun haben.

Um diese Zeit berichteten englische Seefahrer, dass nach einem Blitzeinschlag die Nadel des Schiffskompasses in die entgegengesetzte Richtung zeigte. Der

Blitz hatte offensichtlich die Magnetnadel umgepolt.

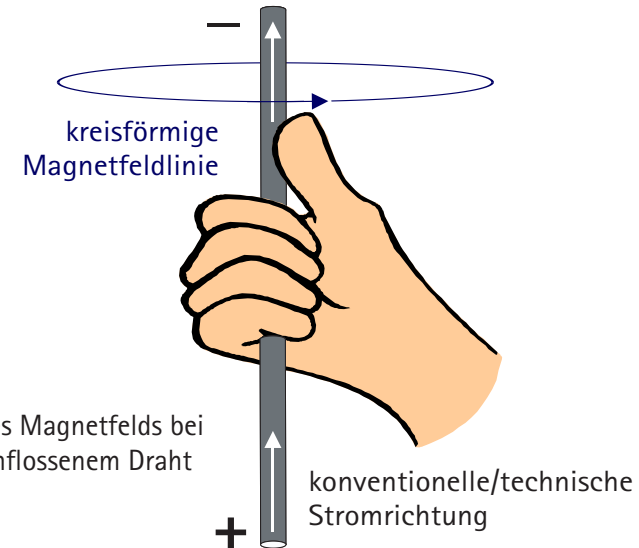
Anfang des 18. Jahrhunderts bemerkte man nach einem Blitzeinschlag in eine Kiste, in der Eisenteile lagen, dass die Gegenstände magnetisch geworden waren. Beides legt die Vermutung nahe, dass ein Blitz mit einem Magnetfeld verbunden ist; denn wie sonst hätte etwas ummagnetisiert oder überhaupt magnetisiert werden können als durch ein Magnetfeld? Der Amerikaner Benjamin Franklin konnte im 18. Jahrhundert nachweisen, dass Blitze tatsächlich elektrische Ströme sind, aber weder ihm noch anderen Forschern gelang es, mit künst-

lichen Blitzen irgendetwas zu magnetisieren.

Erst 1820 veröffentlichte Hans Christian Ørsted, ein dänischer Professor, was er durch Zufall bei seinen Experimenten entdeckt hatte: Immer wenn er in seiner Versuchsanordnung einen starken Strom fließen ließ, wurde eine in der Nähe befindliche Kompassnadel abgelenkt. Durch systematische Versuche fand er heraus, dass ein Strom elektrischer Ladungsträger, der durch einen Draht fließt, um diesen herum ein kreisförmiges Magnetfeld erzeugt. Dieses Magnetfeld ist am dichtesten an der Drahtoberfläche und nimmt bei wach-

sender Entfernung vom Draht immer mehr ab.

Die Magnetfeldstärke ist proportional zum fließenden Strom: Ein doppelt so großer Strom verdoppelt auch die Stärke des Magnetfeldes. Umfasst man den Draht mit der rechten Hand, so dass der Daumen in die Richtung des fließenden Stromes zeigt, dann zeigen die Finger die Richtung des entstehenden Magnetfeldes an, die Richtung in die sich eine Magnetnadel einstellt. Die Magnetfeldlinien, die das vom elektrischen Strom erzeugte Magnetfeld veranschaulichen, haben - anders als beim Dauermagneten - keinen Anfang und kein Ende.



Experiment 9 Oerstedts Versuch

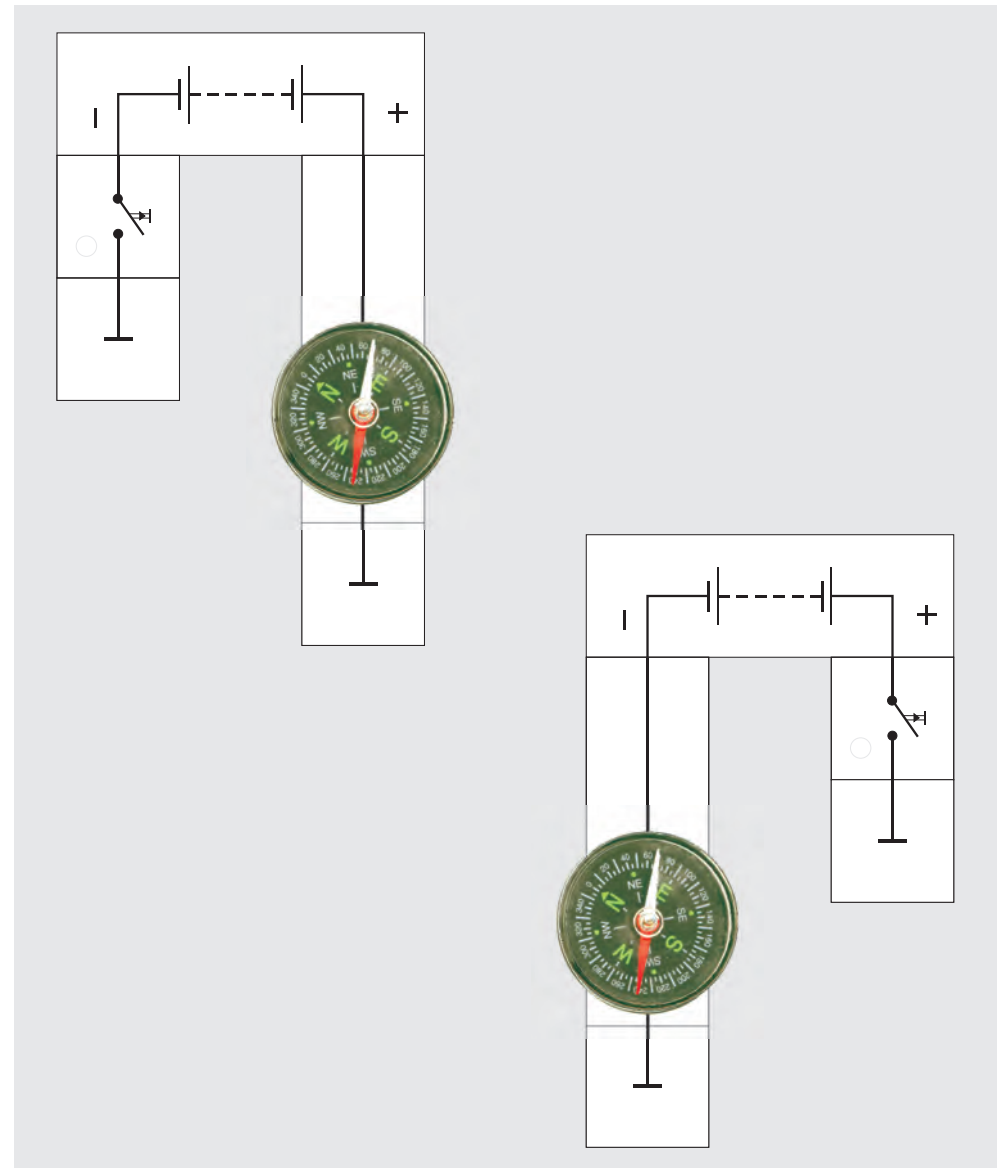
Wir können Oerstedts Entdeckung nachvollziehen, wenn wir das nebenstehende Experiment aufbauen. Auf den Dreierverbindungsbaustein legen wir einen kleinen Kompass. Wir müssen ein wenig probieren, um eine Stelle zu finden, an der die Kompassnadel möglichst in Richtung der Verbindungsgeraden auf dem Deckel zeigt. An welcher Seite sich die Spitze der Kompassnadel befindet ist gleichgültig. Die Kompassnadel wird uns ohnehin nicht die Nordrichtung anzeigen, weil durch die weichmagnetische Aufbauplatte aus Eisen das magnetische Erdfeld örtlich verändert und es weiter durch die Nähe der Rundmagnete relativ stark von deren Feldern überlagert wird. Für das Experiment ist das aber weiter nicht störend. Wichtig ist eben nur, dass die Nadel in Richtung des Verbindungsdrahtes zeigt.

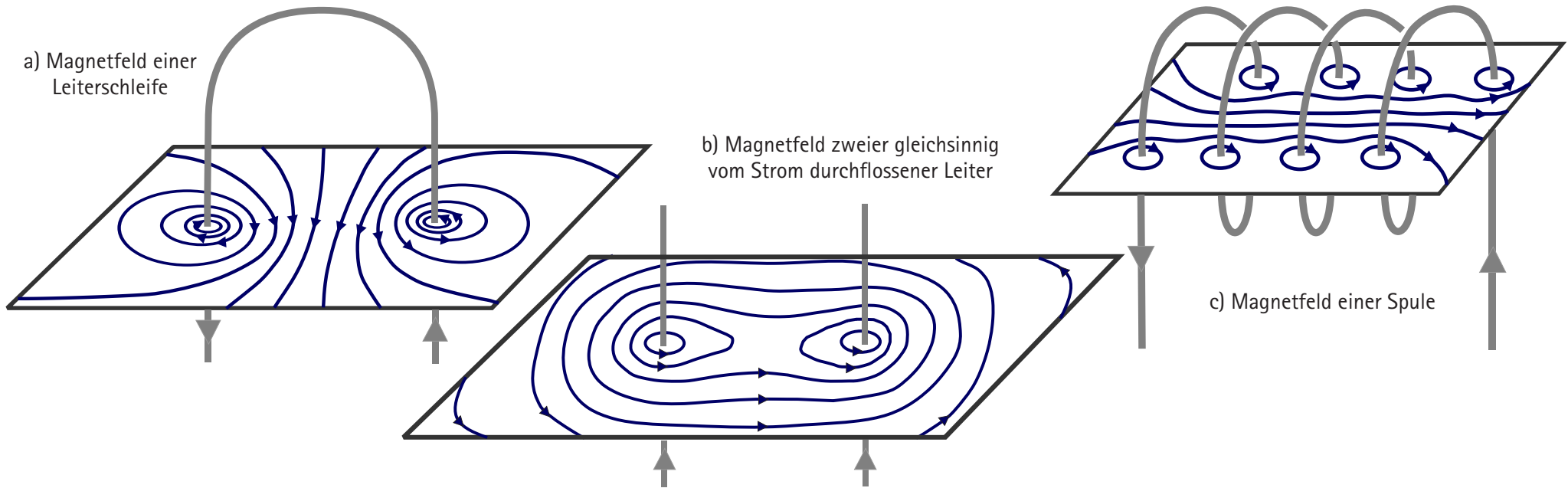
Wie wir unschwer erkennen, wird beim Betätigen des Tasters die Batterie kurzgeschlossen, so dass ein relativ hoher Kurzschlussstrom fließt. Das ist nicht gut für die Lebensdauer der Batterie und wir sollten die Taste deswegen nur ganz kurz betätigen und dabei auf die Kompassna-

del achten. Sie wird sich - solange der Strom fließt - etwas aus der Ausgangslage heraus drehen, diese aber sofort wieder annehmen, wenn der Taster nicht mehr betätigt ist.

Die Erklärung hierfür ist, dass sich beim relativ starken Stromfluss durch den Verbindungsdraht des Dreierbausteins um diesen herum ein kreisförmiges Magnetfeld bildet. Dieses Feld steht senkrecht zu dem Feld, das die Nadel vor der Tasterbetätigung angezeigt hat. Beide Felder addieren sich nach Stärke und Richtung und als resultierendes Feld ergibt sich eins, das in der Richtung geändert ist. Dies zeigt die Kompassnadel durch ihre neue Ausrichtung an.

Dass die Richtung des beim Stromfluss entstehenden Feldes von der Stromrichtung abhängig ist, können wir leicht zeigen, indem wir den Strom andersherum durch den Dreierbaustein fließen lassen. Dazu ändern wir den Versuchsaufbau, achten aber darauf, dass die Nadel weiterhin in die gleiche Ausgangsrichtung zeigt. Bei Tasterbetätigung wird sie nun etwas in die entgegengesetzte Richtung ausschlagen: Das durch den Stromfluss erzeugte Feld ist - wie erwartet - entgegengesetzt gerichtet zu dem des ersten Versuchs.





Das Magnetfeld einer Leiterschleife

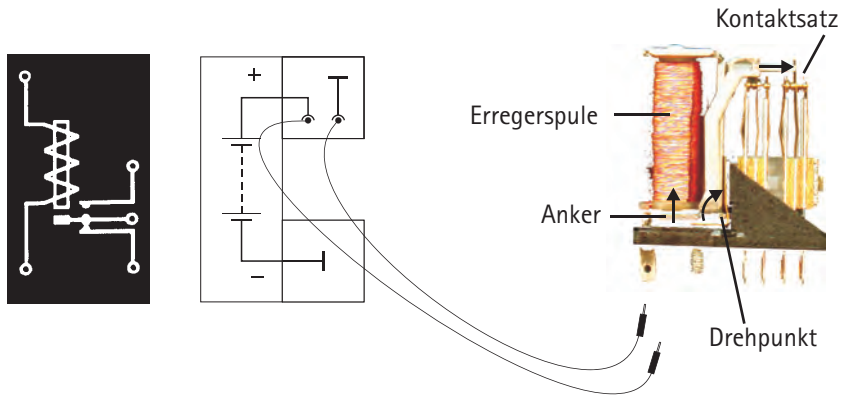
Wir haben gesehen, dass sich um einen geraden Draht, durch den ein elektrischer Strom fließt, ein kreisförmiges magnetisches Feld bildet. Was wird nun mit dem Feld passieren, wenn wir den geraden Draht zu einer Leiterschleife biegen (Abbildung a)?

In beiden Leitern fließt jetzt der Strom entgegengesetzt. Die sich jeweils an ihnen bildenden magnetischen Felder überlagern sich nach Größe und Richtung. Zwischen den beiden Leitern haben

sie die gleiche Richtung, das magnetische Feld wird dort also dichter. In größerem Abstand von den Leitern schwächen sich die beiden Teilfelder aber überall. Werden dagegen die beiden Leiter gleichsinnig vom Strom durchflossen, ist das magnetische Feld zwischen ihnen geschwächt, in größerem Abstand werden die beiden Leiter von den Feldlinien gemeinsam umschlungen (Abbildung b). Ohne dass wir die Versuche mit unseren Bausteinen hier machen können, sei noch angemerkt, dass, wenn die Ströme

sehr groß sind – beispielsweise einige 10 Ampere aus einem Autoakku – bei frei hängenden Drähten im Fall a) diese deutlich durch die Kräfte des magnetischen Feldes auseinander gedrückt werden. Im Fall b) werden sie dagegen zueinander gedrückt. Beschränken wir uns nicht nur auf eine Drahtschleife, sondern wickeln das Ganze zu einer Spule mit vielen Windungen, so folgt aus den bisherigen Erkenntnissen ein resultierendes magnetisches Feld, wie es Abbildung c) zeigt. Zwischen

den einzelnen Windungen hebt sich das Feld auf, besonders dann, wenn die Spule dichter gewickelt ist als in der Abbildung; dagegen ist es im Inneren der Spule sehr dicht. Außerhalb der Spule umschlingen die Feldlinien alle Windungen gemeinsam. Im Außenraum sieht es genauso aus wie das Feld eines Stabmagneten. Im Inneren verlaufen die Feldlinien parallel zur Spulenachse, das Feld ist dort überall gleich stark und zeigt in dieselbe Richtung. Man sagt dann, es ist HOMOGEN.



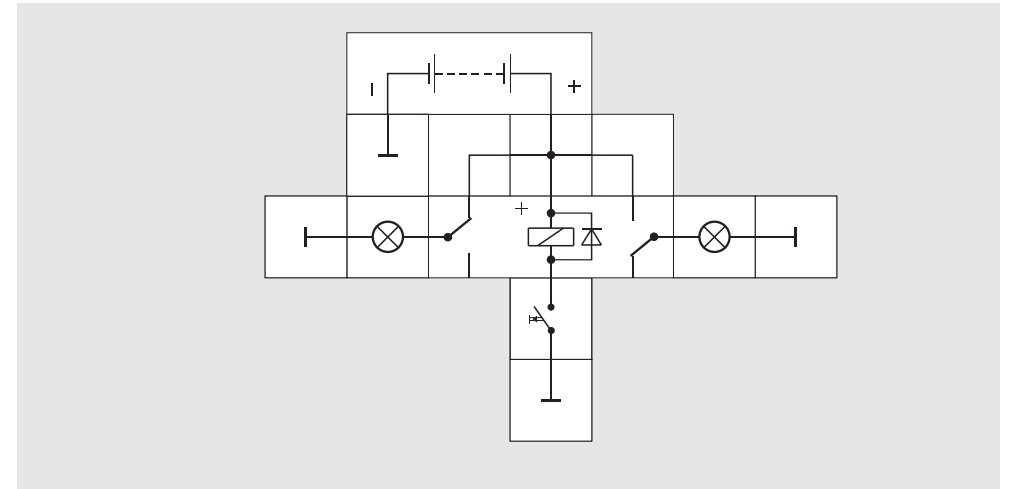
Experiment 10 & 11 Der Elektromagnet / Das Relais

Schiebt man in das Innere einer solchen Spule ein passendes Stück Weicheisen, so wird es - wie wir bereits wissen - magnetisiert. Es verdrängt dabei die magnetischen Feldlinien in seinen Außenraum. Das führt im Falle unserer Anordnung dazu, dass sich an den Spulenden das Magnetfeld der Spule mit dem des Weicheisens verstärkt. Hier ist es nun am dichtesten, Spule und Weicheisenkern bilden einen ELEKTROMAGNETEN. Das Stück Weicheisen nennt man den Kern, der aufgewickelte Draht heißt Spule. Der Elektromagnet verhält sich an seinen Spulenden und im Außenraum wie ein Stabmagnet. An seinem

einen Ende, dort wo die magnetischen Feldlinien austreten, sitzt der Nordpol und an seinem anderen Ende der Südpol. Gegenüber einem Dauermagneten hat er jedoch den großen Vorteil, dass man ihn ausschalten und durch Umkehr der Stromrichtung auch umpolen kann.

Als Regel wollen wir uns merken: **Umfassen wir mit den vier Fingern der rechten Hand die Spule derart, dass die Finger in die Richtung des fließenden Stroms weisen, dann zeigt der Daumen zu dem Spulenende, an dem der Nordpol entsteht.**

Elektromagnete haben viele Anwendungen in unserem täglichen Leben. Im elektrischen Türöffner wird z. B. ein Riegel mit Hilfe des Elektromagneten herausgezogen,



gen, der Sicherungsautomat unterbricht den Strom, wenn dieser zu stark wird und ein entsprechend starkes Magnetfeld in einer Spule erzeugt, die elektrische Türklingel hat einen Elektromagneten und die Weichen der Modelleisenbahn werden durch einen Elektromagneten gestellt.

Möchte man mit einem schwachen Strom einen starken Strom steuern, so kann man das mit einem RELAIS tun. Ein Relais ist ein Elektromagnet, dessen Spule viele hundert bis einige tausend Windungen hat. In dem Spulenstromkreis braucht deswegen nur ein schwacher Strom, der so genannte ERREGESTROM, zu fließen, damit ein Weicheisenstück, der ANKER, angezogen wird. Der Anker bewegt dann einen Kontakt (es können auch mehrere sein) und schließt einen

unabhängigen Stromkreis, in dem ein wesentlich stärkerer Strom fließen kann.

Bei einem gängigen Relais, z. B. einem KAMMRELAIS (linke Abbildung), sieht man sehr gut, wie der Anker angezogen wird, wenn wir Spannung an die Spule legen. Der Anker wiederum betätigt einen Kontaktsatz mit vier Umschaltern. Diese könnten gleichzeitig in vier verschiedenen Stromkreisen größere Ströme ein- oder auch ausschalten, je nachdem, wie wir die Umschalter beschalten.

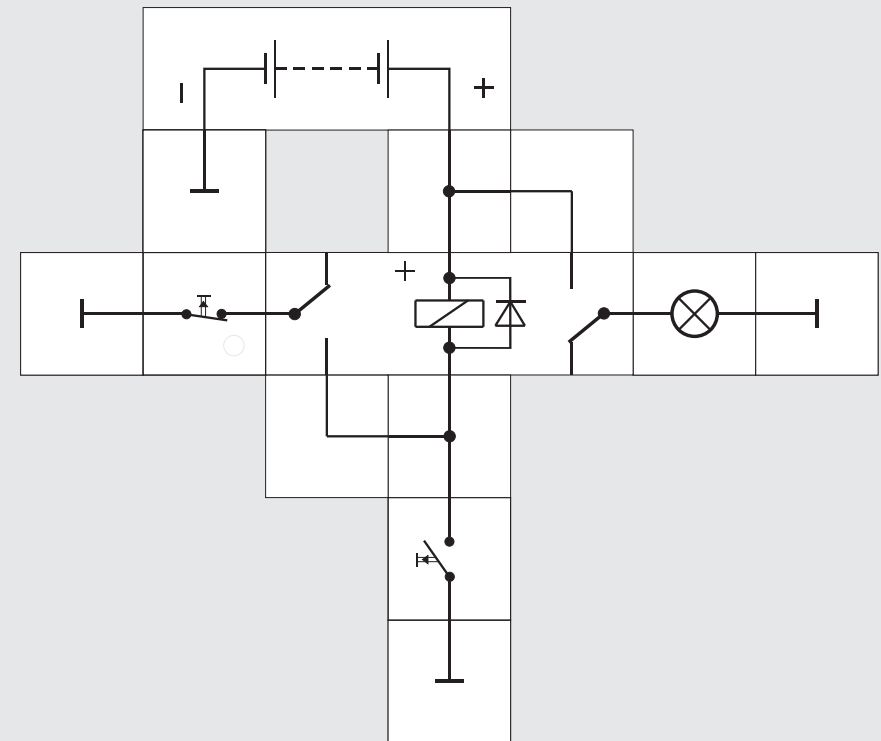
Beim LECTRON Relais Baustein können wir das leider nicht sehen, weil das Relais vergossen ist; wir hören es aber klicken (auf richtige Polung / Plus - Zeichen achten). Das Relais kann nun zwei Lampen ein- bzw. ausschalten.

Experiment 12 Selbsthaltung beim Relais

Ein Relais braucht nicht unbedingt andere von seinem Erregerstrom unabhängige Stromkreise zu schalten, obwohl es meistens in dieser Anwendung eingesetzt wird; es kann auch seinen eigenen Stromkreis beeinflussen. Eine wichtige Grundschialtung dazu ist nebenstehend abgebildet. Es ist die so genannte SELBSTHALTUNG. Einmal durch Betätigen des unteren Tasters eingeschaltet, hält sich das Relais selbst, auch dann, wenn der Taster nicht mehr gedrückt ist. Durch das Anziehen des Ankers werden beide Umschaltkontakte geschaltet, was beim

rechten dazu führt, dass die (Kontroll-) Lampe leuchtet. Der linke legt Massepotenzial an die Erregerspule, so dass der Taster wieder losgelassen werden kann. Der Erregerstrom fließt nun von der Batterie über die Spule und den linken Umschaltkontakt zur Masse. Die Kontaktstellung bei einem Relais wird im Schaltbild immer in Ruhestellung, also ohne Erregerstrom, dargestellt.

Damit der Anker wieder abfallen kann, muss der Stromkreis unterbrochen werden. Dies kann durch Betätigen des linken Tasters, der in Ruhestellung schließt, erreicht werden. Natürlich können wir auch den Batteriebaustein kurz wegnehmen, was aber nicht so elegant ist.



Experiment 13

Der Wagnersche Hammer

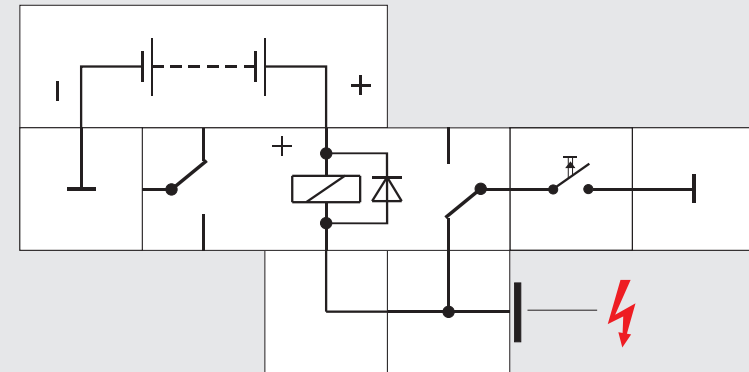
Eine interessante Anwendung entsteht, wenn wir – im Gegensatz zum vorherigen Versuch – den Erregerstromkreis vom eigenen Relais unterbrechen lassen: Betätigen wir den Taster, zieht das Relais an, unterbricht damit seinen Erregerstrom, der Anker fällt ab und schließt damit den Erregerstromkreis, das Relais zieht wieder an, usw.

Dies geschieht in so schneller Folge, dass wir einen Summen oder Schnarren hören. Würden wir den Anker gegen eine Glocke schlagen lassen, hätten wir eine Klingel. Bei diesem Summer, auch WAGNERSCHER HAMMER genannt, entstehen recht hohe, aber trotzdem ungefährliche Spannungen: Wenn der Erregerstrom unterbrochen wird, kann das magnetische Feld nicht mehr fortbestehen und wird abgebaut. Da es Träger der Energie ist, muss die Energie nun irgendwo bleiben. Durch die Veränderung des Magnetfeldes entsteht in der Spule eine INDUKTIONSSPANNUNG, die den Strom unbedingt aufrechterhalten will. Sie ist deswegen

entgegengesetzt zur vorher anliegenden Spannung gerichtet (Plus-Pol am unteren, Minus-Pol am oberen Anschluss). Da der Kontakt aber bereits den Stromkreis unterbrochen hat, wird die Spannung so hoch, dass der Strom über den geöffneten Kontakt durch die Luft weiter fließt; es kommt zur Funkenbildung am unterbrechenden Kontakt, was auf Dauer den Kontakt zerstören könnte. Die Energie wird dabei auf den neuen Träger Entropie (Wärme) umgeladen.

Damit der Kontakt nun geschützt ist, gibt es eine FREILAUFDIODE parallel zur Spule. Im normalen Betrieb ist sie gesperrt, lässt aber den Strom aufgrund der Induktionsspannung passieren. Da sie nicht sofort leitend ist, können wir die hohe Spannung als ungefährliches Kribbeln merken, wenn wir mit dem feuchten Finger das freie Kontaktplättchen und gleichzeitig die Aufbauplatte berühren. Nicht erschrecken!

Das Relais ist für eine solche Betriebsart eigentlich nicht gebaut, und wir sollten den Versuch nur kurzzeitig ausführen.

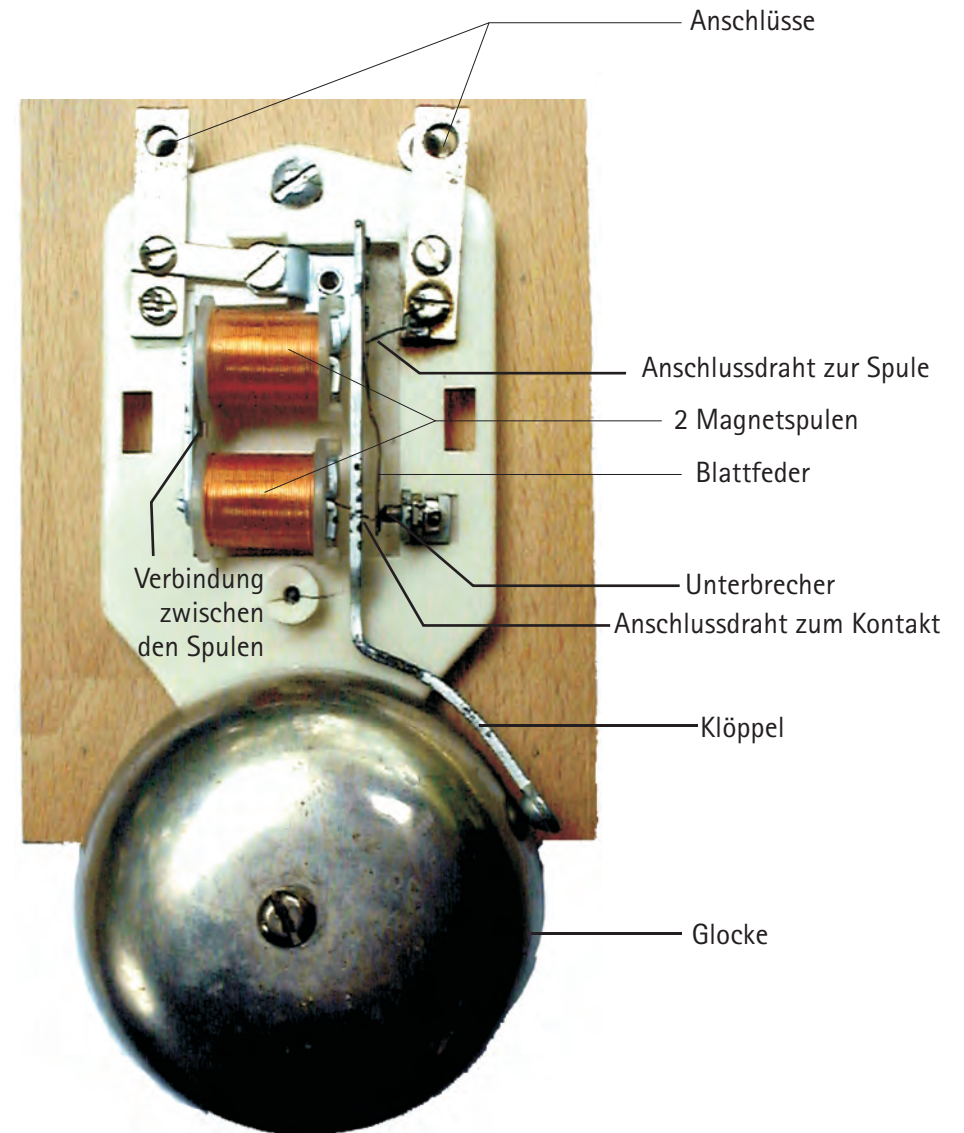




Die Klingel

Die nebenstehende Abbildung zeigt eine Klingel, wie sie in vielen Haushalten vorkommt. Wir sehen oben die beiden Anschlüsse und dass vom rechten ein Draht zur oberen Spule führt. Nicht zu sehen ist die Verbindung zwischen den beiden in Reihe geschalteten Spulen. Von der unteren Spule führt ein weiterer Draht zum Unterbrecherkontakt. Damit der eigentliche Unterbrecherkontakt trotz der auftretenden Funken beim Abschalten des Stroms nicht verbrennt, sondern lange hält, ist er meistens aus einem hochschmelzenden Material wie Wolfram angefertigt; wir erkennen ihn als kleinen zylindrischen Stift. Das Gegenstück ist eine biegsame Blattfeder aus Kupfer, an der

der Klöppel aus Weicheisen befestigt ist. Im Bild ist der Kontakt geschlossen. Blattfeder und Klöppel sind über eine massive Lasche an den zweiten Anschluss geschraubt. Der Stromkreis zwischen den beiden Anschlüssen ist somit geschlossen. Legen wir eine Spannung an die Anschlüsse, zieht der aus den beiden Spulen bestehende Elektromagnet den Klöppel an und öffnet damit den Kontakt. Als Folge wird der Stromkreis unterbrochen, der Elektromagnet abgeschaltet und der Klöppel in seine Ruhelage zurückschnellen, wodurch die Verbindung zwischen Blattfeder und Unterbrecherkontakt wieder hergestellt wird und das Spiel von neuem beginnt. Da der Klöppel gegen die Glocke schlägt, hören wir sie klingeln.





Experiment 14

Der Lectron Spulenbaustein

Wir haben gelernt, dass man schon mit relativ kleinen Strömen starke magnetische Felder erzeugen kann, indem man aus dem Draht eine Spule wickelt. Dann trägt jede Windung ihren Teil zum Gesamtmagnetfeld bei.

Der Lectron Spulenbaustein enthält zwei Spulen mit 2000 bzw. 4000 Windungen; schaltet man sie hintereinander, wobei der Wicklungssinn zu beachten ist (Anfang der Spule ist jeweils mit einem Punkt gekennzeichnet), erhält man eine Spule mit 6000 Windungen. Schickt man einen Strom durch sie hindurch, so bildet sich ein magnetisches Feld, dessen einer Pol zur Grundplatte und dessen anderer Pol nach oben gerichtet ist.

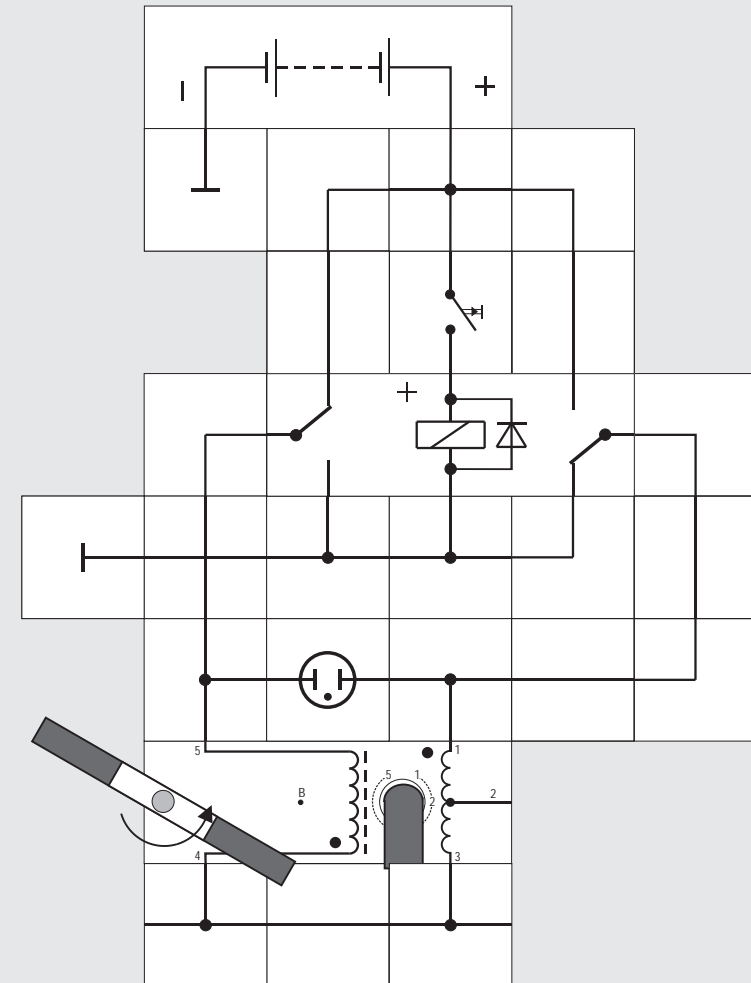
Steckt man den zugehörigen Eisenkern in die Spulenöffnung (s. Abb.), so lässt sich bei Stromdurchfluss mit der Feldlinienplatte ein magnetisches Feld nachweisen: Das Weicheisen selbst wird magnetisiert und es bilden sich Pole an den Enden des Eisenkerns aus, hier ist das Feld am dichtesten. Verdreht man den Eisenkern um 90° im Uhrzeigersinn und lagert den großen Rotor in der Bohrung A, so richtet sich einer der Pole auf den Eisenkern aus. Der Rotor dreht sich um 180°, wenn die Stromrichtung und

damit die Polung des aus Spule und Eisenkern bestehenden Elektromagneten geändert wird. Dafür lassen sich gut die Relaisumschaltkontakte einsetzen. Dieses Mal wollen wir nicht durch das Kribbeln im Finger die kurzzeitig hohe Induktionsspannung nachweisen, sondern mit einer Glimmlampe, die parallel zur Spule liegt. Solch eine Lampe ist mit dem Edelgas Neon gefüllt und besitzt zwei Elektroden, die nicht miteinander verbunden sind. Bei Stromdurchgang nehmen die Neon-Atome kurzzeitig Energie auf und geben sie als rotes Licht wieder ab.

Beim Umschalten blitzt jeweils eine der Elektroden kurz auf und zeigt damit an, dass relativ hohe Spannungen (größer als die Zündspannung von 70 V) beim Abschalten auftreten.

Die Induktionsspannung ist von der Polarität wieder genau entgegengesetzt zu der ursprünglich anliegenden Spannung gerichtet; man kann das an der Glimmlampe erkennen, da bei ihr immer der Pol mit dem niedrigen Potenzial leuchtet.

Durch Betätigen des Tasters immer gerade im »richtigen« Augenblick kann man versuchen, den Stabmagneten kontinuierlich in eine Richtung zu drehen. Auf Seite 29 werden wir einen weit verbreiteten Spielzeugmotor kennen lernen, bei dem das Umschalten selbsttätig durch den Rotor erfolgt.



Experiment 15

Das Magnetfeld des Spulenbausteins

Das magnetische Feld lässt sich in bekannter Weise mit der Feldplatte in Polnähe sichtbar machen. Wir nehmen dazu

den großen Rotor aus dem Baustein heraus und halten die Feldplatte unter den Eisenkern. Nach vorsichtigem Klopfen gegen die Feldplatte ordnen sich die Eisenfeilspäne so an, wie es die Abbildung zeigt.



Spielzeugmotore von TRIX

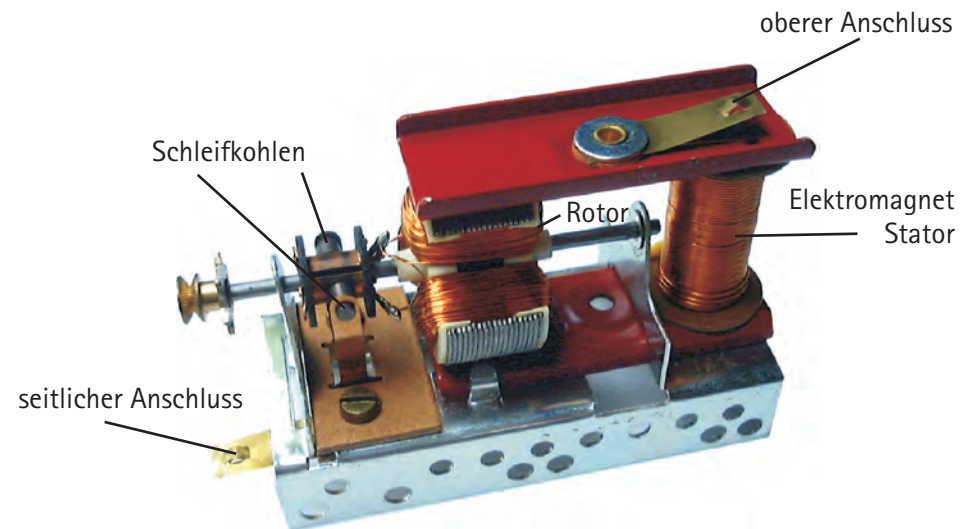
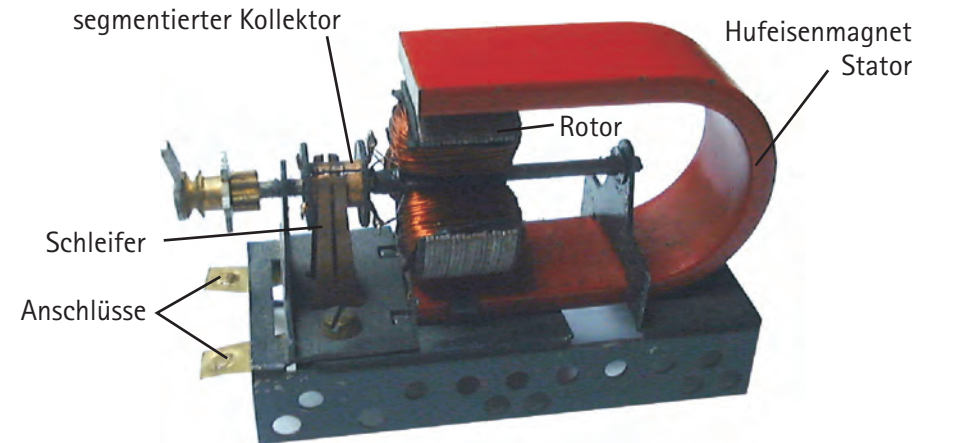
Das Prinzip der Elektromotoren lässt sich besonders gut an Experimentiermotoren erkennen, die früher von mehreren Firmen hergestellt wurden. In der Abbildung sind zwei Modelle der Nürnberger Modelleisenbahnfirma TRIX gezeigt. Im letzten Experiment haben wir einen Dauermagneten vor einer feststehenden Spule, dem Elektromagneten, dadurch zum Drehen gebracht, dass wir im richtigen Augenblick den Elektromagneten umgepolt haben. Mit Hilfe des Schwungs und einigem Geschick beim Schalten konnten wir so eine kontinuierliche Drehbewegung erzeugen.

Diese Anordnung kann auch umgekehrt aufgebaut werden: Wir erhalten dann einen feststehenden Dauermagneten, auch STATOR genannt, und eine sich drehende Spule; das ist der Elektromagnet, der dann ROTOR heißt (obere Abbildung). Der Stator ist ein Hufeisenmagnet und statt einer Spule gibt es derer gleich drei. Die Zuführung der fließenden Elektrizität in den Elektromagneten kann, weil er sich ja drehen muss, nicht mehr über feste Drähte geschehen, sondern muss über Schleifer erfolgen, die federnd auf den Kollektor drücken. Das ist ein gewisser Nachteil, er wird aber dazu genutzt, die für die kontinuierliche Drehung erforderliche Umpolung von der Welle selbst im richtigen Augenblick

ausführen zu lassen. Zu diesem Zweck ist der kupferne Kollektor in Segmente geteilt, und der Strom wird über senkrecht stehende Schleifer zugeführt. Die Anschlüsse der Spulen sind mit den entsprechenden Segmenten verbunden und zwar so, dass eine Spule abgeschaltet wird, wenn sie gerade unter einem Pol des Hufeisenmagnets ankommt. Durch die drei Spulen ist ein »runder« Lauf des Motors gewährleistet. Zur Drehrichtungsumkehr muss die Polarität der anliegenden Spannung vertauscht werden.

An diesem Motor kann noch eine entscheidende Änderung vorgenommen werden: Da Dauermagneten - zumindest in früheren Zeiten - ihren Magnetismus langsam verloren, ersetzte man sie ebenfalls durch einen Elektromagneten (untere Abbildung). Der Strom fließt dann vom oberen Anschluss über die feststehende Spule (Stator) und einen Schleifer zum Kollektor, dann zum Rotor und von dort über den anderen Schleifer zum seitlichen Anschluss. Der Eisenkern der feststehenden Spule ist mit Hilfe zweier Weicheisenbleche oben und unten so zum Rotor hin verlängert, dass sich dort die Pole bilden. Als Schleifer fungieren hier kleine Graphitzylinder, die Kohlen, die sich im Laufe der Zeit abnutzen und ausgetauscht werden müssen.

Die Drehrichtung kann allerdings nicht mehr durch Polaritätsumkehr der Betriebsspannung geändert werden, da dabei auch



der Stator seine Polarität wechselt. Als Vorteil kann man bei diesem Motor ansehen, dass er eben wegen dieser Eigenschaft

auch an Wechselspannung betrieben werden kann. Zur Drehrichtungsumkehr werden allein die Statoranschlüsse vertauscht.

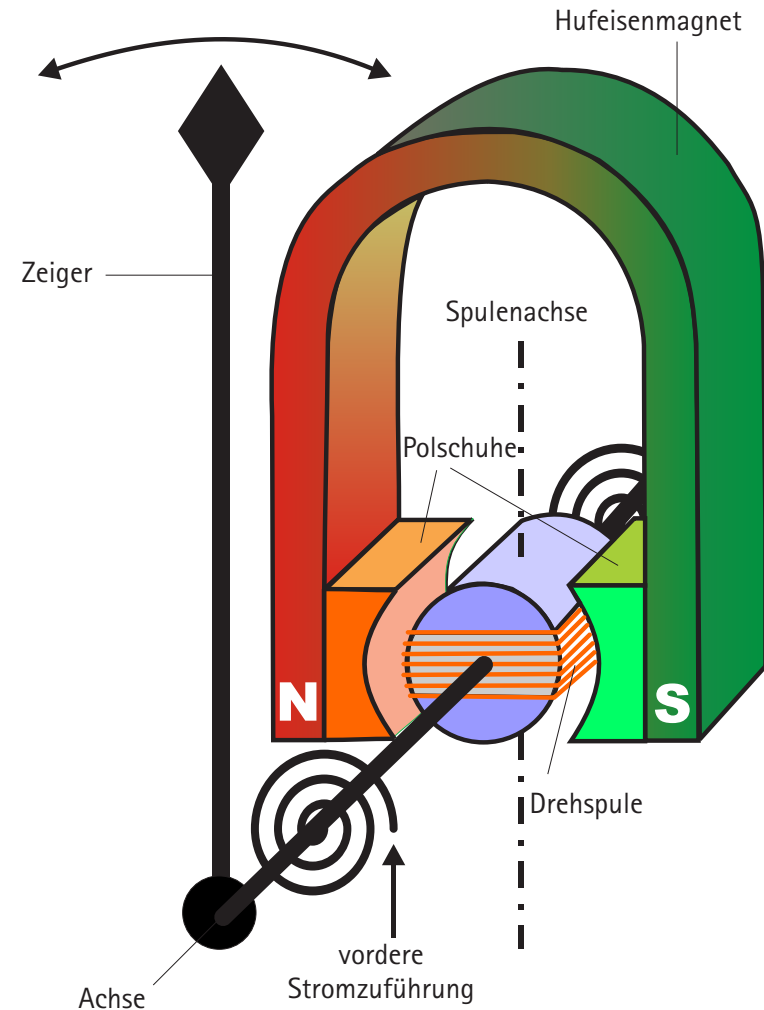
Lectron Drehspulinstrument

Ähnlich wie beim Spielzeugmotor wird das Prinzip, dass zwei Magnetfelder - ein konstantes und ein veränderliches - miteinander in Wechselwirkung treten bei dem uns bekannten Messinstrument angewendet. Durch den geriffelten Kunststoff kann man schlecht in das Instrument hineinschauen, deswegen ist sein Aufbau hier in einer Prinzipzeichnung dargestellt.

Das Instrument besteht aus einem Hufeisenmagneten, dessen Pole nach innen durch konkave Weicheisenstücke (Polschuhe) verlängert sind. In dem Zwischenraum der zylindrisch ausgebohrten Polschuhe bewegt sich eine von dem zu messenden Strom durchflossene Drehspule, nach der das Instrument seinen Namen bekommen hat. Auf ihrer Drehachse sitzt vorn ein Zeiger, der durch gleichzeitig den Strom zuführende Spiralfedern vorn und hinten in seiner Ruhelage gehalten wird.

Ohne Messstrom gibt es nur ein magnetisches Feld, nämlich das des Dauermagneten. Die Feldlinien verlaufen wa-

gerecht vom Nord- zum Südpol. Fließt ein Strom durch die Spule, entsteht ein zweites Magnetfeld, dessen Feldlinien parallel zur Spulenachse und senkrecht zum Feld des Hufeisenmagneten verlaufen. Die Stärke dieses Feldes ist proportional zum Strom in der Spule. Wir haben jetzt die Situation, dass die ungleichnamigen Magnetpole von Dauermagnet und Spule durch ihre Felder zueinander hingezogen werden. Die Spule würde sich also um 90° drehen (Die Spulenachse würde dann vom Nord- zum Südpol des Hufeisenmagneten zeigen) und so verharren. Es ist genauso wie beim Spielzeugmotor, nur dass dort der Kollektor dann den Spulenstrom umpolt und der Rotor sich weiterdreht. Hier dagegen werden durch die Drehung der Spule beide Spiralfedern mechanisch so weit gespannt bis ein Gleichgewicht zwischen dem Drehmoment, hervorgerufen durch die Felder, und dem Rückstell - Drehmoment durch die Spiralfedern eintritt. Die Spule dreht sich also nur ein wenig, wobei der Drehwinkel, also auch der Zeigerausschlag, der Stromstärke proportional ist. Die Skala ist daher linear.





Experiment 16

Lectron – Messinstrument an Gleich- und Wechselstrom

Das Lectron – Messinstrument ist sehr empfindlich und wir können mit ihm schwache Ströme messen. Sein Vollausschlag wird erreicht, wenn durch die Spule ein Strom von $100\mu\text{A}$ fließt; der Zeiger schlägt dann je nach Stromrichtung fast an den linken oder den rechten Anschlag.

Damit das Instrument bereits kleine Ströme anzeigt, hat die Spule viele Windungen; jede Windung trägt ja zur Stärke des Gesamtfeldes bei. Leider wird dadurch auch der Gesamtwiderstand höher; er beträgt beim Lectron Instrument $4\text{k}\Omega$. Bei Vollausschlag fallen also am Instrument immer $0,4\text{V}$ ab.

Ein Drehspul – Messinstrument ist nur für Gleichstrom verwendbar; es zeigt auch die Stromrichtung an und kann wegen der mechanischen Trägheit seiner beweglichen Teile einem Wechselstrom, dessen Frequenz höher als $1\text{--}2\text{ Hz}$ (Hertz) ist, nicht mehr folgen.

Im Versuchsaufbau wollen wir das Instrument über den Kreuzschalter zur Umpolung an der 9V Stromversorgung als Spannungsmesser betreiben. Damit es seinen Vollausschlag bei 10V hat, benö-

tigen wir einen Gesamtwiderstand im Stromkreis von

$$R_{\text{Ges}} = 10\text{V} / 100\mu\text{A}$$

$$R_{\text{Ges}} = 100\text{ k}\Omega$$

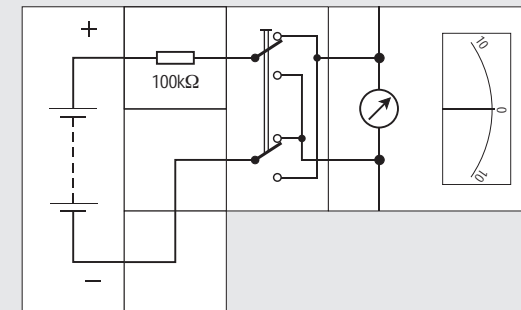
Das Instrument hat selbst bereits $4\text{k}\Omega$, also muss noch ein $96\text{k}\Omega$ Widerstand in Reihe geschaltet werden. Für unsere Ansprüche ist ein $100\text{k}\Omega$ Widerstand genau genug. Wir messen die Spannung also indirekt über den dann fließenden Strom. Soll beispielsweise der Vollausschlag nur 1V betragen, sieht die Rechnung entsprechend aus:

$$R_{\text{Ges}} = 1\text{V} / 100\mu\text{A}$$

$$R_{\text{Ges}} = 10\text{ k}\Omega$$

$4\text{k}\Omega$ abgezogen ergibt $6\text{k}\Omega$; der $5,6\text{k}\Omega$ Vorwiderstand ist ausreichend genau.

Nach dem Anlegen der Spannung werden 9 Skalenteile angezeigt, entsprechend 9V . Betätigen wir den Schalter, zeigt das Instrument den gleichen Wert zur anderen Seite hin an. Durch schnelles Hin- und Herschalten erzeugen wir Wechselstrom entsprechender Frequenz, z. B. $0,5\text{ Sekunden}$ in der einen Stellung und $0,5\text{ Sekunden}$ in der anderen ergibt eine Frequenz von 1Hz . Bei schnellerem Schalten sehen wir, dass der Zeiger kaum noch folgen kann und finden bestätigt, dass das Instrument zur Anzeige von Wechselstrom nicht geeignet ist.





Experiment 17

Lectron – Messinstrument an Wechselstrom

Beim Umschalten haben wir sicherlich festgestellt, dass nicht nur das Instrument eine gewisse Trägheit aufweist, sondern dass wir selbst auch nicht sehr flink beim Umschalten sind.

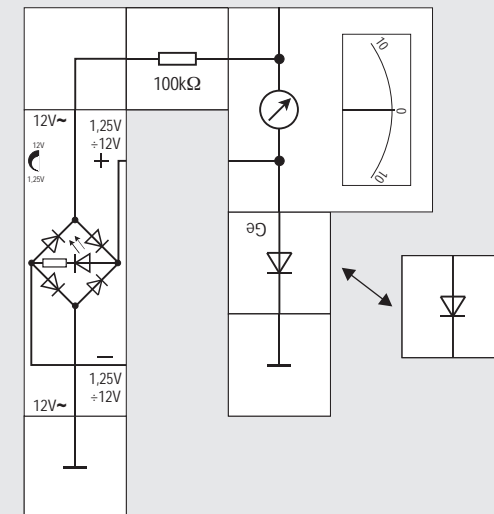
Um Wechselstrom höherer Frequenz durch das Instrument zu schicken, brauchen wir eigentlich gar nicht ständig umzuschalten, sondern können ihn mit der in Europas Stromnetzen üblichen Frequenz von 50Hz (USA 60Hz) aus unserem Netzgerät beziehen. Der Strom fließt also in einer Sekunde 50 mal in die eine und 50 mal in die andere Richtung.

Schließen wir das Instrument wie in der Versuchsschaltung an, bleibt der Zeiger auf Null stehen. Er kann diesen schnell-

len Wechseln erwartungsgemäß nicht folgen.

Zur Messung von Wechselströmen muss man diese vorher mit einer Diode (s. Experiment 20, Elektronik AG) gleichrichten und kann den dann pulsierenden Gleichstrom mit einem Umrechnungsfaktor, der gleich in die Skala eingearbeitet werden kann, messen.

Wir können das Instrument zum Messen von Wechselströmen tauglich machen, indem wir also eine Diode (Germanium oder Silizium) in den Stromkreis legen. Die entsprechende Flussspannung der Diode (0,3V bzw. 0,7V) muss zusätzlich auf der Skala berücksichtigt werden. Da wir die Skala nicht ändern können, wird der angezeigte Wert in diesem Experiment nicht stimmen. Durch Vergleichsmessungen mit einem käuflichen Wechselstrominstrument lässt sich die Skala jedoch »eichen«.



Weicheiseninstrument

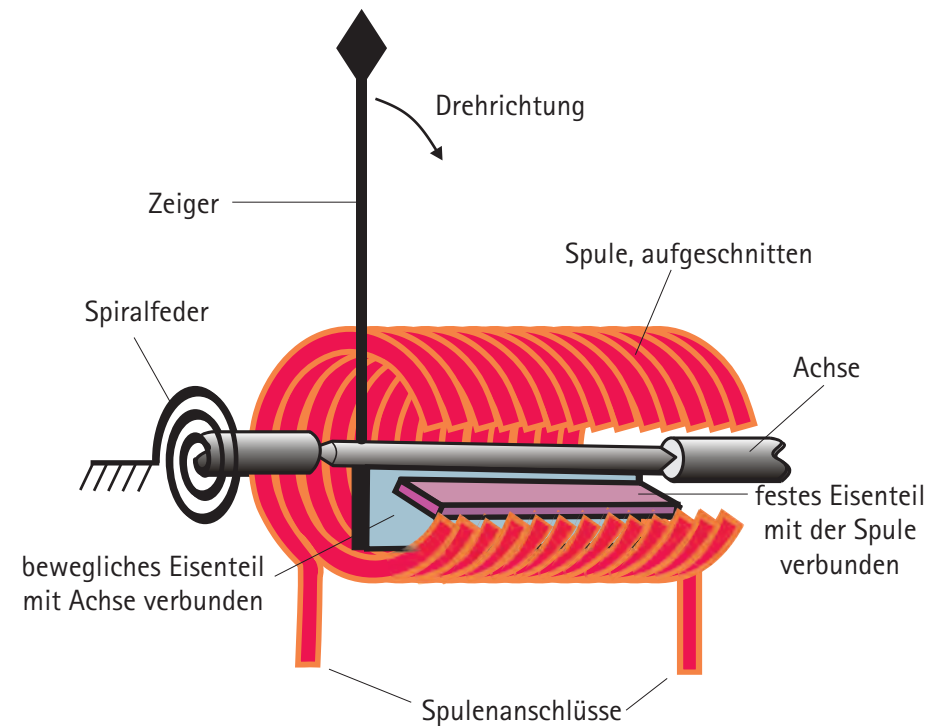
Eine andere Möglichkeit Wechselströme zu messen, ist ein Dreheiseninstrument zu verwenden.

Die Funktionsweise eines solchen Instruments beruht auf der Abstoßung zweier in derselben Spule befindlichen Weicheisenstücke. Wir wissen bereits, dass sich im Inneren einer stromdurchflossenen Spule ein homogenes Magnetfeld befindet (s. Seite 22). Legt man in sie parallel zu ihrer Spulenachse zwei längliche Weicheisenteile, so bilden diese an ihren Enden selbst Pole aus, und zwar sind gleichnamige Pole benachbart, wodurch sich ihre Felder abstoßen. Ist nun das eine Teil fest und das zweite beweglich angeordnet und mit einem

Zeiger versehen, so wird die resultierende Bewegung des letzteren Teils um so größer sein, je stärker das magnetische Feld – und damit die Abstoßung der Eisenstückchen – in der Spule ist.

Die Rückstellung des Zeigers erfolgt durch eine Spiralfeder. Die Abhängigkeit des Drehwinkels vom Strom ist eher quadratisch als linear, weswegen die Skalen von Dreheiseninstrumenten nicht gleichmäßig geteilt sind. Durch geeignete Formgebung der Weicheisenteile kann die Anzeige in gewissen Grenzen linearisiert werden.

Weil Dreheiseninstrumente bei kleinen Drehwinkeln darüber hinaus nicht genau genug anzeigen, beginnt der eigentliche Messbereich meistens erst mit dem zweiten Fünftel der Skala.





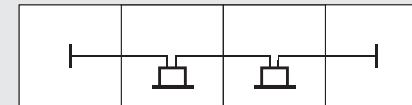
Experiment 18

Ohrhörer

Ein weiteres empfindliches Nachweismittel für Wechselströme ist der uns bereits aus den Experimenten Nr. 26 und 27 der Elektronik AG bekannte Ohrhörer. Sein Aufbau und seine Wirkungsweise sind dort beschrieben, so dass sie hier nicht wiederholt werden sollen. Auch bei ihm wirken ein statisches und ein durch fließenden Strom erzeugtes Magnetfeld miteinander, so dass sich letztlich eine Membran bewegt und Schall erzeugt. Wie bei sehr vielen Geräten in der Elektrotechnik ist dieses Prinzip auch umkehrbar. Lassen wir Schall auf die Membran treffen, so bewegt sie die mit ihr verbundene Spule im Ohrhörer, wodurch im Zusammenspiel mit dem Dauermagneten eine (winzige) Spannung erzeugt

wird. Sie ist ausreichend, durch einen zweiten angeschlossenen Ohrhörer einen Wechselstrom fließen zu lassen, den jener wieder in hörbaren Schall verwandelt.

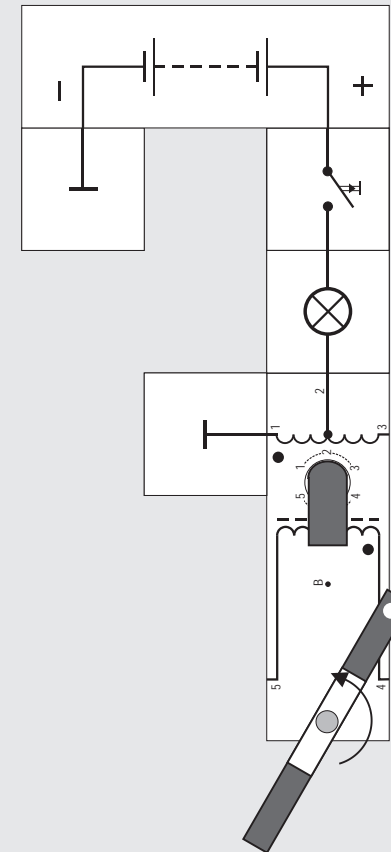
In unserem Versuchsaufbau fügen wir die Anschlussbausteine der beiden Ohrhörer auf der Aufbauplatte aneinander und schalten sie in Reihe durch den beiderseitigen Abschluss mit den Massebausteinen. Wir verwenden den einen als Mikrofon und den anderen als Hörer. Klopfen wir beispielsweise mit dem Fingernagel an den ersten oder pusten über seine Öffnung, so ist eine sehr leise Wiedergabe im anderen vernehmbar. Wir können - weil beide Wandler gleich aufgebaut sind - die Signalflussrichtung auch vertauschen: Der zunächst als Mikrofon verwendete Wandler ist dann der Hörer und umgekehrt.



Experiment 19 Die Pole eines Elektromagneten

Wir wollen mit unserem großen Rotor zeigen, dass die Pole beim Elektromagneten von der Richtung der fließenden Elektrizität, also vom Strom, abhängen. Dazu lassen wir in der Versuchsanordnung einen Strom durch die eine Spulenhälfte nach »links« fließen, indem wir den Massebaustein an die linke Spulenseite legen. Die Glühlampe dient zur Strombegrenzung. Bei der angegebenen Polung wird der drehbare Dauermagnet sich mit seinem Nordpol zur Spulenöffnung drehen: Die Spule hat also oben einen Südpol ausgebildet, da sich die Felder ungleichnamiger Pole anziehen.

lenhälfte nach »links« fließen, indem wir den Massebaustein an die linke Spulenseite legen. Die Glühlampe dient zur Strombegrenzung. Bei der angegebenen Polung wird der drehbare Dauermagnet sich mit seinem Nordpol zur Spulenöffnung drehen: Die Spule hat also oben einen Südpol ausgebildet, da sich die Felder ungleichnamiger Pole anziehen.

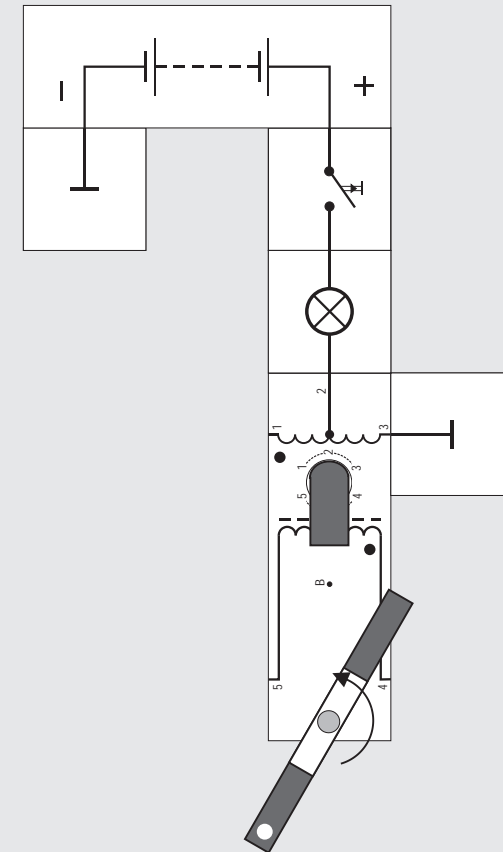


Experiment 20

Polabhängigkeit von der Stromrichtung

Legen wir nun den Massebaustein rechts an die Spule, so wird die andere Spulenhälfte vom Strom durchflossen; der Richtungssinn hat sich dabei verändert. Betä-

tigen wir den Taster, so stellt sich der Südpol des drehbaren Dauermagneten zur Spulenöffnung. Die Feldrichtung des Elektromagneten und damit seine Pole sind also davon abhängig, in welcher Richtung der Strom durch die Spule fließt.

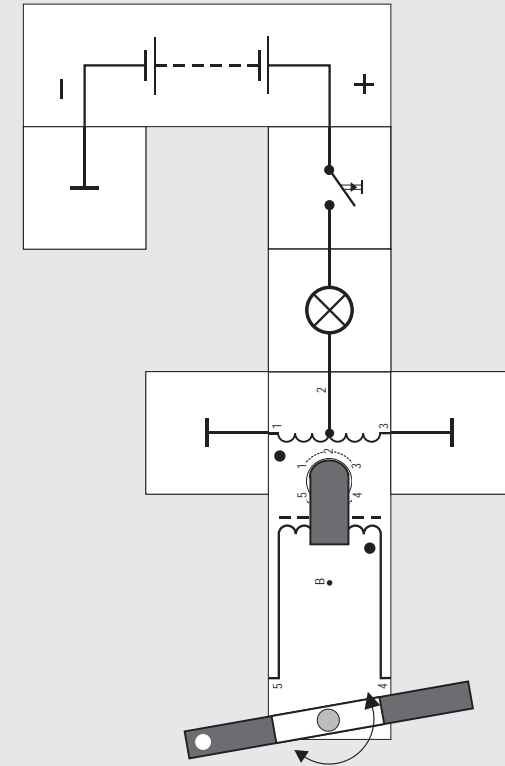


Experiment 21

Addition von Magnetfeldern

Legen wir bei der Spule an beide Seiten Massebausteine, so werden bei Tastendruck beide Spulenhälften vom Strom durchflossen und bilden jeweils ein eigenes Magnetfeld aus. Da die beiden Stromrichtungen in den Spulenhälften

aber gegeneinander gerichtet sind, sind es auch die beiden erzeugten Teilfelder. Sie kompensieren sich, so dass höchstens noch auf Grund von Unsymmetrien der Spule ein ganz schwaches Feld übrig bleibt; der drehbare Dauermagnet wird sich nicht mit einer bestimmten Seite der Spulenöffnung zuwenden.



Experiment 22**Spannungserzeugung mit einer Spule**

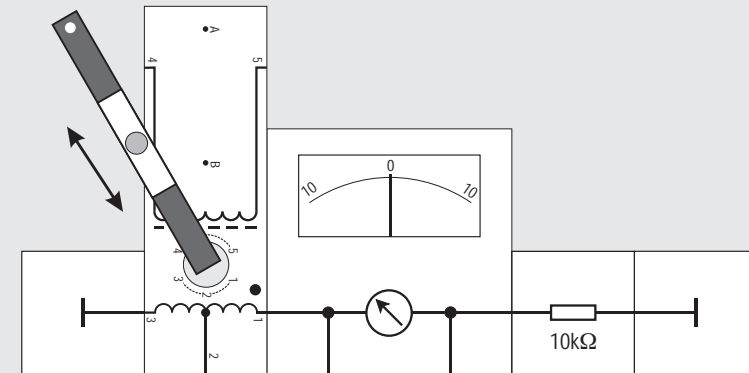
Die Versuche zeigten, dass Ströme (also bewegte elektrische Ladungsträger) durch eine Spule Magnetfelder erzeugen; dieses Prinzip gilt auch umgekehrt. Erzeugt man in einer Spule ein sich änderndes Magnetfeld, so entsteht an den Enden der Spule eine Spannung und es fließt ein Strom, wenn der Stromkreis geschlossen ist.

Zunächst bauen wir die Schaltung mit der Spule auf, die 2000 Windungen hat; als empfindlicher Strommesser dient das Lectron Messinstrument.

Führen wir den Stabmagneten in die Spulenöffnung ein, werden wir bemerken, dass das Instrument ein wenig ausschlägt und wieder auf Null zurückgeht. Reißen wir den Magneten nun so schnell wie möglich aus der Spulenöffnung heraus, zeigt das Messinstrument einen INDUKTIONSSSTROM von 3 bis 4 Skalenteilen in entgegengesetzter Richtung an, bevor es wieder auf Null geht. Eventuell muss der Widerstandswert angepasst werden. Die Höhe des Stromes ist offensichtlich abhängig von der Geschwindigkeit, mit

der sich das Magnetfeld im Inneren der Spule ändert. Durch Ausprobieren finden wir weiter heraus, dass die Richtung der erzeugten Spannung und damit auch die des Stromes davon abhängt, ob man den Süd- oder den Nordpol in die Spulenöffnung steckt.

Wenn wir einen Gleichstrommotor zur Verfügung haben, können wir das Instrument an seine beiden Klemmen direkt anschließen und die Welle von Hand drehen. Das Instrument wird einen Strom anzeigen, der von der Drehrichtung abhängt. Aus dem Motor ist jetzt ein Generator geworden. An den Spulendenen des Rotors wird eine Wechselspannung abgegeben; wegen des geschlitzten Kollektors, der gerade immer dann umschaltet (kommutiert), wenn sie ihre Polarität ändert, wird daraus eine pulsierende Gleichspannung, die einen Strom durch das Instrument bewirkt. Das Instrument zeigt uns den arithmetischen Mittelwert des Stroms an. Der Fahrraddynamo arbeitet nach demselben Prinzip. Bei ihm findet jedoch keine Kommutierung statt, so dass er Wechselspannung abgibt.



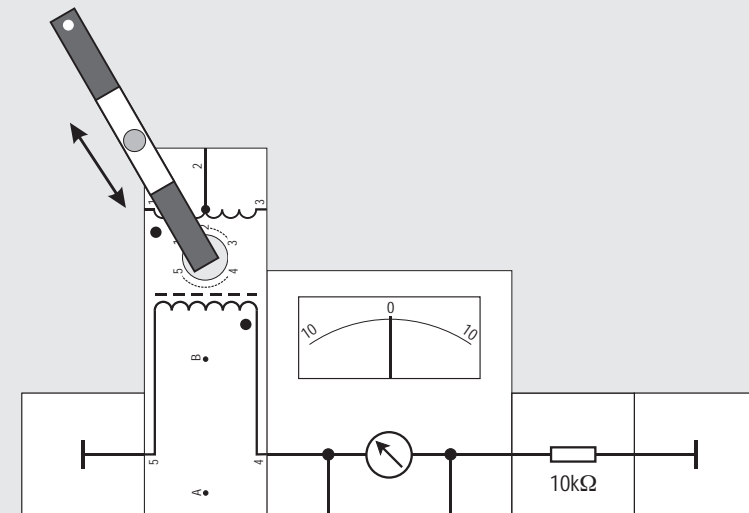
Experiment 23 Das Induktionsgesetz

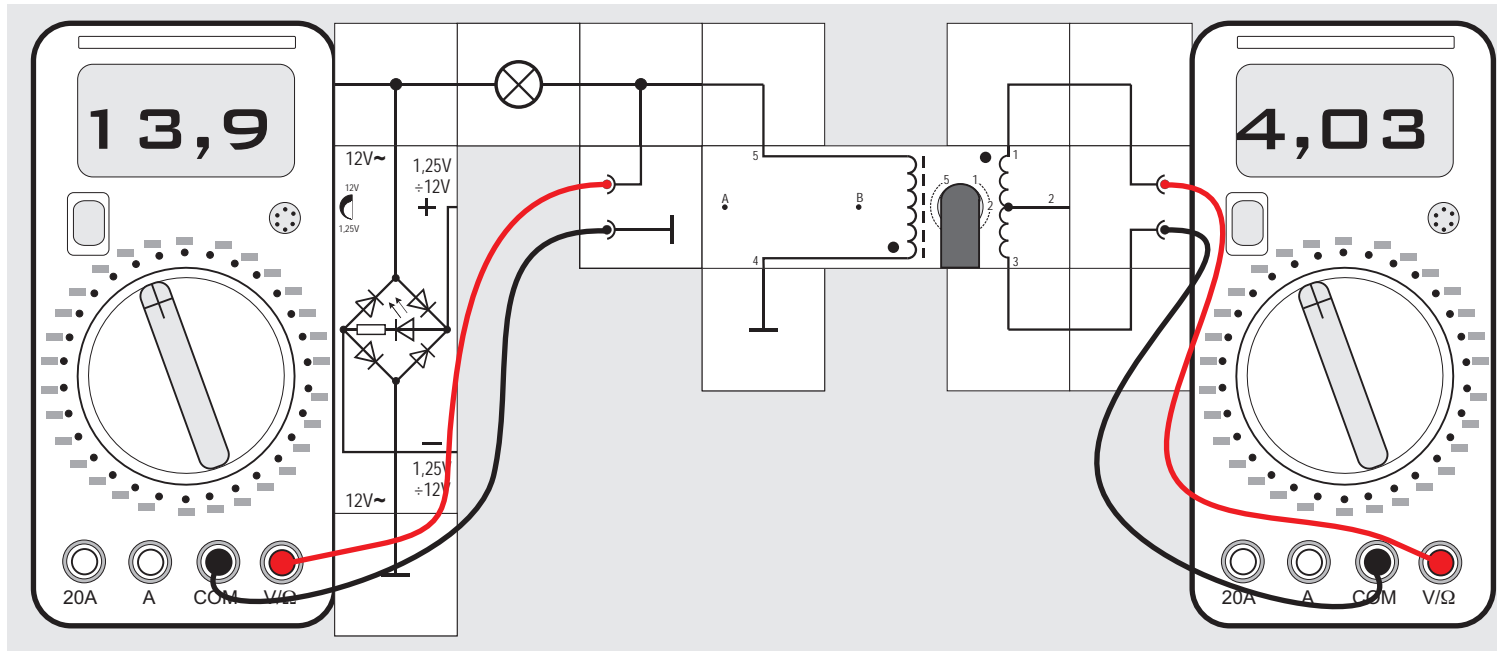
Bauen wir den Spulenbaustein so in die Versuchsanordnung ein, dass die Spule mit den 4000 Windungen vom Induktionsstrom durchflossen werden kann und wiederholen die Versuche, so werden wir feststellen, dass die Ausschläge des Messinstrumentes bei sonst gleichen Versuchsbedingungen doppelt so hoch sind. Die Höhe der Induktionsspan-

nung U_{IND} ist also nicht nur der Änderungsgeschwindigkeit des Magnetfeldes proportional, sondern auch der Windungszahl der Spule.

Das Maß für die Stärke des Magnetfeldes in der Spule ist der so genannte MAGNETISCHE FLUSS, er wird mit Φ bezeichnet und in Vs gemessen. Seine Änderungsgeschwindigkeit ist dann $\Delta\Phi/\Delta t$. Wenn n die Anzahl der Spulenwindungen ist, ergibt sich das Induktionsgesetz zu

$$U_{\text{IND}} = n \cdot \Delta\Phi/\Delta t.$$





Experiment 24 Der Transformator

Die Änderung des magnetischen Feldes braucht nun nicht »von Hand« zu passieren, es geht einfacher, wenn man Wechselstrom verwendet, der ja ständig seine Stärke und Richtung ändert. Schickt man Wechselstrom durch eine erste Spule (PRIMÄRSPULE), so wird er dort ein sich ständig änderndes magnetisches Feld erzeugen; das ist aber genau das, was man braucht, um in einer zweiten Spule (Induktions-) Spannung zu erzeugen, wie die voran gegangenen Versuche

zeigten. Man muss nur noch dafür sorgen, dass das von der ersten Spule erzeugte magnetische Feld auch vollständig durch die Windungen der zweiten, SEKUNDÄRSPULE genannt, führt. Hierfür bekommen die Spulen einen gemeinsamen Weicheisenkern, der das magnetische Feld »bündelt«, so dass der angegebene Versuchsaufbau, nämlich ein TRANSFORMATOR, entsteht: Misst man mit einem Digitalmultimeter (für die Messung ist das Lectron Messgerät nicht ohne weiteres geeignet, da es nur Gleichstrom messen kann) die Eingangsspannung (PRIMÄRSPANNUNG) und die Ausgangsspannung

(SEKUNDÄRSPANNUNG), so sollten sich bei unbelastetem Sekundärkreis die Spannungen wie die Windungszahlen verhalten; es gilt:

$$n_{\text{primär}} / n_{\text{sekundär}} = U_{\text{primär}} / U_{\text{sekundär}}$$

Das wird in unserem Versuch jedoch nicht der Fall sein, die Sekundärspannung ist kleiner als erwartet. Der Grund dafür ist, dass der Eisenkern die beiden Spulen nicht gut genug koppelt, ein geschlossener Weg für das magnetische Feld, z. B. ein Eisenring statt eines Stabs mit zwei Enden, wäre erheblich besser. Den Nachweis führen wir indirekt: Indem wir den Stab langsam weiter he-

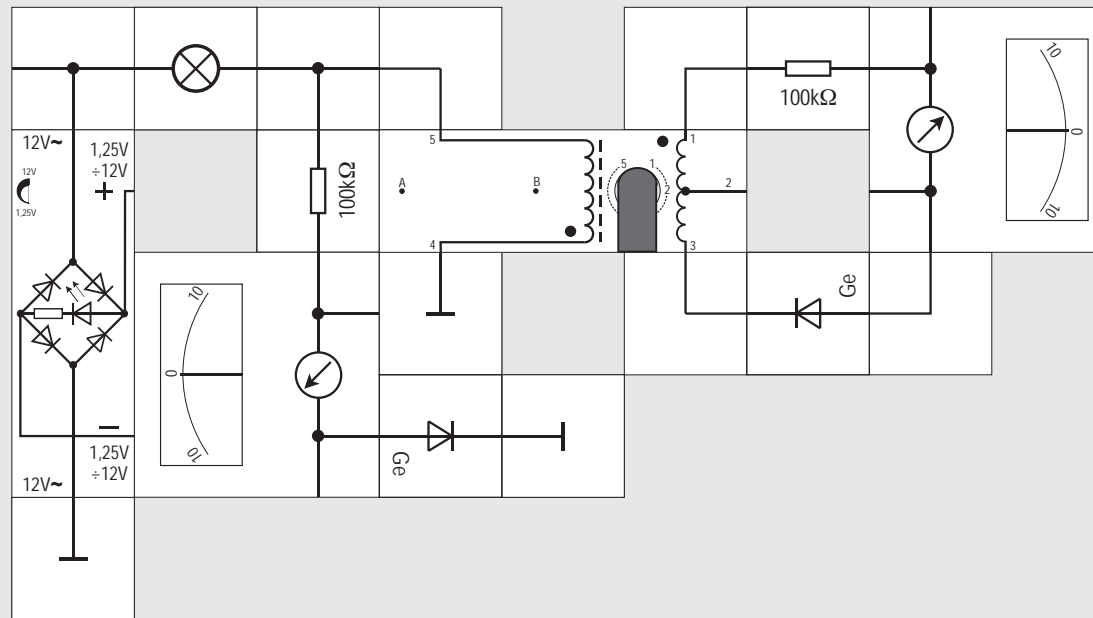
rausziehen, verschlechtert sich die Kopplung und die Sekundärspannung sinkt weiter ab.

Da der Transformator keine Energie erzeugen kann und auch kaum welche auf den Energieträger Entropie (Wärme) umsetzt, wenn er gut konstruiert ist, muss der in ihn hineingehende Energiestrom (in der Alltagssprache LEISTUNG genannt) gleich dem herauskommenden sein; daraus folgt, dass sich die Ströme der elektrischen Ladungsträger umgekehrt verhalten wie die Spannungen:

$$n_{\text{primär}} / n_{\text{sekundär}} = I_{\text{sekundär}} / I_{\text{primär}}$$

Der Transformator begegnet uns im Alltag auf Schritt und Tritt. Unzählige elektrische Geräte unseres täglichen Lebens, wie Transistorradio, MP3-Player, Handy, elektrische Zahnbürste, Spielzeugmotore, Akku - Ladegeräte, benötigen zum Betrieb eine viel kleinere Spannung als die 230V des Hausnetzes. Wollen wir diese Geräte betreiben, muss die Spannung auf einen kleineren passenden Wert »heruntertransformiert« werden.

Für den Energietransport über weite Entfernungen ist es andererseits aber günstiger, mit möglichst hohen Spannungen (z. B. 400kV) und entsprechend kleineren Strömen zu arbeiten; die Verluste infolge der Leitungswiderstände sind quadratisch von der Stromstärke abhängig und werden dadurch kleiner: $P=I^2 \cdot R$.



Experiment 25 Wechselspannungsmessung mit Lectron Instrumenten

Haben wir keine Multimeter mit Wechselspannungsmessbereich, z.B. Digitalmultimeter, zur Verfügung, so können wir die Spannungsmessung auch mit zwei Lectron Messinstrumenten durchführen. Wir wissen aus Experiment 16, dass sie zunächst nur zur Messung von Gleichstrom geeignet sind. Wir müssen also die Wechselspannung gleichrichten, was wir einfach mit einer Diode bewerkstelligen können.

Die Diode lässt bekanntlich nur Strom in einer Richtung durch, in der Gegenrichtung sperrt sie. (s. Elektronik AG, Experimente 20ff.) Es gelangt dann nur eine Halbschwingung zum Instrument, die andere, gegenläufige wird unterdrückt und es fließt – ein pulsierender – Strom nur in einer Richtung, den das Instrument anzeigen kann. Gegenüber dem wahren Wert zeigt es natürlich zu wenig an, weil die halbe Zeit ja wegen der Gleichrichtung nichts fließt. Die Herleitung des Faktors, mit dem der angezeigte Wert multipliziert werden muss, um den

wahren zu erhalten, würde an dieser Stelle zu weit führen, deswegen geben wir ihn einfach an:

$$\pi/\sqrt{2} = 2,22$$

Zeigt unser Instrument also beispielsweise 4,5 Skalenteile an, was mit dem 100kΩ Widerstand 4,5 V bei Gleichspannung bedeutet, so müssen wir diesen Wert noch mit 2,22 multiplizieren und erhalten ungefähr 10V. Die gleiche Rechnung gilt auch für die Sekundärseite, weil wir auch hier mit der Diode gleichrichten.

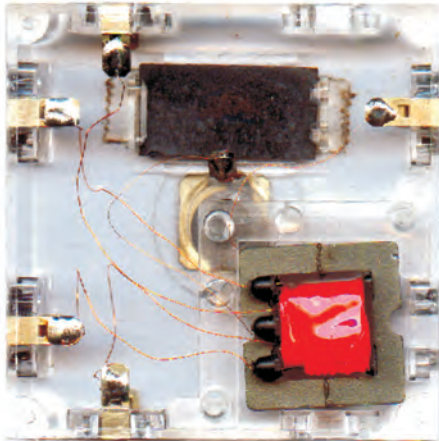
Da wir aber nur das Verhältnis beider Spannungen ausrechnen wollen, brauchen wir diese Rechnungen überhaupt nicht auszuführen. Der Faktor kürzt sich heraus, da er im Zähler und im Nenner vorkommt.

Wenn die Wechselspannung an die Schaltung gelegt ist, werden wir ein schnelles Klappern vernehmen; es rührt von den Rundmagneten des Spulenbausteins her, die sich im Takt des magnetischen Wechselfeldes in ihren Kammern bewegen. Das Feld ist 50-mal in der Sekunde in die eine und 50-mal in die andere Richtung gerichtet. Man sagt dazu auch, es hat eine Frequenz von 50 Hz (Hertz).

Experiment 26

Der Hochspannungstransformator

Neben dem Spulenbaustein gibt es in dem Elektronik AG Experimentierkasten einen weiteren Baustein, der mehrere Spulen auf einem gemeinsamen Eisenkern enthält; es ist der Hochspannungstransformator. Er besitzt drei Spulen mit 27, 180 und 610 Windungen. Der gemeinsame Kern besteht aus zwei m-förmigen gesinterten Formteilen, die von rechts und von links in die Öffnung des Wickelkörpers gesteckt und anschließend zusammen geklebt wurden. Die Abbildung zeigt den geöffneten Baustein.



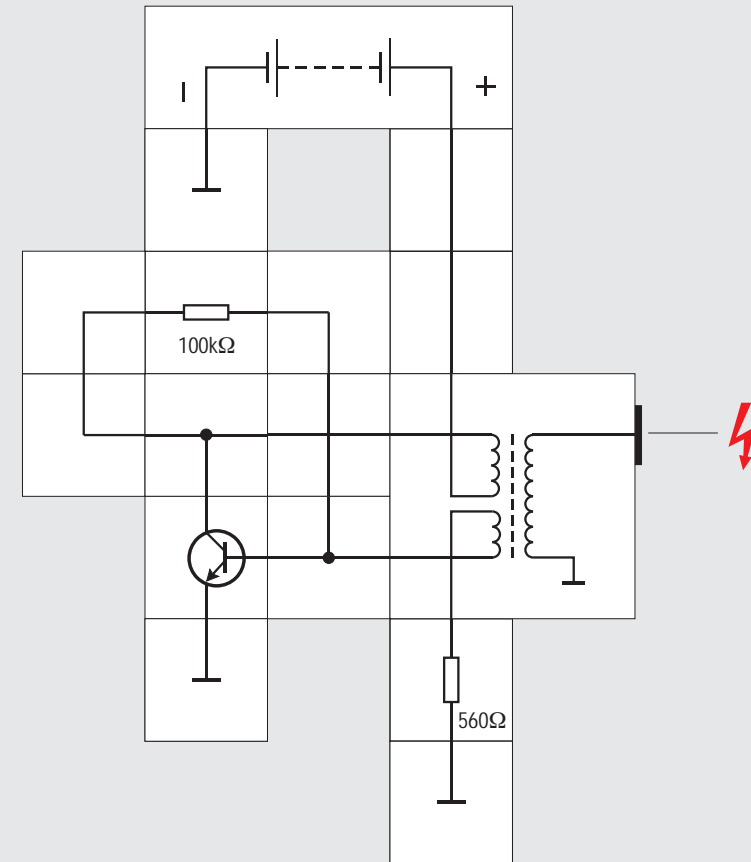
Mit ihm und einem Transistor wollen wir eine Schaltung aufbauen, die zunächst durch Rückkopplung Schwingungen erzeugt. Es entsteht also in einer Spule mit kleiner Windungszahl eine Wechselspan-

nung, die wir hochtransformieren und als »Hochspannung« von einigen Hundert Volt an der Spule mit der hohen Windungszahl abgreifen können.

Wenden wir uns zunächst der Schwingerschaltung zu. Die Funktion eines Transistors sollte bekannt sein (s. Elektronik AG Experimente 30ff.). Im Kollektorkreis des Transistors liegt die »Primärspule« des Transformators. Jede noch so kleine Stromänderung in ihr wird infolge der Transformatoreigenschaften auch auf die »Rückkopplungsspule« in den Basiskreis des Transistors übertragen. An der Basis tritt dadurch eine Spannungsänderung auf, die im Transistor verstärkt wird und wieder eine entsprechende Stromänderung im Kollektorkreis zur Folge hat. Auf diese Weise schaukelt sich die Schaltung auf; die Anordnung beginnt zu schwingen. Das einwandfreie Arbeiten der Versuchsschaltung erkennt man daran, dass bei eingeschalteter Batterie ein hoher Pfeifton auftritt.

In der dritten Wicklung des Transformators entsteht die hohe Wechselspannung von etwa 250 V. Sie ist hier völlig ungefährlich, da der Energiestrom nur sehr schwach ist.

Berührt man bei eingeschalteter Batterie mit einem Finger gleichzeitig das freie Kontaktplättchen und die Grundplatte, dann verspürt man ein Prickeln, ein Zeichen für hohe Spannung. Nicht erschrecken!

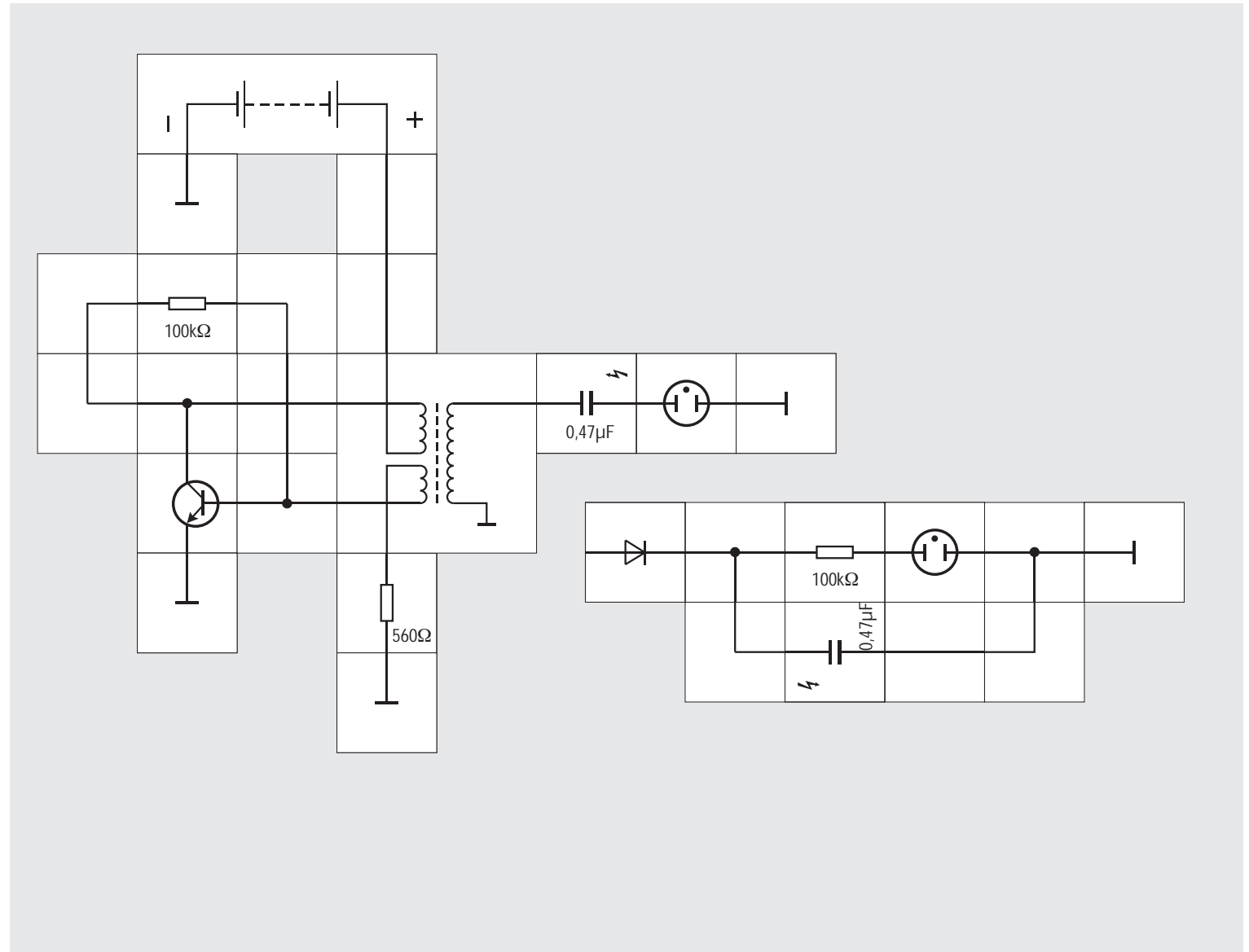




Experiment 27

Glimmlampe an Hochspannung

Mit Hilfe der Glimmlampe können wir nachweisen, dass es sich bei der erzeugten Spannung um mehr als ihre Zündspannung von circa 70V handelt. In Reihe zu ihr legen wir den $0,47\mu\text{F}$ Kondensator zur Strombegrenzung. An seine Stelle dürfen wir keinen anderen Kondensator einsetzen, da nur er die nötige Spannungsfestigkeit aufweist. Bei der Glimmlampe leuchtet das Neongas an beiden Elektroden rötlich auf, ein Zeichen, dass sie an Wechselspannung liegt. Wenn wir dagegen die erzeugte Wechselspannung mit einer Diode gleichrichten, also immer eine Halbwelle nicht fließen lassen, weil dann die Diode sperrt, leuchtet das Gas nur an der Elektrode mit dem niedrigeren Potenzial auf.





Experiment 28 Die Induktivität

Elektrische Bauelemente, die Magnetfelder erzeugen, nennt man INDUKTIVITÄTEN. Induktivitäten sind z. B. Elektromotoren, Transformatoren, Erregerspulen elektromagnetische Schalter (Relais) und natürlich Spulen in Form von Drosseln, Zündspulen usw.

Beim Einschalten eines Stromes in einem Stromkreis mit einer Induktivität wird ein Magnetfeld aufgebaut, das Energie speichert. Für den speisenden Stromkreis entsteht an den Spulenenenden eine INDUKTIONSSPANNUNG, die dem fließenden Strom entgegenwirkt, so dass er nur langsam bis zu seinem Endwert ansteigt. Die Größe der Induktivität ist ein Maß für die Fähigkeit der Spule, SELBSTINDUKTIONSSPANNUNG zu erzeugen. Den gleichen Zeitverzug erhält man beim Abschalten des Stromes, also beim Abbau des Magnetfeldes.

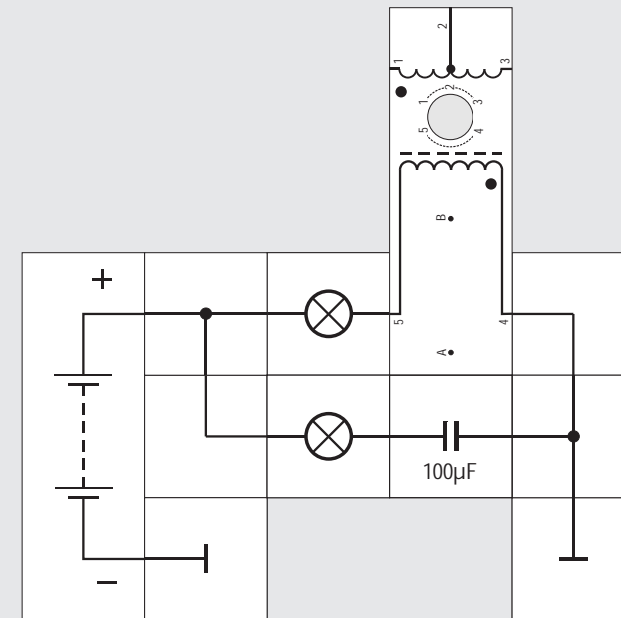
Wir wollen nun die Eigenschaften einer Induktivität an einer Gleichspannung un-

tersuchen:

Dazu legen wir zuerst Gleichspannung an die Anschlusspunkte der Schaltung und beobachten, was geschieht. Nach Anlegen der Spannung leuchtet die Lampe am Kondensator eventuell nur für einen kurzen Augenblick auf. Die Lampe an der Spule leuchtet dauernd.

Dies ist folgendermaßen zu erklären:

Von den Versuchen aus der Elektronik AG ist das Verhalten des Kondensators bekannt. (Falls nicht, sollten erst die dortigen Experimente Nr. 22 bis 25 durchgeführt werden.) Nach Anlegen der Spannung fließt nur ein kurzzeitiger Ladestrom in den Kondensator. Die Spule stellt für den Gleichstrom dagegen nur einen normalen ohmschen Widerstand dar. Die Birne wird (Spannungsabfall an der Spule vernachlässigbar) mit der vollen Betriebsspannung betrieben. Induktivitäten wirken bei Gleichstrom nur mit ihrem ohmschen Widerstand. (Ein / Ausschalten nicht berücksichtigt), Kondensatoren sind für Gleichstrom nicht leitend.



Experiment 29

Die Induktivität an Wechselspannung

Jetzt wiederholen wir den Versuch, legen aber Wechselspannung an. Hierzu ist das Netzgerät erforderlich. Wenn wir statt des bipolaren $100\mu\text{F}$ Elkos normale verwenden, müssen zwei gegeneinander geschaltet werden.

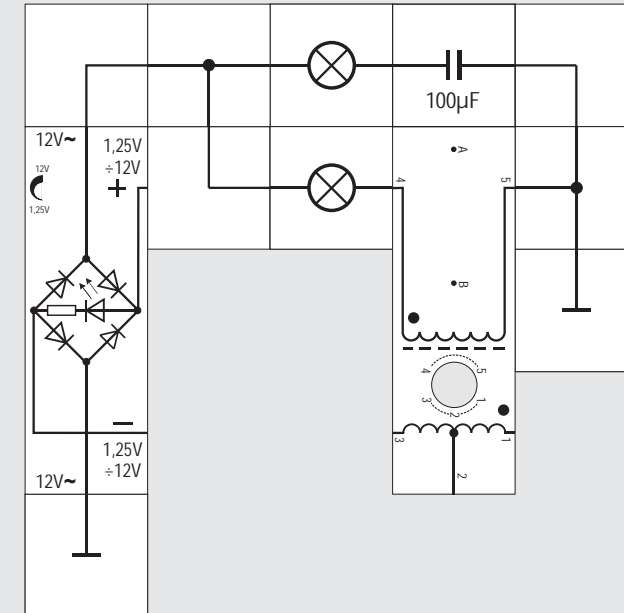
Die Glühbirne am Kondensator leuchtet hell und die Glühbirne an der Spule bleibt dunkler. Durch die Spule fließt also weniger Strom. Wie ist dies zu erklären? Aus den Erklärungen zur Induktivität beim letzten Versuch folgt, dass eine Induktivität (Spule) beim Anlegen einer Spannung eine Selbstinduktionsspannung erzeugt. Wechselstrom ist aber nichts anderes, als ein ständiges, periodisches Ein- und Ausschalten (bzw. Umschalten mit Nulldurchgang). Diese Spannung treibt einen Strom entgegengesetzt zu dem Strom, der von außen durch die Spule fließen soll. Da sich aber Spannungen mit ungleichen Vorzeichen gegenseitig aufheben, wird der resultierende Strom sehr viel kleiner, als es dem ohmschen (Gleichstrom -) Widerstand der Spule entsprechen würde (wie viel kleiner ist abhängig von der Frequenz und der Induktivität). Die Birne bleibt dunkler.

Die effektive Höhe des Stromes durch die Spule ist abhängig davon, mit wel-

cher Geschwindigkeit sich die Spannung ändert. Bei Gleichspannung ist die Änderungsgeschwindigkeit 0; anders ist es bei Wechselspannung. Die Änderungsgeschwindigkeit ist abhängig von der Frequenz: Eine hohe Frequenz bedeutet eine hohe Änderungsgeschwindigkeit, eine hohe Induktionsspannung steht für einen hohen scheinbaren Widerstand.

Daraus folgt, dass der induktive Widerstand einer Spule mit steigender Frequenz und zunehmender Induktivität steigt.

Beim Kondensator liegen die Verhältnisse anders: Die Birne leuchtet hell auf; beim Einschalten der Spannung fließt ein Ladestrom in den Kondensator. Aus dem Elektronik AG Versuch 23, Kondensator laden und entladen, ist bekannt, dass beim Entladen ein Strom aus dem Kondensator fließt. Für Wechselspannung bedeutet dies, dass am Kondensator wechselweise einmal der positive und im nächsten Moment der negative Pol der Spannung angelegt wird. Der Kondensator wird also von der positiven Halbwelle aufgeladen und im nächsten Moment von der negativen Halbwelle wieder ent- und umgeladen. Durch die Glühbirne fließen also ständig Lade- bzw. Umladeströme. Dies ergibt einen mittleren Wechselstrom, der sie zum Leuchten bringt.



Die effektive Höhe der Umladeströme ist abhängig von der Häufigkeit der Umladevorgänge, d.h. davon, wie oft die Wechselspannung umgeschaltet wird. Die Häufigkeit des Polaritätswechsels wird als Frequenz bezeichnet. Der Strom steigt mit zunehmender Frequenz und

der Kapazität des Kondensators; der scheinbare Widerstand des Kondensators wird geringer.

Daraus folgt: Der kapazitive Widerstand eines Kondensators sinkt mit steigender Frequenz und größer werdender Kapazität.

Experiment 30 Der Induktivgeber

An vielen Motoren befinden sich Sensoren, die dazu dienen, die Stellung des Kolbens bzw. den Kurbelwellenwinkel zu erkennen. Diese Sensoren steuern z. B. die Zündung des Motors. Auch bei kontaktlosen Zündanlagen werden teilweise induktive Sensoren zur Auslösung der Zündung eingesetzt.

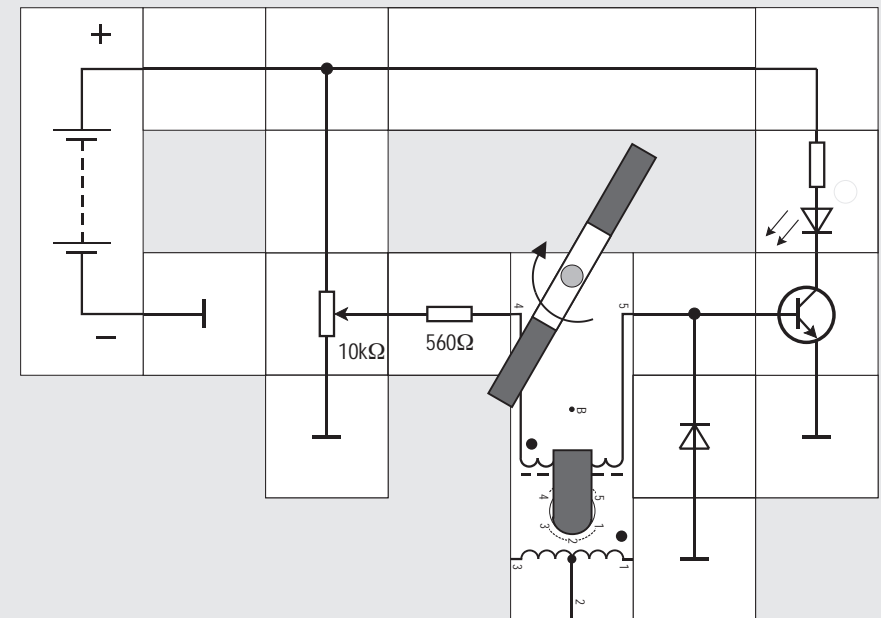
Die Auswertung kann auf verschiedene Arten erfolgen. Entweder werden Induktivitätsänderungen erfasst, wenn z. B. ein Stift oder eine Kerbe über eine Spule mit Eisenkern läuft oder ein Magnetfeld wie beim Zündverteiler mit Induktionsgeber durch die Spule geleitet wird, wie die Schaltung zeigt.

Ebenso wie ein fließender Strom in einer Spule ein Magnetfeld erzeugt, induziert ein sich änderndes Magnetfeld in einer Spule eine Spannung. Wir haben das bereits in Experiment 19 kennen gelernt. Leiten wir durch Drehen des großen Rotors einen sich ändernden magnetischen Fluss durch eine Spule, so wird in ihr eine Spannung induziert; diese Spannung

kann verstärkt werden und zum Auslösen des Zündfunken genutzt werden. Die folgende Schaltung zeigt das Prinzip. Die Funktionsweise eines Transistors sollte bekannt sein, ansonsten empfehlen wir, zunächst die Versuche 30 bis 35 der Elektronik AG durchzuführen.

Mit dem Potentiometer stellen wir das Basis - Potenzial am Transistor so ein, dass der Transistor gerade noch nicht leitet. Die Spule mit dem Eisenkern liegt in der Basisleitung des Transistors. Wenn wir nun den Rotor mit dem Magneten in Bewegung setzen, wird in der Spule eine Wechselspannung induziert, deren positive Halbwelle den Transistor in den leitenden Zustand bringt. Es fließt ein Kollektorstrom, die Leuchtdiode leuchtet auf. Damit die anschließend entstehende negative Halbwelle den Transistor nicht zerstört, schützt die Diode seine Basis - Emitter - Strecke vor zu hohen negativen Spannungen.

Beim Aufleuchten der Leuchtdiode wissen wir, dass der Drehmagnet sich immer in der gleichen Winkelstellung befindet, wenn er mit konstanter Geschwindigkeit bewegt wird.



Experiment 31

Gleichstrommotor ohne Kollektor

Wir wissen bereits, dass ein Gleichstrommotor einen Kollektor zum Ab- oder Umschalten der anliegenden Spannung benötigt. Beim Schalten wird das vorhandene Magnetfeld abgebaut und es entstehen Funken, die auf Dauer den Kollektor schädigen können. Verwenden wir statt des mechanischen Schalters einen elektronischen, nämlich den Transistor, so können wir die schädlichen Funken vermeiden.

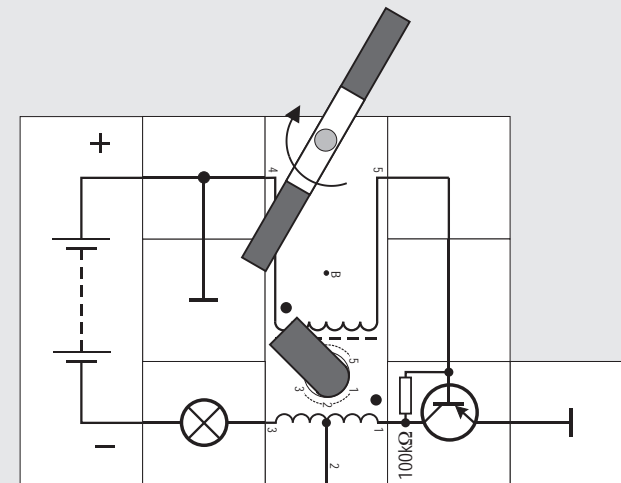
Für den Aufbau der Schaltung sollte zunächst der pnp - Germaniumtransistor mit dem Basiswiderstand $100\text{ k}\Omega$ verwendet werden. Der Plus - Pol der Spannungsversorgung muss dann unbedingt an Masse gelegt werden. Der Eisenkern wird um 45° gedreht so wie in der Abbildung in die Spule eingesetzt.

Setzen wir in Bohrung A des Spulenbausteins den Rotor mit den beiden Stabmagneten, tut sich zunächst nichts außer dass sich der Rotor nach Norden ausrichtet. Nach dem Anlegen der Versorgungsspannung setzt sich der Rotor durch leichtes Antippen in Bewegung - unser Motor läuft.

Die Basis des Transistors liegt zunächst

über die Basiswicklung an Massepotential genau wie der Emitter; der Transistor sperrt also. Damit ist die Spule im Kollektorkreis stromlos, vom Magneten (Eisenkern) geht keine elektromagnetische Kraftwirkung aus. Durch das Anstoßen des großen Rotors ändert sich das Magnetfeld in der Basisspule, wodurch eine ausreichend hohe Induktionsspannung (mit richtiger Polarität an der Basis) bewirkt, dass der Transistor gut durchschaltet. Damit fließt ein Strom durch die Kollektorspule, und es wird für diesen Moment eine elektromagnetische Kraft eingeschaltet, die so wirkt, dass sie die Drehbewegung des Magnetrotors unterstützt. Je nach Pol des Magnetrotors tritt dieser Effekt bei Annäherung (bei zunehmenden Feld) oder beim Entfernen (bei abnehmenden Feld) vom Eisenkern auf. Zwischendurch induziert der sich bewegende Rotor zwar eine Spannung in die Basisspule, die zum Sperren des Transistors führt, die Trägheit des Rotors »überspielt« aber diesen Punkt und nach kurzem Weiterdrehen beginnt das Spiel von neuem.

Durch vorsichtiges Drehen des Eisenkerns kann die Laufruhe des Rotors optimiert werden.



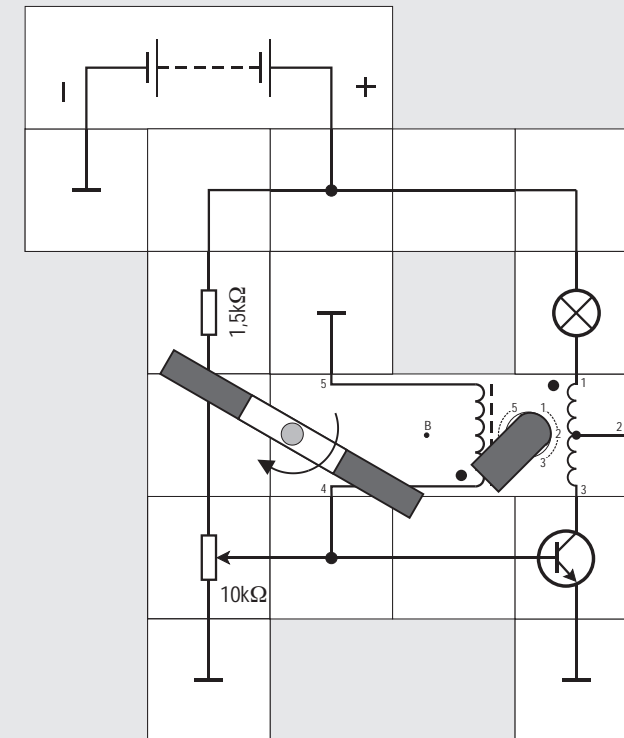
Experiment 32**Gleichstrommotor ohne Kollektor mit npn - Transistor**

Der kollektorlose Motor lässt sich auch mit einem npn - Siliziumtransistor aufbauen. Weil Silizium - Transistoren mit $U_{BE} = 0,7\text{ V}$ eine höhere Schwellspannung haben als Transistoren aus Germanium ($U_{BE} = 0,3\text{ V}$), muss dem Transistor zusätzlich eine geeignete Vorspannung an die Basis gelegt werden.

Das Potentiometer wird so eingestellt, dass der Glühlampenfaden bei stehendem Magnetstab gerade zu glühen anfängt. Der Eisenkern sollte - wie in der

Abbildung gezeigt - um 45° gedreht sein. Der Rotor setzt sich durch Antippen in Pfeilrichtung leicht in Bewegung. Bei laufendem Motor können der Winkel des Eisenkerns und das Potentiometer noch leicht verstellt werden, um die Laufruhe zu optimieren. Am periodischen Aufglühen des Glühlampfadens ist gut zu erkennen, wann der Transistor leitet und wann er sperrt.

Die gleiche Schaltung funktioniert auch mit einem pnp - Siliziumtransistor; die Spannungsversorgung muss lediglich umgekehrt angeschlossen und das Potentiometer neu eingestellt werden.





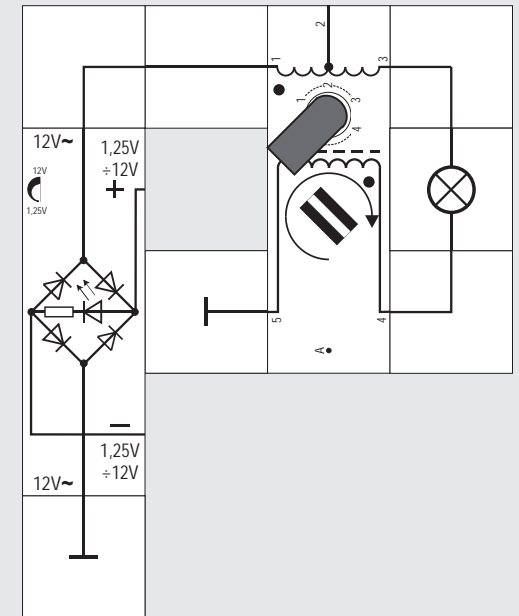
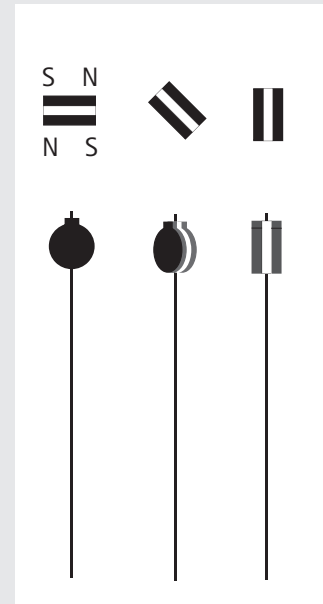
Experiment 33 Ein Synchronmotor

Mit dem Spulenbaustein ist es uns auch möglich, einen einfachen SYNCHRONMOTOR aufzubauen: Bei einem einfachen Synchronmotor dreht sich der Rotor (Dauermagnet) synchron zu einem magnetischen Drehfeld, das im Stator durch Elektromagnete erzeugt wird. Bei großen Synchronmotoren werden statt der Dauermagnete ebenfalls Elektromagnete verwendet, wobei die Stromzuführung über Schleifringe erfolgt.

Speist man die Statorwicklungen mit 50Hz Wechselspannung, so entsteht in ihm lediglich ein Wechselfeld aber kein Drehfeld. Dieses Wechselfeld kann man sich nun aus zwei gegenläufig rotierenden Drehfeldern gleicher Frequenz zusammengesetzt vorstellen. Wenn es uns gelingt, den Rotor in eine der beiden Drehrichtungen auf die synchrone Drehzahl zu bringen, wird er durch seine Trägheit diesem Feld folgen und sich mit ihm drehen. Das Feld dreht sich 50-mal in der

Sekunde, woraus eine Drehung mit 3000 U/min folgt. Besteht der Rotor aus einem Polpaar, dreht er sich genauso schnell. Hat er wie unser Rotor - der aus zwei Seitenkontakt - Haftmagneten besteht, die an einer Drehachse befestigt sind - zwei Polpaare, ist seine Drehzahl nur halb so hoch, nämlich 1500 U/min. Die nebenstehende Abbildung zeigt den Aufbau des kleinen Rotors bei verschiedenen Winkelstellungen.

Die Drehachse kommt in das Loch B des Spulenbausteins. Unser Motor kann sich nur mit der synchronen Drehzahl drehen oder gar nicht. Er läuft nicht von selbst an. Deswegen gibt man dem Rotor nach Anlegen der Wechselspannung einen kräftigen Anstoß, damit die synchrone Drehzahl auch erreicht wird; anschließend wird er sich in der vorgegeben Drehrichtung drehen. Bei einem Anstoß in Gegenrichtung folgt der dem gegenläufigen Feld mit der synchronen Drehzahl. Durch vorsichtiges Drehen des Eisenkerns kann ein »ruhiger« Lauf des kleinen Rotors erreicht werden.



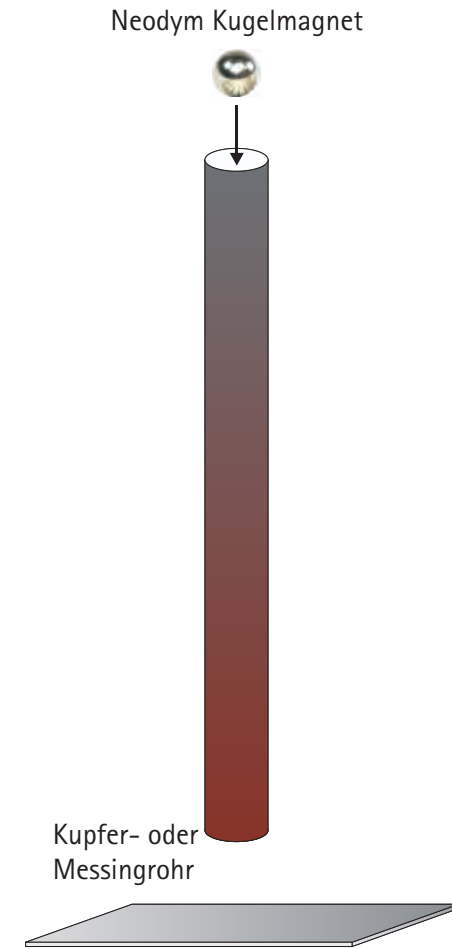
Experiment 34 Wirbelströme

Zum Schluss wollen wir noch einen verblüffenden Versuch mit einem Neodym-magneten und die Entstehung von WIRBELSTRÖMEN zeigen. Normalerweise wird bei der Behandlung von Transformatoren ein Typ gezeigt, bei dem die Sekundärspule aus einer einzigen geschlossenen Windung, also einem Kupferring, besteht und sich diese zusammen mit der aus vielen Windungen bestehenden Primärspule auf einem stabförmigen gemeinsamen Kern befindet. Legt man die Primärspule an Spannung, fliegt der Ring vom Kern und zwar unabhängig von der Polung der Primärspannung. Wie ist das zu erklären?

Die einzige kurzgeschlossene Sekundärwindung wird beim Einschalten der Primärspannung vom Magnetfeld durchsetzt und es entsteht in ihr eine Spannung mit einem sehr hohen Strom, da der Widerstand des gut leitenden Kupferringes sehr klein ist. Dieser große Strom erzeugt seinerseits ein starkes Magnetfeld, welches immer so gerichtet ist, dass es sich von dem erzeugenden abstößt. Mit dem Lectron Spulenbaustein können wir dieses Experiment nicht ausführen, weil bereits das erste Magnetfeld nicht kräftig

genug ist.

Wir nehmen stattdessen die magnetische Kugel aus Neodym und lassen sie durch das senkrecht gehaltene lange Kupfer- oder Messingrohr fallen. Vorsichtshalber legen wir etwas Weiches unter die untere Öffnung, damit die Kugel nicht hart auf den Boden aufschlägt. Zu unserem Erstaunen wäre das gar nicht nötig gewesen, denn die Kugel hält sich viel länger in dem Rohr auf als wir gedacht haben. Ihr Fall wird stark abgebremst, obwohl das Rohr nachweislich nicht magnetisch ist. Auch hier ist das Zusammenwirken von zwei Magnetfeldern wieder die Ursache: Das Feld des fallenden Kugelmagneten durchdringt das gut leitende Kupfer oder Messing und erzeugt durch die sich ändernde Feldstärke im Rohr in unmittelbarer Nähe des Magneten eine örtliche Spannung. Diese führt wegen des geringen elektrischen Widerstands zu Induktionsströmen beträchtlicher Stärke in dem Rohr. Der Stromverlauf ist nicht so gut vorher bestimmbar, diese Ströme heißen deswegen WIRBELSTRÖME. Das durch sie hervorgerufene Magnetfeld ist so gerichtet, dass es den Magneten am Fallen hindern will, er schwebt darum nur langsam nach unten. Dies können wir gut erkennen, wenn wir von oben in das Rohr sehen. Der gleiche Effekt tritt auf, wenn der



Kugelmagnet in einer schräg gehaltenen Rinne mit V-Profil aus einem nicht magnetischem Metall deutlich langsamer nach unten läuft als in einer Rinne aus

elektrisch nicht leitendem Material. Wirbelströme erzeugen Entropie und sind darum meistens unerwünscht. Man nimmt deswegen beispielsweise beim Transformator keinen massiven Eisenkern, sondern dünne Bleche oder gesinterte Materialien, die einen großen elektrischen Widerstand haben und so die Wirbelströme schwächen oder verhindern.

Andererseits nutzt man die bremsende Wirkung von Wirbelströmen bei Eisen- oder Straßenbahnen in der Wirbelstrombremse oder in Messinstrumenten, um störende Schwingungen der Zeiger zu dämpfen.

Eine der wichtigsten Anwendungen von Wirbelströmen erfolgt in DREHSTROM-ASYNCHRONMOTOREN, deren Rotor ein Metallkäfig ist. Das magnetische Drehfeld der Stator-Spulen induziert in ihm Wirbelströme mit magnetischen Feldern, welche im Zusammenspiel mit dem Stator-Drehfeld zu einer Drehung des Rotors führen. Seine Winkelgeschwindigkeit ist geringfügig kleiner als die des Statorfeldes, also ASYNCHRON. Wäre sie synchron, würde in dem Rotor kein Wirbelstrom mehr erzeugt, da dann im Rotor keine Flussänderung mehr erfolgt. Diese Motore zeichnen sich durch große Robustheit aus, da sie weder Kollektor noch Schleifer benötigen.