KPK

Der Karlsruher Physikkurs

für die Sekundarstufe II

Elektrodynamik

Unterrichtshilfen

Der Karlsruher Physikkurs

Ein Lehrbuch für den Unterricht in der Sekundarstufe II

Unterrichtshilfen

- **Elektrodynamik**
- Thermodynamik
- Schwingungen, Wellen, Daten
- Mechanik
- Atomphysik, Kernphysik, Teilchenphysik

Herrmann

Der Karlsruher Physikkurs

Auflage 2014

Bearbeitet von Prof. Dr. *Friedrich Herrmann* und *Dr. Holger Hauptmann*

Abbildungen: *F. Herrmann*

Lizensiert unter Creative Commons

http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/

A

Allgemeine Bemerkungen

1. Das Feld als Gegenstand

Man kann sich vom Feld, so wie es die moderne Physik kennt, zweierlei Anschauungen bilden: zum einen als ein besonderer Zustand des so genannten Vakuums. Dies war auch die Vorstellung von Faraday und Maxwell, den Erfindern des Feldbegriffs. Was heute den unglücklichen Namen „Vakuum“ trägt, hieß damals Äther. Die andere Auffassung ist die, dass das Feld ein Gebilde ist; eine Art Gegenstand, der sich im Raum befindet, wobei man nach der Natur dieses Raums nicht weiter fragt, wohl aber nach der des Gegenstandes. Man kann die beiden Auffassungen vergleichen mit zwei Betrachtungsweisen eines über die Meeresoberfläche laufenden Wasserwellenpulses: Entweder man sagt, die Welle sei nichts weiter als ein besonderer Zustand des Wassers, oder man betont, dass hier neben dem Wasser etwas Selbstständiges, Neues entstanden ist, und dass man, wenn man die Welle beschreiben will, gar nicht mehr an das Wasser zu denken braucht.

Wir haben uns bei der Behandlung des elektromagnetischen Feldes für das zweite Modell entschieden. Der Grund ist einfach: Schließlich beschreiben wir den Rest der Welt, nämlich das, was man gewöhnlich Materie nennt, genauso. Tatsächlich kann man den materiellen Teil der Welt als einen besonderen Zustand des Vakuums darstellen.

Nun ist in die Lehrbücher der Physik außerdem eine andere Auffassung vom Feld eingedrungen: Das Feld ist danach nichts anderes als die Verteilung einer physikalischen Größe im Raum, der Feldstärke. Das Feld ist damit natürlich kein physikalisches System. Es ist nicht mehr als ein mathematisches Werkzeug, das es gestattet, Kräfte zu berechnen, die auf das scheinbar einzig Wahre in der Welt wirken: auf Körper. Dieses Bild vom Feld ist für gewisse Zwecke brauchbar. Es verstellt aber den Blick auf andere Aspekte des Feldes. Dass ein Feld, wie jedes materielle System, noch andere Eigenschaften hat, außer der, Kräfte zu übermitteln, ist dann nur schwer zu verstehen.

Im Grunde herrscht hier eine Unsitte, die wir Lehrer doch sonst mit so viel Einsatz bekämpfen: dass man physikalische Größe und physikalisches System verwechselt. „An der Feder hängt eine Masse“ dürfen unsere Schüler nicht sagen. Aber einen Satz wie „Zwischen den Kondensatorplatten befindet sich ein Feld *E*“ kann man in den besten Physikbüchern finden.

Kaum besser ist es, wenn man das Feld einführt als Raum, in dem Kräfte auf geladene Körper wirken. Auf dieselbe Art könnte man versuchen, jemandem zu erklären, was Luft ist. Auch Luft ist Raum, in dem Kräfte wirken. Und als Maß für die Luft würde man zum Beispiel den Druck p einführen. Man würde dann etwa formulieren: „Die Luft p zwischen den Wänden des Behälters …“

Noch einmal kurz unsere Empfehlung an die Lehrkraft: Man verwechsle nicht die Einführung des Feldbegriffs mit der Definition der Feldstärke.

2. Der Feldstoff

In einem Punkt waren wir bei der Entwicklung des Mittelstufenkurses inkonsequent: Wenn das Wort „Feld“ der Name eines physikalischen Systems ist – genauer: eines ausgedehnten Gebildes –, so braucht man einen weiteren Namen für den Stoff, aus dem das Gebilde besteht. Es war uns damals kein passender Name eingefallen, und wir haben versucht, das Problem zu umgehen. Im Grunde ist das aber so, als wollte man jemandem (einem Marsmenschen zum Beispiel) erklären, was ein See ist, ohne das Wort „Wasser“ zu benutzen. Wir haben uns daher schließlich entschlossen, das etwas farblose Wort „Feldstoff“ einzuführen. Beim Schreiben des Textes und vor allem beim Unterrichten hat sich dies als eine regelrechte Erlösung erwiesen. Tatsächlich haben verkrampfte und schwer verständliche Formulierungen oft als Ursache, dass man etwas, das man im Kopf hat, nicht aussprechen kann, weil das passende Wort fehlt.

3. Mechanische Spannungen im Feld

Dem Feld musste Substanz gegeben werden. Es musste über Eigenschaften des Feldes gesprochen werden, die sich nicht nur an seinen Rändern äußern, dort, wo es an den materiellen Körpern hängt. Wenn ein Feld Kräfte vermittelt, so muss es, wie auch jedes materielle Gebilde, das Kräfte vermittelt, selbst unter mechanischer Spannung stehen. Diese Spannungen sind seit der Erfindung des Feldes bekannt und seit Maxwell ist die funktionale Abhängigkeit von der Feldstärke bekannt. Trotzdem werden diese Spannungen in den Lehrbüchern recht stiefmütterlich behandelt, gelegentlich sogar als „fiktive“ Spannungen bezeichnet.

4. Kräfte und Kraftgesetze

Die Kräfte, die durch Felder vermittelt werden, bzw. Impulsströme, die durch Felder fließen, finden ihren mathematischen Ausdruck in drei sehr unterschiedlichen Typen von Gesetzen. Wir erläutern sie am Beispiel des elektrischen Feldes.

Im Coulomb'schen Gesetz

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \qquad (1)$$

treten nur zwei Ladungen auf, eine Feldstärke kommt nicht vor.

In der Beziehung

$$\vec{F} = Q_1 \cdot \vec{E}_2 \qquad (2)$$

kommt nur noch eine Ladung Q_1 vor. Die andere Ladung oder die anderen Ladungen werden durch die Feldstärke $\vec{E}_2$ vertreten. In dem Ausdruck

$$|\vec{F}| = A \cdot \frac{\varepsilon_0}{2} |\vec{E}| \qquad (3)$$

schließlich gibt es nur noch eine Feldstärke.

Mit allen drei Beziehungen kann man dieselbe Kraft beschreiben. Die Zweckmäßigkeit jeder der Beziehungen ist nun aber ganz unterschiedlich, und zwar zum einen hinsichtlich der Art des Problems, das gelöst werden soll, und zum anderen hinsichtlich der Rolle, die sie im begrifflichen Aufbau der Physik spielen.

Zunächst zum ersten Punkt: Je nach Symmetrie des Problems eignet sich die eine oder andere der Beziehungen besonders gut zur Berechnung von $\vec{F}$. Das Coulomb-Gesetz ist zweifellos geeignet, wenn man es mit zwei Punktladungen zu tun hat. Auch Gleichung (2) ist in diesem Fall noch brauchbar. Die Kraft mit Gleichung (3) zu berechnen, erfordert dagegen eine recht umständliche Integration. Gleichung (2) ist besonders geeignet, wenn sich eine Punktladung in einem Feld befindet, das ohne die Punktladung eine einfache Feldstärkeverteilung hat, etwa in einem homogenen Feld. Sowohl Gleichung (1), als auch Gleichung (3) würden in diesem Fall eine Integration erfordern. Gleichung (3) schließlich ist für die Impulsstrom- (Kraft-) Berechnung besonders geeignet, wenn das *resultierende*

Feld eine einfache Struktur hat. Ein Beispiel ist das homogene Feld eines Kondensators.

Jedes der Gesetze hat, von diesem praktischen Standpunkt aus gesehen, seine Existenzberechtigung. Etwas anders fällt das Urteil aus, wenn es um die Einführung der Impulsströme in Feldern (der Kraftwirkung von Feldern) geht.

Mit dem Coulomb-Gesetz zu beginnen ist sicher ungeschickt, da es eine Fernwirkungsinterpretation der Kräfte nahe legt. Das Medium in der Umgebung der geladenen Körper tritt darin gar nicht in Erscheinung. Das zweite Gesetz, das ja besonders gern zur Einführung der Feldstärke herangezogen wird, ist, unserer Meinung nach, Ursache für manche Unklarheit im Zusammenhang mit dem Feldbegriff. Wenn man davon spricht, dass sich ein Körper mit der Ladung Q_1 im Feld der Feldstärke $\vec{E}_2$ befindet, so sagt man im Grunde nicht die Wahrheit, denn sobald sich der Körper dort befindet, ist die Feldstärke nicht mehr $\vec{E}_2$, sondern sie wird durch die Ladung des Körpers, manchmal erheblich, verändert.

Wir stellen deshalb im vorliegenden Kurs die Druck- und Zugspannungen im Feld, die durch Gleichung (3) beschrieben werden, in den Vordergrund. So kommt die Idee der Nahewirkung am klarsten zum Ausdruck, und so wird die Vorstellung vom Feld als einem eigenständigen System am besten gefördert. Es wird eine Sprache benutzt, die einer sehr konkreten Anschauung vom Feld entspricht. So wird etwa nahegelegt zu sagen, dass das Feld an einem geladenen Körper zieht, statt der sonst üblichen, etwas spröden Aussage, der geladene Körper erfahre im Feld eine Kraft.

5. Die Einführung der Feldstärke

Der Absicht, das Feld als ernst zu nehmendes physikalisches System einzuführen, steht die übliche Einführung der Feldstärken im Wege: der elektrischen über $F = Q \cdot E$ und der magnetischen über $F = Q \cdot v \cdot B$.

Beide Gleichungen halten einen geradezu davon ab, das tatsächlich vorhandene Feld zu betrachten, denn die Feldstärke, die in diese Beziehungen einzusetzen ist, ist ja die des Feldes ohne den „Probekörper". Wenn man etwas misst, glaubt man doch etwas wirklich Vorhandenes zu messen. Das ist aber hier nicht der Fall. Es handelt sich dabei nicht um die bekannte Erscheinung, dass der Messwert durch den Messvorgang gestört wird, und dass man diese Störung durch geeignete Wahl des Messinstruments beliebig klein machen kann: Das Voltmeter muss einen hinreichend großen Innenwiderstand, das Thermometer eine hinreichend kleine Wärmekapazität haben usw. Das Verfahren funktioniert ja auch dann exakt, wenn die Ladung des Probekörpers beliebig groß ist (Influenzwirkungen seien ausgeschlossen). Wir betonen daher, dass eine solche Gleichung nicht mehr ist als eines von mehreren Verfahren zur Bestimmung der Feldstärke.

6. Das „eigentliche" Feld

Dass man recht oft physikalische Größe und physikalisches System verwechselt, zeigt sich deutlich, wenn man die Diskussionen darüber verfolgt, welche der beiden Größen H oder B die fundamentalere ist. Die Autoren der meisten Bücher entscheiden sich heute für B. Dass dies für die Behandlung der Magnetostatik ungeschickt ist, diskutieren wir später. Im Augenblick interessiert uns die Art der Begründung. Es wird argumentiert, B (oder bei wenigen Autoren H) sei das *eigentliche* Feld oder das *fundamentale* Feld, und das andere sei nur eine „Hilfsgröße". Solche Argumente gehören nicht in die Physik. Weder B noch H *ist* das magnetische Feld. Beides sind Größen, mit denen man das Feld beschreibt. Und solche Größen gibt es zahlreiche andere: das magnetische Vektorpotenzial, das skalare magnetische Potenzial, die Energiedichte, die mechanische Spannung, und schließlich kann man beliebig viele andere, neue Größen konstruieren. Keine dieser Größen *ist* das Feld. Selbstverständlich ist es eine sinnvolle Frage, welche dieser Größen für die Beschreibung der gerade interessierenden Phänomene zweckmäßig ist. Dabei stellt sich heraus, dass für unterschiedliche Phänomene unterschiedliche Größen die geeigneten sind. Man muss also einen Kompromiss finden. Verwendet man zu wenige Größen, so wird die Beschreibung mancher Vorgänge schwerfällig. Verwendet man zu viele, so wird die Beschreibung zu komplex.

7. Symmetrien in der Elektrodynamik

Die Elektrodynamik enthält mehrere innere Symmetrien oder Analogien. Symmetrie bedeutet hier, dass man, ausgehend von einer gültigen Beziehung zwischen physikalischen Größen, durch rein formales Ersetzen der Größen wieder eine gültige Beziehung erhält.

Im Folgenden sind für drei dieser Symmetrien die wichtigsten Größen gegenübergestellt:

1.

elektrische Feldstärke $\vec{E}$	magnetische Feldstärke $\vec{H}$
elektrisches Potenzial ϕ	magnetisches Potenzial ϕ_m
elektrische Ladung Q	magnetische Ladung Q_m
elektrische Flussdichte $\vec{D}$	magnetische Flussdichte $\vec{B}$
elektrische Feldkonstante ε_0	magnetische Feldkonstante μ_0

2.

elektrische Feldstärke $\vec{E}$	magnetische Flussdichte $\vec{B}$
elektrisches Potenzial φ	magnetisches Vektorpotenzial $\vec{A}$
elektrische Ladung Q	elektrische Stromstärke I
elektrische Feldkonstante ε_0	Kehrwert der magnetischen Feldkonstante $1/\mu_0$

3.

elektrische Spannung U	elektrische Stromstärke I
elektrische Ladung Q	magnetischer Fluss Φ
Kapazität C	Induktivität L
elektrische Feldstärke $\vec{E}$	magnetische Feldstärke $\vec{H}$

Das Ausnutzen von Symmetrien und Analogien trägt zur Ökonomie des Lernens bei und ist daher sicher ein gutes Verfahren. Es birgt jedoch Gefahren, die man besonders gut anhand der Strukturen der Elektrodynamik sieht.

So stehen die Symmetrien Nummer 1 und Nummer 2 in Konkurrenz zueinander, und man sollte sich hüten, im Schulunterricht beide zu benutzen. Man muss sich zwischen ihnen entscheiden. Heute schwören die meisten Lehrer und Autoren auf die zweite. Wir werden im Folgenden erklären, warum wir die erste vorziehen.

Ein anderes Problem im Zusammenhang mit Analogien und Symmetrien ist dies: Behandelt man die Symmetrie in aller Konsequenz, so wird die Darstellung zwar ästhetischer und man glaubt vielleicht, dass man nur so das Lernökonomiepotenzial richtig ausschöpft. Tatsächlich kann es aber leicht passieren, dass daraus eine etwas weltfremde Darstellung der Natur resultiert.

Man sieht das deutlich an der Symmetrie Nummer 1: Entschließt man sich, beim elektrischen Feld gleich zu Anfang das elektrische Potenzial einzuführen, so müsste man, um der Symmetrie Genüge zu tun, beim magnetischen Feld mit dem magnetischen Skalarpotenzial beginnen. Nun sind zwar elektrische Potenzialdifferenzen bequem messbar, magnetische dagegen nicht.

8. Was gehört in die Elektrodynamik der Schule?

Die in einem gängigen Oberstufenbuch abgehandelte Elektrodynamik reicht wahrscheinlich aus, um das Bachelor-Examen des Physikstudiums zu bestehen. Sie geht unserer Meinung nach über das hinaus, was man in einer allgemein bildenden Schule lernen sollte, und was man von einem Gymnasiasten erwarten kann.

Diese Behauptung steht durchaus nicht im Widerspruch zu den Klagen der Universitäten, die Abiturienten seien zu schlecht auf das Studium vorbereitet.

Dass sich die Elektrodynamik im Unterricht so breit gemacht hat, hat sicher mehrere Ursachen. Eine Elementarisierung scheint zwangsläufig zu einer rein qualitativen Mittelstufen-Elektrodynamik zu führen. Wenn man überhaupt quantitative Betrachtungen anstellen will, muss man die ganze Maxwell-Theorie behandeln. Jeder Stein, den man herausnimmt, führt dazu, dass das ganze Gebäude einstürzt.

Wenn man daran festhält, dass die Schüler diejenigen Probleme lösen können sollen, die heute unsere typischen Abituraufgaben darstellen, dann ist das Einsparpotenzial in der Tat gering.

Wir würden gern empfehlen, von diesen Lernzielen etwas abzurücken. Die Berechnung der Flugbahn von geladenen Teilchen im Massenspektrometer ist sicher kein wichtiges Allgemeinbildungsziel. Die einzige Rechtfertigung, solche Fragen zu behandeln, wäre, dass man daran andere fundamentale Einsichten erwirbt. Dass das der Fall ist, kann man bezweifeln. Es trifft wohl ohnehin für jeden Physikunterricht zu, dass man die physikalischen Probleme löst, die man lösen kann, und nicht die, die man lösen möchte. Da wir versucht haben, auf die Anforderungen des Abiturs Rücksicht zu nehmen, ist auch die vorliegende Elektrodynamik breiter geraten, als es uns lieb ist.

So sind die Weglassungen, die wir uns geleistet haben, eher ein schlechter Kompromiss. Die Kürzungen bringen nicht viel.

Hätten wir völlige Freiheit beim Entwurf des Kurses gehabt, so hätten wir uns darauf konzentriert, das elektromagnetische Feld vorzustellen als eines der beiden Grundbestandteile der Welt, nämlich Feld und Materie. Wir hätten die Behandlung des elektromagnetischen Feldes nicht auf seine mechanischen Wirkungen beschränkt, sondern genauso wie man es mit der Materie tut, die thermischen und chemischen Eigenschaften stärker in den Vordergrund gestellt.

B

Bemerkungen zu den einzelnen Abschnitten

1. Das elektrische Feld

1.2 Das elektrische Potenzial

Wir empfehlen, das elektrische Potenzial gleichzeitig mit der elektrischen Spannung einzuführen. Dies erleichtert das Verständnis der elektrischen Spannung und bringt auch Vorteile bei der Behandlung des elektrischen Feldes: Das Feld wird mit Hilfe einer Größe beschrieben, die den Schülern bereits vertraut ist.

1.9 Ladung und Ladungsträger

Es wird betont, dass zwischen der *physikalischen Größe* „elektrische Ladung" und dem *physikalischen System* „Ladungsträger" zu unterscheiden ist. Es kommt sonst nur allzu leicht dazu, die elektrische Ladung und die Elektronen miteinander zu identifizieren. Elektronen, Ionen und andere Teilchen sind nicht nur Träger elektrischer Ladung. Sie tragen auch andere (mengenartige) physikalische Größen: Masse, Stoffmenge, Drehimpuls, Impuls, Entropie etc. So „trägt" ein freies Elektron

die elektrische Ladung	$Q = e = -1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C,
die Masse	$m = m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg,
den Drehimpuls	$L = h/4\pi = 0{,}527 \cdot 10^{-34}$ Js,
die Stoffmenge	$n = 1/N_A = 1{,}66 \cdot 10^{-24}$ mol.

Die Werte von Impuls und Entropie hängen vom Zustand ab, in dem sich das Elektron befindet.

1.13 Die elektrische Feldstärke

Die Gleichung $\vec{E} = \vec{F}/Q$ ist die erste Gleichung im Unterricht, in der die elektrische Feldstärke auftritt. Sie erscheint damit als Definitionsgleichung der Feldstärke. Sie soll aber nicht das Vehikel sein, über das man sich eine Anschauung vom Feld bildet. Der der Gleichung vorangehende Lehrsatz interpretiert den Betrag der Feldstärke nicht als Maß für die Kraft auf einen Probekörper, sondern als Maß für das, was auch ohne den Probekörper vorhanden ist. Und unter der Richtung des Feldstärkevektors stellen wir uns nicht die Richtung der Kraft auf den Probekörper vor, sondern die Zugrichtung des Feldes ohne Probekörper.

1.14 Grafische Darstellung elektrischer Felder

1. Unsere Anschauungen werden durch Bilder geprägt. Wenn man, wie es üblich ist, Felder vorzugsweise mit Hilfe von Feldlinien visualisiert, entsteht eine Vorstellung vom Feld, die durch die Eigenschaften von durchgehenden Linien bestimmt ist. Wir haben die Erfahrung gemacht, dass Physikstudenten – etwa in Prüfungen – das Wort Feldlinien benutzen, wenn sie von dem System sprechen, das in der Physik „Feld“ genannt wird. Die grafische Darstellung wird mit dem dargestellten Gegenstand identifiziert. Dass dies gemacht wird, wollen wir keineswegs kritisieren. Es ist ja gerade unser Ziel, mit Hilfe der grafischen Darstellung eine Anschauung zu erzeugen. Im Falle der Feldlinienbilder entsteht aber ein Bild, das zu bestimmten Fehlschlüssen verleitet. Insbesondere unterstützt das Bild zwar, dass das Feld, dort wo es an einem geladenen Körper endet, an dem Körper zieht. Die Querrichtung kommt dagegen schlechter weg. Der Druck quer zu den Feldlinien scheint weniger Realität zu haben.

Es gibt noch andere Gründe, dass Feldlinienbilder täuschen. Wir wollen uns eine Vorstellung davon machen, „wie viel Feld“ sich an einer Stelle innerhalb eines kleinen Raumelements befindet. Ein vernünftiges Maß hierfür ist die Energiedichte, d. h., bis auf einen konstanten Faktor das Quadrat der Feldstärke (genauso wie man als Maß für die Dichte der Materie das Quadrat der Wellenfunktion betrachtet und nicht die Wellenfunktion selbst).

Betrachten wir nun etwa das elektrische Feld einer geladenen Kugel. Die Energiedichte nimmt mit der 4. Potenz des Abstands vom Kugelmittelpunkt ab. Ein dreidimensionales Feldlinienbild suggeriert durch die Liniendichte eine Abnahme mit der 2. Potenz, die zweidimensionale Projektion sogar mit der 1. Potenz. Es entsteht der falsche Eindruck, das Feld reiche sehr weit in den Raum hinaus. Wir benutzen daher im Unterricht gern Darstellungen, in denen das Feld durch eine Grautönung angedeutet wird, die sich auf einen recht engen Bereich in der Umgebung der geladenen Körper beschränkt.

2. Wir möchten vor einigen Fehlschlüssen warnen, die demjenigen unterlaufen können, der die Physik gut kennt, der aber noch keine Übung im Umgang mit Feldlinien und Feldflächen hat.

Die Feldflächen zeigen die *Richtung* der Druckspannung an; sie sind aber keineswegs Isobaren, also Orte konstanten Drucks.

Wir betrachten eine elektrisch geladene Kugel. Das Feld zieht an der Oberfläche nach außen. Woran hält sich das Feld selbst fest? Da die Feldlinien radial nach außen, „ins Unendliche“ laufen, könnte man vermuten, auch die Zugspannung werde ins Unendliche abgeleitet. (Das Unendliche muss ja für vieles herhalten.) Dies würde erfordern, dass die Zugspannung mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Sie nimmt aber mit der 4. Potenz der Entfernung ab, genauso wie die Energiedichte. Tatsächlich und glücklicherweise reicht das Feld nicht so weit. Wie das Feder-und-Ring-Modell im Schülertext zeigt, hält sich das Feld an sich selbst fest: Der Zug in radialer Richtung hat einen Druck quer zu dieser Richtung zur Folge.

3. Im Unterricht benutzen wir gern die Bezeichnungen homogen und isotrop, und wir diskutieren Beispiele für homogene und isotrope Medien. So kann eine Temperaturverteilung homogen und isotrop sein. Ein Stück gemasertes Holz kann homogen sein, ohne isotrop zu sein. Die elektrischen Felder erscheinen auf recht natürliche Art als ein „Material“, das nicht isotrop ist.

4. An der Tafel und in den Heften werden viele Bilder mit Feldlinien und Feldflächen gezeichnet. Wir machen es uns zur Regel, dass die Feldlinien immer in einer Farbe, die Feldflächen in einer anderen gezeichnet werden.

1.21 Flächen konstanten Potenzials

1. Ein zentraler Versuch in unserem Zugang zum Feld ist das Ausmessen von Äquipotenzialflächen in Wasser, d. h. einer schlecht leitenden Flüssigkeit, in dem man eine Sonde bewegt, die an ein Voltmeter angeschlossen ist. Es ist uns wichtig, dass das Potenzial nicht dadurch definiert wird, dass man eine „Punktladung in einem Feld“ bewegt, die Energie misst, die man zum Verschieben der Ladung braucht und durch die Ladung dividiert. Hier wäre man wieder in der Situation, dass man das Potenzial in dem Feld misst, das man ohne die Punktladung hätte.

2. Es sei noch kurz erläutert, aus welchem Grunde und unter welchen Bedingungen das Messverfahren überhaupt funktioniert. Im stationären Zustand gilt für das Wasser überall

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

wobei $\vec{j}$ die elektrische Stromdichte ist.

Nun ist der Zusammenhang zwischen Stromdichte und elektrischer Feldstärke $\vec{E}$

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$$

Hier ist σ die elektrische Leitfähigkeit. Eingesetzt in die vorige Gleichung gilt demnach:

$$\mathrm{div}\,(\sigma \cdot \vec{E}) = 0$$

Wenn σ ortsunabhängig ist, kann man es vor den Divergenz-Operator ziehen;

$$\sigma \cdot \mathrm{div}\,\vec{E} = 0$$

Daraus folgt

$$\mathrm{div}\,\vec{E} = 0$$

und das ist die Bestimmungsgleichung für die elektrostatische Anordnung ohne Wasser. Die Bedingung dafür, dass die Potenzialverteilung im Wasser dieselbe ist wie die im rein elektrostatischen Fall, ist also: σ muss ortsunabhängig sein. Man findet leicht Beispiele, die zeigen, dass man durch eine ortsabhängige Leitfähigkeit die ursprüngliche elektrostatische Potenzialverteilung verzerrt.

1.23 Die Energie des elektrischen Feldes

Die Schüler haben möglicherweise im Mathematikunterricht das Integrieren gelernt. Ist das der Fall, so kann die Energieformel auf eine etwas elegantere Art hergeleitet werden.

1.27 Wie man elektrisch geladene Teilchen mit Energie lädt – Elektronenstrahlen

1. Die Potenzialdifferenz $\phi_2 - \phi_1$ in der Formel $dE = (\phi_2 - \phi_1) \cdot dQ$ ist die des Feldes ohne den geladenen Probekörper. Die traditionelle Sprechweise ist der Fernwirkungsmechanik entlehnt, in der die potenzielle Energie und auch das Potenzial dem Probekörper zugeschrieben wird. Nach der Maxwell'schen Elektrodynamik ist das Potenzial aber eine Größe des Feldes, in unserem Fall: die des Feldes ohne die Probeladung.

2. Wir hätten gern einen besseren Namen für die so genannten Teilchenbeschleuniger oder Collider benutzt. Leider sind aber keine passenderen Namen gebräuchlich, und wir konnten uns nicht entschließen, einen neuen Namen vorzuschlagen. Man benutzt diese Maschinen, um Teilchen mit Impuls zu laden. Der Name Beschleuniger trifft die Sache schon lange nicht mehr, denn bei den heutigen Maschinen haben die Teilchen schon am Eingang Lichtgeschwindigkeit. Sie können gar nicht mehr beschleunigt werden. Das Kollidieren ist zwar ein wichtiger Vorgang, aber er stellt das Experiment dar, das man mit den Teilchen macht, nachdem sie mit Impuls geladen worden sind.

2. Das magnetische Feld

2.1 Magnetische Ladung und magnetisches Feld

Die Wege der geschichtlichen Entwicklung sind manchmal merkwürdig. Oft überleben Konzepte, die nicht gebraucht werden, über Jahrhunderte. Gelegentlich verschwinden gute Konzepte auf Grund eines Missverständnisses. Ein Beispiel hierfür ist die magnetische Ladung. Das Argument gegen sie lautet, es gebe sie gar nicht, denn, so heißt es, es gibt keine magnetischen Monopole. Aber schon die Formulierung ist missverständlich. Man sollte besser sagen: Es gibt keine magnetisch geladenen Teilchen. Dann wird gleich klar, dass nicht folgt, dass es keine magnetische Ladung gibt. Dass es keine magnetisch geladenen Teilchen gibt, ist eine Beobachtung. Unsere Welt ist wohl so gebaut. Es könnte allerdings sein, dass solche Teilchen eines Tages noch entdeckt werden. Ob es aber eine physikalische Größe „magnetische Ladung" gibt oder nicht, hängt nur davon ab, ob wir sie definieren und ihre Werte durch Messungen bestimmen können. Wie ältere Bücher der Elektrodynamik lehren, ist die Definition ganz einfach. Die magnetische Ladung an der Oberfläche eines Magneten lässt sich in völliger Analogie zur „gebundenen" elektrischen Ladung an der Oberfläche eines polarisierten Dielektrikums einführen.

Die Frage ist nicht, ob es magnetische Ladung gibt oder nicht, sondern ob ihre Einführung zweckmäßig ist. Diese Frage ist aber klar mit „ja" zu beantworten. Welche Lücke ohne sie entstanden ist, sieht man daran, auf wie umständliche und ungenaue Art man magnetische Pole zu beschreiben pflegt. Positive und negative Werte der magnetischen Ladung werden durch die Bezeichnungen Nord- und Südpol umschrieben. Die einfache Tatsache, dass die magnetische Gesamtladung eines Körpers immer null ist, kann nur durch die umständliche und ungenaue Beschreibung von Experimenten geschehen, in denen sich diese Tatsache äußert, etwa, dass beim Durchbrechen eines Stabmagneten neue Pole entstehen.

2.2 Die Magnetisierung

Die Magnetisierung erscheint gewöhnlich als eine Größe für Fortgeschrittene. Wir meinen, dass sie im Gegenteil diejenige Größe ist, mit der man am leichtesten einen ersten Zugang zum Magnetismus bekommt. In der Elektrostatik geht man von Ladungsverteilungen aus, die man als gegeben annimmt. Entsprechend kann man in der

Magnetostatik von den als gegeben angenommenen Magnetpolen ausgehen. Dass es keine Körper gibt, die eine magnetische Nettoladung tragen, mag man als einen Mangel empfinden. Es hat aber den großen Vorteil, dass dadurch der Zusammenhang zwischen Magnetisierung und magnetischer Ladungsverteilung einfach wird: Magnetische Ladung sitzt dort, wo Magnetisierungslinien beginnen oder enden. Diese Tatsache hat sich für den Unterricht des Magnetismus als sehr hilfreich erwiesen. Von den drei Größen $\vec{H}$,$\vec{B}$ und $\vec{M}$ ist sie diejenige, deren Verteilung man am leichtesten angeben kann.

2.6 Weichmagnetische Materialien

Die Sätze über weichmagnetische Materialien treffen nur zu, solange das Material nicht in den Bereich der Sättigung kommt. Diese Tatsache muss nicht unbedingt erwähnt werden – genauso wenig wie die, dass das Hooke'sche Gesetz für eine Feder nicht mehr gilt, wenn man die Feder überdehnt. Wenn die Sättigung einsetzt, ist das Material eben nicht mehr weichmagnetisch.

2.7 Elektrischer Strom und magnetisches Feld

Wir haben formuliert, dass die Feldflächen des magnetischen Feldes auf Strömen enden. Das bedeutet nicht, dass das Feld nur auf die Oberfläche eines Drahtes drückt. Das magnetische Feld reicht bekanntlich in den Draht hinein, die Feldstärke nimmt von der Drahtoberfläche zur Mitte linear ab. Das Feld greift also am ganzen Drahtvolumen an, ähnlich wie etwa ein elektrisches Feld an einer homogen geladenen Kugel oder das Gravitationsfeld an einem massiven Körper.

2.12 Magnetische Feldstärke, Magnetisierung und Flussdichte

Der algebraische Umgang mit der Magnetisierung ist, was den Schulunterricht betrifft, nicht sehr ergiebig. Die Definition als messbare Größe haben wir deshalb knapp gehalten. Gebraucht wurde sie für den Übergang von der Feldstärke zur Flussdichte.

2.13 Die Spule – die Induktivität

Die Induktivität wird oft im Zusammenhang mit der Induktion eingeführt, nämlich über die Gleichung

$$U = L\frac{dI}{dt} \ .$$

Ihr Name weist darauf hin, dass sie etwas mit Induktionsvorgängen zu tun hat. Wenn man so verfährt, erscheint sie allerdings als eine wenig intuitive Größe. Es ist, als würde man die Kapazität einführen über die analoge Gleichung

$$I = C\frac{dU}{dt}$$

Sie ist zweifellos richtig, aber ein Verständnis für die Kapazität vermittelt sie erst, nachdem man einmal um die Ecke gedacht hat.

So wie es einfacher ist, sich die Kapazität über

$$Q = C \cdot U$$

zu veranschaulichen, bekommt man eine einfachere Vorstellung von der Induktivität, wenn man sie über

$$\Phi = \frac{1}{n}L \cdot I$$

definiert. Wie die Kapazität uns sagt, ob man bei einer gegebenen Spannung viel oder wenig Ladung auf einem Kondensator unterbringt, sagt uns die Induktivität, ob man mit einem gegebenen Strom einen großen oder kleinen magnetischen Fluss hervorbringt.

2.15 Die „Entladekurve“ der Spule

Hier wird die Erscheinung diskutiert, die oft unter dem Stichwort „Selbstinduktion“ läuft. Nun ist der Begriff Selbstinduktion eine etwas ungeschickte Schöpfung. Er legt nahe, und das wird oft explizit gesagt, dass in der Spule ein elektrisches Feld oder eine elektrische Spannung entsteht – was nicht korrekt ist. Zum Integral auf der linken Seite der Gleichung

$$\oint \vec{E}\, d\vec{r} = -N\dot{\Phi}$$

tragen nur die Wegstücke außerhalb der Spule bei.

Wie ungeschickt es ist, von einer Selbstinduktion zu sprechen, kann man sich klar machen, indem man den entsprechenden Begriff für den Kondensator konstruiert.

2.16 Wie das magnetische Feld auf einen elektrischen Strom drückt

In diesem Abschnitt wird das erarbeitet, was man gewöhnlich die Lorentzkraft nennt. Dass wir dieser so wichtigen Formel ihren traditionellen Namen verweigern, müssen wir rechtfertigen. Ein Bestimmungswort vor dem Namen der physikalischen Größe Kraft suggeriert, es handele sich um eine Kraft besonderer Art, einer Kraft, die nur auftritt, wenn sich ein elektrisch geladener Körper durch ein magnetisches Feld bewegt. Dies zu betonen ist aber gar nicht unsere Absicht. Im Rahmen unserer Darstellung ist diese Kraft nichts weiter als eine Anwendung einer allgemeineren Aussage, die wir vorher schon kennen gelernt haben: Sie resultiert aus den Druckspannungen, die in jedem magnetischen Feld herrschen. Wenn man dieser Kraft einen eigenen Namen gibt, nur weil das Feld zum Teil durch einen sich bewegenden Körper zustande kommt, so könnte man vielen anderen, bislang namenlosen Kräften Namen geben. Statt der einfachen Einsicht, dass es sich bei allen Kräften um dasselbe handelt, entsteht der Eindruck einer großen Komplexität.

3. Das Zusammenspiel von elektrischen und magnetischen Feldern

3.2 Die Induktion

1. Die Diskussion von Bezugssystemwechseln ist lehrreich, meist aber auch kompliziert. Ein Beispiel sind Drehbewegungen in der Mechanik. Die Beschreibung von Bewegungen im rotierenden Bezugssystem ist interessant, aber verwickelt. Es treten Kräfte auf, die es im nichtrotierenden System nicht gibt. Ähnlich steht es mit den Phänomenen der Elektrodynamik. Bei Bezugssystemwechsel treten neue Felder auf: Aus magnetischen Feldern entstehen elektrische und aus elektrischen magnetische. Was in einem Bezugssystem durch die erste Maxwell'sche Gleichung beschrieben wird, findet im anderen seine Erklärung durch die zweite, und umgekehrt. Wenn man eine Erscheinung nicht nur in einem, sondern in beliebigen Bezugssystemen diskutiert, so wird die notwendige Unterrichtszeit erheblich zunehmen. Wir haben uns in Anbetracht des ständigen Zeitmangels dazu entschlossen, Fragen, die mit dem Wechsel des Bezugssystems zusammenhängen, weitgehend auszuklammern. Sie werden gebündelt im Mechanikband angesprochen. Wir glauben, dass bei der Behandlung der Induktion dadurch kein Defizit entsteht, zumal die integrale Formulierung des Induktionsgesetzes (oder der zweiten Maxwell'schen Gleichung) das Bezugssystemproblem auf elegante Art verschleiert.

2. Im Oberstufenunterricht wird im Rahmen der Elektrodynamik gewöhnlich die Lenz'sche Regel (in manchen Büchern „Lenz'sches Gesetz" genannt) formuliert. Außerdem versucht man zu zeigen, wie das Minuszeichen im Induktionsgesetz aus der Lenz'schen Regel folgt. Das Argument ist etwa so: In eine Spule, die an eine Batterie angeschlossen ist, schiebt man einen Eisenkern hinein. Man beobachtet, dass die elektrische Stromstärke für kurze Zeit abnimmt. Man sagt nun, $d\Phi/dt$ sei positiv, die induzierte Spannung negativ, also gehört ein Minuszeichen ins Induktionsgesetz. An diesen Aussagen ist zwar nichts falsch. Nur enthält die Schlusskette eine Lücke: Woher kennt man das Vorzeichen der Flussänderung?

Wir haben sowohl von der Formulierung der Lenz'schen Regel als auch von einem Minuszeichen im Induktionsgesetz abgesehen.

Wenn man ein Vorzeichen in einer Gleichung erklärt, so sollte die Aussage, die das Vorzeichen macht, anhand der Gleichung selbst überprüfbar sein. Das Minuszeichen im Induktionsgesetz besagt, dass die induzierte Spannung das entgegengesetzte Vorzeichen wie die Änderung des magnetischen Flusses hat. Um diese Aussage zu prüfen, muss man wissen, wie man Flussänderung und elektrische Spannung vorzeichenrichtig messen kann.

Man stelle sich vor, die folgende Flussänderung werde realisiert: Der $\vec{B}$-Vektor weist in die positive *x*-Richtung und sein Betrag, und damit seine *x*-Komponente, nimmt zu. Welches Vorzeichen hat $d\Phi/dt$? Bleibt das Vorzeichen dasselbe, wenn man das Koordinatensystem um 180° dreht, sodass der $\vec{B}$-Vektor in die negative *x*-Richtung weist? Dieser Fluss werde nun von einem Leiter umschlungen, der in der *y*-*z*-Ebene liegt und durch ein Voltmeter unterbrochen ist. Wie sieht man es dem Voltmeter an, ob die induzierte Spannung positiv oder negativ ist?

Da die Schüler nicht lernen, diese Fragen zu beantworten, ist für sie das mühsam erarbeitete Minuszeichen im Induktionsgesetz wertlos.

Statt der Lenz'schen Regel führen wir später die „Linke-Faust-Regel" ein, deren Formulierung analog zu bekannten „Rechte-Faust-Regel" ist.

3.5 Der Transformator

Die beiden Bedingungen

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

und

$$n_1 \cdot I_1 = n_2 \cdot I_2$$

gelten gleichzeitig nur in einem bestimmten Bereich der Belastung des Transformators. Man sieht das besonders deutlich, wenn man die beiden Extremfälle

Leerlauf: $R_{\text{Last}} = \infty$
Kurzschluss: $R_{\text{Last}} = 0$

betrachtet. Im Leerlauf kann die zweite Beziehung nicht gelten, denn $I_2 = 0$ A, aber $I_1 \neq 0$ A. Im Kurzschluss ist $U_1 \neq 0$ V, aber $U_2 = 0$ V, also gilt die erste nicht. Auch die Gleichheit der Energieströme P_1 und P_2 gilt nur in diesem Bereich von R_{Last}. Die Herleitung der Grenzen dieses Bereichs ist für die Schule zu aufwändig. Da man einen Transformator normalerweise in diesem Bereich betreibt, beschränken wir uns auf die vereinfachte Beschreibung.

3.7 Supraleiter

Die Eigenschaften der Supraleiter, die wir im Schülertext diskutieren, sind die von Supraleitern in der Meißner-Phase. Die Shubnikow-Phase ist komplizierter. Sie steht zur Meißner-Phase etwa in demselben Verhältnis wie ein Körper, der sich unter der Wirkung eines Druckes inelastisch verformt, zu einem, der sich elastisch verformt. Man beachte, dass Hochtemperatur-Supraleiter typische Shubnikow-Supraleiter sind. Für sie gilt nicht, dass das magnetische Feld nicht in sie eindringen kann.

3.9 Elektromagnetische Wellen

1. Es ist eine Tradition, die elektromagnetischen Wellen über den elektrischen Schwingkreis einzuführen. Wir haben uns diesem Vorgehen aus mehreren Gründen nicht angeschlossen.

Die Erklärung zielt von vornherein auf das komplizierte Feld eines strahlenden Dipols ab. Man hat es hier nicht nur mit einer verwickelten Feldverteilung zu tun, sondern auch noch mit der schwierigen Unterscheidung zwischen Nah- und Fernfeld. Beides müsste aber nicht sein. Es gibt viel einfachere Wellen, und um die Prinzipien der Wellenausbreitung zu erklären, ziehen wir es vor, uns auf diese einfachen Fälle zu beschränken: auf den ebenen Rechteckpuls und die ebene Sinuswelle.

2. Bei der traditionellen Einführung der elektromagnetischen Wellen beginnt man mit dem Erzeugungsverfahren. Nun ist die Erzeugungsmethode schwerer zu verstehen als die Welle selbst. Es ist so, als würde man die Erklärung einer Schallwelle damit beginnen, die Funktionsweise etwa der Klarinette zu erläutern. Die Klarinette ist ein Resonator, aus dem ständig ein kleiner Anteil des Energiestroms, der im Resonator hin- und herfließt, ausgekoppelt und emittiert wird. Auch der elektrische Dipol ist ein Resonator, und auch hier wird nur ein kleiner Bruchteil der Energie, die ständig in die Antenne hinein und aus ihr herausfließt, emittiert.

3. Wir legen im Unterricht viel Wert auf die Darstellung der elektromagnetischen Wellen im dreidimensionalen Ortsraum, siehe die Abbildungen 3.29 und 3.35 im Schülertext. Eine sonst sehr beliebte Darstellung ist die, nach rechts eine Ortskoordinate z aufzutragen, nämlich die der Laufrichtung der Welle, nach oben etwa die x-Komponente der elektrischen Feldstärke und nach vorn die y-Komponente der magnetischen Feldstärke. Dieses Bild ist jedem Physikstudenten geläufig. Allerdings ist es etwas tückisch und unserer Meinung nach für Schüler zu schwierig. So stellt sich die Frage: Hat die vertikale Achse eine andere Dimension (die einer elektrischen Feldstärke) als die nach vorn weisende Achse (magnetische Feldstärke)? Oder sind in der Ebene quer zur z-Richtung elektrische und magnetische Feldstärke beide übereinander als vektorielle Größen aufgetragen? Das größte Problem ist aber wohl, dass die Lernenden das ganze Schaubild als dreidimensionalen Ortsraum missverstehen. Studenten, die nur diese Darstellung kennen gelernt haben, sind bei der Frage, wie denn die Feldlinien in einer ebenen elektromagnetischen Welle verlaufen, völlig ratlos.

C

Versuche

1. Das elektrische Feld

1.1 Wiederholung: der elektrische Stromkreis

Es werden einfache elektrische Stromkreise aufgebaut, mit verschiedenen Energiequellen (Batterie, Dynamo, Peltierelement, Solarzelle) und mit verschiedenen Energieempfängern (Lampen, Motor).

1.3 Der Potenzialnullpunkt

1. Man erdet einmal den Plus- und einmal den Minuskontakt einer Batterie und misst die Spannung zwischen dem jeweils anderen Kontakt und der Erde.

2. Man misst die Spannung zwischen der Erdbuchse des Lehrertisches und der Wasserleitung.

3. Man verbindet einen Anschluss einer Batterie mit einem auf recht hohem Potenzial liegenden Anschluss eines Netzgeräts und misst das Potenzial (= Spannung gegen Erde) des anderen Kontakts der Batterie.

1.4 Elektrotechnische Probleme

Man prüft durch Nachmessen die Aussagen, die man als Lösungen einiger Aufgaben erhält. Man zeigt insbesondere, dass das Potenzial des rechten Anschlusses der Lampe in Abb. 1.18 beim Ausschalten von 0 V auf den Wert des anderen Lampenanschlusses ansteigt.

1.5 Kennlinien – der elektrische Widerstand

Man nimmt I-U-Kennlinien verschiedener Bauteile auf: Lampe, Elektromotor, Halbleiterdiode, langer Draht, technischer Widerstand.

1.6 Der Widerstand von Volt- und Amperemeter

Man misst die Stärke des Stroms, der durch ein Voltmeter fließt und die Spannung, die an einem Amperemeter liegt.

1.10 Ladungsstrom und Ladungsträgerstrom

1. Demonstration der Bewegung von Ionen, die elektrische Ladung transportieren. Man beobachtet, wie sich die Grenze zwischen violetten Permanganat-Ionen und farblosen Nitrat-Ionen verschiebt.

2. Ein Kügelchen, das zwischen den Platten des Demonstrationskondensators hin- und herpendelt, transportiert sowohl auf dem Hin- als auf dem Rückweg elektrische Ladung von der positiven zur negativen Platte.

1.11 Die Anhäufung von elektrischer Ladung

1. Man füllt einen Kolbenprober einmal mit Luft, einmal mit Wasser und zeigt, dass sich das Wasser nicht zusammendrücken lässt, wohl aber die Luft.

2. Es wird versucht, elektrische Ladung in einem Kabel anzuhäufen, zunächst, indem man das Kabel mit dem einen Anschluss einer Batterie oder eines gewöhnlichen Niederspannungsnetzgeräts verbindet, während der andere Anschluss der Batterie bzw. des Netzgeräts geerdet ist. Man versucht, die Ladung mit einem Glühlämpchen nachzuweisen. Man erhöht die Spannung, verbessert die Isolation und nimmt ein empfindlicheres Nachweisinstrument – ein Glimmlämpchen – und kann schließlich eine minimale Ladungsanhäufung erkennen.

1.12 Das elektrische Feld

Die bekannten Experimente zu Anziehung und Abstoßung geladener Körper und zur Influenz.

1.14 Die grafische Darstellung elektrischer Felder

Sichtbarmachen der Feldlinien mit den bekannten Methoden.

1.19 Druck und Zug im elektrischen Feld

1. Man stellt selbstgebaute mechanische Modelle aus Federn, Stäben und Ringen vor, etwa wie in Abb. 1.67 und 1.69 im Schülertext.

2. Die Anziehung zwischen den Platten eines Kondensators wird gezeigt. Man nimmt Kondensatorplatten aus der Schulsammlung. Eine Platte wird fest und elektrisch isoliert aufgehängt, Abb. 1. Die andere, geerdete wird auf einer Analysenwaage oder an einem empfindlichen Kraftmesser befestigt.

3. In zwei Drahtringen wird je eine Seifenlamelle aufgespannt. Die Ringe stehen sich in dichtem Abstand gegenüber und sind elektrisch isoliert. Man legt eine Spannung zwischen den Ringen an. Die Lamellen wölben sich aufeinander zu.

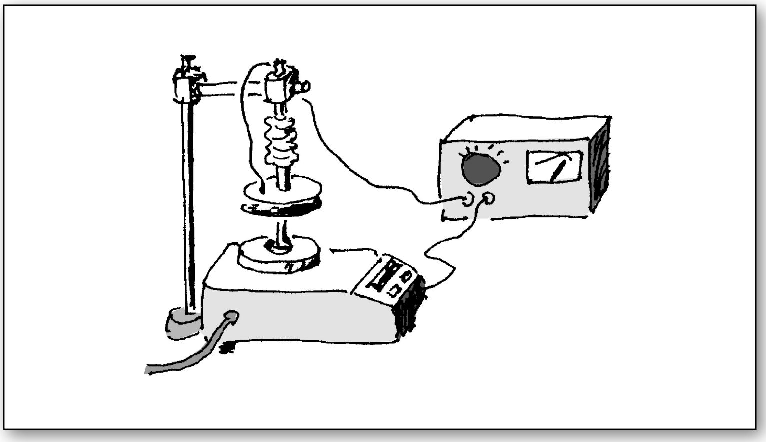

Abb. 1
Der Wert, den die Analysenwaage anzeigt, ändert sich, wenn man den Kondensator lädt.

1.20 Der Kondensator – die Kapazität

1. Man zeigt die Proportionalität zwischen Spannung und Ladung, wie im Schülertext beschrieben. Falls man kein geeignetes stromstabilisiertes Netzgerät hat, kann man jede andere Quelle in eine stromstabilisierte verwandeln, indem man einen Widerstand in Reihe schaltet, der groß ist gegen den Widerstand des Verbraucherstromkreises. Die elektrische Stromstärke hängt dann nur noch von diesem Serienwiderstand ab. Man braucht eine recht hohe Spannung, denn ihr größter Teil fällt an diesem Widerstand ab.

2. Wenn man in der Sammlung über ein Ladungsmessgerät verfügt, bestimmt man den *U*-*Q*-Zusammenhang mit dem großen Demonstrationskondensator der Sammlung. Über die geometrischen Abmessungen des Kondensators bestimmt man die elektrische Feldkonstante.

3. Man macht die bekannten Versuche zur Abhängigkeit der Kapazität von Plattenfläche und Plattenabstand.

4. Man lädt den großen Demonstrationskondensator mit einer Hochspannung bei kleinem Plattenabstand. Am Kondensator ist ein Hochspannungsmessgerät angeschlossen. Man trennt den Kondensator vom Netzgerät und zieht die Platten auseinander. Die Spannung steigt an.

5. Der Demonstrationskondensator mit veränderlichem Plattenabstand wird mit Hilfe eines Netzgeräts geladen und dann über ein Glimmlämpchen entladen. Der Plattenabstand ist zunächst gering. Die Spannung wird so gewählt, dass das Glimmlämpchen nicht zündet. In einem zweiten Versuch werden die Platten nach dem Laden auseinander gezogen. Dabei nimmt die Spannung zu, so dass das Glimmlämpchen zündet.

1.21 Flächen konstanten Potenzials

1. In einem kleinen, flachen, mit Wasser gefüllten Glasbehälter werden zwei Elektroden aufgestellt. Zwischen die Elektroden wird eine niedrige elektrische Spannung gelegt. Der eine Anschluss eines Voltmeters wird mit einer der beiden Elektroden verbunden, der andere mit einer Drahtspitze, die man im Wasser herumbewegt. Man sucht Stellen konstanten Potenzials. Das Experiment steht auf dem Overheadprojektor; das Bild entsteht auf der Wandtafel. So kann man an der Tafel Linien konstanten Potenzials zeichnen. Es ist zu beachten, dass der Innenwiderstand des Voltmeters groß gegen den Widerstand des Wassers sein muss.

2. An die Tafel werden Äquipotenzialflächen (als Linien) gezeichnet. Man markiert einen Punkt P und hält die Mitte eines kurzen Lineals (etwa 20 cm) an diesen Punkt. Die Enden des Lineals definieren eine Potenzialdifferenz. Man dreht nun das Lineal um P und stellt fest, dass die Potenzialdifferenz zwischen null Volt und einem Maximalwert variiert. Wenn die Potenzialdifferenz maximal ist, weist das Lineal in die Richtung der Feldlinien.

1.23 Die Energie des elektrischen Feldes

1. Man macht verschiedene Experimente mit einem Kondensator großer Kapazität. Der Kondensator sollte mindestens 10 Millifarad haben, noch besser wären 100 Millifarad oder 1 Farad. Man lädt den Kondensator mit einem Netzgerät und entlädt ihn über ein Glühlämpchen.

Man verbindet den Kondensator mit einem Motor, der auch als Dynamo arbeiten kann. (Der Motor sollte einen guten Wirkungsgrad haben.) Man dreht die Motorwelle mit der Hand in eine bestimmte Richtung und lässt sie dann los. Sie dreht sich in dieselbe Richtung weiter. Man kann den Motor auch kurz anhalten. Er läuft sofort wieder an.

2. Ein Kondensator mit einer Kapazität von etwa 80 µF und einer maximal zulässigen Spannung von 300 V wird auf etwa 250 V geladen. Man entlädt ihn, indem man seine Anschlüsse mit einem Schraubenzieher überbrückt. Beim Entladen gibt es einen lauten Knall. Achtung! Die Anschlüsse des geladenen Kondensators nicht berühren.

1.24 Entladekurve des Kondensators

Man nimmt die Entladekurve auf für verschiedene Widerstände und Kapazitäten. Man trägt die Kurven auch halblogarithmisch auf und entnimmt den Graphen die Abklingzeit.

1.25 Felder und elektrische Leiter

1. Durch einen langen, dünnen Draht lässt man einen starken elektrischen Strom fließen. (Der Draht kann als eine der Zuleitungen einer Glühlampe geschaltet werden.) Man misst die elektrische Potenzialdifferenz zwischen Anfang und Ende des Drahtes. Man unterbricht nun den Stromkreis. Die Potenzialdifferenz geht auf null zurück.

2. Ein Drahtkäfig wird elektrisch aufgeladen. Innen und außerhalb auf dem Käfig befindet sich je ein Büschel aus Seidenpapierstreifen. Die Streifen des Büschels außerhalb spreizen sich voneinander weg, das Büschel innen verändert sich nicht.

3. Man experimentiert mit Faraday-Becher und Elektrometer.

1.26 Die elektrische Stromdichte – das lokale Ohm'sche Gesetz

Die bekannten Versuche zur Abhängigkeit des Widerstandes eines Drahtes von Länge, Querschnittsfläche und Material. Man bestimmt die elektrische Leitfähigkeit (den Kehrwert des spezifischen Widerstandes).

1.27 Wie man elektrisch geladene Teilchen mit Energie lädt

Man experimentiert mit der Braun'schen Röhre.

2. Das magnetische Feld

2.1 Magnetische Ladung und magnetisches Feld

1. Man zeigt Anziehung und Abstoßung zwischen Magnetpolen.

2. Man weist das magnetische Feld der Erde nach.

Bei einigen der folgenden Versuche ist darauf zu achten, dass manche kommerziellen „Hufeisenmagneten" für Schulversuche nicht durchgehend aus hartmagnetischem Material bestehen. Diese Magneten haben frei verschiebbare Pole.

3. Man zeigt, dass sich die Polladungen von zwei gleichartigen Hufeisenmagneten kompensieren: Der „Ringmagnet", der entsteht, zieht einen eisernen Gegenstand nicht mehr an. Wenn die Polladungen der beiden Magneten nicht exakt gleich sind oder die Pole nicht genau auf die Stirnflächen der Magneten begrenzt sind, kompensieren sich die Ladungen nicht vollständig. Daher nimmt man einen recht schweren eisernen Körper, etwa einen Transformatorkern. Leichtere Gegenstände werden an den zusammengesetzten Magneten eventuell hängenbleiben.

4. Ein sehr einfacher, aber suggestiver Versuch: Schüler versuchen, die Pole gleichen Vorzeichens von zwei starken Magneten aufeinander zu drücken. Man spürt, dass sich zwischen den Magneten etwas befindet.

2.2 Die Magnetisierung

1. Man bricht eine magnetisierte Stricknadel durch, um zu zeigen, dass neue Pole entstehen. Man setzt Stabmagneten in Längsrichtung zusammen, um zu zeigen, dass Pole verschwinden. Sehr gut geeignet sind zum Beispiel lange (6 cm) „Supermagnete".

2. Man untersucht die Polverteilung verschiedener Magnete, insbesondere von Keramikmagneten, die mehr als nur zwei Pole haben, etwa mit Hilfe von Magnetpol-Sensorfolie.

2.3 Die magnetische Feldstärke

Vorstellen des Magnetfeldmessgeräts. Da das Gerät wahrscheinlich zunächst in Tesla geeicht ist, muss man die Ergebnisse in $\vec{H}$-Werte umrechnen. Man kann auch eine A/m-Skala auf dem Gerät anbringen. Man misst Feldstärken in der Umgebung von Dauermagneten.

2.6 Weichmagnetische Materialien

1. Man magnetisiert eine Stricknadel.

2. Man experimentiert mit einem Dauermagneten und mit Weicheisenteilen, z.B. Nägeln.

3. Man überbrückt die Pole eines Hufeisenmagneten mit einem Weicheisenstab. Der resultierende „Ring“ zieht keine (schweren) Weicheisenkörper mehr an.

2.7 Elektrischer Strom und magnetisches Feld

1. Zwei dicht nebeneinander liegende oder hängende Drähte, durch die ein elektrischer Strom fließt, ziehen sich an oder stoßen sich ab, je nach Stromrichtung. Um eine große Stromstärke zu erhalten, nimmt man als Quelle am besten eine Autobatterie. (Der Stromkreis wird nur für sehr kurze Zeit geschlossen.)

2. Man untersucht die Richtung der magnetischen Feldstärke in der Umgebung eines Drahtes, in dem ein elektrischer Strom fließt, mit dem Magnetfeldmessgerät.

3. Man zeigt, dass man durch Aufwickeln eines langen Drahtes zu einer Spule bei gleichbleibender Stromstärke ein dichteres magnetisches Feld erzeugen kann.

4. Man untersucht das Feld einer Zylinderspule mit Eisenfeilspänen, Kompassnadeln und dem Magnetfeldmessgerät.

2.8 Berechnung von magnetischen Feldstärken

Man prüft die Feldstärkewerte, die man für Spulen und in die Umgebung von geraden Leitern berechnet hat, indem man mit dem Magnetfeldmessgerät nachmisst.

2.9 Die Messung der magnetischen Ladung

Ein Stabmagnet wird an einen empfindlichen Kraftmesser gehängt. Der untere Pol befindet sich im Innern einer Spule (vom Transformator-Bausatz, 500 Windungen). Als Kraftmesser eignet sich ein Sensor, der an den Rechner angeschlossen wird, oder eine Analysenwaage, die an ihrer Unterseite einen Haken für Kraftmessungen hat.

Man verändert die Stärke des elektrischen Stroms in der Spule, etwa zwischen 0 A und 2,5 A, und misst die Kraft (Impulsstromstärke). Der Nullpunkt des Kraftmessers wird so eingestellt, dass der Beitrag des Gewichts-Impulsstroms, für den wir uns nicht interessieren, wegkompensiert wird. Aus der elektrischen Stromstärke berechnet man die magnetische Feldstärke in der Spule. Man erhält so den Zusammenhang zwischen F und H und damit die magnetische Ladung, die am unteren Pol des Magneten sitzt.

Eine Variante des Versuchs sieht so aus: Der Magnet hängt, wie vorher, am Kraftsensor, die Spule selbst liegt aber wieder auf einer empfindlichen Waage. Man misst so ein und denselben Impulsstrom an zwei Stellen. Die Ergebnisse sind natürlich gleich.

2.10 Druck und Zug im magnetischen Feld

Man braucht eine große, flexible Spule: Spulendurchmesser etwa 10 cm, Länge etwa 40 cm; die Windungen berühren sich nicht gegenseitig. Die Spule ähnelt einer sehr weichen elastischen Feder. Der Drahtdurchmesser ist so, dass die Spule einen elektrischen Strom großer Stromstärke verträgt. Die Spule wird waagrecht aufgehängt, Abb. 2. Man verbindet nun ihre Anschlüsse für kurze Zeit mit den Anschlüssen einer Autobatterie. Das entstehende Magnetfeld drückt die Spule in Längsrichtung kräftig zusammen.

2.11 Elektromagneten

1. Neben einer Spule, durch die ein elektrischer Strom fließt, etwa in der Spulenachse, befindet sich die Sonde des Magnetfeldmessgeräts. In die Spule wird ein Weicheisenkern hineingeschoben. Der Feldstärkewert, den das Messgerät anzeigt, steigt stark an.

2. Man zeigt, dass sich bei Umkehren der Stromrichtung in einem Elektromagneten die Pole am Eisenkern vertauschen.

3. Man zeigt die Wechselwirkungen zwischen

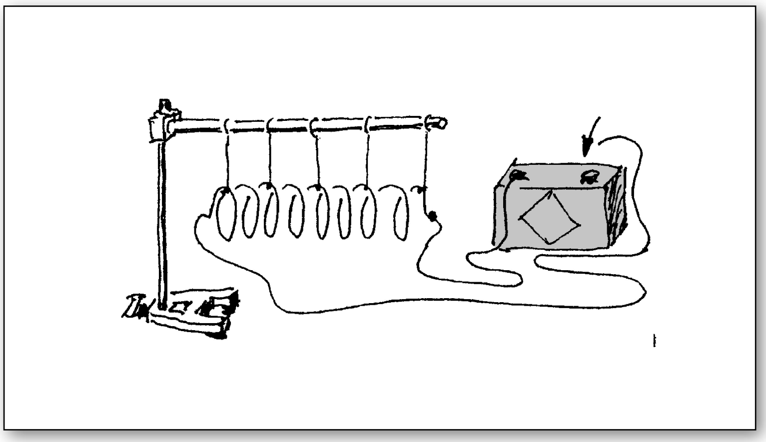

Abb. 2
Man berührt mit den Zuleitungen der Spule kurz die Anschlüsse der Batterie. Die Spule zieht sich schlagartig zusammen.

– einem Elektromagneten und einem Dauermagneten;
– einem Elektromagneten und einem Stück Weicheisen;
– zwei Elektromagneten.

Man beachte, dass die Pole eines Elektromagneten durch einen anderen Elektromagneten oder durch einen Dauermagneten verschoben werden, so dass man statt einer evtl. erwarteten Abstoßung Anziehung beobachtet.

4. Man baut einen Elektromagneten auf, der einen schmalen Spalt hat, der also einen fast geschlossenen Ring bildet. Man misst die magnetische Feldstärke im Spalt und zeigt, dass sie umgekehrt proportional zur Spaltbreite ist. Die elektrische Stromstärke darf nicht zu groß sein, damit das Weicheisen nicht in die Sättigung gelangt.

5. Man zeigt Modelle, die evtl. selbst aufgebaut werden, für verschiedene Geräte, in denen Elektromagneten verwendet werden, z.B. elektrische Klingel, Amperemeter, Sicherungsautomat.

6. Man experimentiert mit einem selbst aufgebauten Elektromotor oder mit dem Elektromotormodell der Sammlung.

7. Man zeigt handelsübliche Elektromotoren, evtl. aus alten Elektrogeräten.

2.14 Die Energie des magnetischen Feldes

Eine Spule (500 Windungen, 2,5 Ω, auf geschlossenem Eisenkern), ein Lämpchen (3 V, 0,2 A) und eine 1,5-V-Zelle werden parallel geschaltet, Abb. 3. Durch die Spule fließt ein elektrischer Strom von etwa 0,5 A. Durch das Lämpchen fließt ein viel geringerer Strom, es leuchtet nur schwach. Trennt man die Zelle ab, so leuchtet das Lämpchen kurz auf. Die Energie des magnetischen Feldes der Spule wird über das Lämpchen entladen.

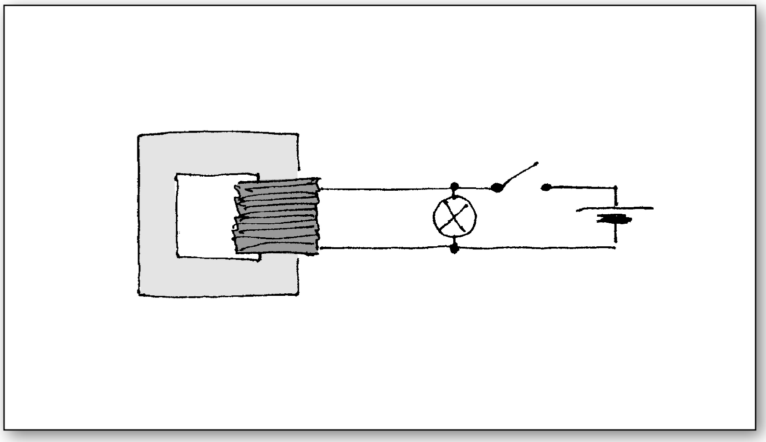

Abb. 3
Öffnet man den Schalter, so leuchtet das Lämpchen kurz auf.

2.15 „Entladekurve" der Spule

Man nimmt für den Versuch von 2.14 die Spannung als Funktion der Zeit auf.

2.16 Wie das magnetische Feld auf einen elektrischen Strom drückt

1. Der bekannte Versuch aus der Sammlung: Eine Seite eines rahmenförmigen Leiters, der an einem empfindlichen Kraftmesser oder an einem Kraftsensor hängt, durchquert das homogene Magnetfeld einer Spule (die mit einem Schlitz versehen ist). Durch den Leiter fließt ein elektrischer Strom. Man misst die Kraft auf den Leiter.

2. Man experimentiert mit der Elektronenstrahlröhre. Der Strahl wird durch Anlegen einer Spannung an die Ablenkplatten gekrümmt.

3. Der bekannte Versuch zur *e/m*-Bestimmung mit dem Fadenstrahlrohr. Man zeigt auch, dass die Bahn der Elektronen spiralförmig wird, wenn ihre Anfangsgeschwindigkeit eine Komponente parallel zur magnetischen Feldstärke hat.

3. Das Zusammenspiel von elektrischen und magnetischen Feldern

3.2 Die Induktion

1. An eine Spule wird ein Voltmeter angeschlossen. Man führt einen Magneten in die Spule ein und zieht ihn wieder heraus. Man schließt die Spule über ein Amperemeter kurz und wiederholt das Experiment.

2. Man wiederholt das Experiment mit Spulen verschiedener Windungszahlen und mit verschieden starken Magneten.

3. Man schließt statt eines Voltmeters ein Oszilloskop an und bewegt den Magneten sehr schnell.

4. Statt einen Dauermagneten zu bewegen, schaltet man einen Elektromagneten ein und aus.

5. Die Spule wird auf einen Eisenkern geschoben. An die Enden des Eisenkerns werden weitere Weicheisenstücke angelegt, so dass ein „U" entsteht. Man kann das „U" sehr lang machen, indem man mehrere Weicheisenteile an jede Seite anlegt. Der Versuch wird dann noch eindrucksvoller. Man bewegt einen Dauermagneten zwischen den beiden Enden des verlängerten Weicheisenkerns. Es wird eine Spannung induziert, obwohl das Feld des Dauermagneten kaum noch bis zur Spule reicht.

6. Zwei Spulen (10 000 und 23 000 Windungen) werden auf einen Eisenkern gesteckt. An die Spule mit 10 000 Windungen wird eine Sägezahnspannung sehr niedriger Frequenz (etwa 0,5 Hz, 6 V Spitzenspannung) gelegt. Die Sägezahnspannung und die in der zweiten Spule induzierte Spannung werden über ein Interface auf dem Computerbildschirm als Funktion der Zeit dargestellt. Als Messzeit wählt man etwa 8 s. Alternativ oder zusätzlich kann man die Sägezahnspannung von einem Analogvoltmeter anzeigen lassen. Man sieht, dass die induzierte Spannung konstant ist, solange die angelegte Spannung linear mit der Zeit wächst.

7. Man macht die bekannten Induktionsversuche mit den Geräten der Sammlung. Man zeigt, dass die induzierte Spannung proportional zur von magnetischem Fluss durchsetzten Fläche, sowie zur Windungszahl der Spule ist. Man zeigt, dass man die Flussänderung auch dadurch realisieren kann, dass man die Spule verschiebt oder dreht.

8. Man legt die Induktionsspule außen um die felderzeugende Spule herum (Abb. 3.9 im Schülertext) und zeigt, dass die induzierte Spannung unabhängig vom Radius der Induktionsspule ist. Das Experiment ist besonders eindrucksvoll, wenn man als Induktionsspule einfach ein Kabel nimmt, das man um die felderzeugende Spule einmal, zweimal usw. herumschlingt. Die Form dieser „Kabelspule" hat keinen Einfluss auf die induzierte Spannung.

3.3 Der Generator

1. Eine kleine Induktionsspule wird im Zentrum eines Helmholtz-Spulenpaares gedreht (angetrieben von einem Elektromotor). Die induzierte Sinusspannung wird auf dem Computerbildschirm über der Zeit aufgetragen.

2. Man experimentiert mit dem Generatormodell aus der Schulsammlung.

3.4 Wechselspannung und Wechselstrom

1. Man misst die Spannung zwischen der Erdbuchse und jedem der beiden Kontakte der Steckdose.

2. Versuche mit dem Sinusgenerator:

Man braucht einen Sinusgenerator, der einen starken Energiestrom liefert und bis zu sehr niedrigen Frequenzen (~1 Hz) heruntergedreht werden kann.

Man schließt ein Lämpchen an und dreht die Frequenz, mit 1 Hz beginnend, langsam hoch. Solange die Frequenz noch niedrig ist, geht das Lämpchen periodisch an und aus. Bei höherer Frequenz kann es schließlich nicht mehr folgen.

3. Man betreibt ein Lämpchen mit einer Frequenz > 20 Hz und ein anderes, gleichartig gebautes, mit einer Gleichspannungsquelle. Man stellt die Gleichspannung so ein, dass beide Lämpchen gleich hell leuchten. Man vergleicht die Gleichspannung mit der Spitzenspannung des Sinusgenerators.

3.5 Der Transformator

1. Man zeigt die Gültigkeit der Beziehung

$U_1 / U_2 = n_1 / n_2$

2. Man zeigt mit einem möglichst guten Transformator, dass näherungsweise gilt

$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$

Man muss dazu den Transformator bei mittlerer Belastung betreiben.

3.6 Ein etwas merkwürdiger Generator – „magnetische Ströme“

1. Man lässt einen Magneten durch Rohre unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit fallen. Als Magnet eignet sich besonders gut ein stabförmiger „Supermagnet“.

3.7 Supraleiter

1. Man bringt einen Supraleiter über ein Magnetfeld mit „Delle“. Der Supraleiter bleibt in der Schwebe.

2. Man legt den „Supraleiter“ auf die Magneten, solange er noch normalleitend ist, und kühlt ihn erst dann ab. Er steigt von selbst nach oben.

3.9 Elektromagnetische Wellen

Man experimentiert mit dem Millimeter- oder Mikrometerwellensender aus der Schulsammlung.

D

Lösungen der Aufgaben

1. Das elektrische Feld

1.3 Der Potenzialnullpunkt

1. Punkt 1: 4,5 V, Punkt 2: 0 V, Punkt 3: –4,5 V

2. Punkt 1: 0 V, Punkt 2: –12 V, Punkt 3: 0 V

3. Voltmeter 1: 18 V, Voltmeter 2: 9 V, Voltmeter 3: 9 V

5. Stromkreise in Fahrrad, Auto, Flugzeug, Rakete, Satellit

1.4 Elektrotechnische Probleme

1. Im Uhrzeigersinn, beginnend mit dem geerdeten Leitungsabschnitt: 0 V; 4,5 V; 9 V; 5 V

2. Linke Lampe: 1,6 A, rechte Lampe: 0 A

3. Leitungsabschnitte A: –20 V; B: 0 V; D: 40 V.
Die Batterie erzeugt 60 V. Bei geöffnetem Schalter sind die Potenziale in den Punkten A bis D alle gleich 0 V.

4. (a) $\phi_P = 12$ V, $U_{L1} = 12$ V, $U_{L2} = 0$ V
(b) $\phi_P = 6$ V, $U_{L1} = 6$ V, $U_{L2} = 6$ V

Die Stromstärke in Lampe L1 ist größer, wenn der Schalter geschlossen ist, da dann die Spannung an L1 größer ist.

Die Stromstärke in L2 ist größer, wenn der Schalter offen ist. Bei geschlossenem Schalter ist die Stromstärke 0 A.

5. (a) $\phi_1 = 0$ V, $\phi_2 = 150$ V, $\phi_3 = \phi_4 = 75$ V
(b) $\phi_1 = \phi_4 = 0$ V, $\phi_2 = \phi_3 = 150$ V

Wenn der Schalter geöffnet ist, leuchtet nur noch die rechte Lampe.

1.5 Kennlinien – der elektrische Widerstand

1. $U = 20$ V
$I = 4$ mA

$$R = \frac{U}{I} = \frac{20\text{ V}}{0{,}004\text{ A}} = 5\text{ k}\Omega$$

2. $R = 2$ kΩ
$U = 120$ V

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120\text{ V}}{2000\ \Omega} = 60\text{ mA}$$

3. $R = 1\ \text{M}\Omega$
$I = 0{,}1\ \text{mA}$

$U = R \cdot I = 10^6\,\Omega \cdot 10^{-4}\,\text{A} = 100\ \text{V}$

4. $U = 35\ \text{V}$
$I = 5\ \text{A}$
$U_1 = 10\ \text{V}$

$$R_1 = \frac{U_1}{I} = \frac{10\ \text{V}}{5\ \text{A}} = 2\ \Omega$$

$$U_2 = U - U_1 = 35\ \text{V} - 10\ \text{V} = 25\ \text{V}$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I} = \frac{25\ \text{V}}{5\ \text{A}} = 5\ \Omega$$

5. $U = 12\ \text{V}$
$R_i = 100\ \Omega$

$\phi_{\text{oben}} = 12\ \text{V}$, $\phi_{\text{Mitte}} = 6\ \text{V}$, $\phi_{\text{unten}} = 0\ \text{V}$

$U_1 = U_2 = 6\ \text{V}$, $U_3 = 12\ \text{V}$

$$I_{1,2} = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{12\ \text{V}}{200\ \Omega} = 60\ \text{mA}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{12\ \text{V}}{100\ \Omega} = 120\ \text{mA}$$

$I_{\text{Batt}} = I_{1,2} + I_3 = 180\ \text{mA}$

6.

(a) $$R_{\text{gesamt}} = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_1 + I_2} = \frac{U}{\frac{U}{R} + \frac{U}{R}} = \frac{R}{2}$$

Gesamtwiderstand = halber Widerstand der Einzelwiderstände

(b) $$R_{\text{gesamt}} = \frac{U}{I} = \frac{U_1 + U_2}{I} = \frac{RI + RI}{I} = 2R$$

Gesamtwiderstand = doppelter Widerstand der Einzelwiderstände

Ähnliche Regeln gelten für die Federkonstante bei Parallel- und Hintereinanderkoppeln von Federn, allerdings umgekehrt (oder dieselben Regeln für den Kehrwert der Federkonstanten).

1.6 Der Widerstand von Volt- und Amperemeter

Volt- und Amperemeter sind falsch angeschlossen. Das Amperemeter schließt die Batterie kurz. Es könnte dabei kaputtgehen. Das Voltmeter blockiert den Stromkreis.

1.7 Die elektrische Leitfähigkeit

1. Querschnittsfläche: $A = 2\ \text{mm}^2$
Länge von Hin- und Rückleitung: $l = 100\ \text{m}$
Kupferdraht: $\sigma = 5{,}59 \cdot 10^7\ (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$

$$R = \frac{100\ \text{m}}{5{,}59 \cdot 10^7\ (\Omega\text{m})^{-1} \cdot 2 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^2} = 0{,}9\ \Omega$$

2.

$$\frac{l_1}{\sigma_1} = \frac{l_2}{\sigma_2}$$

$$l_1 = l_2 \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 1\ \text{m} \cdot \frac{5{,}59 \cdot 10^7}{10^{-13}} \approx 6 \cdot 10^{20}\text{m}$$

Der Draht reicht quer durch die Milchstraße.

3. Durch Erhöhen der Salzkonzentration

1.10 Ladungsstrom und Ladungsträgerstrom

1. Der elektrische Strom fließt nach rechts. Die Stromstärke ist 0,5 A + 0,3 A = 0,8 A.

2. $2\ \text{C}/(1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}) = 1{,}25 \cdot 10^{19}$

1.12 Das elektrische Feld

1. Bei der Berührung fließen negative Ladungsträger von B nach A, sodass B eine positive Nettoladung hat. Jetzt sind beide Kugeln positiv geladen, und das Feld drückt sie voneinander weg.

2. Man beobachtet die Anziehung und Abstoßung auch dann, wenn die geladenen Gegenstände aus einem nichtmagnetisierbaren Material, z.B. aus Aluminium, bestehen.

3. Bei der Berührung mit B lädt sich A auf mit Elektrizität von B. Daraufhin wird Kugel A von B weggedrückt, sodass sie C berührt. Hier entlädt sich A zunächst und lädt sich gleich darauf mit Elektrizität von C auf. Daraufhin drückt das Feld A wieder zurück zu B. Die Kugel A pendelt daher zwischen B und C hin und her.

1.13 Die elektrische Feldstärke

1. $F = Q \cdot \left|\vec{E}\right| = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{C} \cdot 80\,000\ \text{V/m} = 1{,}28 \cdot 10^{-19}\,\text{N}$

2. $\left|\vec{E}\right| = \dfrac{F}{Q} = \dfrac{0{,}02\ \text{N}}{10 \cdot 10^{-9}\,\text{C}} = 2 \cdot 10^{6}\ \text{V/m}$

1.15 Regeln für das Zeichnen elektrischer Felder

1. (orthogonal zu den Feldlinien)

2. (orthogonal zu den Feldflächen)

3. (Ladungen innerhalb der drei geschlossenen Feldflächen sowie innerhalb der ausgebuchteten Feldfläche links unten; Feldlinien orthogonal zu den Feldflächen)

1.16 Vier wichtige Felder

1. Die Felder unterscheiden sich gar nicht. Die Feldlinien müssen in beiden Fällen im Bereich der Kugel beginnen. Da das Feld ebenso wie die Kugel drehsymmetrisch ist, können die Feldlinien nur radial nach außen laufen. Die Feldflächen sind konzentrische Kugelflächen.

2. Sieht man vom Vorzeichen der Ladung und der Richtung der Feldlinien ab, so hat das Feld, ebenso wie die Ladung, zwei Spiegelachsen. Berücksichtigt man Ladungsvorzeichen und Feldlinienrichtung, so verwandelt sich die Spiegelung an der vertikalen Achse in eine „Spiegelung + Vorzeichenumkehr + Pfeilrichtungsumkehr".

3. Ladung und Feld haben dieselbe Symmetrie: eine vertikale und eine horizontale Spiegelachse durch das Zentrum der Abbildung.

1.17 Berechnung elektrischer Feldstärken

1. Für $r > R$ ist die Feldstärke überall gleich null.

2. In der Gleichung

$$F = Q \cdot \left|\vec{E}\right|$$

ist Q die Ladung eines Körpers A, und $\left|\vec{E}\right|$ die Feldstärke des Feldes, das sich am Ort von A befindet, solange A noch nicht dort ist, und die von der Ladung eines anderen Körpers B herrührt. Wir schreiben daher:

$$F = Q_{\text{A}} \cdot \left|\vec{E}_{\text{B}}\right|$$

In Gleichung

$$\left|\vec{E}(r)\right| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

ist Q die Ladung von Körper B und $\left|\vec{E}\right|$ die Stärke des Feldes, das diese Ladung um sich herum hat. Wir schreiben daher:

$$\left|\vec{E}_B(r)\right| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_B}{r^2}$$

Damit ergibt sich

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_A \cdot Q_B}{r^2}$$

Hier ist r der Abstand zwischen den geladenen Körpern A und B. Das analoge Gesetz aus der Mechanik ist das Newton'sche Gravitationsgesetz.

1.18 Mehrere geladene Körper – Vektoraddition

1. Siehe Abbildung 4

2. Obere Platte: Feldlinien treten aus der Platte vertikal nach oben und nach unten aus.
Untere Platte: Feldlinien münden in die Platte vertikal von oben und von unten ein.

Oberhalb der oberen und unterhalb der unteren Platte addieren sich die Feldstärken zu null; dort befindet sich also kein Feldstoff.

3.

A: Feldstärke null
B: Feldstärkevektor weist nach rechts unten (45°)
C: Feldstärkevektor weist senkrecht nach unten
D: Feldstärkevektor weist nach rechts oben (45°)

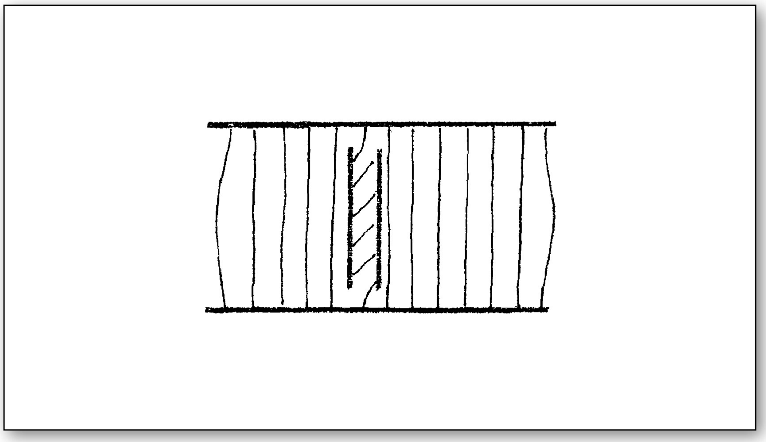

Abb. 4
Zu *1.18*, Aufgabe **1**

1.19 Druck und Zug im elektrischen Feld

1. Am bequemsten, indem man die senkrechte Mittelebene betrachtet: Hier herrscht in waagrechter Richtung reine Zugspannung. Es ist, als wäre der linke Teil der Abbildung (linke Kugel + linke Hälfte des Feldes) mit dem rechten (rechte Kugel + rechte Hälfte des Feldes) über gedehnte Federn verbunden.

Man kann auch eine der beiden Kugeln betrachten, etwa die linke. Hier zieht das Feld an allen Seiten der Kugel nach außen. Da die Feldstärke rechts der Kugel größer ist als links, resultiert ein Netto-Zug nach rechts.

2. Analog zu Aufgabe **1.** In der Mittelebene herrscht eine waagrechte Druckspannung. Das Feld zieht auf der linken Seite der linken Kugel stärker als auf der rechten.

3.

$$\left|\vec{E}\right| = \sqrt{\frac{2F}{\varepsilon_0 A}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}0025\ \text{N}}{8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \text{C/(V·m)} \cdot 0{,}24\ \text{m}^2}} = 4{,}85 \cdot 10^4\ \text{V/m}$$

4. Feldlinien radial, Feldflächen konzentrische Kreise

1.20 Der Kondensator – die Kapazität

1. $Q = I \cdot t = 20\ \mu\text{A} \cdot 10\ \text{ms} = 200\ \text{nC}$
$C = Q/U = 200\ \text{nC}/60\ \text{V} = 3{,}3\ \text{nF}$

2. $Q = C \cdot U = 16\ \mu\text{F} \cdot 10\ \text{V} = 160\ \mu\text{C}$

3. $d = \varepsilon_0 A/C$
$= 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \text{C/(V·m)} \cdot 0{,}5\ \text{m}^2/(10^{-6}\ \text{F})$
$= 4{,}4 \cdot 10^{-6}\ \text{m} = 4{,}4\ \mu\text{m}$

4. Zwei parallele Kondensatoren mit gleichem Plattenabstand und gleichem Plattenflächeninhalt können betrachtet werden als ein einziger Kondensator mit dem doppelten Plattenflächeninhalt. Daher ist die Gesamtkapazität gleich zweimal der Kapazität eines einzelnen Kondensators.

Die Gesamtkapazität von *n* parallelen Kondensatoren gleicher Kapazität ist gleich *n* mal der Kapazität eines einzelnen Kondensators.

5. Zwei in Reihe verbundene Kondensatoren mit gleichem Plattenabstand und gleichem Plattenflächeninhalt können betrachtet werden als ein einziger Kondensator mit dem doppelten Plattenabstand. Daher ist die Gesamtkapazität gleich der Hälfte der Kapazität eines einzelnen Kondensators.

Die Gesamtkapazität von n in Reihe verbundenen Kondensatoren gleicher Kapazität ist gleich dem n-ten Teil der Kapazität eines einzelnen Kondensators.

1.21 Flächen konstanten Potenzials

1.

$$\left|\vec{E}\right| = \frac{U}{d} = \frac{2000\ \text{V}}{0{,}5\ \text{cm}} = 400\,000\ \text{V/m}$$

2.

Punkt P: $\left|\vec{E}\right| = \dfrac{5\ \text{V}}{0{,}6\ \text{mm}} = 8300\ \text{V/m}$

Punkt Q: $\left|\vec{E}\right| = \dfrac{5\ \text{V}}{0{,}2\ \text{mm}} = 25\,000\ \text{V/m}$

1.22 Noch einmal der Kondensator

$C' = 3C$

(1) $Q = \text{const}$

$Q' = Q, U' = U/3, \left|\vec{E}'\right| = \left|\vec{E}\right|/3$

(2) $U = \text{const}$

$Q' = 3Q, U' = U, \left|\vec{E}'\right| = \left|\vec{E}\right|$

1.23 Die Energie des elektrischen Feldes

1.

(a) $Q = I \cdot t = 0{,}01\ \text{A} \cdot 8\ \text{s} = 0{,}08\ \text{C}$

(b) $E = \dfrac{Q^2}{2C} = \dfrac{0{,}08^2}{2 \cdot 16 \cdot 10^{-6}}\ \text{J} = 200\ \text{J}$

2.

$$E = \frac{CU^2}{2} = \frac{80 \cdot 10^{-6} \cdot 300^2}{2}\ \text{J} = 3{,}6\ \text{J}$$

$$\left|\vec{E}\right| = \frac{U}{d} = \frac{300\ \text{V}}{8 \cdot 10^{-6}\text{m}} = 3{,}75 \cdot 10^{7}\ \text{V/m}$$

$$\rho_E = \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \left|\vec{E}\right|^2$$
$$= \frac{8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \text{C/(V} \cdot \text{m)}}{2} \cdot (3{,}75 \cdot 10^{7}\ \text{V/m})^{\ 2}$$
$$= 6{,}23 \cdot 10^{3}\ \text{J/m}^3$$

3.

$$E = \frac{CU^2}{2} \Rightarrow C = \frac{2E}{U^2} = \frac{2 \cdot 1{,}6\ \text{J}}{10^8\ \text{V}^2} = 32\ \text{nF}$$

$$Q = C \cdot U = 32\ \text{nF} \cdot 10^4\ \text{V} = 320\ \mu\text{C}$$

4.

(a) $C = \varepsilon_0 \dfrac{A}{d} = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \text{C/(Vm)} \dfrac{2\pi \cdot 0{,}0245\ \text{m} \cdot 0{,}12\ \text{m}}{0{,}001\ \text{m}} = 0{,}163\ \text{nF}$

(b) $Q = C \cdot U = 0{,}163\ \text{nF} \cdot 2000\ \text{V} = 0{,}326\ \mu\text{C}$

(c) $E = \dfrac{CU^2}{2} = \dfrac{0{,}163\ \text{nF} \cdot (2000\ \text{V})^2}{2} = 0{,}326\ \text{mJ}$

(d) $\rho_E = \dfrac{E}{A \cdot d} = \dfrac{0{,}326\ \text{mJ}}{2\pi \cdot 0{,}0245\ \text{m} \cdot 0{,}12\ \text{m} \cdot 0{,}001\ \text{m}} = 17{,}6\ \text{J/m}^3$

5. Vergrößern des Plattenabstandes:

(a) $Q' = Q$, $C' = C/3$
Mit $E = Q^2/2C$ wird $E' = 3E$.

(b) $U' = U$, $C' = C/3$
Mit $E = U^2 \cdot C/2$ wird $E' = E/3$.

Vergrößern der Plattenfläche:

(a) $Q' = Q$, $C' = 3C$
Mit $E = Q^2/2C$ wird $E' = E/3$.

(b) $U' = U$, $C' = 3C$
Mit $E = U^2 \cdot C/2$ wird $E' = 3E$.

6.

vorher		nachher	
A	B	A	B
Q_0	0	$Q_0/2$	$Q_0/2$
U_0	0	$U_0/2$	$U_0/2$
$\lvert\vec{E}_0\rvert$	0	$\lvert\vec{E}_0\rvert/2$	$\lvert\vec{E}_0\rvert/2$
$\frac{C}{2}Q_0^2$	0	$\frac{C}{2}\frac{Q_0^2}{4}$	$\frac{C}{2}\frac{Q_0^2}{4}$

$$\underbrace{\frac{C}{2}\frac{Q_0^2}{4} \quad \frac{C}{2}\frac{Q_0^2}{4}}_{\frac{C}{2}\frac{Q_0^2}{2}}$$

Die Energie hat auf den halben Wert abgenommen. Mit ihr wurde unmittelbar nach dem Verbinden Entropie erzeugt. Ähnliche Erscheinungen in der Mechanik: inelastischer Stoß; das Verbinden von zwei Schwungrädern mit einer Rutschkupplung.

1.24 Entladekurve des Kondensators

1.

$$U + RC\frac{dU}{dt} = 0$$

Lösungsansatz:

$$U(t) = f \cdot t^2$$

$$\frac{dU}{dt} = 2ft$$

Einsetzen in die Differenzialgleichung:

$$ft^2 + 2RCft = 0 \quad \Rightarrow \quad t + 2RC = 0$$

Die „Gleichung“ stellt einen Widerspruch dar.

2.

Abstand Kugel–Tisch: $d \approx 0{,}1\ \text{m}$

Oberfläche der Kugel: $A \approx 5 \cdot 10^{-2}\ \text{m}^2$

$\varepsilon_0 \approx 10^{-11}\ \text{C/(Vm)}$

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \approx 10^{-11}\frac{5 \cdot 10^{-2}}{10^{-1}} = 5 \cdot 10^{-12}\ \text{F}$$

Länge des Stiels: $l \approx 0{,}1\,\text{m}$

Querschnittsfläche des Stiels: $A \approx 1\,\text{cm}^2 = 10^{-4}\ \text{m}^2$

Leitfähigkeit von Plexiglas: $\sigma \approx 10^{-13}\ (\Omega\text{m})^{-1}$

$$R = \frac{1}{\sigma}\frac{l}{A} \approx \frac{1}{10^{-13}}\frac{10^{-1}}{10^{-4}} = 10^{16}\ \Omega$$

$$\tau = R \cdot C = 10^{16}\ \Omega \cdot 5 \cdot 10^{-12}\ \text{F} = 5 \cdot 10^{4}\text{s}$$

Die Abklingzeit ist von der Größenordnung „Stunden".

1.25 Felder und elektrische Leiter

1. Die Feldflächen sind Querschnittsflächen des Drahtes. Ihr Abstand ist dort größer, wo die Querschnittsfläche des Drahtes größer ist.

2. Das Innere der Metallplatte ist feldfrei. In der Metallplatte herrscht Zugspannung orthogonal zur Plattenfläche.

3. siehe Abbildung 5

4. siehe Abbildung 6

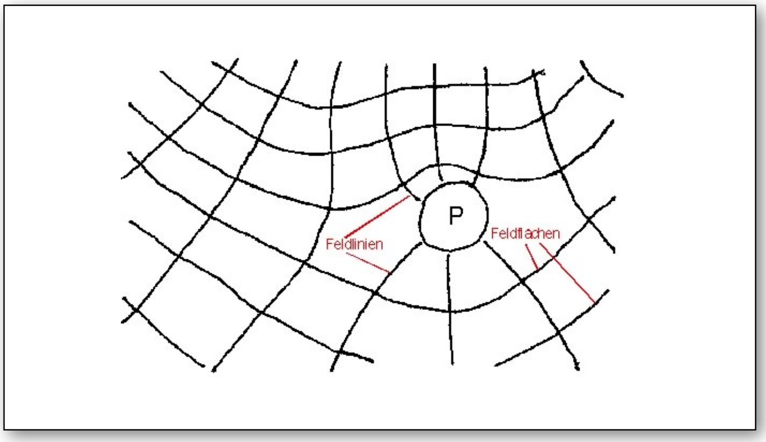

Abb. 5
Zu *1.25*, Aufgabe **3**

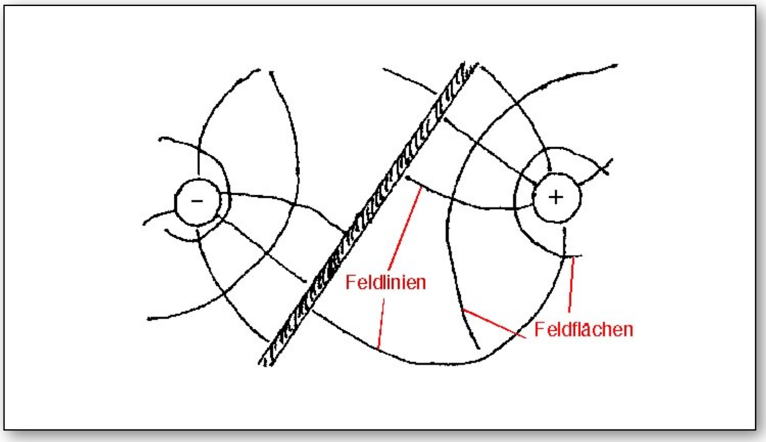

Abb. 6
Zu *1.25*, Aufgabe **4**

1.26 Die elektrische Stromdichte – das lokale Ohm'sche Gesetz

1.

$$\left|\vec{E}\right| = \frac{U}{d} = \frac{1{,}5\ \text{V}}{100\ \text{m}} = 0{,}015\ \text{V/m}$$

$$j = \sigma \cdot \left|\vec{E}\right| = 5{,}59 \cdot 10^{7} \Omega^{-1}\text{m}^{-1} \cdot 0{,}015\ \text{V/m}$$

$$= 8{,}38 \cdot 10^{5}\ \text{A/m}^{2}$$

$$I = j \cdot A = 8{,}38 \cdot 10^{5}\ \text{A/m}^{2} \cdot 10^{-6}\ \text{m}^{2} = 0{,}838\ \text{A}$$

2.

$$j = \frac{I}{A} = \frac{5\text{A}}{3 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^{2}} = 1{,}67 \cdot 10^{6}\ \text{A/m}^{2}$$

$$\left|\vec{E}\right| = \frac{j}{\sigma} = \frac{1{,}67 \cdot 10^{6}\ \text{A m}^{-2}}{5{,}59 \cdot 10^{7}\ \Omega^{-1}\text{m}^{-1}} = 0{,}03\ \text{V/m}$$

Kondensator: $\left|\vec{E}\right| = \frac{U}{d} = \frac{1000\ \text{V}}{0{,}005\ \text{m}} = 200\,000\ \text{V/m}$

3.

$$j = \frac{I}{A} = \frac{0{,}5\ \text{A}}{10^{-6}\ \text{m}^{2}} = 5 \cdot 10^{5}\ \text{A/m}^{2}$$

$$\left|\vec{E}_{\text{Cu}}\right| = \frac{j}{\sigma_{\text{Cu}}} = \frac{5 \cdot 10^{5}\ \text{A m}^{-2}}{5{,}59 \cdot 10^{7}\ \Omega^{-1}\text{m}^{-1}} = 0{,}0089\ \text{V/m}$$

$$\left|\vec{E}_{\text{Fe}}\right| = \frac{j}{\sigma_{\text{Fe}}} = \frac{5 \cdot 10^{5}\ \text{A m}^{-2}}{1{,}02 \cdot 10^{7}\ \Omega^{-1}\text{m}^{-1}} = 0{,}049\ \text{V/m}$$

$$U_{\text{Cu}} = \left|\vec{E}_{\text{Cu}}\right| \cdot d = 0{,}0089\ \text{V m}^{-1} \cdot 2\ \text{m} = 0{,}018\ \text{V}$$

$$U_{\text{Fe}} = \left|\vec{E}_{\text{Fe}}\right| \cdot d = 0{,}049\ \text{V m}^{-1} \cdot 1\ \text{m} = 0{,}049\ \text{V}$$

4. Die Stromdichte ist bei A geringer als bei B. Der Glühdraht wird bei B durchbrennen.

1.27 Wie man elektrisch geladene Teilchen mit Energie lädt – Elektronenstrahlen

1. $Q = 50 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C
$m = 10^{-5}$ kg
$h = 1000$ m
$U = \Delta\phi = 2 \cdot 10^{7}$ V

$E_{schwer} = m \cdot g \cdot h = 10^{-5}$ kg $\cdot$ 9,8 N/kg $\cdot$ 1000 m = 0,098 J

$E_{elektr} = \Delta\phi \cdot Q = 2 \cdot 10^{7}$ V $\cdot\ 50 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C $= 1{,}6 \cdot 10^{-10}$ J

Das Tröpfchen gibt nur einen sehr kleinen Teil der aus dem Schwerefeld gewonnenen Energie an das elektrische Feld ab. Der größte Teil geht bei der Reibung in die Entropieerzeugung.

2. $P = U \cdot I = 50\,000$ V $\cdot$ 50 µA = 2,5 W

3.

(a) $E = Q \cdot (\phi_2 - \phi_1) = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C $\cdot\ 1{,}2 \cdot 10^{6}$ V$= 1{,}92 \cdot 10^{-13}$ J

(b) $E = \dfrac{mv^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\dfrac{2E}{m}}$

Mit $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg wird

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.92 \cdot 10^{-13}\,\text{J}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\,\text{kg}}} = 0{,}65 \cdot 10^{9}\ \text{m/s}$$

Das ist viel mehr als die Grenzgeschwindigkeit c. Die Gleichung für die kinetische Energie ist nicht mehr gültig.

2. Das magnetische Feld

2.2 Die Magnetisierung

1. siehe Abb. 7a

2. siehe Abb. 7b

3. siehe Abb. 7c

4. Den Ring durchbrechen. Wenn er magnetisiert ist, entstehen an den Bruchstellen Pole.

2.3 Die magnetische Feldstärke

1.
(a) $F = Q_m \cdot H = 10^{-5}$ Wb · 6,4 A/m = 6,4 · 10^{-5} N
Der Vektor des Impulsstroms, der zum positiven Pol fließt, weist in Richtung der Feldlinien, der zum negativen fließt, in die entgegengesetzte Richtung.

(b) Das Feld zieht den positiven Pol in die eine Richtung, den negativen in die andere. Ergebnis: Die Kompassnadel wird gedreht. Sie pendelt sich in die Feldrichtung ein.

2. Siehe Abbildung 8

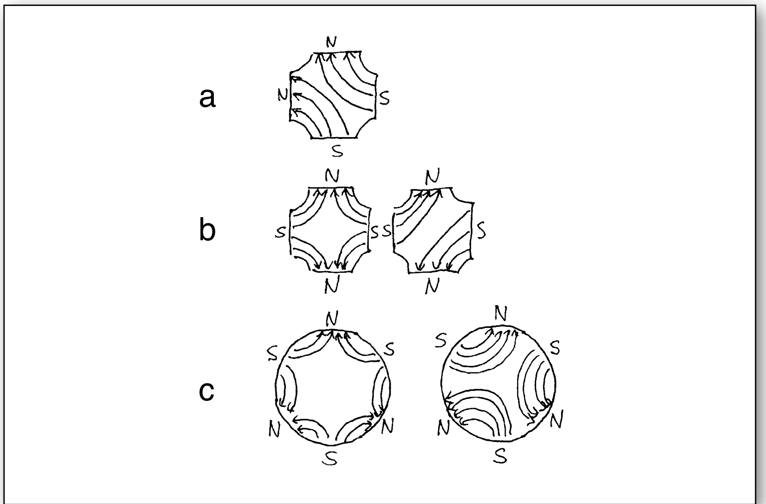

Abb. 7
Zu *2.2*, Aufgaben **1**, **2** und **3**

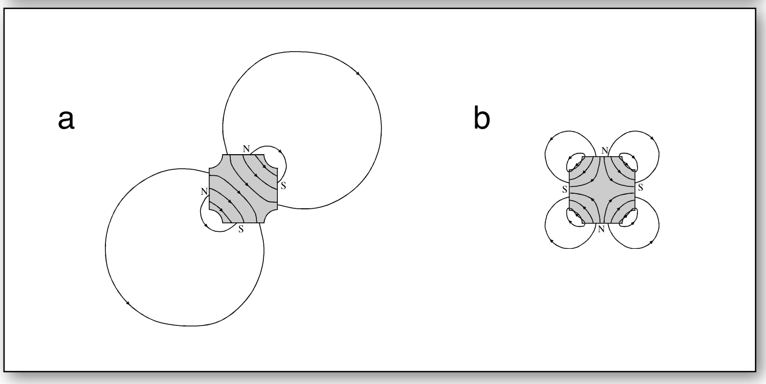

Abb. 8
Zu *2.3*, Aufgabe **2**

2.5 Vier wichtige magnetische Felder

1. (a) Die Magnetisierung ist innerhalb der Magneten homogen. Die Linien laufen auf den linken Nordpol zu und vom rechten Südpol weg. Feldlinien und -flächen siehe Abb. 9a.

(b) Die Feldlinien münden orthogonal in die Polflächen ein. Das Feld zieht daher an beiden Polen. Es zieht die Pole aufeinander zu.

2. (a) Die Magnetisierung ist innerhalb der Magneten homogen. Die Linien laufen von außen auf die beiden Nordpole zu. Feldlinien und -flächen siehe Abb. 9b.

(b) Die Feldflächen münden innen nahezu orthogonal in die Polflächen ein. Das Feld drückt daher auf die beiden Pole. Die Feldlinien laufen außen nahezu orthogonal zu den Polflächen weg. Das Feld zieht die Pole nach außen.

3. Magnetisierungslinien radial von innen nach außen. Feldlinien nur innerhalb des Materials radial von außen nach innen. Die Bereiche innerhalb der inneren und außerhalb der äußeren Oberfläche sind feldfrei.

4. Der Magnet hat keine Pole. Die magnetische Feldstärke ist überall null. Es gibt also weder Feldlinien noch Feldflächen.

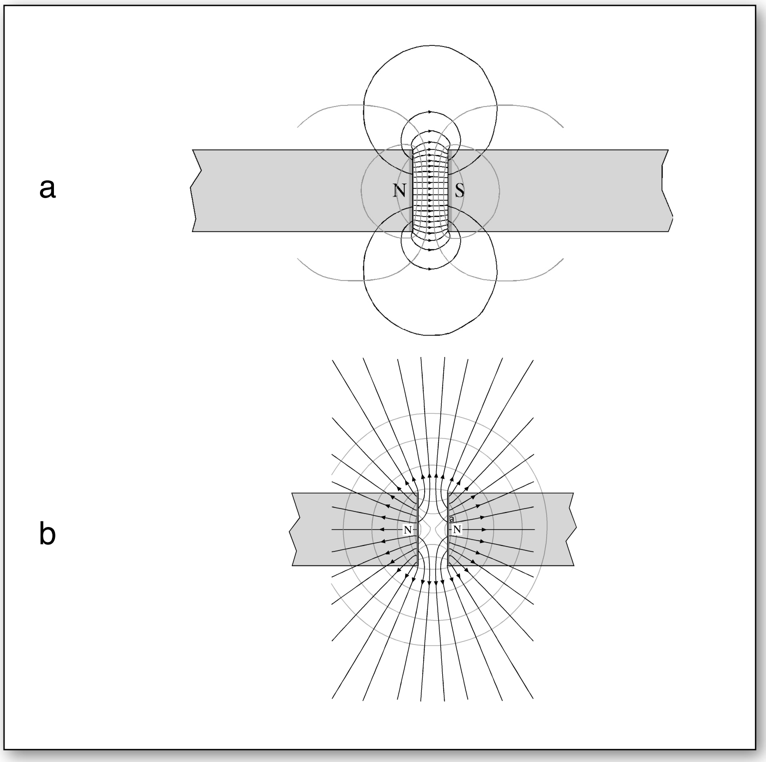

Abb. 9
Zu *2.5*, Aufgaben **1** und **2**

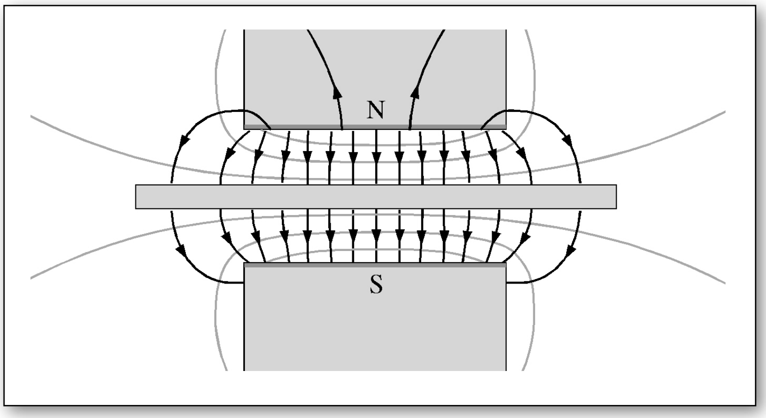

Abb. 10
Zu *2.6*, Aufgabe **1**

2.6 Weichmagnetische Materialien

1. Siehe Abb. 10. Die Feldlinien münden von oben und von unten orthogonal in das Weicheisenstück ein. Das Feld zieht daher nach oben und unten. Das Weicheisenstück steht in senkrechter Richtung unter Zugspannung.

2. In unmittelbarer Nachbarschaft der Pole des Dauermagneten entstehen im Weicheisen Pole entgegengesetzter Ladung. Die zugehörigen Gegenpole liegen auf den Innenseiten der Weicheisenstücke. Beim oberen befindet sich an der Unterseite negative magnetische Ladung (Südpol), und beim unteren an der Oberseite positive Ladung (Nordpol). Das Feld sieht (im zweidimensionalen Schnitt) aus wie das elektrische Feld eines Plattenkondensators.

Vorteil des Magneten: Das Feld ist annähernd homogen. Nachteil: Bringt man einen anderen Magneten oder ein Weicheisenteil in sein Feld, so können sich die magnetischen Ladungen stark verschieben.

2.7 Elektrischer Strom und magnetisches Feld

1. Siehe Abb. 11. Man muss zwei Bedingungen erfüllen:
– Die Feldflächen müssen auf dem Strom enden.
– Das Feldbild muss drehsymmetrisch sein.

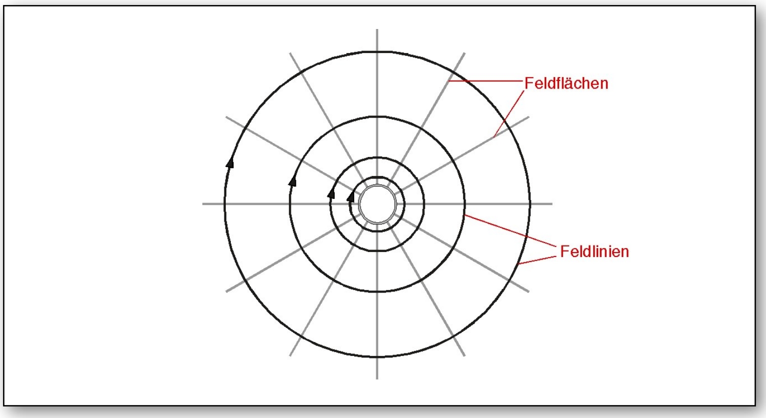

Abb. 11
Zu *2.7*, Aufgabe **1**

Daraus folgt der Verlauf von Feldlinien und -flächen außerhalb des Rohres.

Wenn Feldflächen vom Leiter aus nach innen wegliefen, müssten sie sich in der Mitte treffen. Das würde aber bedeuten, dass dort quer zu jeder Feldfläche wieder Druck herrscht, was aber nicht sein darf. Das Innere des Rohres muss also feldfrei sein.

Da die Feldflächen des äußeren Feldes senkrecht auf der Rohroberfläche enden, drückt das Feld von außen auf das Rohr.

2. Siehe Abb. 12a

3. Siehe Abb. 12b

2.8 Berechnung magnetischer Feldstärken

1. Die Gleichungen haben eine ähnliche Struktur. In der einen steht die Spannung, in der anderen die Stromstärke im Zähler. Im Nenner steht beide Male eine Länge.

Zu Gleichung (1.3): Man betrachtet zwei parallel verbundene Kondensatoren. Für jeden gilt einzeln Gl. (1.3). Beide zusammen bilden einen Kondensator mit der doppelten Plattenfläche. In ihm haben U und d dieselben Werte wie in den Einzelkondensatoren. Es ergibt

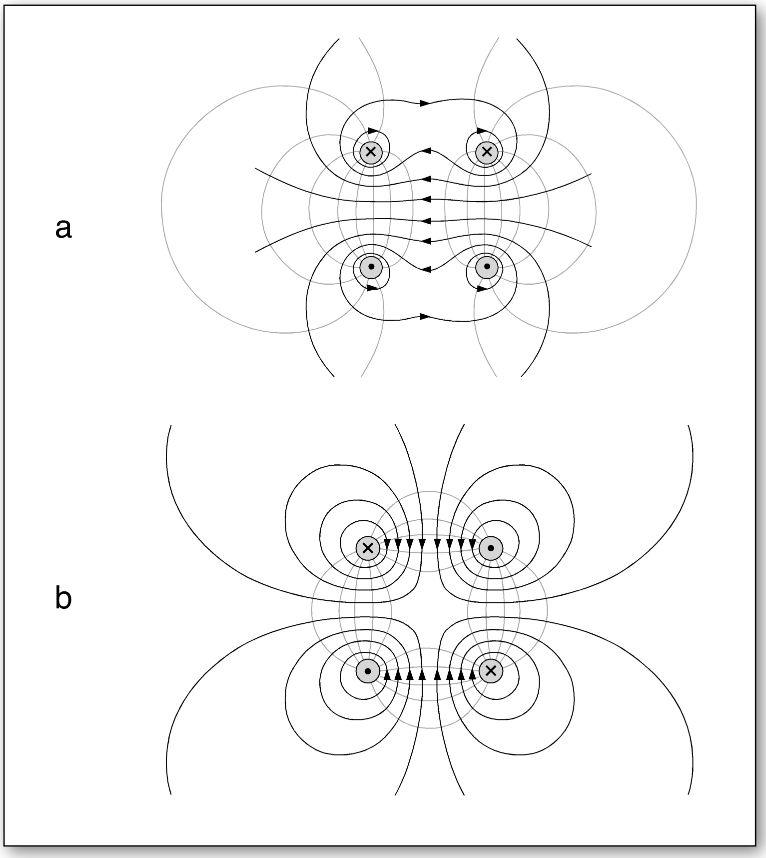

Abb. 12
Zu *2.7*, Aufgaben **2** und **3**

sich nach Gl. (1.3) dieselbe Feldstärke – wie es auch sein muss. Stünde in der Gleichung der Flächeninhalt, so ergäbe sich für den großen Kondensator eine andere, also falsche Feldstärke.

Zu Gleichung (2.4): Man betrachtet zwei in Reihe verbundene Spulen, am besten mit quadratischen Querschnitt. Für jede gilt einzeln Gl. (2.4). Man kann die Spulen so nebeneinander legen, dass sie äquivalent sind zu einer einzigen Spule mit der doppelten Querschnittsfläche. (In den Seiten, die sich berühren, fließt der Strom der einen Spule in eine Richtung, in der anderen in die entgegengesetzte Richtung. Der Beitrag dieser Ströme zum Feld hebt sich daher weg.) In dieser großen Spule haben Stromstärke und Länge dieselben Werte wie in den Einzelspulen. Es ergibt sich nach Gl. (2.4) dieselbe Feldstärke – wie es auch sein muss. Stünde in der Gleichung der Flächeninhalt, so ergäbe sich für die große Spule eine andere, also falsche Feldstärke.

2. $$\left|\vec{H}\right| = \frac{n \cdot I}{l} = \frac{3000 \cdot 0{,}8\ \text{A}}{0{,}6\ \text{m}} = 4000\ \text{A/m}$$

3. $$n = \frac{l \cdot \left|\vec{H}\right|}{I} = \frac{0{,}15\ \text{m} \cdot 3000\ \text{A/m}}{0{,}5\ \text{A}} = 900$$

4.

(a) Siehe Abb. 13

(b) $$\left|\vec{H}\right| = \frac{n \cdot I}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 2{,}5\ \text{A}}{\pi \cdot 0{,}5\ \text{m}} = 1590\ \text{A/m}$$

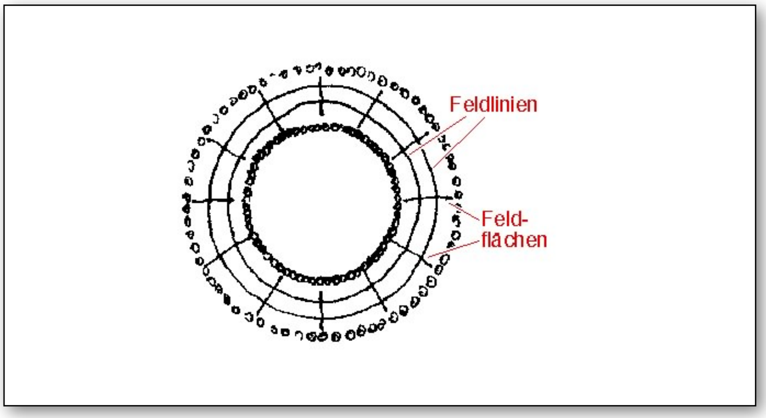

Abb. 13
Zu *2.8*, Aufgabe **4**

5.

(a) $\left|\vec{H}\right| = \frac{I}{l} = \frac{16\ \text{A}}{\pi \cdot 0{,}002\ \text{m}} = 2546\ \text{A/m}$

(b) $\left|\vec{H}\right| = \frac{16\ \text{A}}{\pi \cdot 0{,}02\ \text{m}} = 254{,}6\ \text{A/m}$

6. (a) Wir betrachten zunächst den Zylinder allein. Sein Feld ist außerhalb dasselbe wie das eines Drahtes mit derselben Stromstärke. Im Innern ist der Zylinder feldfrei.

Wir betrachten nun das ganze Kabel, bestehend aus Draht und Zylinder. Außerhalb des Kabels ist der Beitrag des Drahtes zur Feldstärke dem Beitrag des Zylinders entgegengesetzt gleich, also ist dort die resultierende Feldstärke null A/m. Im Innern des Zylinders bleibt nur der Beitrag des Drahtes zum Feld.

(b) $\left|\vec{H}\right| = \frac{I}{l} = \frac{0{,}5\ \text{A}}{\pi \cdot 0{,}001\ \text{m}} = 159\ \text{A/m}$

2.10 Druck und Zug im magnetischen Feld

1.

$A = 1{,}5\ \text{mm}^2 = \pi r^2$

$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{1{,}5\ \text{mm}^2}{\pi}} = 0{,}69\ \text{mm}$

Magnetische Feldstärke an der Oberfläche:

$\left|\vec{H}\right| = \frac{I}{l} = \frac{16\ \text{A}}{2\pi \cdot 0{,}00069\ \text{m}} = 3691\ \text{A/m}$

Druck an der Oberfläche:

$$\sigma_{\perp} = \frac{\mu_0}{2}\left|\vec{H}\right|^2$$

$$= -\frac{1{,}257 \cdot 10^{-6}\ \text{Wb/(A·m)}}{2} \cdot (3691\ \text{A/m})^2 = 8{,}56\ \text{Pa}$$

2.

(a)

$d = 0{,}01\ \text{m}, \qquad I = 10\,000\ \text{A}$

$\left|\vec{H}\right| = \frac{I}{\pi \cdot d} = \frac{10\,000\ \text{A}}{\pi \cdot 0{,}01\ \text{m}} = 3{,}18 \cdot 10^5\ \text{A/m}$

$$\sigma_\perp = \frac{\mu_0}{2}\left|\vec{H}\right|^2$$

$$= -\frac{1{,}257 \cdot 10^{-6}\ \text{Wb/(A·m)}}{2} \cdot (3{,}18 \cdot 10^5\ \text{A/m})^2$$

$$\approx 64\ 000\ \text{Pa} = 0{,}64\ \text{bar}$$

(b)

$p_0 = 1$ bar, $T_0 = 300$ K, $T_1 = 10\,000$ K

Aus $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ folgt für $V =$ const und $n =$ const

$$\frac{p_0}{T_0} = \frac{p_1}{T_1} \quad \Rightarrow \quad p_1 = p_0 \frac{T_1}{T_0} = 1\ \text{bar} \cdot \frac{10\,000\ \text{K}}{300\ \text{K}} = 33\ \text{bar}$$

Der Gasdruck ist viel größer als der Druck des magnetischen Feldes. Das Feld kann das Gas nicht zusammenhalten.

3. Zum Beispiel so: Man denkt sich eine senkrechte Schnittfläche durch die Mitte des Feldes gelegt. In dieser Fläche verlaufen alle Druckflächen orthogonal dazu. Das heißt, dass sich die beiden Feldhälften voneinander wegdrücken.

4. Man denkt sich eine senkrechte Schnittfläche durch die Mitte des Feldes gelegt. In dieser Fläche verlaufen alle Zuglinien orthogonal dazu. Das heißt, dass sich die beiden Feldhälften aufeinander zu ziehen.

2.11 Elektromagneten

3. d = 0,01 m, $A = 0{,}01\ \text{m}^2$, $n = 1000$, $I = 2$ A

(a) $\left|\vec{H}\right| = \dfrac{n \cdot I}{d} = \dfrac{1000 \cdot 2\ \text{A}}{0{,}01\ \text{m}} = 2 \cdot 10^5\ \text{A/m}$

(b) $E = \rho_E \cdot V = \dfrac{\mu_0}{2}\left|\vec{H}\right|^2 \cdot A \cdot d = \ldots = 2{,}51\ \text{J}$

(c) Die Feldstärke wächst auf das Zehnfache, das Volumen nimmt auf ein Zehntel ab. Damit nimmt die Energie auf das Zehnfache zu.

4. Beides kann passieren. Ist der Elektromagnet im Vergleich zum Dauermagneten hinreichend stark, so findet Abstoßung statt. Ist er aber schwach (ist die Stromstärke in der Spule gering), so entsteht dort, wo zunächst der Nordpol des Elektromagneten war, durch Influenz ein Südpol, und es findet Anziehung statt.

2.13 Die Spule – die Induktivität

1.

$n = 500, \quad A = 0{,}001\ \text{m}^2, \quad l = 0{,}08\ \text{m}$

$$L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot \frac{A}{l} = \ldots = 3{,}93 \cdot 10^{-3}\ \text{H}$$

2. Die Induktivität nimmt auf die Hälfte ab.

2.14 Die Energie des magnetischen Feldes

1.

$\left|\vec{H}\right| = 40\ \text{A/m}, \quad V = 1\ \text{m}^3$

$$E = \frac{\mu_0}{2} \cdot \left|\vec{H}\right|^2 \cdot V = \ldots = 1{,}01 \cdot 10^{-3}\,\text{J}$$

2.

$A = 0{,}0004\ \text{m}^2, \quad d = 0{,}005\ \text{m}, \quad \left|\vec{H}\right| = 120\ 000\ \text{A/m}$

$$E = \frac{\mu_0}{2} \cdot \left|\vec{H}\right|^2 \cdot V = \ldots = 0{,}0181\ \text{J}$$

3.

$L = 0{,}01\ \text{mH}, \quad I = 2{,}5\ \text{A}, \quad l = 0{,}1\ \text{m}, \quad A = 0{,}0004\ \text{m}^2$

(a) $E = \dfrac{L}{2} I^2 = \ldots = 0{,}000\ 031\ \text{J}$

(b) $\rho_E = \dfrac{E}{V} = \ldots = 0{,}78\ \text{J/m}^3$

4.

$L = 0{,}2\ \text{mH}, \quad R = 500\ \Omega, \quad U = 200\ \text{V}$

$$E = \frac{L}{2} I^2 = \frac{L}{2}\left(\frac{U}{R}\right)^2 = \ldots = 0{,}000\ 016\ \text{J}$$

5. (a) Als Erstes wird die Spule überbrückt. Da dabei auch das Netzgerät überbrückt wird, muss es einen Kurzschluss vertragen. Dann wird die überbrückte Spule vom Netzgerät getrennt.

(b) Der Kondensator, der vom Netzgerät getrennt wurde, verliert seine Energie, weil er sich entlädt, und er entlädt sich, weil die Isolierung zwischen seinen Platten nicht perfekt ist. Die vom Netzgerät getrennte Spule verliert ihre Energie, weil der elektrische Strom aufhört zu fließen. Der Strom hört auf zu fließen, weil die Spulendrähte und der Überbrückungsdraht keine perfekten Leiter sind. In supraleitenden Spulen klingt der elektrische Strom nicht ab.

2.15 Die „Entladekurve“ der Spule

1.

$R = 500\ \Omega, \quad t_{1/10} = 4\ \text{ms}$

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad \Rightarrow \quad -\frac{t}{\tau} = \ln\frac{I(t)}{I_0} \quad \Rightarrow \quad \frac{t}{\tau} = \ln\frac{I_0}{I(t)}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{0{,}004\ \text{s}}{\tau} = \ln 10$$

$$\Rightarrow \quad \tau = \frac{0{,}004\ \text{s}}{\ln 10} = 0{,}00174\ \text{s}$$

Mit $\tau = \dfrac{L}{R}$ wird

$$L = \tau \cdot R = 0{,}00174\ \text{s} \cdot 500\ \Omega = 0{,}87\ \text{H}$$

2.

$$E(t) = \frac{L}{2} I(t)^2$$

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

$$E(t) = \frac{L}{2} \cdot I_0^2 \cdot e^{-2t/\tau}$$

Die Energie in der Spule klingt doppelt so schnell ab wie die elektrische Stromstärke.

2.16 Wie das magnetische Feld auf einen elektrischen Strom drückt

1.

$I = 200\ \text{A}, \quad H = 40\ \text{A/m}, \quad \Delta s = 1\text{m}$

$$F = I \cdot \Delta s \cdot B = I \cdot \Delta s \cdot \mu_0 \cdot H$$

$$= 200\ \text{A} \cdot 1\ \text{m} \cdot 1{,}257 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs/Am} \cdot 40\ \text{A/m}$$

$$= 0{,}01001\ \text{N}$$

2.

$H = 2400\ \text{A/m}, \quad r = 0{,}1\text{m}, \quad m = 0{,}911 \cdot 10^{-30}\ \text{kg}, \quad e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \text{C}$

$$r = \frac{m \cdot v}{e \cdot B}$$

$$v = \frac{r \cdot e \cdot B}{m} = \frac{r \cdot e \cdot \mu_0 \cdot H}{m}$$

$$E = \frac{m}{2} v^2 = \frac{(r \cdot e \cdot \mu_0 \cdot H)^2}{2m}$$

$$= \ldots = 1{,}279 \cdot 10^{-15}\,\text{J} = \frac{1{,}279 \cdot 10^{-15}}{1{,}60 \cdot 10^{-19}}\ \text{eV} = 8\ \text{keV}$$

3.

$d = 0{,}005$ m, $\quad B = 1{,}2$ T, $\quad I = 200$ mA

$U_{H1} = 0{,}12 \cdot 10^{-3}$ V, $\ U_{H2} = 0{,}36 \cdot 10^{-6}$ V

$$U_H = v \cdot B \cdot d \quad \Rightarrow \quad v = \frac{U_H}{B \cdot d}$$

$v_1 = \ldots = 0{,}02$ m/s

$v_2 = \ldots = 0{,}000\,06$ m/s

Die erste Probe enthält weniger bewegliche Elektronen. Um auf dieselbe Geschwindigkeit zu kommen wie die Elektronen in Probe 2, müssen sie sich schneller bewegen.

4.

$v = 1{,}1$ m/s, $\quad d = 0{,}002$ m, $\quad B = 3$ T

$U_H = v \cdot B \cdot d = \ldots = 0{,}066$ V

Dass das Wasser positive und negative Ionen enthält, wirkt sich auf die Hallspannung nicht aus.

3. Das Zusammenspiel von elektrischen und magnetischen Feldern

3.2 Die Induktion

1.

$$U = n \cdot \frac{d\Phi}{dt} = n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt}$$

$$= 200 \cdot 0{,}0008\ \text{m}^2 \cdot \frac{0{,}3\ \text{T}}{2\ \text{s}} = 0{,}024\ \text{V}$$

2. Siehe Abb. 14

3.

(a) $\left|\vec{H}\right| = \frac{n \cdot I}{l} = \frac{2000 \cdot 10\ \text{A}}{0{,}5\ \text{m}} = 40\,000\ \text{A/m}$

(b) $\left|\vec{B}\right| = \mu_0 \left|\vec{H}\right| = 1{,}257 \cdot 10^{-6}(\text{Wb/Am}) \cdot 40\,000\ \text{A/m} = 5{,}03 \cdot 10^{-2}\ \text{T}$

(c)

$$U = n' \cdot A' \cdot \frac{dB}{dt} = n' \cdot A' \cdot \frac{B}{t} \Rightarrow$$

$$t = \frac{n' \cdot A' \cdot B}{U}$$

$$= \frac{500 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-3}\text{m}^2 \cdot 5{,}03 \cdot 10^{-2}\text{T}}{100\ \text{V}} = 0{,}38\ \text{ms}$$

4.

$$U = n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} = 1 \cdot 2 \cdot 10^{-4}\text{m}^2 \cdot 0{,}2\ \text{T/s} = 4 \cdot 10^{-5}\ \text{V}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{4 \cdot 10^{-5}\ \text{V}}{200\ \Omega} = 2 \cdot 10^{-7}\text{A}$$

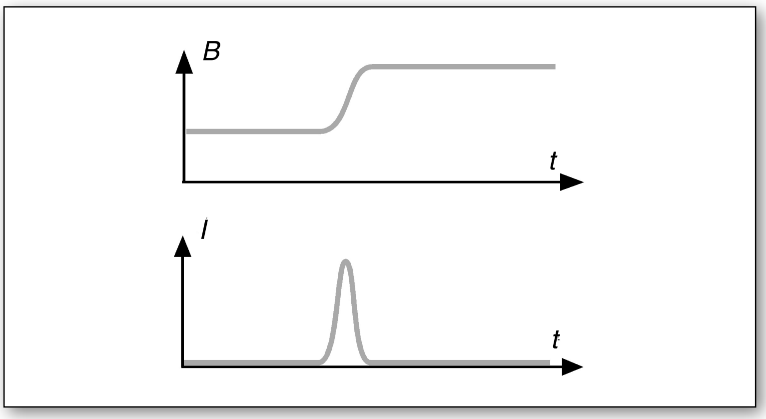

Abb. 14
Zu *3.2*, Aufgabe **2**

3.3 Der Generator

2. Ja. Man kann sich die Spule aus vielen kleinen quadratischen Spulen zusammengesetzt denken. Jede dieser Spulen erzeugt eine Sinusspannung derselben Frequenz.

3. Nein. In der Beziehung $\Phi = B \cdot A$ ändert sich *A* mit dem Sinus der Zeit. Φ ist nur dann eine Sinusfunktion von *t*, wenn *B* konstant, also homogen ist.

3.4 Wechselspannung und Wechselstrom

1.

$U_0 = \sqrt{2} \cdot U_{eff} = \sqrt{2} \cdot 230$ V = 325 V

2. Man zeichnet im *P*-*t*-Diagramm für den *P*-Wert 0,5 · U_0 · I_0 eine waagrechte Gerade. Zu jedem Zeitintervall, in dem *P* um einen bestimmten Betrag über dieser Geraden liegt, gibt es eines, für das *P* um denselben Betrag darunter liegt. Der Mittelwert von *P* für zwei solche zusammengehörenden Zeitintervalle ist 0,5 · U_0 · I_0. Also hat auch das Gesamtmittel diesen Wert.

3. Nein. Der Mittelwert der Spannung ist 0 Volt, der der elektrischen Stromstärke 0 Ampere. Also wäre der Mittelwert der Energiestromstärke 0 Watt. Das kann nicht sein, denn die Energiestromstärke hat positive Werte.

3.5 Der Transformator

1. 5 · 230 V = 1150 V und (1/5) · 230 V = 46 V

2. Die Windungszahl der Primärspule ist 20-mal so groß wie die der Sekundärspule. Im Primärstromkreis fließt ein elektrischer Strom von 0,1 A.

3. I_2 = (1/10) · I_1 = 10 mA

U_2 = 10 · U_1 = 10 · 230 V = 2300 V

4. Die Zuleitungen müssen dick sein, damit der Widerstand nicht zu groß ist. Die Wegleitungen müssen gut isoliert sein, damit kein „Funke überspringt".

5. (a)

$$I = \frac{P}{U}$$

$$I_1 = \frac{60\,000\,000\ \text{W}}{3000\ \text{V}} = \ 20\,000\ \text{A}$$

$$I_2 = \frac{60\,000\,000\ \text{W}}{300\,000\ \text{V}} = \ 200\ \text{A}$$

(b)

$$U = R \cdot I$$

$$U_1 = 0{,}05\ \Omega\ \cdot\ 20\,000\ \text{A} = 1000\ \text{V}$$

$$U_2 = 0{,}05\ \Omega\ \cdot\ 200\ \text{A} = 10\ \text{V}$$

(c)

$$U_{01} = 3000\ \text{V} - 2000\ \text{V} = 1000\ \text{V}$$

$$U_{02} = 300\,000\ \text{V} - 20\ \text{V} = 299\,980\ \text{V}$$

(d)

$$P_1 = 2 \cdot U_1 \cdot I_1 = 2 \cdot 1000\ \text{V} \cdot 20\,000\ \text{A} = 40\ \text{MW}$$

$$P_2 = 2 \cdot U_2 \cdot I_2 = 2 \cdot 10\ \text{V} \cdot 200\ \text{A} = 0{,}004\ \text{MW}$$

3.7 Supraleiter

1. Siehe Abb. 15. Im Rohr fließen kreisförmige Ströme (Kreismittelpunkte auf der Rohrachse). Die Stromrichtung ist im Bereich des Magneten entgegengesetzt zu der außerhalb des Magneten (rechts und links vom Magneten).

2. Der Magnet kommt gar nicht mehr heraus. Er wird durch einen Suprastrom in der Schwebe gehalten.

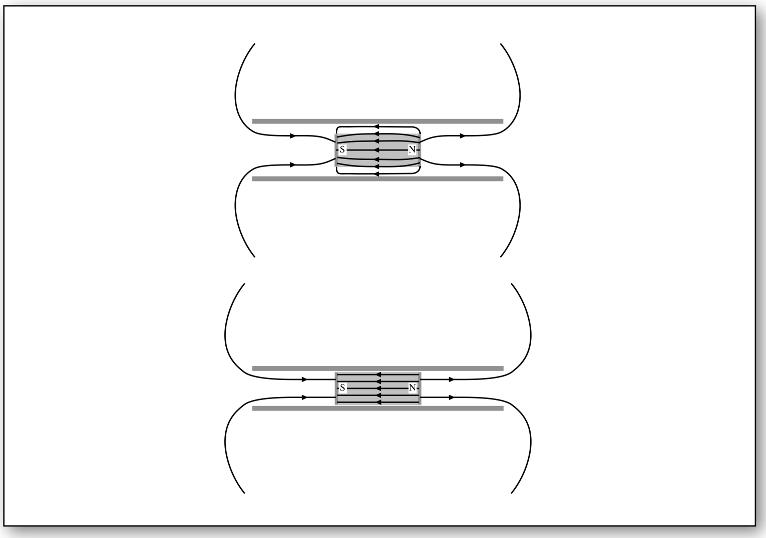

Abb. 15
Zu 3.7, Aufgabe **1**

3.11 Energietransport mit elektromagnetischen Wellen

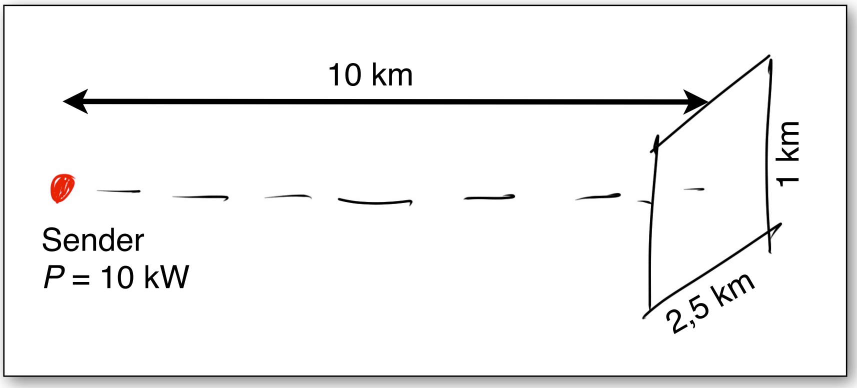

Abb. 16
Zu 3.11, Aufgabe **1**

1.

$$j_E = \frac{P}{A} = \frac{10^4 \text{ W}}{2{,}5 \cdot 10^6 \text{ m}^2} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$$

Für eine elektromagnetische Welle gilt, Gleichung (3.13):

$$\sqrt{\varepsilon_0}\left|\vec{E}\right| = \sqrt{\mu_0}\left|\vec{H}\right|$$

Mit Gleichung (3.15) erhalten wir damit:

$$j_E = \left|\vec{E}\right| \cdot \left|\vec{H}\right| = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\left|\vec{E}\right|^2$$

und daraus

$$\left|\vec{E}\right| = \sqrt[4]{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\sqrt{j_E}$$

Wir berechnen

$$\frac{\mu_0}{\varepsilon_0} = \frac{1{,}257 \cdot 10^{-6} \text{ (Vs/Am)}}{8{,}854 \cdot 10^{-12} \text{ (As/Vm)}} = 1{,}94\sqrt{\frac{\text{V}}{\text{A}}}$$

Damit wird

$$\left|\vec{E}\right| = \sqrt[4]{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\sqrt{j_E} = 12{,}27 \text{ V/m}$$

und entsprechend

$$\left|\vec{H}\right| = \sqrt[4]{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\sqrt{j_E} = 32{,}56 \text{ A/m}$$

Die Energiestromdichte des Lichts von der Sonne ist etwa 500 W/m^2, also etwa 100 000 mal größer.

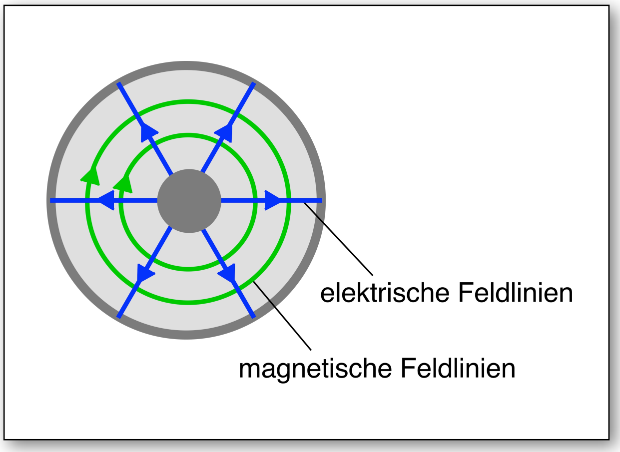

Abb. 17
Zu 3.11, Aufgabe **2**

2.

Der Strom ist ein Wechselstrom, Abb. zeigt eine Momentaufnahme. Die Energie fließt in die Bildebene hinein.