Die Struktur elektrischer Felder erkunden

Arbeitsteilige Experimente mit einer einfachen Feldsonde

Von Klaus Bresser und Michael Rode

KLASSE:	10/11
SCHULFORM:	Gymnasium, Gesamtschule
ZEITUMFANG:	4–6 Unterrichtstunden
THEMA:	elektrisches Feld
METHODE:	arbeitsteiliges Experimentieren
SOZIALFORM:	Gruppenarbeit
WEITERE MATERIALIEN:	Arbeitsblätter und Software können bei einem der Verfasser *CDJMRode@t-online.de* angefordert werden.

In diesem Beitrag wird ein Feld als eine Art Landkarte aufgefasst, auf der jedem Punkt eine gerichtete physikalische Größe zugeordnet wird (s. a. S. 4–10). Die Vorstellung von einer ortsabhängigen Größe, die durch Richtung und Betrag gekennzeichnet ist, ist für Lernende neu, so dass sie einer möglichst handlungsorientierten Einführung bedarf.

Diese Einführung gelingt gut, wenn man – anders als üblich – mit der Erkundung magnetischer Felder beginnt. Die propädeutische Arbeit mit Kompassnadeln hilft dabei, die Richtungseigenschaft von Feldern zu erkunden. Moderne Experimentierumgebungen erlauben dann, deutlich darüber hinaus zu gehen. Die Experimentiersätze für die Abiturprüfung in Niedersachsen [3] enthalten Feldsonden, mit deren Hilfe auch Beträge der magnetischen Feldstärke bestimmt werden können.

Das auf diese Weise eingeführte „Rezept“ zur Messung im magnetischen Feld dient als Muster für das Vorgehen im elektrischen Feld, das im Mittelpunkt dieses Beitrages steht: Mit einem geeigneten Sensor werden auf vergleichbare Weise Richtung und Betrag einer feldbeschreibenden Größe bestimmt.

Erst im weiteren Verlauf des Unterrichts wird über die inneren Vorgänge in den benutzten Sensoren und über Gemeinsamkeiten und vor allem Unterschiede zwischen den beiden Feldarten vertiefend nachgedacht.

Unser unterrichtliches Vorgehen bei der ersten Begegnung mit dem magnetischen Feld wird in **Kasten 1** beschrieben. Eine für Erkundungen im elektrischen Feld geeignete Experimentieranordnung beschreiben wir in **Kasten 2**.

Das vorgestellte Vorgehen bietet Anknüpfungsmöglichkeiten zum Unterricht in der Mittelstufe (s. **Kasten 4**) und hat das Potenzial, über die Analyse von Gemeinsamkeiten und Unterschieden ein vertieftes Verständnis beider Feldarten zu gewinnen (s. dazu **Kasten 3**).

Überblick über den Unterrichtsabschnitt zum elektrischen Feld

Der hier ausführlich dargestellte Unterrichtsabschnitt setzt Grunderfahrungen über das Vorgehen bei einer Messung mit einer Feldsonde gemäß **Kasten 1** voraus. Den Lernenden soll auf dieser Grundlage ermöglicht werden, die Struktur eines elektrischen Feldes zu erkunden.

Dazu wird ein arbeitsteiliges Vorgehen vorgeschlagen, mit dem neben dem Erwerb einer Reihe von inhaltsbezogenen auch der Erwerb von prozessbezogenen Kompetenzen verfolgt werden kann: Die Lernenden

- beschreiben ein Verfahren zur Bestimmung von Richtung und Betrag der elektrischen Feldstärke mithilfe einer Feldsonde,
- erläutern ein Messverfahren für die elektrische Feldstärke,
- beschreiben die elektrische Feldstärke als gerichtete Größe,
- zerlegen eine gemessene elektrische Feldstärke in Komponenten,
- addieren elektrische Feldstärken in einer Überlagerungssituation vektoriell,
- stellen Analogien zum Vorgehen im magnetischen Feld her und verwenden in beiden Fällen das Superpositionsprinzip für gerichtete Größen,
- untersuchen experimentell den Feldstärkeverlauf in der Umgebung verschiedener Kontaktanordnungen und bestimmen die zugehörigen Abhängigkeiten,
- führen Experimente durch und dokumentieren die Ergebnisse,
- gewinnen Erfahrung mit der selbstständigen Dokumentation von Versuchsergebnissen,
- erkennen Strukturgleichheiten,
- präsentieren Arbeitsergebnisse adressatengerecht.

Das arbeitsteilige Verfahren ist hinsichtlich der Förderung von Selbstständigkeit ideal und bietet auch gute Möglichkeiten für die Binnendifferenzierung. Allerdings dürfen in einer so komplexen Umgebung wie dieser Versuchsanleitungen nicht zu offen sein. Insbesondere müssen sie das experimentelle Vorgehen hinreichend genau beschreiben, so dass kognitive Last und hohe Komplexität einen selbstständigen Zugriff nicht verhindern.

Planungsphase

In einer einführenden Stunde wird an einem geeigneten Kontext (z. B. „Menschen im Gewitter“) das Themengebiet elektrisches Feld vorgestellt, das Problemfeld wird gesichtet und mit vorhandenen Erfahrungen verglichen.

Die Struktur magnetischer Felder erkunden

Ausgangspunkt und Ideengeber für alle Untersuchungen in diesem Beitrag ist das punktweise Ausmessen des magnetischen Feldes eines Dauermagneten (s. **Abb. 1**), wie es die Lernenden wahrscheinlich schon aus dem Anfangsunterricht kennen.
Im Kursunterricht sollte man dieses Experiment zunächst wiederholen. Erst danach tritt an die Stelle des Kompasses eine Feldsonde. Gut geeignet und zu angemessenem Preis erhältlich ist die Hall-Sonde aus dem Experimentiersatz zur Elektrik für das Abitur in Niedersachsen von Leybold.

Einsatz der Feldsonde

Man setzt die Feldsonde so ein, wie in **Abbildung 2** gezeigt. Wesentliche Teile aus einer zugehörigen Experimentieranleitung sind:

- Bauen Sie die Messvorrichtung nach Anleitung auf.
  Stellen Sie die Betriebsart „transversale Sonde“ und die Verstärkung „x1“ ein.
- Nehmen Sie wieder das Blatt mit dem Dauermagneten und dem Feldlinienbild zur Hand.
  Setzen Sie die Feldsonde lotrecht auf einen der Messpunkte (s. **Abb. 3**).
- Wenn Sie die Sonde vorsichtig und langsam genug um die Hochachse drehen, werden Sie bemerken, dass die Anzeige gerade dann am größten ist, wenn die Sonde in die Richtung zeigt, die Sie vorher mit der Kompassnadel ermittelt haben.
- Nun kann man einen Messwert für die magnetische Feldstärke B ablesen, wenn man die Angaben zur Kalibrierung aus dem Anleitungsblatt verwendet.

Beispiel

Am Messort misst man die Spannung $U = 20$ mV. Daraus bestimmt man mithilfe der beiliegenden Kalibrierkurve $B = 0{,}8$ mT.
Das Ergebnis stellt man grafisch so dar: An den Messpunkt zeichnet man einen Pfeil, dessen Richtung durch den Feldsensor (vorher: die Kompassnadel) festgelegt wurde und dem man eine maßstabgetreue Länge gibt, also in unserem Beispiel 8 mm.

Hinweise

- Wir benutzen für die Größe B den Begriff magnetische Feldstärke anstelle der oft verwendeten Bezeichnung magnetische Flussdichte.
- Das Magnetfeld der Erde soll bei diesen ersten Messungen ohne Einfluss sein. Da die Neodymmagnete hinreichend stark sind, braucht man über das Magnetfeld der Erde in diesem Fall nicht nachzudenken. Bei Experimenten mit einer Spule ist das anders. Hier kann man sich helfen, indem man die Δ/Rel-Taste des Messgerätes für eine Nullpunktkorrektur verwendet.

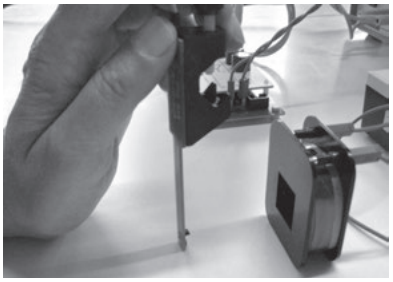


Abb. 3: Richtige Haltung der magnetischen Feldsonde. In dieser Abbildung steht eine Spule statt des Dauermagneten, wichtig ist nur die Stellung der Feldsonde

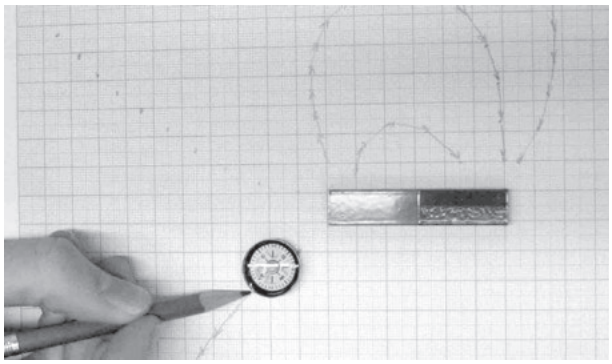


Abb. 1: Beginnend an einem Startpunkt nahe an einem der Pole eines Dauermagneten wird die Richtung der Kompassnadel durch einen Punkt nahe der Nadelspitze markiert. Der Startpunkt wird mit dem ermittelten Punkt durch einen Pfeil verbunden und so die Richtung der Kompassnadel auf das Papier übertragen. Im nächsten Schritt stellt man die Kompassnadel mit ihrem Mittelpunkt auf diesen Punkt. Durch schrittweises Vorgehen in Richtung der Nadelspitze erhält man eine Kette von Pfeilen, die geglättet und im Zusammenhang eine durchgehende Linie mit Richtungsinformation liefert („Feldlinie“)

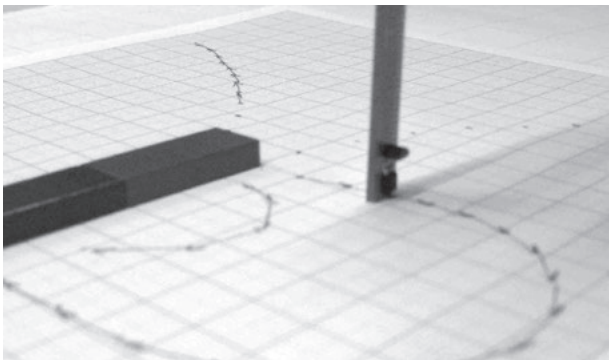


Abb. 2: In der Anordnung, die man mit der Kompassnadel erhalten hat, setzt man die Feldsonde auf die schon vorher markierten Punkte. Durch vorsichtiges Drehen der Sonde um die Hochachse ermittelt man diejenige Einstellung, bei der die angezeigte Spannung maximal ist. Man kann erkennen, dass diese Richtung mit derjenigen übereinstimmt, die man vorher mit der Kompassnadel bestimmt hat. Aus den Angaben zur Kalibrierung der Sonde in der Betriebsanleitung kann man nun die zugehörige magnetische Feldstärke B ermitteln und einen entsprechenden Pfeil einzeichnen

Eine elektrische Feldsonde

Die Einheit der elektrischen Feldstärke ist festgelegt als $[E] := \frac{1\text{V}}{1\text{m}}$.
Diese Festlegung erlaubt es, sinnvolle Näherungswerte für den Betrag der elektrischen Feldstärke durch Anwenden der Beziehung $E = \frac{U}{d}$ zu bestimmen, wenn d hinreichend klein gewählt wird und die Spannung zwischen den Messelektroden gemessen wird.
Das so vereinbarte Messverfahren trifft auf experimentelle Schwierigkeiten, weil Spannungsmessungen in der Regel nicht stromlos erfolgen können. Mit modernen Messgeräten, deren Innenwiderstände im Bereich mehrerer MΩ liegen, kann man es aber experimentell gut umsetzen, indem man leicht graphitierte Unterlagen verwendet, wie sie z. B. von Pasco (PK 9025) angeboten werden.
Im Unterricht der Verfasser hat sich bewährt, den Abstand d mithilfe einer kleinen Vorrichtung aus Acrylglas konstant zu halten (s. **Abb. 4**). Wir wählten diesen Abstand zu 1,5 cm, damit alle handelsüblichen Messleitungen verwendet werden können. Die Messungen werden jeweils so ausgeführt, dass der Messpunkt unter der Mitte der Sonde liegt.

Funktionsprüfung

Um die Tauglichkeit des Messverfahrens zu überprüfen, wurden zwei Experimente durchgeführt.

Experiment 1

Im ersten Experiment wurde die elektrische Feldstärke entlang der Strecke zwischen den beiden Magnetkontakten gemessen und über dem Abstand zum oberen Kontakt aufgetragen. Zum Vergleich wurde eine Modellierung durchgeführt, die von der Annahme ausging, dass die resultierende elektrische Feldstärke zwischen zwei Kontakten durch vektorielle Addition von zwei Komponenten bestimmt werden muss. Deren Beträge sollten wegen des Coulomb-Gesetzes quadratisch mit dem Abstand zum Bezugskontakt abnehmen. Unter dieser Annahme ist die Übereinstimmung entgegen unserer ursprünglichen Erwartung keineswegs zufriedenstellend!
Wenn man allerdings dieselbe Modellierung noch einmal ausführt und annimmt, die elektrische Feldstärke nehme nur mit $1/r$ ab, wird die Übereinstimmung gut. Es handelt sich ja auch nicht um das kugelsymmetrische Feld um zwei Punktladungen, vielmehr „ist es ja nur ein zweidimensionales Problem“. In diesem Fall sollten Orte gleicher Feldstärke nicht auf Kugeloberflächen, sondern auf einem Kreisring liegen, dessen Maß nicht mit r^2, sondern mit r wächst.

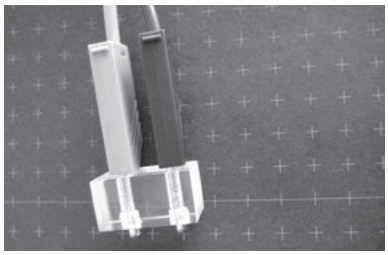


Abb. 4: Man sieht die Feldsonde mit ihren beiden Bananensteckern auf einem Ausschnitt aus der graphitierten Unterlage. Die beiden Stecker sollten glatte Kuppen ohne erkennbare Beschädigungen aufweisen

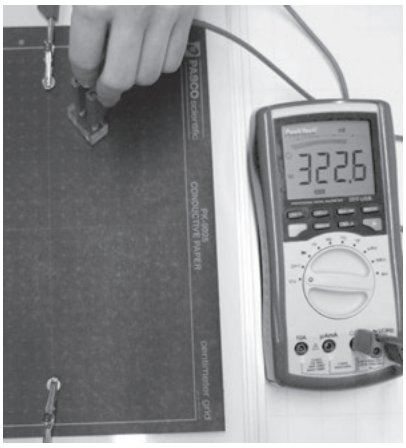


Abb. 5: Auf einem kleinen Whiteboard liegt ein graphitiertes Papier. Oben und unten sind zwei elektrische Kontakte durch Neodym-Magnete (am besten Durchmesser 10 mm) und Krokodilklemmen hergestellt. Mit der Feldsonde wird die Richtung der elektrischen Feldstärke dadurch bestimmt, dass man durch langsames Drehen der Sonde die Richtung bestimmt, unter der der Maximalwert der Spannung auftritt. Die zugehörige Spannung beträgt einige Hundert mV, wenn man an die Magnetkontakte eine Spannung von etwa 10 V legt. Aus dieser Spannung und dem Abstand der beiden Kontakte in der Feldsonde kann man dann einen guten Näherungswert für den Betrag der elektrischen Feldstärke errechnen oder aus einer zuvor angefertigten Kalibrierkurve ablesen

Experiment 2

Ein zweites Experiment dient dazu, zu überprüfen, ob die vektorielle Addition der elektrischen Feldstärke im Experiment nachvollzogen werden kann.
Dazu wird nacheinander zwischen die Anschlüsse B und D, dann A und C, anschließend an beide Paare zugleich

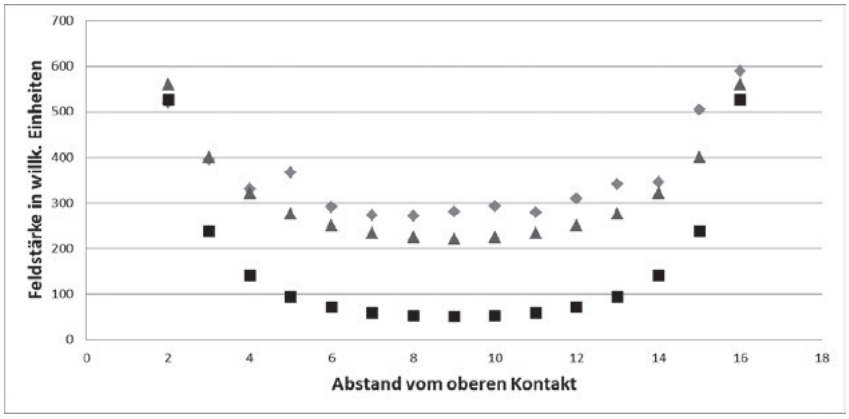


Abb. 6: Gemessene elektrische Feldstärke, aufgetragen über dem Abstand zum oberen Kontakt (Rauten), gemeinsam dargestellt mit einer Modellierung derselben Situation unter der Annahme eines invers-quadratischen Gesetzes für die Abnahme der Feldstärke mit dem Abstand (Quadrate) und unter der Annahme einer invers-linearen Abnahme (Dreiecke)

VERSUCH 2

eine Betriebsspannung angelegt.
Am Punkt E werden die elektrischen Feldstärken bestimmt, dargestellt durch die beiden Pfeile und deren Summe. Eine anschließende Messung in der von der Modellierung ermittelten Richtung ergibt eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit der Theorie.

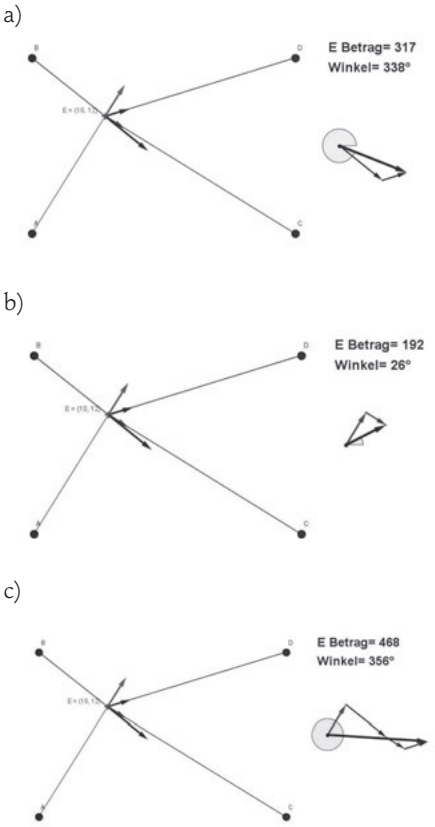


Abb. 7: Zur Überprüfung der Superposition verwendete Modellierungen: a) für den Fall „oberes Kontaktpaar angeschlossen", b) „unteres Paar angeschlossen", c) „beide Paare angeschlossen". Die Modellierungsergebnisse wurden am rechten Bildrand als Pfeile dargestellt, der Betrag der resultierenden Feldstärke und deren Richtung gegenüber der Horizontalen werden darüber nummerisch mit willkürlichen Einheiten angegeben. In einer Messung unter den von der Modellierung bestimmten Winkeln erhält man für a) 322 Feldstärkeeinheiten, für b) 185 Feldstärkeeinheiten und für c) 408 Feldstärkeeinheiten. Der Modellierung liegt dabei ein invers-lineares Gesetz zugrunde. Auch in diesem Fall halten wir die Übereinstimmung für zufriedenstellend. Die Modellierung kann mit dem Material bei einem der Verfasser abgerufen werden

Das Problemfeld wird in Teilaufgaben zergliedert. Die genaue Untersuchung der Teilaspekte wird auf Gruppen verteilt, bei typischen Kursgrößen sollten dies etwa sieben sein.

Gruppenarbeitsphase

Die zugewiesenen Experimente und deren theoretische Fundierung werden in kleinen Gruppen möglichst selbstständig erarbeitet. Jede Gruppe hat den Auftrag, ihre Ergebnisse in einem kurzen Vortrag vorzustellen.

Für die Gruppenarbeitsphase schlagen wir die folgenden Themen vor:

1. *Die elektrische Feldstärke:* In einer eindimensionalen Anordnung wird der Zusammenhang $U \sim d$ zwischen gemessener Spannung und Abstand der Messelektroden erkundet und auf dieser Grundlage die näherungsweise geeignete Messvorschrift $E \approx \frac{U}{d}$ sowie die Festlegung der Einheit $[E] := \frac{1\text{V}}{1\text{m}}$ nachvollziehbar gemacht.
2. *Auch elektrische Feldstärken haben eine Richtung:* In einer Ebene werden in der Umgebung zweier Kontakte (nach der gleichen Vorgehensweise wie mit der Feldsonde im magnetischen Feld) Richtung und Betrag der elektrischen Feldstärke erkundet. Die Ergebnisse können im Vergleich mit einer Modellierung beurteilt werden.
3. *Die Struktur eines elektrischen Feldes erkunden:* In einer Anordnung aus zwei Kontaktpunkten wird die elektrische Feldstärke bei verschiedenartigen Kontaktanordnungen untersucht. Analogien zu Abbildungen in Lehrbüchern werden hergestellt.
4. *Elektrische Feldstärken und ihre Komponenten:* In einer Anordnung in der Umgebung zweier Kontakte (wie in 2.) wird an verschiedenen Orten die elektrische Feldstärke sowie deren x- bzw. y- Komponente gemessen und daran das Verfahren der Komponentenzerlegung eingeführt.
5. *Elektrische Feldstärken addieren:* In einer Anordnung mit vier oder mehr Kontaktpunkten wird erarbeitet, dass sich elektrische Feldstärken vektoriell addieren lassen.
6. *Das Abstandsgesetz für elektrische Feldstärken:* Mithilfe eines Elektrofeldmeters („professionelle Ausführung einer Feldsonde") wird das Abstandsgesetz für elektrische Felder in der Umgebung einer Punktladung in der Form $E \cdot 4\pi r^2 = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot Q$ erarbeitet.
7. *Das Kraftgesetz für elektrische Felder:* Im homogenen elektrischen Feld eines Plattenkondensators wird die Gleichung $F = q \cdot E$ erarbeitet und durch eine mathematische Betrachtung deren Gleichwertigkeit zur Definition aus 1. gezeigt.

Die **Anleitungsblätter** zu Gruppe 1 und 2 werden exemplarisch abgedruckt, weil sie die Grundlagen des verwendeten Messverfahrens abbilden. Einen wichtigen Anstoß für die experimentelle Gestaltung verdanken wir [1] und vertieften Diskussionen im Rahmen von [4].

Die Lernenden benötigen 2–3 Unterrichtsstunden für die selbstständige Bearbeitung der Aufgaben und die Vorbereitung ihres Vortrages.

Vortragsphase

Im Verlauf der Vortragsphase und der anschließenden Übungsphase soll sichergestellt werden, dass alle Kursmitglieder gleiche Kenntnisse erwerben. Die Vorträge werden nacheinander, streng begrenzt auf 10 Minuten, vor der Lerngruppe gehalten.

Hinweise und Erfahrungen

Zur Organisation arbeitsteiligen Unterrichtens kann man in [2] nachlesen.

Als Begleiterscheinung arbeitsteiligen Lernens können wir beobachten, dass Lernfreude und Einsatzbereitschaft steigen, nicht nur wegen der Selbsttätigkeit, sondern sicher auch, weil die gewählte Methode den Lernenden gestattet, ihr Lerntempo in den gesetzten Grenzen selbst zu bestimmen und über die Abfolge der Lernschritte selbst zu entscheiden.

Literatur

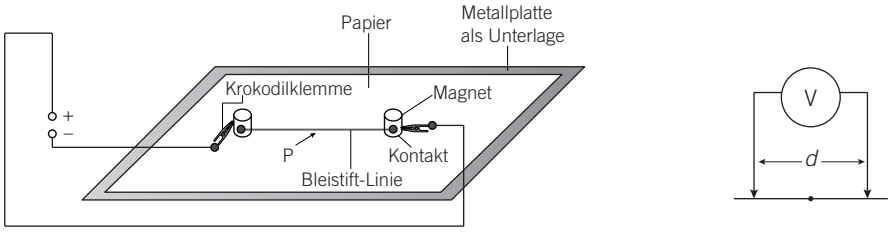
[1] Rauner, K.: Schülerexperimente mit gezeichneten Widerständen. Erlangen: Palm u. Enke, 1998. S. 47 ff.
[2] Rode, M.: Arbeitsteiliges Experimentieren. Impulse Physik 2. Stuttgart: Klett 1999.
[3] Leybold-didactic: Anleitung zum Schülerexperimentierkasten „Magnetismus – Elektrik – Elektronik". Hürth, o. J. und Gerätesatz: Leybold 585 510.
[4] NUN – Naturwissenschaftlicher Unterricht in Niedersachsen. Tagung der Multiplikatoren für Physik 2012. Das Material wird für eine online-Veröffentlichung vorbereitet.
[5] Grob, K. et al.: Die Gravitationsanalogie zur Einführung des Spannungsbegriffs. In: NiU – PC 36 (1988), Nr. 31, S. 14–19.
[6] Müller, R.: Was ist Spannung? In: PdN – Physik in der Schule, 61 (2012), Nr. 5, S. 5–16.

Anleitung für Gruppe 1: Die elektrische Feldstärke

Mit der Hall-Sonde haben wir durch geeignetes Drehen Richtung und Betrag der magnetischen Feldstärke an ausgewählten Punkten bestimmt. Mit einer geeigneten Sonde kann man im elektrischen Feld vergleichbar vorgehen.
Eine solche Sonde und deren physikalische Grundlagen sollen hier untersucht werden.

Vorbereitung

- Für das Experiment wird ein Bereich benötigt, in dem ein gut kontrollierbares elektrisches Feld herrscht. Um das möglichst einfach zu bewerkstelligen, fertigen Sie sich eine eindimensionale Anordnung an, wie es die nachstehende Aufbauzeichnung zeigt.



- Auf einem weißen Blatt wird mit einem Bleistift der Härte 8B sorgfältig eine Linie gezeichnet. Dabei muss man gleichmäßig aufdrücken und die Linie mehrmals langsam durchfahren. An beiden Enden der Linie zeichnet man eine Kontaktstelle in Form einer ausgefüllten Kreisfläche, auf die dann die Magnete als Hilfsmittel zum Erzielen eines guten elektrischen Kontaktes aufgesetzt werden.
- Die Krokodilklemmen sollen seitlich an die Haltemagnete angeheftet werden, damit der Kontakt zur Bleistiftlinie möglichst stabil bleibt.
  Bitte achten Sie daher darauf, dass die Klemmen die Magnete nicht unbeabsichtigt anheben.
- Die elektrische Feldsonde besteht aus zwei Bananensteckern, deren Messleitungen mit einem Spannungsmessgerät verbunden werden. Diese beiden Stecker berühren die Bleistiftlinie so, dass der Punkt P genau in der Mitte zwischen beiden Steckern liegt. Der Abstand der beiden Stecker voneinander heißt *d*.

Aufgaben

1. Legen Sie, wie im Bild rechts dargestellt, einen Punkt P auf der Linie fest.
   - Messen Sie die Spannung *U*, die Sie erhalten, wenn Sie den Abstand *d* der beiden Bananenstecker planmäßig verändern.
   - Stellen Sie Ihre Ergebnisse in einem *d*-*U*-Diagramm dar.
   - Zeigen Sie, dass dieses Diagramm in einem weiten Bereich zu einer linearen Zuordnung passt.
   - Bestimmen Sie die Steigung des Graphen im linearen Bereich und deren Einheit.
     Die eben bestimmte Steigung ergibt einen Messwert für die elektrische Feldstärke $\vec{E}$.
   - Überlegen Sie, wie man die Steigung bestimmen könnte, wenn der Graph nicht linear wäre.
2. Überprüfen Sie die Behauptung, dass die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ von der Wahl des Punktes P unabhängig sei.
   Dazu dürfen Sie die beiden Steckkontakte in die kleine Feldsonde aus Plexiglas stecken. Diese Feldsonde stellt sicher, dass d konstant gehalten bleibt.
3. Untersuchen Sie, wie die elektrische Feldstärke am Punkt P von der vom Netzteil gelieferten Spannung U_N abhängt.
4. Stellen Sie das Ergebnis in einem U_N-*E*-Diagramm dar.

Auswertung

- Bereiten Sie einen **Vortrag** über Ihr Ergebnis vor.
  Dieser Vortrag soll nicht wesentlich länger als 10 Minuten dauern. Er muss sich auf eine oder mehrere gut lesbare Folien stützen. Während des Vortrages dürfen Sie die Tafel nur als Projektionsfläche benutzen.
- **Der spezielle Beitrag Ihrer Gruppe zum Gesamtbild:** Am Ende Ihres Vortrages soll den Zuhörenden klar sein, was man unter elektrischer Feldstärke versteht und wie man die in Ihrem Experiment gemessen hat.

© Friedrich Verlag GmbH | UNTERRICHT PHYSIK 138 | 2013 | Zum Beitrag S. 18–25

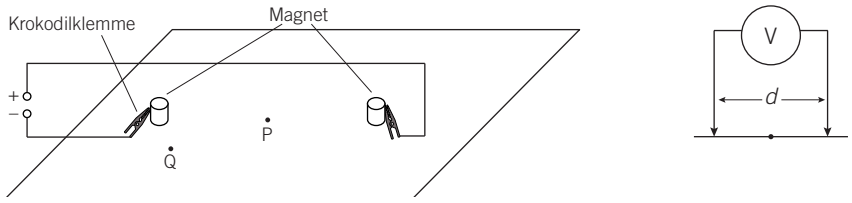
Anleitung für Gruppe 2: Auch elektrische Feldstärken haben eine Richtung

Mit der Hall-Sonde haben wir durch geeignetes Drehen Richtung und Betrag der magnetischen Feldstärke an ausgewählten Punkten bestimmt. Mit einer geeigneten Sonde kann man im elektrischen Feld vergleichbar vorgehen.
Eine solche Sonde und deren physikalische Grundlagen sollen hier untersucht werden.

Vorbereitung

Für das Experiment wird ein Bereich benötigt, in dem ein gut kontrollierbares elektrisches Feld herrscht.

- Um das möglichst einfach zu bewerkstelligen, verwenden Sie eine experimentelle Anordnung auf einem Spezialpapier, wie es die nachstehende Aufbauzeichnung zeigt.



- An zwei Punkten, die etwa 15 – 20 cm auseinander liegen sollen, werden die Magnete als Hilfsmittel zur Herstellung eines guten elektrischen Kontaktes aufgesetzt. Die Krokodilklemmen sollen seitlich angeheftet werden, damit der Kontakt zur Bleistiftfigur möglichst gut ist. Bitte achten Sie darauf, dass die Klemmen die Magnete nicht unbeabsichtigt anheben.
- Ihre elektrische Feldsonde besteht aus zwei Messleitungen mit Bananensteckern in einem Distanzstück aus Plexiglas. Verbinden Sie die andere Seite der Messleitungen mit dem Spannungsmessgerät. Die beiden Stecker in dem Plexiglasstück sollen bei einer Messung die Unterlage fest berühren, ohne sie dabei zu zerstören. Der Punkt, an dem die Messung vorgenommen wird, soll möglichst genau in der Mitte zwischen den beiden Bananensteckern liegen.
- Gruppe 1 wird zeigen, dass man eine gute Näherung für den Betrag der elektrischen Feldstärke $\vec{E}$ erhält, wenn man die gemessene Spannung durch den Abstand der beiden Kontakte dividiert. Einen so bestimmten Näherungswert benutzen Sie bitte für Ihre Messungen.

Aufgaben

1. Wählen Sie sich einen beliebigen Messpunkt aus. Setzen Sie dort die Feldsonde auf.
   Stellen Sie durch Drehen der Feldsonde (wie im magnetischen Feld) die Richtung und den Betrag der elektrischen Feldstärke an diesem Punkt fest. Die Richtung von $\vec{E}$ ist dabei durch die Richtung der Sonde festgelegt, die Pfeilspitze ist zum Minuspol der Quelle orientiert.
   Prüfen Sie die Aussage: In der Nähe des Minuspols zeigen alle Pfeile von $\vec{E}$ auf diesen Pol, in der Nähe des Pluspols von diesem weg.
2. Erarbeiten Sie sich den zugehörigen Text im Schulbuch.
   Versuchen Sie, mit Ihren Mitteln mindestens eines der dort abgebildeten Bilder nachzubilden, und fertigen Sie dazu eine eigene grafische Darstellung an.
   Formulieren Sie eine Entsprechung zum anschaulichen Teil des Abstandsgesetzes für das magnetische Feld um einen Leiter.
3. Informieren Sie sich über typische Größenordnungen der elektrischen Feldstärke.
4. Versuchen Sie, mit Ihrem Aufbau die Wirkung eines Faraday‘schen Käfigs nachzuweisen.

Auswertung

- Bereiten Sie einen **Vortrag** über Ihr Ergebnis vor. Dieser Vortrag soll nicht wesentlich länger als 10 Minuten dauern. Er muss sich auf eine oder mehrere gut lesbare Folien stützen. Während des Vortrages dürfen Sie die Tafel nur als Projektionsfläche benutzen.
- **Der spezielle Beitrag Ihrer Gruppe zum Gesamtbild:** Am Ende Ihres Vortrages soll den Zuhörenden klar sein, wie typische Feldlinienbilder aussehen und wie deren Ausmessung dem Vorgehen im magnetischen Feld gleicht.

© Friedrich Verlag GmbH | UNTERRICHT PHYSIK 138 | 2013 | Zum Beitrag S. 18 – 25

Ein vertiefender Blick auf die beiden Sonden: Gemeinsamkeiten und Unterschiede

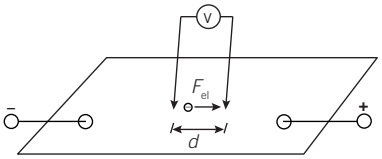


Abb. 8: Die elektrische Feldsonde wird in der eindimensionalen Anordnung betrachtet

Grundlegendes zur Physik der elektrischen Feldsonde

Die von unserer Feldsonde angezeigten Messwerte sind Spannungen. Sie lassen sich mit den Kenntnissen aus dem Mittelstufen-Unterricht so deuten: Von dem kleinen elektrischen Strom, der zwischen den Kontakten der Sonde fließt, wird die elektrische Energie $E = U \cdot I \cdot \Delta t$ übertragen. Diese Energie kann auch auf das Wirken einer Kraft auf die im Zeitintervall Δt transportierte Ladung $Q = N \cdot e$ längs des Wegelementes d zurückgeführt werden, so dass gilt: $U \cdot I \cdot \Delta t = F_{el} \cdot d$. Mit der Einsetzung $I = \frac{N \cdot e}{\Delta t}$, worin N die Anzahl der Elektronen ist, die während des Zeitintervalls Δt zwischen den Kontakten bewegt werden und e die Elementarladung, erhält man durch Umformung von $U \cdot \frac{N \cdot e}{\Delta t} \cdot \Delta t = F_{el} \cdot d$ die Beziehung $\frac{U}{d} = \frac{F_{el}}{N \cdot e}$, die die Identität der Definitionsgleichung für die elektrische Feldstärke mit der benutzten Messvorschrift darstellt, wenn d klein genug ist. In diesem Fall kann das elektrische Feld im Bereich der Sonde als homogen angenommen werden, so dass die elektrische Feldkraft dort ebenfalls als näherungsweise konstant angenommen werden darf.

Vorstellungen über Elektrizität aus dem Unterricht in der Mittelstufe erscheinen geeignet, Aussagen über elektrische Felder zu erschließen.

Theoretisch müsste eine gute elektrische Feldsonde beliebig kurz gestaltet werden und eindimensional ausgeführt werden. Die Eindimensionalität unterscheidet sie von einer Hallsonde genauso wie das Verfahren zur Festlegung der Feldrichtung: Die Richtung des elektrischen Feldes wird nach sachgerechter Ausrichtung der Sonde näherungsweise durch deren Richtung angezeigt.

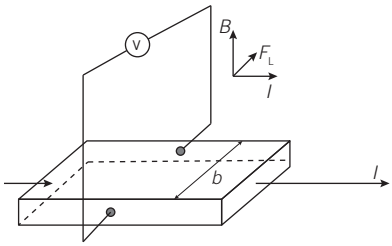


Abb. 9: Schematische Darstellung einer Hall-Sonde. Am oberen Bildrand ist die Drei-Finger-Regel dargestellt, die zur gemessenen Spannung führt

Zur Physik der magnetischen Feldsonde

In der Hallsonde nutzt man zur Messung einen möglichst gut konstant gehaltenen elektrischen Strom der Stromstärke I, den man sich als Strom von Elektronen der Geschwindigkeit v denken kann. Auf diese bewegten Elektronen wirkt die Lorentzkraft $F_L = e \cdot v \cdot B$. Sie bewirkt eine Ladungsverschiebung zwischen den Kontaktflächen der Sonde, als deren Folge ein elektrisches Feld entsteht, das so lange anwächst, bis die elektrische Feldkraft und die Lorentzkraft entgegengesetzt gleich groß sind. In diesem Zustand kann die Spannung $U_H = v \cdot B \cdot b$ zwischen den Anschlüssen des Spannungsmessgerätes gemessen werden.

Die gemessene Spannung ist besonders groß, wenn die Richtung der magnetischen Feldstärke senkrecht auf der Richtung des elektrischen Stroms steht.

Eine solche Sonde muss in den zwei Richtungen, senkrecht zum elektrischen Strom und zur gemessenen Spannung, ausgedehnt sein. Sie kann zwar theoretisch sehr klein ausgeführt werden, muss aber wegen der vier notwendigen Kontakte grundsätzlich mindestens zweidimensional gedacht werden.

Die Richtung des magnetischen Feldes wird dabei durch den Normalenvektor auf der Sondenfläche beschrieben. Diese Richtung wird also ganz anders festgelegt als bei der elektrischen Feldsonde.

Strukturgleichheiten: Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Beide Sonden erlauben die Bestimmung von Betrag und Richtung der zu messenden Größe. Beide Sonden können aus technischen Gründen nicht beliebig klein gestaltet werden, so dass beide prinzipiell nur Mittelwerte der Messgröße in einem Raumgebiet angeben können.

Beide Messverfahren beruhen auf einer Spannungsmessung. Allerdings ist die elektrische Feldsonde (mindestens theoretisch) ohne eine externe Hilfsgröße funktionsfähig, denn die für die Anzeige am Spannungsmessgerät erforderliche Energie $e \cdot U$ wird direkt dem elektrischen Feld entnommen. Die Richtung des in der Sonde vom Feld angetriebenen, sehr kleinen elektrischen Stroms stimmt (bis auf das Vorzeichen) mit der Richtung der elektrischen Feldstärke überein, wenn die Sonde sachgerecht ausgerichtet wurde. Im Unterschied dazu benötigt eine Hallsonde zu ihrem Betrieb einen elektrischen Strom als externe Hilfsgröße, denn nur auf bewegte Ladungen wirkt die magnetische Feldkraft und es entsteht gemäß der Dreifingerregel das schließlich für die gemessene Spannung verantwortliche elektrische Feld. Aus dieser Spannung (wieder bei sachgerecht ausgerichteter Sonde) lässt sich allerdings erst mit der Kenntnis der Dreifinger-Regel die Richtung der magnetischen Feldstärke erschließen.

Bezüge zum Unterricht in der Mittelstufe

In Niedersachsen konzentriert sich der Elektrik-Unterricht in der Mittelstufe hauptsächlich auf die Vermittlung von altersangemessenen Vorstellungen zum elektrischen Stromkreis. Ein zentrales Anliegen ist dabei die Einführung des Begriffs Spannung. Durch den hier beschriebenen Zugang kann man nach unserer Erfahrung sowohl der Ausbildung von Fehlvorstellungen begegnen als auch Anknüpfungspunkte für eine spätere Behandlung des elektrischen Feldes schaffen.

Elektronenstrom und Energiestrom

Es ist sinnvoll, bei der Behandlung von Stromkreisen frühzeitig den kreisförmig zirkulierenden Elektronenstrom vom gerichteten Energiestrom zu unterscheiden.

Untersucht man nun Stromkreise mit verschiedenen elektrischen Quellen, so kann man feststellen, dass mit einem Elektronenstrom fester Größe nicht immer auch ein identischer Energiestrom verknüpft sein muss. Es liegt nahe, die elektrische Spannung als Maß für die je Elektron übertragbare Energie einzuführen.

So lassen sich die Zusammenhänge von Energie- und Elektronenstrom leicht deuten, viele Lernende verlangen jedoch auch nach anschaulichen Vorstellungen.

Die verbreitete Fehlvorstellung, dass Elektronen beim Verlassen der Quelle je eine Energieportion gleichsam wie einen Rucksack mit sich trügen, muss vermieden werden [6]. Stattdessen erscheint es uns sinnvoll, die obige Festlegung durch Bilder zu ergänzen, welche die Höhenanalogie bzw. Gravitationsanalogie [5] zur Darstellung der Spannung nutzen.

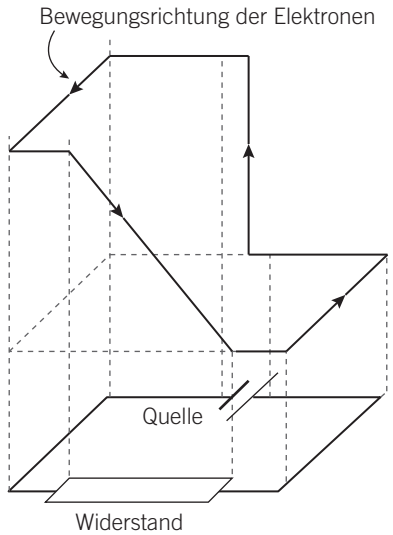


Abb. 10: Höhenanalogie für die Spannung für einen einfachen Stromkreis

Die Höhenanalogie

Der bislang als eben dargestellte Schaltkreis wird in der Höhenanalogie zu einer „Berg-und-Tal-Fahrt“ für die Elektronen (s. **Abb. 10**): In der Quelle werden die Elektronen vom Pluspol zum Minuspol bergauf gebracht, der erreichte Höhenunterschied stellt die Spannung der Quelle dar. Die „elektrisch hoch liegenden“ Elektronen laufen durch die äußeren Drähte und das Gerät (hier ein Widerstand) zurück zum Pluspol der Quelle. Dabei ist die „Gebirgslandschaft“ so eingerichtet, dass die Elektronen überall dort an Höhe verlieren, wo „wie bei einem Reibungseffekt“ eine Energieübertragung in die Umgebung auftritt. Das ist in den Kabeln (fast) nicht der Fall, die Elektronen verlieren (fast) die ganze „Höhe“ beim Durchlaufen des Widerstands. Dieser Höhenunterschied entspricht der Spannung zwischen den Enden des Widerstands.

Erfahrungen

Die Höhenanalogie bietet eine leicht zu visualisierende Deutung der Spannung. Schülerinnen und Schüler nutzen sie in unserem Unterricht auch für quantitative Argumentationen und Vorhersagen, indem sie im weiteren Unterrichtsverlauf eine etwas veränderte graphische Darstellung verwenden.

Die gemessene Spannung wird in **Abbildung 11** nicht über dem Ort, sondern über dem Widerstandswert aufgetragen, die Zuleitungen sind wegen deren sehr kleinem Widerstandswert nur noch durch Punkte dargestellt. Das Gefälle in einem solchen Diagramm bedeutet wegen $\frac{U}{R} = I$ die elektrische Stromstärke und ist in beiden Abschnitten gleich.

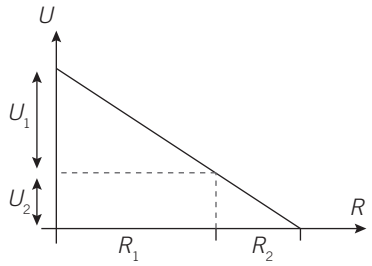


Abb. 11: Schematisches *R-U*-Diagramm für eine Reihenschaltung

Die Lernenden verwenden die Darstellungsform weiter, um die Teilspannungen in einer Reihenschaltung von Widerständen zu deuten bzw. vorherzusagen. So wird ein visueller Zugang zur Maschenregel ermöglicht. Die Darstellung lässt sich danach bei der Untersuchung verschiedener Sensoren nutzen, die auf Reihenschaltungen basieren. Auch die Diskussion von Halbleiterbauelementen profitiert von der neuen Darstellungsart. Ausführliches Material, auch zur experimentellen Ausgestaltung, kann bei den Verfassern abgerufen werden.

Durch Auftragung der gemessenen Spannungswerte über dem Ort im Stromkreis, bestimmt durch die Leiterlänge *s*, erhält man Darstellungen, mit denen – in der Höhenanalogie gesprochen – die verschiedenen Gefälleabschnitte des Elektronenweges identifiziert werden können. Verschiedene Gefälleabschnitte im *s-U*-Diagramm haben unterschiedliche Steigung. Diese lässt sich im Unterricht der Oberstufe mit der elektrischen Feldstärke durch die Näherung $E \approx \frac{U}{d}$ verknüpfen. So wird der Zugang zum Begriff der elektrischen Feldstärke durch Spannungsmessung mit der Feldsonde vorbereitet.