

Analogien in der Elektrodynamik mit FieldLab

H. Hauptmann, F. Herrmann, M. Suleder

1 Einleitung

Ein Atlas enthält Bilder der Erdoberfläche: physische Karten, politische Karten, Straßenkarten, geologische und klimatologische Karten, Karten, die Völkerwanderungen oder Kriege wiedergeben, Karten, aus denen die Verteilung von Industrie und Landwirtschaft hervorgeht, Karten zur Ökologie und zu Touristenströmen. Neuerdings gibt es auch Atlanten mit Satellitenphotos, also „richtigen“ Bildern der Erdoberfläche. Jede dieser Karten vermittelt einen anderen Eindruck vom dargestellten Gegenstand. Es ist bemerkenswert, dass man, wenn man eine konkrete Frage hat, meist nicht zum Satellitenbild greift, denn dort findet man die gewünschte Information entweder gar nicht, oder sie ist nur mit Mühe zu erkennen. Die nicht fotografierten Bilder sind wertvoller, weil sie etwas zeigen, was man in Wirklichkeit nicht sehen kann.

Felder sind von vornherein unsichtbar. Aber auch von ihnen kann man Bilder machen, und man kann Felder, wie die Erdoberfläche, auf unterschiedliche Arten bildlich darstellen. Auch hier entstehen, je nach Wahl der Darstellung, sehr unterschiedliche Eindrücke. Man kann auch bei Feldern durch geschickte Wahl des Darstellungsverfahrens erreichen, dass sich der Betrachter eine einfache und klare Vorstellung vom dargestellten Gegenstand macht. Ebenso wie einer Karte im Atlas, kann man auch einem Feldbild oft auf einen Blick ansehen, was sich in Worten nur sehr umständlich ausdrücken ließe.

Wie kann man ein Bild von einem Feld herstellen?

Zunächst hat man die Wahl, welche physikalische Größe dargestellt werden soll. Im Falle des magnetischen Feldes etwa die magnetische Feldstärke, die magnetische Induktion, die Magnetisierung, das magnetische Skalarpotenzial, das magnetische Vektorpotenzial oder die Energiedichte.

Außerdem hat man die Wahl zwischen verschiedenen grafischen Methoden. Skalare Feldgrößen, wie das Skalarpotenzial oder die Energiedichte, kann man darstellen durch Flächen (im Zweidimensionalen Linien), auf denen die Größe einen konstanten Wert hat. Man kann sie auch darstellen durch einen Grauverlauf oder Farbverlauf, oder auch durch einen 3D-Plot.

Vektorielle Feldgrößen, wie die Feldstärke, die Magnetisierung oder das Vektorpotenzial, kann man darstellen entweder durch Feldlinien, oder durch die Orthogonalflächen zu den Feldlinien (im Zweidimensionalen Orthogonallinien), aber auch durch Vektorpfeile, die auf einem quadratischen Gitter angeordnet sind, oder durch einen Grauverlauf, der nur den Betrag der vektoriellen Größe wiedergibt.

Tatsächlich ist die Vielfalt der Darstellungsverfahren, die man in den Lehrbüchern von Schule und Hochschule antrifft, nicht sehr groß. Das Standard-Darstellungsverfahren ist das Feldlinienbild. Nur für elektrostatische Felder wer-

den gelegentlich die Orthogonalflächen, die hier Äquipotenzialflächen heißen, gezeichnet. Auch Computerprogramme beschränken sich gewöhnlich auf die Darstellung von Feldlinien und Äquipotenzialflächen. Wir haben uns so an die Feldlinienbilder gewöhnt, dass uns die Frage nach Alternativen gar nicht mehr in den Sinn kommt.

In diesem Artikel wird gezeigt, welche Vorteile verschiedene Darstellungen von Feldern haben. In Abschnitt 2 wird dafür plädiert, außer den Feldlinien, stets auch die Orthogonalflächen darzustellen. Man sieht auf diese Art nicht nur, wo sich die Flussquellen des Feldes befinden, d. h. die Stellen, an denen das Feld Divergenzen hat, sondern man erkennt auch auf einen Blick die Lage der Wirbelquellen, d. h. die Stellen, an denen die Rotation von null verschiedene Werte hat. Außerdem wird eine weit gehende Analogie innerhalb der Elektrodynamik deutlich. In Abschnitt 3 wird die Analogie auf den Fall ausgedehnt, dass Influenzerscheinungen auftreten. Eine Analogie etwas anderer Art, nämlich die zwischen Weichmagnet und Supraleiter, wird in Abschnitt 4 erläutert.

Die Bilder in diesem Artikel wurden mit dem Programm FieldLab, das an unserem Institut entwickelt worden ist, hergestellt [1]. FieldLab wird in Abschnitt 5 vorgestellt. Abschnitt 6 enthält weitere Beispiele von mit FieldLab erstellten Bildern.

2 Flussquellen und Wirbelquellen

Wir beschränken uns auf die Betrachtung von stationären Feldern, und zwar entweder nur elektrischen oder nur magnetischen. Mit stationär ist gemeint: Die Feldstärke ändert sich nicht mit der Zeit. Stationär ist also nicht gleich statisch. Unter einem elektrostatischen Feld versteht man ein elektrisches Feld, das als Quellen nur ruhende elektrische Ladungen hat. Zu den stationären elektrischen Feldern dagegen gehören auch solche Felder, die durch eine magnetische Flussänderung zustande kommen, vorausgesetzt, die Zeitableitung der magnetischen Induktion ist zeitlich konstant. Nimmt der elektrische Strom in einer Spule gleichmäßig zu, so ist an jedem Ort $\partial \vec{B} / \partial t = \text{const.}$ Damit ist auch das induzierte elektrische Feld überall zeitlich konstant.

2.1 Fluss- und Wirbelquellen im elektrischen Feld

Man kann jedes stationäre elektrische Feld in zwei Anteile zerlegen, je nachdem, welche „Quellen“ das Feld hat. Mit Quelle ist ein anderes System gemeint, mit dem das elektrische Feld unlösbar verbunden ist.

Die eine Art von Quellen sind die elektrischen Ladungen, also Stellen mit

$$\rho \neq 0.$$

Hier ist ρ die elektrische Ladungsdichte. Wir verstehen unter Ladung nicht nur die so genannte freie Ladung, sondern auch die „gebundene“, d. h. die Ladung, die an der Oberfläche eines polarisierten Dielektrikums sitzt. Wir nennen die elektrischen Ladungen die *Flussquellen* des Feldes. Wegen der dritten maxwellschen Gleichung

$$\operatorname{div} \vec{E} = \rho / \epsilon_0 \quad (1)$$

erkennt man die Flussquellen im Feldlinienbild daran, dass dort Feldlinien beginnen oder enden, Abb. 1a.

Die andere Art von Quellen, die *Wirbelquellen*, sind die Stellen, an denen sich die magnetische Induktion \vec{B} zeitlich ändert, also Stellen mit

$$\partial \vec{B} / \partial t \neq 0.$$

Für die Wirbelquellen gilt die zweite maxwellsche Gleichung

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (2)$$

Wo die Wirbelquellen sitzen, erkennt man am Feldlinienbild aber nur schlecht. Geschlossene Feldlinien deuten zwar darauf hin, dass irgendwo im Innern Wirbelquellen liegen müssen, Abb. 1a. Den genauen Ort der Wirbelquellen sieht man dem Bild aber nicht an.

Statt der Feldlinien kann man nun auch die zu den Feldlinien orthogonalen Flächen zeichnen. Wir wollen sie *Feldflächen* nennen. Im Gegensatz zum Feldlinienbild sieht man dem Feldflächenbild sehr deutlich an, wo die Wirbelquellen sitzen: dort wo die Feldflächen enden, Abb. 1b. Dafür sieht man einem solchen Bild nicht so gut an, wo sich die Flussquellen befinden.

Am besten ist es daher, man zeichnet beide: Feldlinien und Feldflächen, Abb. 1c. Die Feldlinien sind hier und im Folgenden schwarz, die Feldflächen grau dargestellt.

Da Abbildungen zweidimensional sind, wählt man als Beispiele gewöhnlich Anordnungen von Fluss- und Wirbelquellen, die senkrecht zur Zeichenebene Translationssymmetrie haben. Das ist auch bei Abb. 1 der Fall. Eine Flussquelle ist hier ein unendlich dünner mit Ladung belegter Draht, der senkrecht zur Zeichenebene liegt. Das Bild stellt gewissermaßen das Feld einer Punktladung im Zweidimensionalen dar. Eine punktförmige Wirbelquelle im Zweidimensionalen erhält man, indem man sich eine unendlich dünne Spule senkrecht zur Zeichenebene vorstellt, in der man eine zeitlich konstante magnetische Flussänderung erzeugt.

Schon *Maxwell* [2] benutzte durchweg die Darstellung der Felder mit Feldlinien und Feldflächen, Abb. 2. Man ist heute geneigt, dieses Darstellungsverfahren auf den Fall elektrostatischer Felder zu beschränken. Das Argument lautet etwa so: „Die Orthogonalflächen sind Äquipotentialflächen. In Wirbelfeldern kann man aber kein Potenzial definieren, also haben auch die Äquipotentialflächen keinen Sinn.“ Tatsächlich kann man aber die Orthogonalflächen in jedem Fall zeichnen. Man kann zwar den einzelnen Flächen nicht mehr unbedingt einen Potenzialwert zuordnen, aber

¹⁾ Gewöhnlich schreibt man die 3. maxwellsche Gleichung so: $\operatorname{div} \vec{D} = \rho_{\text{frei}}$. Nun gilt für die Polarisation \vec{P} : $\operatorname{div} \vec{P} = -\rho_{\text{gebunden}}$. Mit der allgemein gültigen Beziehung $\epsilon_0 \vec{E} = \vec{D} - \vec{P}$ erhält man daraus $\epsilon_0 \operatorname{div} \vec{E} = \operatorname{div} \vec{D} - \operatorname{div} \vec{P} = \rho_{\text{frei}} + \rho_{\text{gebunden}}$. Bezeichnen wir die Gesamtladungsdichte $\rho_{\text{frei}} + \rho_{\text{gebunden}}$ mit ρ , so erhalten wir $\epsilon_0 \operatorname{div} \vec{E} = \rho$.

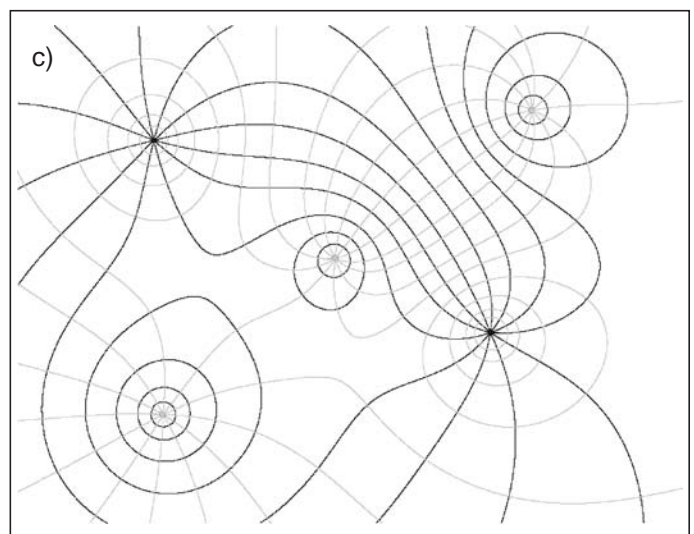
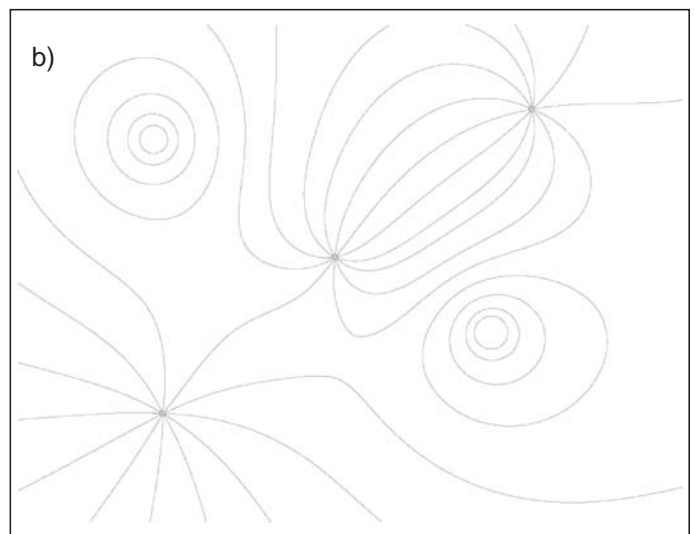
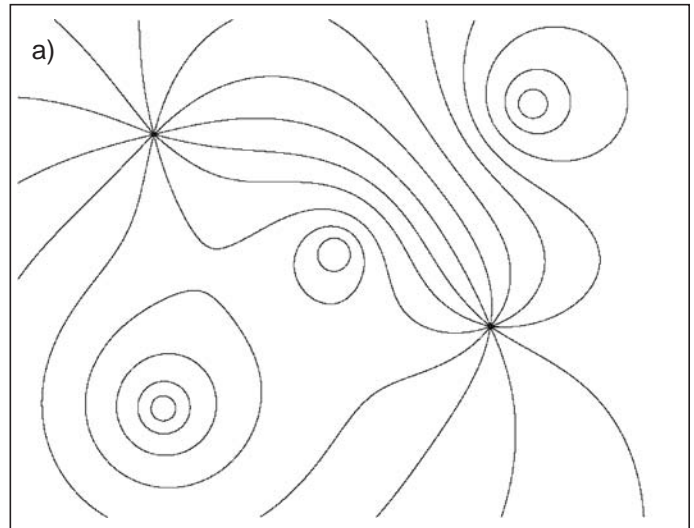


Abb. 1: Elektrisches Feld mit zwei punktförmigen Flussquellen und drei punktförmigen Wirbelquellen, (a) Feldlinien, (b) Feldflächen, (c) Feldlinien und -flächen

das ändert nichts an der Nützlichkeit einer solchen Darstellung. Gerade bei Wirbelfeldern sind die Feldflächen besonders aussagekräftig, weil man aus ihnen die Verteilung der Wirbelquellen ablesen kann. Es nimmt übrigens auch niemand daran Anstoß, dass man den Feldlinien nicht Werte irgendeiner physikalischen Größe zuordnen kann.

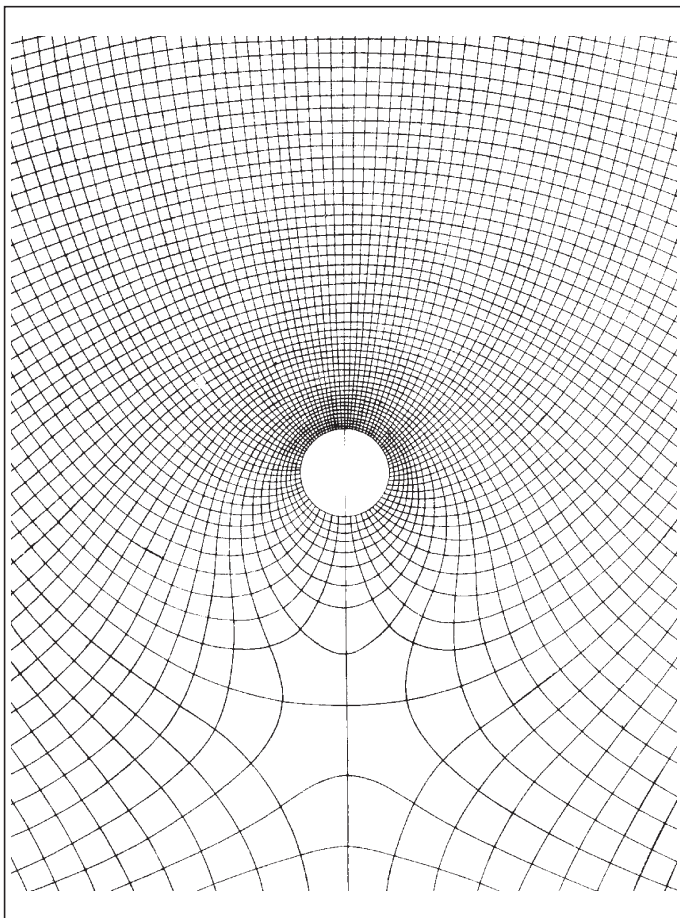
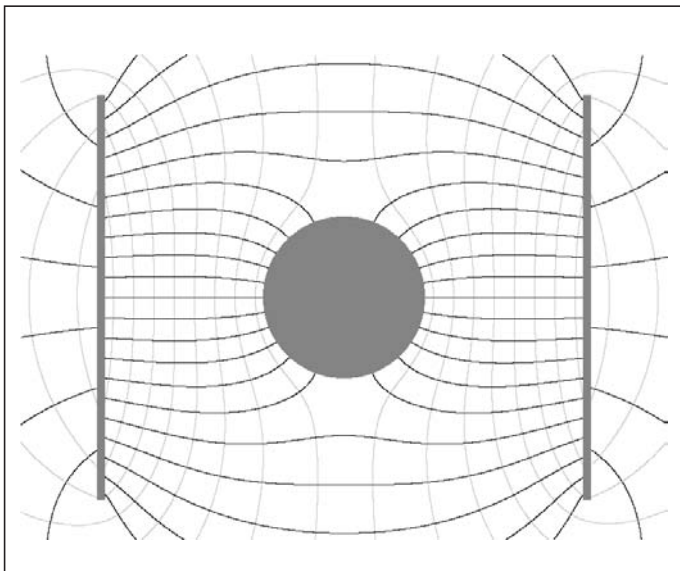


Abb. 2: Überlagerung des magnetischen Feldes eines elektrischen Stromes (senkrecht zur Zeichenebene) und eines homogenen magnetischen Feldes in „Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus“ von Maxwell. Maxwell stellte in allen seinen Feldabbildungen die „Kraftlinien“ und die „Niveauflächen“ dar.

2.2 Fluss- und Wirbelquellen im magnetischen Feld

Da die erste Maxwellgleichung dieselbe Gestalt hat wie die zweite und die dritte dieselbe wie die vierte, lässt sich das im vorangehenden Abschnitt gesagte auf Magnetfelder übertragen. Man muss allerdings darauf achten, dass man

Abb. 3: Das Bild lässt zwei Interpretationen zu: 1. Zwei nicht leitende, elektrisch geladene Platten; dazwischen ein Zylinder aus einem elektrisch leitenden oder polarisierbaren Material. 2. Die beiden Polflächen eines außen herum geschlossenen Magneten; dazwischen ein Zylinder aus einem weichmagnetischen Material.



die Feldgrößen richtig aufeinander abbildet: Der elektrischen Feldstärke \vec{E} entspricht die magnetische Feldstärke \vec{H} , und der elektrischen Verschiebung \vec{D} entspricht die magnetische Induktion \vec{B} . So wie wir uns beim elektrischen Feld auf die Darstellung von \vec{E} beschränken, so zeichnen wir beim magnetischen Feld nur \vec{H} . Solange keine Materie beteiligt ist, kann man die Feldlinienbilder von \vec{H} und \vec{B} , bzw. von \vec{E} und \vec{D} gar nicht unterscheiden. Nur innerhalb von magnetisierten bzw. polarisierten Körpern treten Unterschiede auf. Dass die magnetische Induktion divergenzfrei ist, d. h.

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0,$$

äußert sich im B -Feldlinienbild darin, dass Feldlinien nirgends beginnen oder enden. Für die magnetische Feldstärke dagegen gilt, in Analogie zu Gleichung (1):

$$\operatorname{div} \vec{H} = \rho_m / \mu_0 \quad (3)$$

Hier ist ρ_m die Dichte der magnetischen Ladung [3]. Die magnetische Ladung des Nordpols wurde durch Konvention als positiv festgelegt. Im Gegensatz zum elektrischen Fall gibt es nur gebundene magnetische Ladung. Gleichung (3) sagt uns, dass sich die Flussquellen des magnetischen Feldes dort befinden, wo magnetische Ladung sitzt, d. h. an den Magnetpolen.

Man trifft die Größe „magnetische Ladung“ in modernen Büchern kaum noch an. Es habe sich herausgestellt, so argumentiert man, dass es keine isolierten magnetisch geladenen Teilchen gibt, und darum gebe es auch keine magnetische Ladung. Dieses Argument beruht auf einer Verwechslung der Begriffe „Teilchen“ und „physikalische Größe“. Ein Teilchen ist etwas, was man in der Natur antrifft. Physikalische Größen dagegen sind Menschenwerk. Die Frage, ob es eine Größe gibt oder nicht, stellt sich gar nicht. Man definiert sie, wenn es zweckmäßig ist. Das ist bei der magnetischen Ladung sicher der Fall. Man kann ihre Werte bestimmen, und man kann mathematische Zusammenhänge angeben, in denen sie vorkommt. Sogar die Tatsache, dass es keine magnetischen Monoparteilchen gibt, kann man erst durch sie richtig ausdrücken: Die magnetische Ladung aller bisher beobachteten Teilchen ist null. Das heißt aber nicht, dass in einem ausgedehnten System, wie etwa in einem makroskopischen Magneten, die magnetische Ladungsdichte überall null sein müsste [4, 5].

Auch Gleichung (2) hat ein Analogon, die erste maxwellische Gleichung:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \partial \vec{D} / \partial t + j \quad (4)$$

Außer dem Term $\partial \vec{D} / \partial t$, der elektrischen Verschiebungsstromdichte, der das Analogon zu $\partial \vec{B} / \partial t$ ist, steht auf der rechten Seite von Gleichung (4) noch die elektrische Leitungsstromdichte j . Den entsprechenden Term gibt es in Gleichung (2) nicht. Da es keine Träger magnetischer Ladung gibt, gibt es auch keine magnetischen Leitungsströme. Gleichung (4) sagt uns, dass sich die Wirbelquellen des magnetischen Feldes dort befinden, wo die elektrische Stromdichte (des Verschiebungsstroms oder des Leitungsstroms) von null verschieden ist.

Aus der Analogie zwischen den Gleichungen (1) und (3), sowie zwischen (2) und (4) folgt, dass jedes Bild, das eine elektrische Feldverteilung zeigt, auch das Bild eines magnetischen Feldes ist.

Eine im Zweidimensionalen punktförmige magnetische Ladung bedeutet im Dreidimensionalen einen linienförmigen Magnetpol. Es ist kein Widerspruch, dass ein Bild nur einen einzigen Magnetpol enthält. Man muss sich nur den zugehörigen zweiten Pol in großer Entfernung liegend vorstellen.

3 Elektrische und magnetische Influenz

Elektrostatisch verhält sich ein Material mit einer sehr großen Dielektrizitätszahl, also mit $\epsilon \gg 1$, wie ein elektrischer Leiter. Bringt man einen Körper, der entweder elektrisch leitet, oder ein sehr großes ϵ hat, in ein elektrisches Feld, so verdrängt er das Feld aus seinem Innern. Er erreicht dies dadurch, dass an seiner Oberfläche eine elektrische Ladungsverteilung entsteht, die die elektrische Feldstärke überall im Innern des Körpers zu null kompensiert. Die Feldlinien unmittelbar an der äußeren Oberfläche des Körpers stehen senkrecht auf dieser Oberfläche, die Feldflächen liegen parallel zu ihr. Man nennt die Erscheinung Influenz. Im Fall eines elektrischen Leiters ist die Oberflächenladung freie Ladung, im Fall des Dielektrikums ist es gebundene Ladung.

Für das magnetische Analogon dieser Materialien gibt es nicht mehr zwei Realisierungen, sondern nur noch eine. Es sind die Stoffe mit $\mu \gg 1$, die so genannten weichmagnetischen Stoffe. Magnetische Leiter gibt es nicht.

Reale Dielektrika und weichmagnetische Stoffe verdrängen das Feld aus ihrem Innern natürlich nur solange, wie das Material nicht in den Sättigungsbereich gelangt. Wir nehmen im Folgenden an, dass keine Sättigung vorliegt.

Wir hatten in Abschnitt 2.2 gesehen, dass jedes Bild eines stationären elektrischen Feldes auch das Bild eines magnetischen Feldes ist. Wir sehen jetzt, dass diese Behauptung auch dann noch zutrifft, wenn Influenz im Spiel ist. Bei der einen Interpretation des Bildes handelt es sich um elektrische, bei der anderen um magnetische Influenz. Abb. 3 zeigt ein Feld, das die beiden folgenden Interpretationen zulässt:

1. zwei nicht leitende, elektrisch geladene Platten, dazwischen ein elektrisch leitender oder leicht polarisierbarer Zylinder;
2. die Polflächen eines Dauermagneten, dazwischen ein Zylinder aus Weicheisen. (Der Magnet ist außen herum geschlossen).

4 Supraleiter

Wenn wir im Folgenden von Supraleitern sprechen, so meinen wir die reinen Supraleiter oder „Supraleiter erster Art“ (und nicht die komplizierteren *Shubnikow*-Supraleiter, oder Supraleiter zweiter Art). Sie stimmen mit den Weichmagneten insofern überein, als sie das magnetische Feld aus ihrem Innern verdrängen. Während die Weichmagneten diesen Zustand dadurch realisieren, dass sie an ihrer Oberfläche magnetische Pole bilden, wird das Feld im Innern eines Supraleiters dadurch kompensiert, dass an seiner Oberfläche elektrische Ströme entstehen. Als Folge davon liegen die magnetischen Feldlinien an der äußeren Oberfläche parallel zu dieser, während die magnetischen Feldflächen senkrecht in die Oberfläche einmünden, Abb. 4a.

Diese Tatsachen haben zur Folge, dass es für jedes zweidimensionale Bild eines Feldes noch eine dritte Interpretation

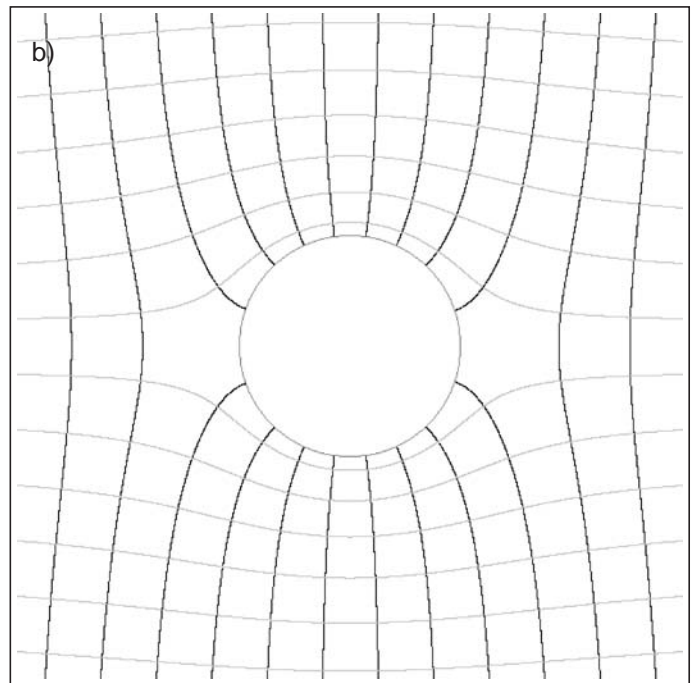
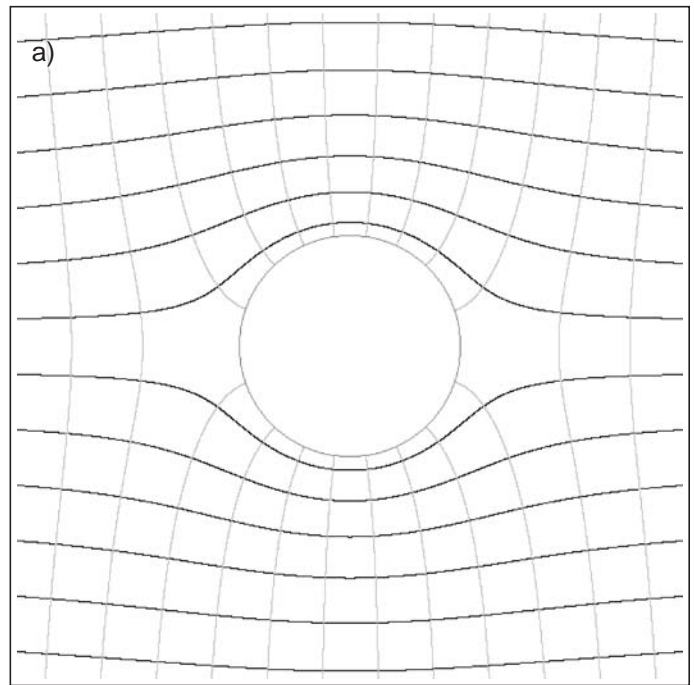


Abb. 4: (a) Supraleitender Zylinder in einem ursprünglich homogenen magnetischen Feld (Feldrichtung im Bild von links nach rechts). Die Feldflächen münden senkrecht in den Supraleiter ein. (b) Weichmagnetischer Zylinder in einem ursprünglich homogenen magnetischen Feld oder elektrisch leitender Zylinder in einem ursprünglich homogenen elektrischen Feld (Feldrichtung im Bild von oben nach unten). Die Feldlinien münden senkrecht in den Zylinder ein.

gibt. Wir betrachten noch einmal Abb. 4. Vertauscht man in Abb. 4a Schwarz und Grau, d.h. die Feldlinien mit den Feldflächen (die im zweidimensionalen auch nur als Linien erscheinen), so erhält man das Bild eines anderen Feldes: eines weichmagnetischen Zylinders im homogenen magnetischen Feld oder eines elektrisch leitenden Zylinders im homogenen elektrischen Feld, Abb. 4b.

Im Dreidimensionalen kann man diese Vertauschung natürlich nicht mehr machen.

Die Frage ist nahe liegend, ob auch eine Interpretation von Abb. 4a möglich ist, bei der die Farben nicht vertauscht werden, aber bei der das Feld ein elektrisches Feld ist.

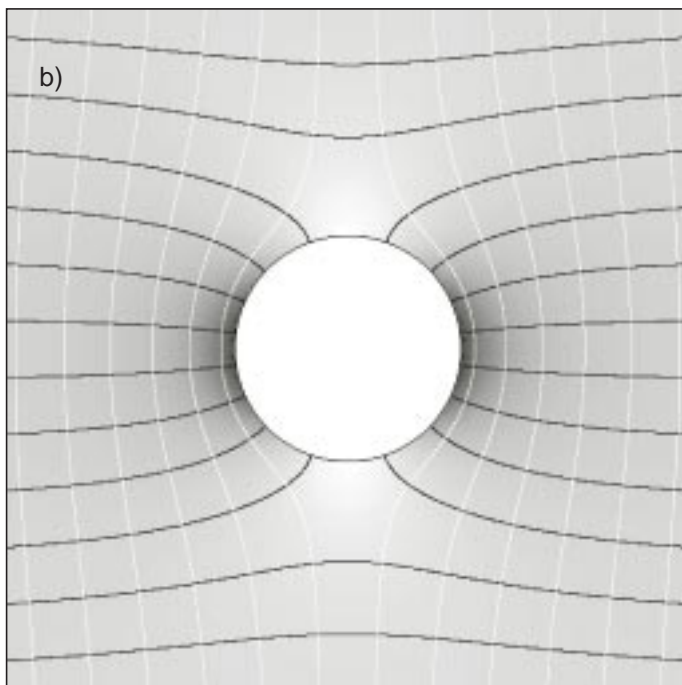
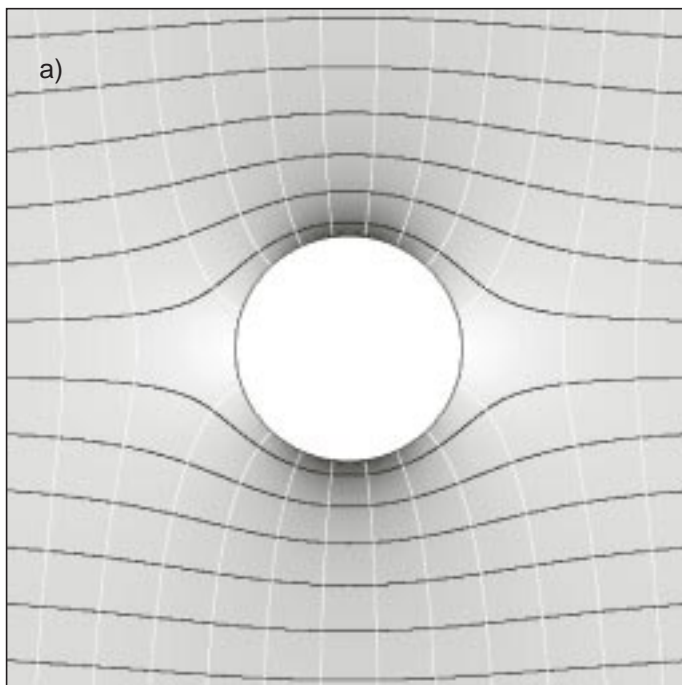


Abb. 5: (a) Ein Supraleiter verdrängt das Feld aus seinem Inneren quer zur Richtung des äußeren Feldes. (b) Ein Weichmagnet verdrängt das Feld parallel zur Richtung des äußeren Feldes. Die Grautönung entspricht der Energiedichte. Die Feldflächen sind ausnahmsweise weiß.

Tatsächlich gibt es eine solche Interpretation nicht. Denn da es keine normalen magnetischen Leitungsströme gibt, gibt es auch keine magnetischen Supraströme. Die Natur hat also diese Erscheinung nicht realisiert. Oder etwas vorsichtiger ausgedrückt: Die Menschen haben die Erscheinung bisher nicht entdeckt.

Vergleicht man die Verteilung der Energiedichte in der unmittelbaren Umgebung eines Supraleiters in einem äußeren Feld mit dem in der Umgebung eines Weichmagneten, so sieht man, dass das Feld aus dem Inneren in verschiedene Richtungen verdrängt wird. Der Zylinder in Abb. 5a ist ein Supraleiter. Die Grautönung stellt die Energiedichte dar. Man sieht, dass das Feld über und unter dem Supraleiter verstärkt wird, während es rechts und links von ihm abge-

schwächt wird. Der Supraleiter verdrängt also das Feld aus seinem Inneren quer zur Richtung des äußeren Feldes. Das ist genau umgekehrt wie beim Weichmagneten, Abb. 5b, der das Feld parallel zur Richtung des äußeren Feldes aus seinem Inneren verdrängt.

5 FieldLab

FieldLab ist ein Programm für die graphische Darstellung stationärer elektrischer oder magnetischer Felder [1]. Die Struktur des Programms lässt drei Blöcke erkennen, die wir „zeichnen“, „rechnen“ und „darstellen“ genannt haben.

5.1 Zeichnen

Mit einem bequemen Editor werden auf dem Bildschirm Körper platziert, und es werden deren elektrische bzw. magnetische Eigenschaften definiert. Man kann wählen zwischen Flussquellen und Wirbelquellen. Die Körper sind punktförmig, quadratisch, rechteckig, kreisförmig oder elliptisch oder sie sind durch einen Polygonzug begrenzt. Die Quellen können über das Innere des Körpers verteilt sein oder an seiner Oberfläche sitzen. Der Wert der Dielektrizitätszahl bzw. der Permeabilitätszahl kann festgelegt werden. Die Quellen können auch als frei beweglich definiert werden, und zwar sowohl die Flussquellen (elektrische Ladung in einem elektrischen Leiter bzw. magnetische Ladung in einem Weichmagneten), als auch die Wirbelquellen (die elektrischen Ströme in einem Supraleiter).

5.2 Rechnen

Wenn man mit dem Zeichnen fertig ist, lässt man rechnen. Es wird das Feld in jedem Punkt eines sehr feinen Rasters der Zeichenfläche berechnet. Die Dauer des Rechengangs hängt stark von der Art des Problems ab. Sind nur punktförmige Quellen vorhanden, so dauert das Rechnen nur einige Sekunden. Etwas länger dauert es, wenn Quellen über das Innere eines Körpers verteilt sind. Noch längere Rechenzeiten werden gebraucht, wenn ein Körper vorhanden ist, in dem Influenz stattfindet. Dann liegt die Verteilung der Quellen am Anfang noch nicht fest. Am kompliziertesten, und damit auch am längsten, wird die Rechnung, wenn mehrere Körper mit verschiebbaren Quellen vorhanden sind. Da die Quellenverschiebung in dem einen von der Quellenverteilung in den anderen abhängt, muss die endgültige Quellenverteilung iterativ bestimmt werden. Die Rechenzeit hängt natürlich in jedem Fall auch von der Größe des Bildes ab.

5.3 Darstellen

Die Herstellung des Bildes aus den gerechneten Daten dauert in jedem Fall nur wenige Sekunden. Man kann wählen zwischen verschiedenen physikalischen Größen: Feldstärke, Feldstärkebetrag und Energiedichte. Nachdem man sich für eine der Größen entschieden hat, hat man noch die Wahl des Darstellungsverfahrens. Die Feldstärkeverteilung kann mit Feldlinien und Feldflächen (im Zweidimensionalen Linien) dargestellt werden, oder durch Vektorpfeile auf einem quadratischen Gitter, oder durch ein Bild, das an einen Eisenfeilspäneversuch erinnert. Die skalaren Größen können dargestellt werden durch Falschfarben oder ein perspektivisches 3D-Bild.

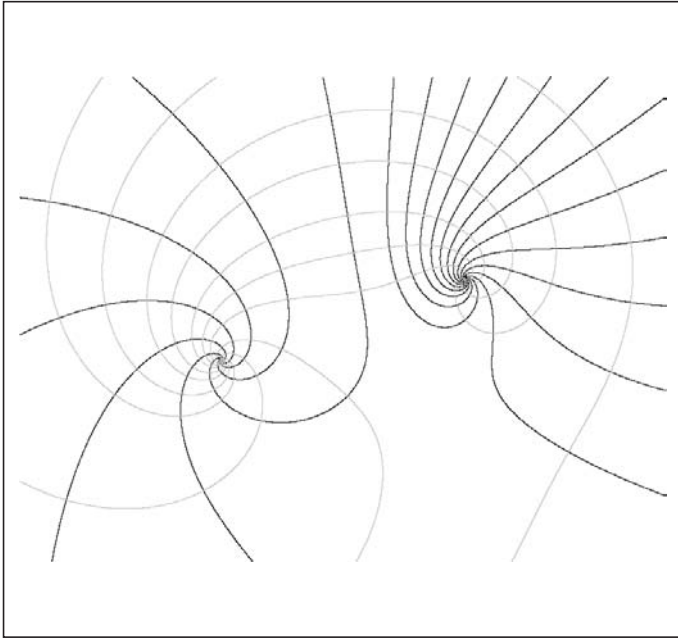


Abb. 8: Man erkennt zwei Stellen, an denen sich je eine Fluss- und eine Wirbelquelle befindet.

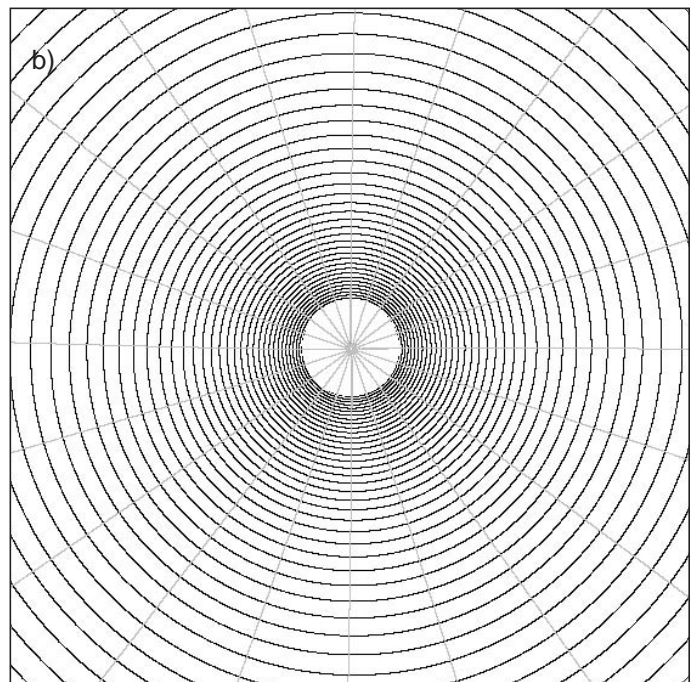
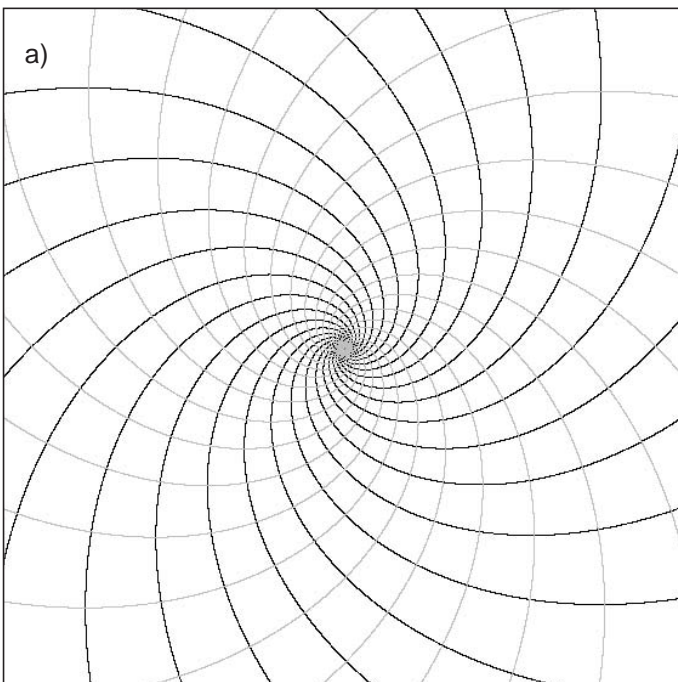
6 Beispiele

Im Folgenden werden einige Beispiele vorgestellt. Jedes Beispiel dient dazu, einen besonderen Aspekt des elektrischen oder magnetischen Feldes zu verdeutlichen.

6.1 Was ist das Feld?

Wir hatten gesehen, dass jedes Feldlinienbild bis zu drei verschiedene Interpretationen hat. Wir wollen uns bei Abb. 6 (siehe beiliegende Folie) auf eine davon beschränken: Abb. 6 zeige das Feld eines elektrisch geladenen, nicht leitenden Zylinders, der senkrecht zur Zeichenebene steht,

Abb. 11: Es ist im Allgemeinen nicht möglich, Feldlinien so zu zeichnen, dass die Liniendichte proportional zur Feldstärke ist. (a) Fluss- und Wirbelquellen sind gleich stark. (b) Die Stärke der Flussquelle wurde auf 1/100 ihres ursprünglichen Wertes vermindert, und es wurde nur noch eine einzige Feldlinie gezeichnet. Die Feldliniendichte ist viel größer als es der Feldstärke entspricht. (In der näheren Umgebung der Quellen wurde die Linie nicht mehr gezeichnet, da dort benachbarte Spiralaringe nicht mehr aufgelöst worden wären.)



in verschiedenen Darstellungen. Die Ladungsdichte ist im Innern des Zylinders konstant, d. h. ortsunabhängig. Die Teilbilder zeigen, dass man von ein und demselben Gegenstand sehr unterschiedliche visuelle Eindrücke erzeugen kann. Die verschiedenen Bilder fördern damit auch die Entstehung sehr unterschiedlicher Anschauungen. Bei Schülern und Studenten, die nur Feldlinienbilder gesehen haben, beobachtet man eine Neigung, das Feld selbst mit den Feldlinien zu verwechseln.

6.2 Wo ist das Feld?

Nimmt man das Feld ernst als real existierendes physikalisches System, so ist die Frage danach, wo sich das Feld befindet, eine sehr natürliche Frage. Betrachtet man die verschiedenen Darstellungen in Abb. 6, so bekommt man auf diese Frage ganz unterschiedliche Antworten. Die Abb. 6a und 6b legen nahe, das Feld sei überall. Es wird zwar nach außen schwächer, aber es reicht trotzdem unendlich weit. Dieser Eindruck entsteht durchaus nicht mehr bei den Abb. 6f und 6g. Aus diesen Bildern schließt man, dass das Feld auf einen Bereich in der unmittelbaren Nachbarschaft der Oberfläche des geladenen Körpers beschränkt ist. Natürlich hat es keinen scharfen Rand, aber diese Eigenschaft hat auch ein Atom oder die Lufthülle der Erde. Die Abb. 6f und 6g geben also sicher die bessere Antwort auf die Frage „Wo ist das Feld“, als 6a und 6b. Die Abb. 7a und 7b (siehe hintere Umschlagseite) zeigen weitere Felddichteverteilungen. Bei dem Kondensator, Abb. 7a, ist das Feld auf den Raum zwischen den Platten beschränkt. Das Gebilde von Abb. 7b ist eigentlich gar kein Kondensator mehr. Das Feld reicht nach allen Richtungen über die Platten hinaus.

6.3 Fluss- und Wirbelquellen

Um die Quellen (Flussquellen und Wirbelquellen) sichtbar zu machen, zeichnet man am besten Feldlinien und Feldflächen. Das wurde schon in Abschnitt 2.2 gezeigt. Abb. 8 zeigt ein weiteres Beispiel.

An zwei Stellen liegen je eine Fluss- und eine Wirbelquelle. Die beiden Flussquellen haben gleiche, die Wirbelquellen entgegengesetzte Vorzeichen. Interpretiert man das Bild als elektrisches Feld, so bedeutet das, dass sich an jeder der beiden Stellen eine dünne Spule mit zeitlich veränderlichem magnetischem Fluss befindet, die außerdem noch elektrisch geladen ist.

6.4 Bewegliche Quellen

Zum Verdeutlichen der Influenz ist sowohl die Darstellung von Feldlinien und -flächen nützlich, als auch eine Farbverlaufsdarstellung. Interpretieren wir Abb. 9 (siehe hintere Umschlagseite) wieder als das Bild eines elektrischen Feldes. Rechts und links befinden sich je eine nicht leitende, elektrisch geladene Platte, dazwischen zwei Metallkörper mit der Nettoladung null. In Abb. 9a haben die Metallkörper einen großen Abstand, in Abb. 9b einen kleineren. Man sieht, dass sich die beiden Metallkörper von Abb. 9b gegenseitig beeinflussen. In Abb. 10 (siehe beiliegende Folie) ist dargestellt, wie man ein Feld abschirmen kann. Links befindet sich ein runder, elektrisch geladener Körper, rechts ein „Kasten“ aus einem elektrisch leitenden Material, ein Faradaykäfig. Man sieht, dass der Innenraum des Kastens feldfrei ist, obwohl er ein Loch hat.

6.5 Feldliniendichte und Feldstärke

In Spezialfällen ist die Feldliniendichte proportional zur lokalen Feldstärke. Ein Beispiel hierfür ist das Feld des elektrisch geladenen Zylinders von Abb. 6a. In manchen Büchern wird behauptet, dies sei eine allgemein gültige Eigenschaft von Feldlinienbildern: die Feldliniendichte sei ein Maß für die elektrische Feldstärke. Tatsächlich ist das im Allgemeinen nicht der Fall, und zwar aus mehreren von einander unabhängigen Gründen [6, 7]. Abb. 11 zeigt ein Beispiel. Im Zentrum der Bilder befinden sich je eine Flussquelle und eine Wirbelquelle. In Abb. 11a sind beide Quellen gleich stark, und es wurden je 20 Feldlinien und Feldflächen eingezeichnet. Alles scheint in Ordnung zu sein. Wir vermindern nun die Flussquelle auf $1/100$, lassen aber

die Stärke der Wirbelquelle unverändert. Das hat zur Folge, dass sich der Betrag der Feldstärke in jedem Punkt um etwa den Faktor 1,4 vermindert. Dieser Feldstärke sollte auch eine um denselben Faktor kleinere Feldliniendichte entsprechen. Wir beginnen nun damit, das Feldlinienbild herzustellen, indem wir eine erste Feldlinie zeichnen, Abb. 11b. Bereits diese erste Linie spiralt nun aber schon so dicht um das Zentrum herum, dass die resultierende Linienendichte weit größer ist als es der tatsächlichen Feldstärke entspricht. Durch weitere Verminderung der Stärke der Flussquelle könnte man die Linienendichte beliebig erhöhen, auch wenn man nur eine einzige Feldlinie zeichnet.

6.6 Feldlinien, Feldflächen und Farbtonung gleichzeitig

Abb. 12 (siehe beiliegende Folie) zeigt noch ein Bild, bei dem mehrere Darstellungsmittel gleichzeitig angewendet wurden: Feldlinien, Feldflächen und Farbverlauf. Welches der beiden Linienfelder die Feldlinien und welches die Feldflächen darstellt, haben wir offen gelassen. Das Bild lässt zwei verschiedene Interpretationen zu. Wir überlassen die Deutung den Leserinnen und Lesern.

Literatur

- [1] FieldLab, Demoversion und weitere Infos unter „<http://www-tfp.physik.uni-karlsruhe.de/~didaktik/>“, Rubrik „Software“, Vollversion ab 20 €
- [2] J. C. Maxwell: Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus, Verlag von Julius Springer, Berlin 1883
- [3] W. Macke: Elektromagnetische Felder. Ein Lehrbuch der Theoretischen Physik, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1960, S. 78
- [4] F. Herrmann: Magnetische Eigenschaften von Materialien im Unterricht, PdN-Ph 8/44 (1995), S. 17
- [5] F. Herrmann: Altlasten der Physik (38): Magnetpole, PhidS 36 (1998), S. 242
- [6] A. Wolf, S. J. van Hook and E. R. Weeks: Electric field line diagrams don't work, Am. J. Phys. 64 (1996), S. 714 - 724
- [7] F. Herrmann, H. Hauptmann, M. Suleder: Representations of Electric and Magnetic Fields, Am. J. Phys., zur Veröffentlichung angenommen.

Anschrift der Verfasser:

Holger Hauptmann, Prof. Dr. Friedrich Herrmann, Michael Suleder, Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe

Experimente mit Styroporkästen

Teil 1: Wärmeleitfähigkeit bei Gleichgewichtsbedingungen

U. Zimmermann

1 Einleitung

In früheren Arbeiten wurde bereits gezeigt, dass mit Hilfe eines Modellhauses aus Styropor in dem sich eine elektrische Heizung befindet zahlreiche Informationen über Energieeinsparungsmöglichkeiten und über Wärmetrans-

portprozesse gewonnen werden können [1, 2]. Inzwischen gibt es eine Reihe von weiteren Arbeiten zu dieser Thematik [3]-[9].

Um Aussagen über systematische Fehler bei Experimenten mit Styroporkästen machen zu können wurden Experimente mit Kästen unterschiedlicher Wandstärke sowohl mit als auch ohne Miniaturlüfter durchgeführt.

**Abb. 7 zum Beitrag *H. Hauptmann, F. Herrmann, M. Suleder:*
Analogien in der Elektrodynamik mit FieldLab**

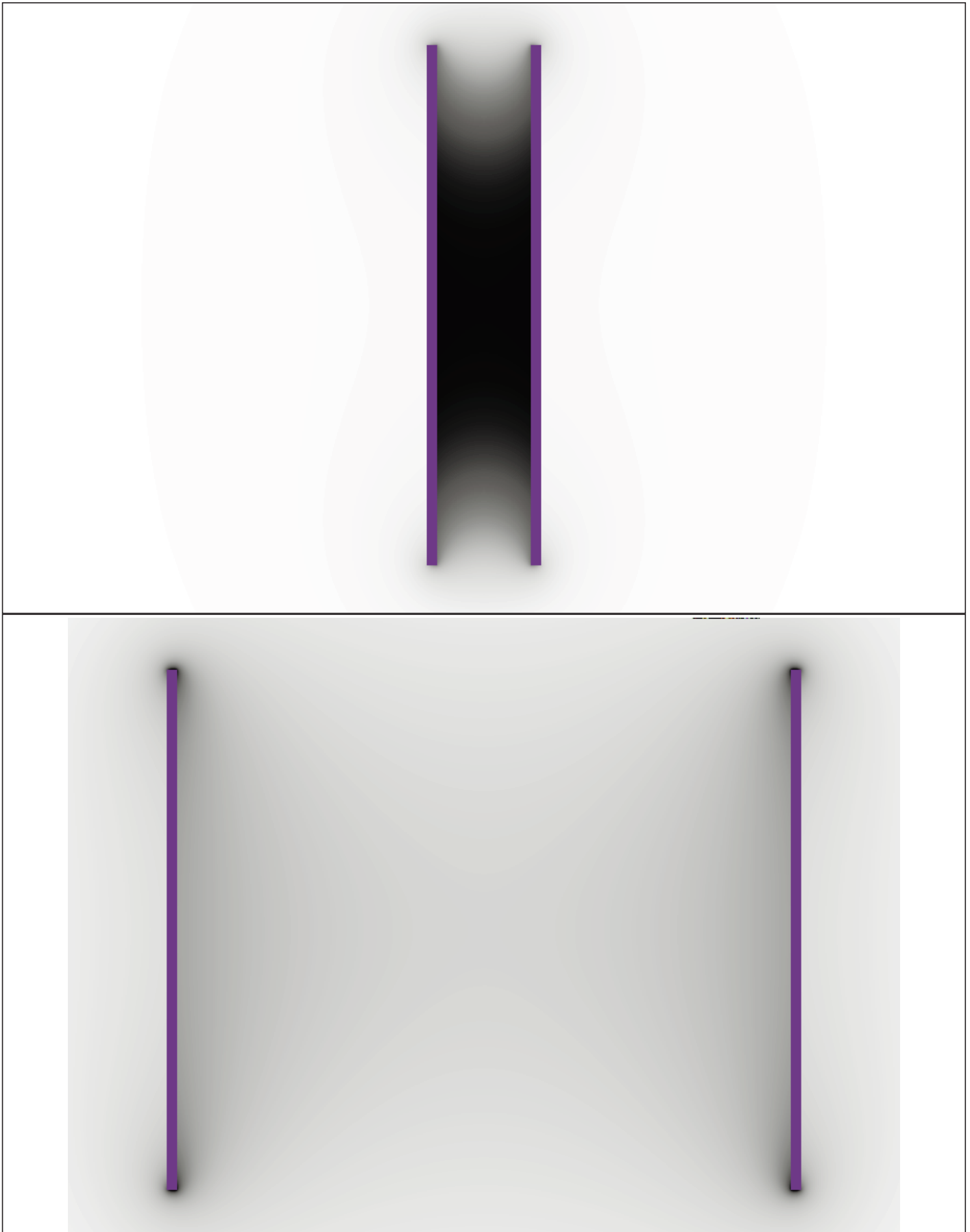


Abb. 7: Wo ist das Feld? (a) Das Feld ist auf den Raum zwischen den beiden Platten beschränkt. (b) Das Feld reicht nach allen Richtungen über die Platten hinaus. Die Grautönung entspricht der Energiedichte.

Abb. 9 zum Beitrag *H. Hauptmann, F. Herrmann, M. Suleder: Analogien in der Elektrodynamik mit FieldLab*

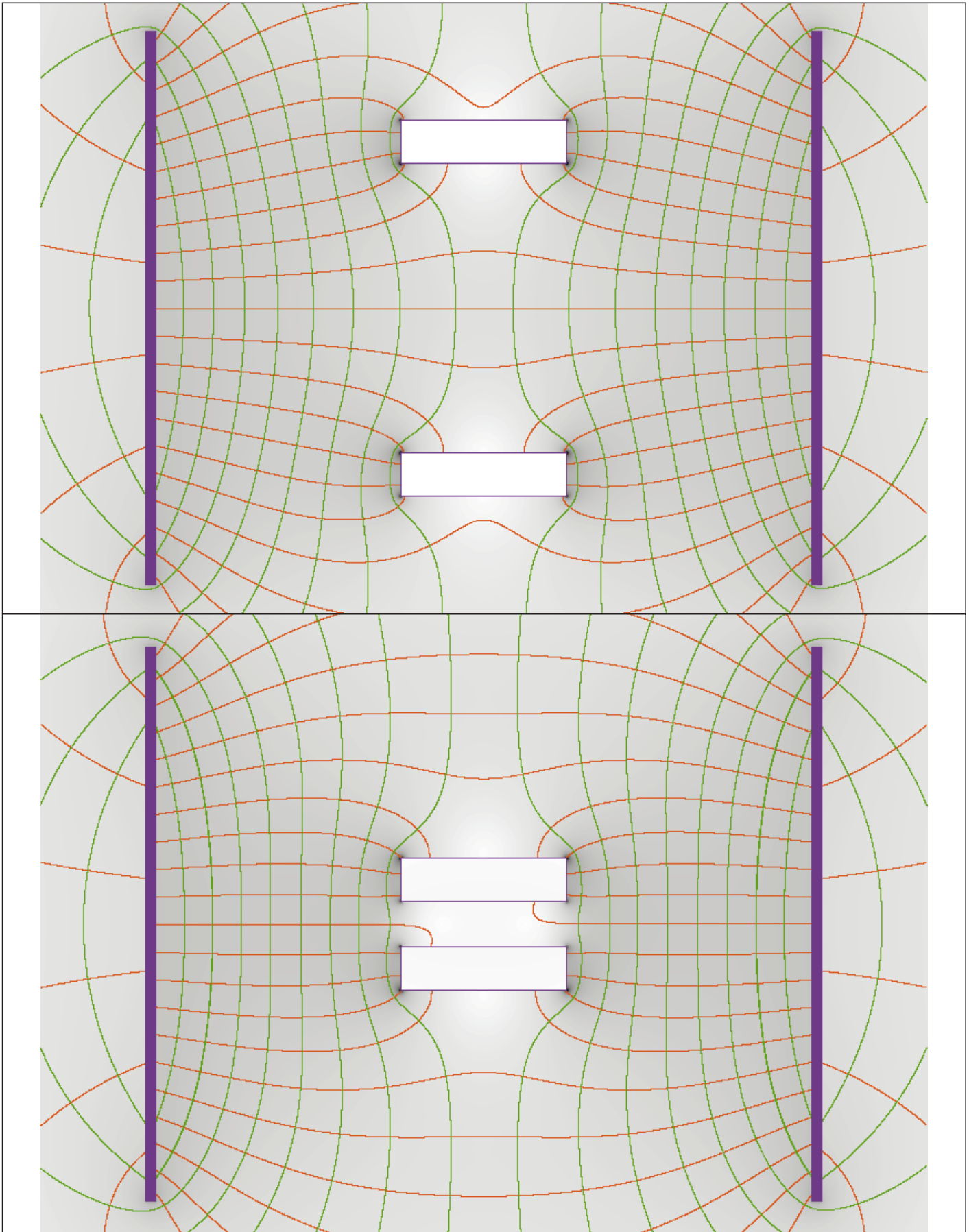


Abb. 9: Zwei nicht leitende Platten, die entgegengesetzt gleiche elektrische Ladung tragen; dazwischen zwei Körper aus elektrisch leitendem Material. Die beiden Körper in (b) beeinflussen sich gegenseitig. Die Grautönung entspricht dem Feldstärkebetrag.