

Magnetische Eigenschaften von Materialien im Unterricht

F. Herrmann

*Abteilung für Didaktik der Physik, Institut für Theoretische Festkörperphysik, Universität,
76128 Karlsruhe*

Zusammenfassung:

Nicht nur Schüler, sondern auch Studenten und Lehrbuchautoren haben Probleme mit der Magnetostatik. Es werden die Ursachen hiervon diskutiert, und es werden drei Vorschläge gemacht:

- Man führe die magnetische Ladung (in Analogie zur elektrischen Ladung) ein.
- Man behandle die Magnetostatik auf der Grundlage der magnetischen Feldstärke H .
- Man beschränke sich bei der Diskussion magnetischer Materialien auf ideale hartmagnetische, ideale weichmagnetische und supraleitende Stoffe.

1. Defizite beim Verständnis des Magnetismus

Unsere Schülerinnen und Schüler haben im Physikunterricht ihre erste Begegnung mit dem Feldbegriff im Zusammenhang mit dem Magnetismus, genauer: bei der Untersuchung der Eigenschaften von Dauermagneten. Die Phänomene, die wir betrachten, sind sehr deutlich, die Kräfte sind groß, die Experimente sind so, daß sie jeder Schüler selbst machen kann, das Thema ist interessant.

Um so merkwürdiger ist es, daß das Wissen über Magnete und magnetische Erscheinungen nach der Behandlung des Magnetismus auffällig gering ist.¹ Die Schwierigkeiten beim Umgang mit dem Magnetismus sind aber durchaus nicht auf Schüler und Studenten beschränkt. Auch was unsere Schulbücher zu dem Thema sagen, ist nicht immer korrekt.

So findet man oft unrichtige Aussagen darüber, wo sich bei einem Dauermagneten die Pole befinden. Tatsächlich liegen die Pole eines homogen magnetisierten Stabmagneten an den Endflächen. In einigen unserer Schulbücher wird gesagt, daß sich die Pole dort befinden, wo Eisenfeilspäne hängenbleiben. Eisenfeilspäne bleiben nun aber nicht nur an den Stirnflächen, sondern auch an den Seiten des Magneten, bis zur Mitte hin, hängen. (Eisenspäne bleiben nicht nur dort hängen wo der Magnet seine Pole hat.) Den Schülern wird damit suggeriert, auch die Pole würden sich bis zur Mitte hin ziehen. Durch die unglückliche Farbgebung von Magneten, die von Lehrmittelfirmen vertrieben werden, wird dieser falsche Eindruck noch verstärkt.

Ein anderer Fehler, den man in Schulbüchern häufig antrifft, hat mit den Feldlinienbildern von Dauermagneten zu tun. Abbildung 1 zeigt ein typisches Beispiel. Hieran ist auszusetzen, daß die Feldlinien nur von den Stirnflächen weg nach außen laufen. Tatsächlich nimmt aber die Feldliniendichte nach innen hin zu. Außerdem werden die Feldlinien oft so gezeichnet, daß sie orthogonal auf den Stirnflächen stehen. Auch das ist nicht richtig. Eine Feldlinienverteilung, wie sie Abb. 1 zeigt, ist prinzipiell nicht realisierbar.

Man mag entgegenen, es handele sich hier um qualitative Darstellungen, und dabei komme es doch auf solche Details nicht an. Man bedenke aber, daß es genauso einfach gewesen wäre, ein richtiges Feldlinienbild zu zeichnen.

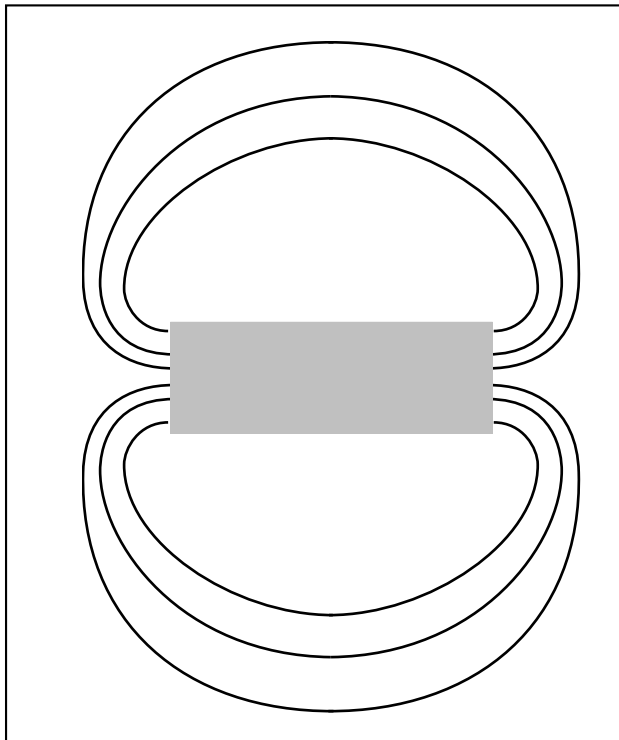


Abb. 1. Unrichtiges Feldlinienbild wie man es in vielen Schulbüchern findet. Die Feldlinien sollten nicht nur nach außen weglaufen. Außerdem sollten sie nicht auf den Stirnflächen senkrecht stehen. Verleiche mit Abb. 3c.

2. Ursachen der Probleme

Wenn man nach dem Schuldigen für die Probleme sucht, die Schüler, aber auch noch Physikstudenten mit der Magnetostatik haben, führt die Spur nicht einfach in die Lehrbücher der Schule, sondern sie geht weiter bis in die Elektrodynamikvorlesung an der Universität, oder bis in die Lehrbücher der Hochschulen. Dem, was dort gelehrt wird, sind die Vorwürfe zu machen. Unsere Kritik an den Hochschulbüchern bezieht sich auf drei verschiedene Dinge:

- zum ersten ist den meisten Hochschulbüchern eine ungeeignete Wahl der Größen, mit denen das Feld beschrieben wird, vorzuwerfen,
- zum zweiten, die Tatsache, daß die magnetische Polladung, eine altbewährte Größe der Elektrodynamik, aus fast metaphysischen Gründen aus der Elektrodynamik hinausgeworfen wurde und
- zum dritten der Mißbrauch der Hysteresiskurve.

Wir werden im Folgenden diese drei Vorwürfe diskutieren.

a) Ungeeignete Wahl der Feldgrößen

Zur Beschreibung des magnetischen Zustands von Materie und Vakuum sind, unter anderen, drei vektorielle Feldgrößen im Gebrauch: die magnetische Flußdichte \mathbf{B} , die magnetische Feldstärke \mathbf{H} und die Magnetisierung \mathbf{M} . \mathbf{B} und \mathbf{H} sind zwei Feldgrößen, mit denen das eigentliche Feld beschrieben wird, \mathbf{M} beschreibt den Magnetisierungszustand der Materie, die Ausrichtung der elementaren, atomaren Magnete. Bei einem Dauermagneten ist sie vom Hersteller in das Material eingepreßt worden.

Die drei Größen sind nicht unabhängig voneinander, sondern verknüpft über die Beziehung:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad (1)$$

Man kann also im Prinzip auf eine der drei Feldgrößen \mathbf{M} , \mathbf{B} oder \mathbf{H} verzichten. Jede von ihnen läßt sich als Linearkombination der beiden anderen schreiben.

Nun ist aber in bestimmten Bereichen der Elektrodynamik die eine oder die andere dieser

Größen besonders praktisch. So lassen sich Induktionsvorgänge besonders bequem mit dem \mathbf{B} -Feld und dem \mathbf{M} -Feld beschreiben. Wir werden zeigen, daß in der Magnetostatik hingegen die magnetische Feldstärke \mathbf{H} besonders bequem ist. Es ist hier also zweckmäßiger, \mathbf{H} und \mathbf{M} zu verwenden. Nun werden aber unsere Studenten fast durchweg so erzogen, daß sie überall, also auch in der Magnetostatik, mit der Flußdichte \mathbf{B} operieren.

Wir wollen begründen, warum \mathbf{H} in der Magnetostatik so vorteilhaft ist. Bekanntlich ist immer

$$\operatorname{div}\mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

in Worten: Die \mathbf{B} -Feldlinien sind immer geschlossen.

Daraus folgt mit (1):

$$\mu_0 \operatorname{div}\mathbf{H} = -\operatorname{div}\mathbf{M}, \quad (3)$$

in Worten: Wo das \mathbf{M} -Feld Quellen hat, hat das \mathbf{H} -Feld Senken, und wo das \mathbf{M} -Feld Senken hat, hat das \mathbf{H} -Feld Quellen. Nun ist die Magnetisierung \mathbf{M} häufig bekannt und damit auch die Quellen und Senken von \mathbf{M} . Die Quellen und Senken von \mathbf{M} sind aber genau das, was man als die dichte der magnetischen Polladung ρ_m bezeichnet:

$$\operatorname{div}\mathbf{M} := -\rho_m$$

Damit können wir Gleichung (3) auch so schreiben:

$$\operatorname{div}\mathbf{H} = \rho_m/\mu_0 \quad (4)$$

Diese Gleichung hat dieselbe Struktur wie die aus der Elektrostatik bekannte Gleichung

$$\operatorname{div}\mathbf{E} = \rho_e/\epsilon_0$$

wo \mathbf{E} die elektrische Feldstärke und ρ_e die elektrische Ladungsdichte ist.

Gleichung (4) ist nun sehr hilfreich beim Bestimmen von Feldlinienverläufen. Es ist viel einfacher, mit Hilfe von Gleichung (4) die \mathbf{H} -Linienverteilung zu bestimmen, als mit Gleichung (2) die Verteilung der \mathbf{B} -Linien. Zu wissen, daß Feldlinien geschlossen sind, wie es Gleichung (2) lehrt, ist in der Magnetostatik nicht so hilfreich wie zu wissen wo sich die Quellen und die Senken eines Feldes befinden.

Das ist auch einer der Gründe dafür, daß sich unsere Studenten in der Elektrostatik so viel besser auskennen als in der Magnetostatik. Im Allgemeinen sind in der Elektrostatik die Quellen und die Senken des Feldes gegeben. Daraus ist der Feldlinienverlauf leicht zu bestimmen, wenn man Gebrauch davon macht, daß die elektrischen Feldlinien an elektrischen Ladungen beginnen und enden.

Tatsächlich haben nun magnetostatische Probleme dieselbe Struktur wie elektrostatische, wenn man sie mit der Feldstärke \mathbf{H} formuliert. In der Magnetostatik ist im Allgemeinen die Magnetisierung vorgegeben. Damit liegen die Quellen und Senken des \mathbf{H} -Feldes fest, und um den Feldlinienverlauf zu bestimmen kann man Gleichung (4) verwenden.

Unsere erste Empfehlung lautet daher: Man benutze in der Magnetostatik die magnetische Feldstärke \mathbf{H} .

Wir werden sehen, wie einfach es wird, wenn man diese Regel beherzigt. Zunächst aber noch zu unseren anderen Vorwürfen an die Behandlung des Magnetismus an der Universität.

b) Die magnetische Ladung

Die magnetische Polladung ist ein schönes Beispiel einer mengenartigen Größe. Es gibt kaum eine andere mengenartige Größe, mit der man so gut experimentieren kann. Der experimentelle Umgang mit magnetischer Ladung ist zum Beispiel viel bequemer als der mit der elektrischen Ladung. Wie die elektrische Ladung, so ist auch die magnetische Ladung

eine extensive Größe, die zweierlei Vorzeichen annehmen kann. Diese Eigenschaft, an der die Schüler sehr viel lernen könnten, läßt man nun völlig ungenutzt, ja man verschleierte sie durch eine ungeschickte Benennung der Pole. Statt zu sagen, daß jeder Magnet, egal wie kompliziert seine Polverteilung ist, stets gleich viel positive und negative magnetische Ladung trägt, verwendet man umständliche und wenig präzise Formulierungen, in denen die positiven Werte ein und derselben Größe einen anderen Namen, nämlich Nord, bekommen als die negativen, die man mit Süd bezeichnet. Selbstverständlich wird dabei gar nicht klar, daß es sich hier überhaupt um eine physikalische Größe handelt.

Die magnetische Polladung ist eine Größe, die in vielen älteren Texten der Elektrodynamik zu finden ist. Sie ist aus den meisten Lehrbüchern verschwunden auf Grund eines Mißverständnisses. Das Argument, sie nicht zu verwenden ist, daß es diese Größe überhaupt nicht gebe, denn, so wird argumentiert, es gibt ja keine isolierten Magnetpole. Tatsächlich hat das eine mit dem anderen nichts zu tun. Von einer physikalischen Größe kann man prinzipiell nicht sagen, ob es sie gibt oder nicht. Physikalische Größen sind vom Menschen erfundene Werkzeuge zur Beschreibung der Natur. Die Frage kann daher nur sein, ob die Größe zweckmäßig ist oder nicht.

Unsere zweite Empfehlung lautet daher: Statt mit "Nordpol" und "Südpol" kennzeichne man Dauermagnete durch die Verteilung der magnetischen Ladung.

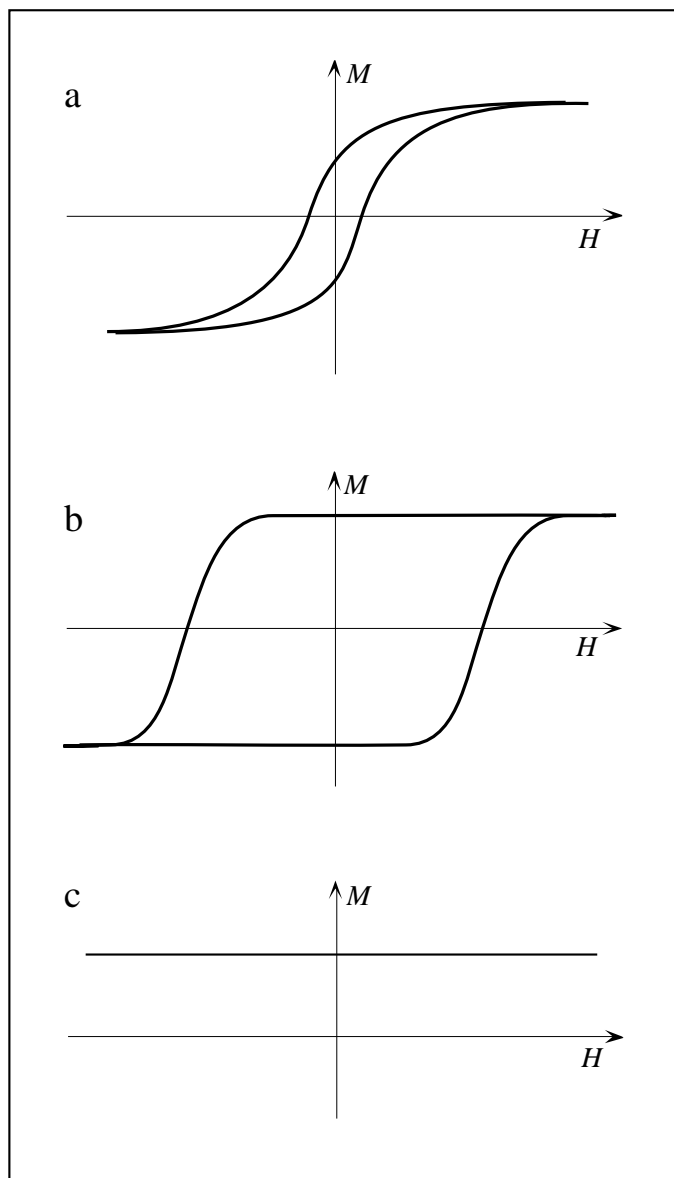


Abb. 2. Hysteresiskurven verschiedener Materialien. (a) Das Material ist weder sehr hart- noch sehr weichmagnetisch. (b) Das Material ist recht hartmagnetisch. (c) Modernes hartmagnetisches Material: Die Magnetisierung ist vom äußeren Feld unabhängig.

c) *Mißbrauch der Hysteresiskurve*

Jeder fortgeschrittene Kurs über magnetische Eigenschaften der Materie diskutiert die Hysteresiskurve. Nun bringt aber die Hysteresiskurve gerade die Unvollkommenheiten magnetischer Materialien zum Ausdruck. Die Hysteresisschleife von Abb. 2a etwa, beschreibt ein Material, das für die Herstellung eines Dauermagneten sehr ungeeignet ist: Schon bei schwachen äußeren Feldern würde ein solcher Magnet seine Magnetisierung verlieren oder gar umgepolt. Für einen besseren Dauermagneten sieht der M - H -Zusammenhang so aus, wie es Abb. 2b zeigt. Heutzutage ist nun aber die Magnetisierung von Dauermagneten praktisch ganz unabhängig von der Feldstärke, der M - H -Zusammenhang sieht so aus wie es Abb. 2c zeigt.

Selbstverständlich kann man auch bei einem solchen modernen Magneten die Magnetisierung mit Gewalt ändern. Das heißt aber einfach, man macht den Magneten kaputt. Auch eine Feder ist keine Hookesche Feder mehr, wenn man sie überdehnt. Und auch die Feder zeigt einen Hysteresiseffekt. Trotzdem beginnt man im Mechanikunterricht die Behandlung der Feder nicht damit, daß man sie überdehnt.

Nicht nur die modernen hartmagnetischen Materialien, sondern auch die weichmagnetischen Materialien kann man viel einfacher beschreiben als mit Hilfe der Hysteresiskurve. Für ein gutes weichmagnetisches Material gilt, daß es sich beliebig leicht ummagnetisieren läßt. Auf jedes von außen angelegte Feld reagiert es mit einer Magnetisierung, und zwar so, daß das Feld, das seine Magnetisierung verursacht, wegkompensiert wird. Weichmagnetische Materialien verhalten sich also dem H -Feld gegenüber genauso wie Metalle dem E -Feld gegenüber: Sie lassen das H -Feld nicht eindringen. Und wie elektrische Feldlinien senkrecht auf der Oberfläche von elektrischen Leitern stehen, so stehen die H -Feldlinien senkrecht auf der Oberfläche weichmagnetischer Körper.

Hier also unsere dritte Empfehlung: Man beginne den Ferromagnetismus nicht mit der Beschreibung der Hysteresis magnetischer Materialien.

Um zu einer qualitativ korrekten Darstellung von magnetischen Feldlinien bei einer magnetostatischen Anordnung zu kommen, genügt es, einige Regeln zu respektieren. Diese Regeln sind dieselben wie diejenigen, die man in der Elektrostatik anwendet. Daher stellen wir gleich die elektrischen den magnetischen Regeln gegenüber, Tabelle 1.

Man beachte, daß das Senkrechtstehen der Feldlinien für weichmagnetische Stoffe gilt, aber ganz und gar nicht für hartmagnetische, wie es durch manche Schulbücher suggeriert wird.

Wir haben zwei Idealfälle von Materialien hinsichtlich ihrer magnetischen Eigenschaften diskutiert: die ideal hartmagnetischen und die ideal weichmagnetischen Stoffe. Einen dritten Idealfall stellen natürlich noch die Stoffe dar, die nicht magnetisiert und nicht magnetisierbar sind: die weitaus meisten Stoffe überhaupt, also etwa Kupfer, Aluminium, Glas, Kunststoffe...

Selbstverständlich gibt es auch alle Zwischenformen zwischen diesen drei Idealtypen. Um diese Zwischenformen *genau* zu charakterisieren *braucht* man die Hysteresiskurve. Die Tatsache, daß ein Stoff nicht ganz hartmagnetisch ist, daß man ihn also auch ummagnetisieren kann, kann man aber qualitativ auch leicht ohne die Angabe der Hysteresiskurve beschreiben. Um zu zeigen, daß man eine Feder überdehnen kann, braucht man schließlich auch nicht die mechanische Hysteresiskurve der Feder zu diskutieren.

Elektrische Feldlinien beginnen und enden auf elektrischen Ladungen.	Magnetische Feldlinien beginnen und enden auf magnetischen Ladungen (dort wo die Magnetisierungslinien enden bzw. beginnen).
Elektrische Feldlinien kreuzen sich nicht und haben (außer an Grenzflächen) keine Knicke.	Magnetische Feldlinien kreuzen sich nicht und haben (außer an Grenzflächen) keine Knicke.
Das Innere von elektrischen Leitern ist E -feldfrei.	Das Innere von weichmagnetischen Stoffen ist H -feldfrei.
Die E -Feldlinien stehen auf elektrischen Leitern senkrecht.	Die H -Feldlinien stehen auf weichmagnetischen Materialien senkrecht.

Tabelle 1. Regeln für das Zeichnen von Feldlinienbildern

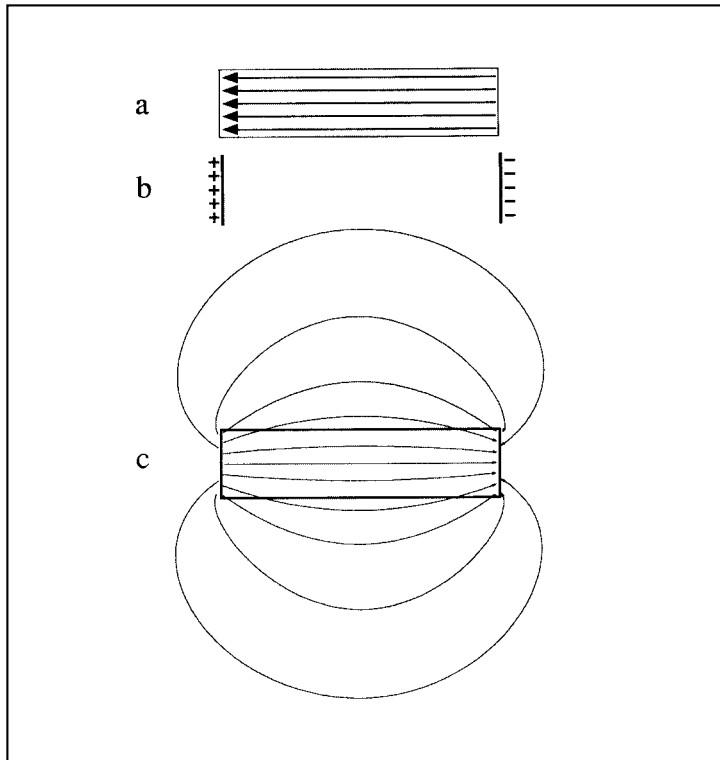


Abb. 3. (a) Magnetisierung eines Stabmagneten. (b) Die Quellen des H -Feldes sind genauso verteilt wie die Quellen des E -Feldes von zwei nichtleitenden Platten, die homogen elektrisch geladen sind. (c) H -Feldverteilung eines Stabmagneten

3. Der Stabmagnet

Wir wollen die im vorigen Abschnitt formulierten Regeln benutzen, um die Feldlinien eines Stabmagneten zu zeichnen. Wir betrachten als vorgegeben die Magnetisierung. Woher weiß man aber, wie die Magnetisierung aussieht? Wir haben den Magneten ja gekauft, mit der Erwartung daß die Pole an den Endflächen liegen. Wenn die Pole anders lägen, würden wir uns beim Hersteller beschweren.

Wir benutzen nun die Tatsache, daß die Pole die Quellen des H -Feldes sind.

Abbildung 3a zeigt einen Stabmagneten, zusammen mit seinem M -Feld. Das Feld ist im Innern des Magneten homogen, außerhalb ist die Magnetisierung null. Dies ist die Vorgabe des Problems. Gleichung (3) sagt uns nun, daß die Quellen bzw. Senken des H -Feldes die Stirnflächen des Stabes sind. Die Aufgabe, die H -Feldlinien zu bestimmen, ist nun dieselbe wie die, die E -Feldlinien der Anordnung von Abbildung 3b zu bestimmen: Zwei nichtleitende Platten sind homogen elektrisch geladen. Abbildung 3c zeigt die Lösung. Man sieht: Die Feldlinien, die seitlich aus dem Stabmagneten austreten, kommen von den Polen an den Stirnflächen, und nicht etwa von Polen, die an den seitlichen Oberflächen sitzen – wie es manche Lehrbücher glauben machen. Und es ist normal, daß hier an den Seiten Eisenspäne hängenbleiben, auch wenn dort keine Pole sind.

4. Supraleiter

Außer den drei Idealfällen oder Extremfällen “unmagnetisch”, “hartmagnetisch” und “weichmagnetisch” gibt es noch eine vierte Klasse von magnetisch idealen Stoffen: die Supraleiter. Ideal in unserem Sinne sind nur diejenigen Supraleiter, die in der Meissnerphase vorliegen. Wenn wir im Folgenden von Supraleitern sprechen, so meinen wir nur diese.

Supraleiter haben interessanterweise eine Ähnlichkeit mit weichmagnetischen Stoffen. Wie diese lassen sie das magnetische Feld nicht in sich eindringen. Um das zu erreichen, benutzen sie aber einen anderen Trick. Erinnern wir uns noch einmal: Ein Stück Weicheisen bil-

1. nichtmagnetisierbare Stoffe:

Feld dringt ein
 Feldlinien bilden mit Oberfläche beliebigen Winkel
 keine Magnetisierung

2. hartmagnetische Stoffe:

Feld dringt ein
 Feldlinien bilden mit Oberfläche beliebigen Winkel
 unveränderliche Magnetisierung

3. weichmagnetische Stoffe:

innen feldfrei
 Feldlinien orthogonal zu Oberfläche
 veränderliche Magnetisierung

4. supraleitende Stoffe:

innen feldfrei
 Feldlinien parallel zu Oberfläche
 keine Magnetisierung

Tabelle 2. Vier Idealtypen magnetischer Materialien

det an seiner Oberfläche magnetische Pole, und zwar gerade so, daß deren Feld das Feld, das eigentlich eindringen wollte, gerade kompensiert.

Der Supraleiter macht es anders: Bringt man ihn in ein äußeres Feld, so bildet er an seiner Oberfläche elektrische Ströme, und zwar wieder so, daß das magnetische Feld, das eigentlich in seinem Innern herrschen würde, wegkompensiert wird.

Bei weichmagnetischen Stoffen hat das Wegkompensieren eine deutliche Konsequenz für das Magnetfeld außerhalb des Materials: Die Feldlinien stehen senkrecht auf der Oberfläche.

Bei Supraleitern ist die Konsequenz genauso deutlich, aber anders: Die Feldlinien an der Oberfläche des Materials liegen parallel zur Oberfläche.

In Tabelle 2 sind noch einmal die Eigenschaften der vier idealen Materialien miteinander verglichen.

Genauso, wie das Senkrechtstehen bei den weichmagnetischen Stoffen uns dabei hilft, Feldlinienbilder qualitativ zu zeichnen, so hilft uns auch das Parallelsein beim Supraleiter, Feldlinienbilder zu zeichnen in Situationen, in denen Supraleiter zugegen sind.

5. Ein Beispiel

Wir diskutieren ein einfaches Beispiel aus der Elektrostatik, zusammen mit seinen diversen Analoga.

Ein kleiner elektrisch geladener Körper befindet sich in einem gewissen Abstand von einer Metallplatte. Unter Verwendung der Regeln von Abschnitt 2 findet man das Feldlinienbild, Abb. 4a.

Man erhält dasselbe Feldlinienbild, wenn man statt der Metallplatte eine "Spiegelladung" anbringt, Abb. 4b: Man stellt sich die Metallplatte als Spiegel vor und bestimmt so den Ort der Spiegelladung. Der Betrag der Spiegelladung ist gleich dem der ursprünglich vorhandenen Ladung, das Vorzeichen entgegengesetzt. Das Feld von Ladung und Spiegelladung ist nun im oberen Halbraum identisch mit dem Feld der Anordnung, die aus einer einzigen Ladung und der Metallplatte besteht.

Die analogen magnetostatischen Probleme zeigen die Abbildungen 4c und 4d. Ein einzelner Magnetpol befindet sich in einem gewissen Abstand von einer ausgedehnten Weichei-

senplatte, Abb. 4c. Das Feld ist dasselbe, wie wenn man statt der Platte eine magnetische Spiegelladung anbringen würde, Abb. 4d.

Wir ersetzen nun die Weicheisenplatte durch eine supraleitende Platte. Während die Feldlinien vorher senkrecht auf der Platte standen, liegen sie jetzt parallel. Das Feld zeigt Abb. 4e. Auch hier wirkt nun die Platte wie ein Spiegel. Nur müssen wir die Platte nicht durch eine magnetische Ladung entgegengesetzten, sondern gleichen Vorzeichens ersetzen, Abb. 4f.

6. Dia- und Paramagnetismus

Bekanntlich werden bei einer fortgeschritteneren Behandlung des Magnetismus in Materie außer dem Ferromagnetismus noch der Diamagnetismus und der Paramagnetismus diskutiert. Para- und Diamagnetismus sind Effekte die um mehrere Größenordnungen geringer sind, als die vorher angesprochenen.

Effekte dieser kleinen Größenordnung gibt es in der Physik unzählige, und die meisten davon werden im Unterricht der allgemeinbildenden Schulen nicht behandelt. Sie sind zu unwichtig, verglichen mit anderen größeren Effekten.

7. Schlußbemerkung

Wir haben vorgeschlagen, die Magnetostatik in Analogie zur Elektrostatik zu behandeln.

Das bedeutet zum einen, daß man die Polverteilung nicht nur, wie es üblich ist, qualitativ beschreibt, sondern, mit Hilfe der Größe "magnetische Ladung" auch quantitativ. So läßt sich eine fundamentale Eigenschaft jedes Magneten sehr einfach beschreiben: Die gesamte magnetische Ladung ist null.

Zum anderen erfordert die analoge Behandlung von Elektrostatik und Magnetostatik, daß man zur Beschreibung des magnetischen Zustands von Feld und Materie nicht die Vektorgrößen \mathbf{B} und \mathbf{M} , sondern \mathbf{H} und \mathbf{M} benutzt. Die \mathbf{H} -Feldverteilung läßt sich leicht gewinnen, da man im Allgemeinen die Magnetisierung von hartmagnetischen Körpern, und damit die Quellen und Senken von \mathbf{H} kennt.

Wir schlagen außerdem vor, den Magnetismus der Materie nicht mit Hilfe der Hysteresis-Kurve zu beschreiben, sondern sich auf die Diskussion magnetisch idealer Stoffe zu beschränken:

- ideal hartmagnetische Stoffe (unveränderliche Magnetisierung)
- ideal weichmagnetische Stoffe (lassen kein Feld eindringen, indem sie an ihrer Oberfläche Pole bilden)
- Supraleiter (lassen kein Feld eindringen, indem sie an ihrer Oberfläche elektrische Ströme bilden).

¹ F. Herrmann, "Teaching the magnetostatic field: Problems to avoid," Am. J. Phys. **59**, 447-452 (1991).

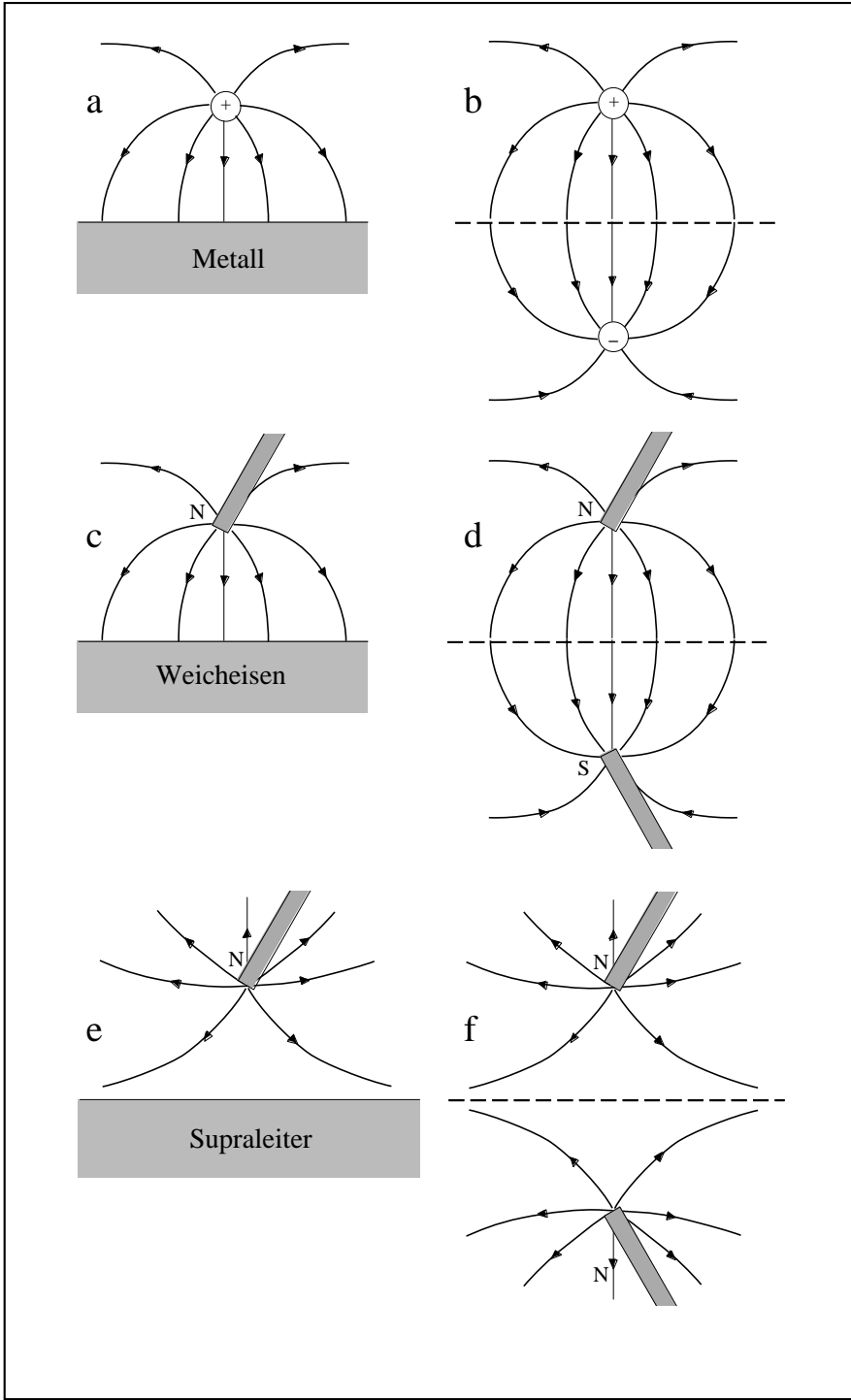


Abb. 4. (a) Ein kleiner elektrisch geladener Körper befindet sich über einer Metallplatte. (b) Die Metallplatte wurde durch eine elektrische Spiegelladung entgegengesetzten Vorzeichens ersetzt. Das Feldlinienbild im oberen Halbraum bleibt gleich. (c) Ein Magnetpol befindet sich über einer Weicheisenplatte. (d) Die Weicheisenplatte wurde durch eine magnetische Spiegelladung entgegengesetzten Vorzeichens ersetzt. Das Feldlinienbild im oberen Halbraum bleibt gleich. (e) Ein Magnetpol befindet sich über einer supraleitenden Platte. (f) Die supraleitende Platte wurde durch eine magnetische Spiegelladung gleichen Vorzeichens ersetzt. Das Feldlinienbild im oberen Halbraum bleibt gleich.