Regionale Lehrerfortbildung des Regierungspräsidiums Karlsruhe
6. Dezember 2010
KIT-Gastdozentenhaus Heinrich Hertz

πάντα ῥεῖ – alles fließt

Supraströme

Friedrich Herrmann
Institut für Theoretische Festkörperphysik
Karlsrsuher Institut für Technologie
f.herrmann@kit.edu

1. Die supraleitende Phase

Die Supraleitung charakterisiert einen Zustand eines Stoffes, der dem betrachteten Stoff nicht unabänderlich anhängt, sondern in dem sich der Stoff nur unter bestimmten Bedingungen befindet, ähnlich wie der feste, flüssige oder gasige, oder auch der ferromagnetische Zustand. Ein Material kann in den supraleitenden Zustand übergehen, wenn seine Temperatur hinreichend niedrig ist. Genauso, wie ein Stoff nur fest ist, wenn die Temperatur nicht höher als die Schmelztemperatur ist, oder ferromagnetisch, solange die Temperatur die Curietemperatur nicht überschreitet, so ist ein Material auch nur dann supraleitend, wenn seine Temperatur nicht höher ist als die so genannte *kritische Temperatur*.

Am Phänomen der Supraleitung nehmen nicht alle Elektronen teil, die im Normalzustand für die elektrische Leitung verantwortlich sind, sondern nur ein Teil von ihnen, und zwar beginnt es mit ganz wenigen bei der kritischen Temperatur, und ihre Zahl nimmt zu, wenn die Temperatur abnimmt.

Es gibt viele Stoffe, die eine supraleitende Phase haben. In Tabelle 1 sind die kritischen Temperaturen für einige chemische Grundstoffe aufgeführt. Es gibt Legierungen und chemische Verbindungen mit viel höheren kritischen Temperaturen.

Hg	4,15
La	4,8
Nb	9,2
Ta	4,48
Tc	11,2
V	5,378

Tabelle 1. Kritische Temperaturen einiger chemischer Grundstoffe in Kelvin

Welche Eigenschaften haben Supraleiter? Wir interessieren uns hier nicht für die mikroskopischen Eigenschaften, also für die Quantenphysik der Supraleitung, denn wenn wir in der Schule die normale Leitung behandeln, kümmern wir uns ja auch nicht um den Mechanismus, der den elektrischen Widerstand verursacht, also etwa die Elektron-Phonon-Kopplung.

Welches sind also seine Eigenschaften? Im Wesentlichen sind es zwei: Erstens hat ein Supraleiter keinen elektrischen Widerstand, d.h. $R = 0$; und zweitens verdrängt er Magnetfelder aus seinem Innern.

Diese beiden Eigenschaften sind zwar nicht unabhängig voneinander, und sie gelten teilweise auch nur unter Vorbehalt, aber über die Details wollen wir uns erst später kümmern.

2. Der elektrische Widerstand

Einen normalen Leiter beschreiben wir dadurch, dass wir sagen, er befolge das Ohmsche Gesetz. Wir wissen, wie er reagiert, wenn man eine Spannung anlegt: Es fließt ein Strom, der proportional zur Spannung ist.

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

Wie reagiert ein Supraleiter, wenn man eine Spannung anlegt? Wir wissen, wie ein reibungsfreier Körper reagiert wenn man eine Kraft auf ihn ausübt, bzw. einen Impulsstrom hineinleitet. Sein Impuls nimmt gleichmäßig zu, er bewegt sich beschleunigt. Das entsprechende macht der Supraleiter. Eine konstante Spannung bewirkt, dass die Stromstärke gleichmäßig zunimmt. Wir haben also

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U}{\lambda}$$

Dies ist die erste Londonsche Gleichung.

λ charakterisiert den Supraleiter, ähnlich wie der elektrische Widerstand einen Normalleiter charakterisiert. λ hängt ab von der Geometrie des Leiters, und von der Masse und der Teilchenzahldichte der supraleitenden Ladungsträger.

3. Magnetische Feldstärke und Magnetisierung

Die interessanteste Eigenschaft der Supraleiter hat mit ihrer Reaktion auf magnetische Felder zu tun. Um dieses Verhalten besser einordnen zu können, werden wir es mit dem Verhalten anderer Materialien vergleichen, nämlich erstens mit dem von hartmagnetischen und zweitens von weichmagnetischen Stoffen. Dazu müssen wir uns allerdings noch die geeigneten Werkzeuge zurechtlegen.

Zunächst zur Erinnerung: In der Schulphysik beschreibt man das magnetische Feld mit der Größe $\vec{B}$, der Flussdichte. Sie bildet ein Vektorfeld. Eine wichtige Tatsache ist, dass dieses Feld divergenzfrei ist, d.h. die $\vec{B}$ -Feldlinien sind geschlossen. Die Größe $\vec{B}$ ist besonders geeignet, um Induktionsvorgänge zu beschreiben, denn im Induktionsgesetz steht der Fluss dieses Vektorfeldes. Die Flussdichte ist aber unpraktisch zur Beschreibung von magnetostatischen Erscheinungen, also zur Beschreibung von Dauermagneten und der Wirkung von weichmagnetischen Stoffen. Hierfür ist die magnetische Feldstärke $\vec{H}$ geeigneter. Außerdem braucht man noch die Magnetisierung $\vec{M}$, um den magnetischen Zustand eines Materials zu beschreiben.

Die magnetische Feldstärke

Im materiefreien Raum unterscheidet sie sich von der Flussdichte $\vec{B}$ nur um den konstanten Faktor μ_0, die magnetische Feldkonstante:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

Man kann die magnetische Feldstärke genau so definieren, wie man gewöhnlich die elektrische definiert. Wir erinnern uns:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$$

Entsprechend ist:

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{Q_\mathrm{m}}$$

Hier ist Q_m die magnetische Ladung oder Polstärke. Die Gleichung legt auch ein Messverfahren der magnetischen Feldstärke nahe: Man nimmt einen Magneten, dessen Polladung man kennt, hängt ihn an einen Federkraftmesser, bringt einen der Pole in das zu messende Magnetfeld hinein, und liest die Kraft (den Impulsstrom ab). Als Demonstrationsexperiment funktioniert diese Messung viel besser als die entsprechende Messung der elektrischen Feldstärke.

So wie $\vec{E}$, ist auch $\vec{H}$ nicht divergenzfrei. Wie die Feldlinien von $\vec{E}$ auf positiven elektrischen Ladungen beginnen und auf negativen enden, so beginnen die magnetischen Feldlinien auf magnetischen Nordpolen und enden auf Südpolen. Man kann auch sagen: sie beginnen auf positiven *magnetischen Ladungen* und enden auf negativen. Es gilt also

$$\mathrm{div}\,\vec{H} = \frac{\rho_\mathrm{m}}{\mu_0}$$

Hier ist ρ_m die Dichte der magnetischen Ladung, das Analogon zur elektrischen Ladungsdichte. Es gilt die Besonderheit, dass positive und negative magnetische Ladungen nicht getrennt auftreten können. Ein Magnet hat immer genau so viel positive Ladung an einem Pol wie negative am anderen.

Die Gleichung ist analog zu einer, die wir vom elektrischen Feld her kennen:

$$\mathrm{div}\,\vec{E} = \frac{\rho_\mathrm{e}}{\varepsilon_0}$$

Hier ist ρ_e die elektrische Ladungsdichte.

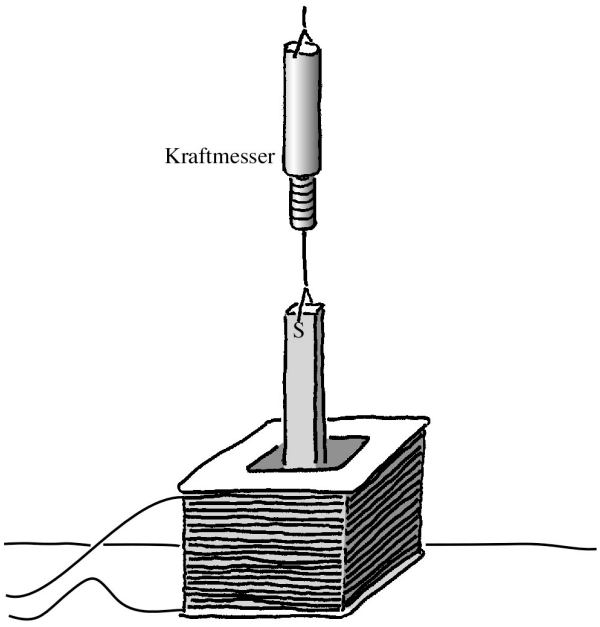

Abb. 1. Zur Messung der magnetischen Feldstärke innerhalb der Spule wir ein Magnetpol bekannter Stärke in das Feld gebracht.

Da die magnetische Feldstärke Quellen und Senken hat, und wir diese im Allgemeinen kennen, ist es in der Magnetostatik leichter, ein $\vec{H}$ -Feldlinienbild zu zeichnen, als ein $\vec{B}$ -Feldlinienbild.

Bevor wir ein solches Bild betrachten, wollen wir noch eine zweite Größe einführen, die Magnetisierung.

Die Magnetisierung

Auch die Magnetisierung $\vec{M}$ ist eine Vektorgröße. Man braucht sie, um den magnetischen Zustand von Materie zu beschreiben. Ein Material ist magnetisiert heißt ja, dass seine elementaren atomaren oder molekularen Magnetchen ausgerichtet sind. $\vec{M}$ beschreibt für

jeden Ort im Material, wie ausgeprägt dort diese Ausrichtung ist und welche Richtung sie hat.

In einem Stabmagneten bildet $\vec{M}$ ein homogenes Feld parallel zur Richtung des Magneten. Woher weiß man das? Man weiß es, weil der Stabmagnet so definiert ist. Er wird so hergestellt; der Hersteller hat die Magnetchen so ausgerichtet. Wenn die Magnetisierung nicht so sein sollte, so ist es ein schlechter Stabmagnet.

Dort wo die Magnetisierungslinien beginnen ist der Südpol des Magneten, wo sie enden ist der Nordpol. Man kann auch sagen: Sie beginnen auf der negativen und enden auf der positiven magnetischen Ladung.

Wir können damit auch sagen:

Wo die Magnetisierungslinien enden, beginnen die Feldlinien, und umgekehrt.

Oder: Eine Feldlinie ist einfach die Fortsetzung einer Magnetisierungslinie. Beide zusammen bilden gewissermaßen eine durchgehende Linie. Beide zusammen bilden ein divergenzfreies Feld. Und in der Tat gilt auch, dass sich das divergenzfreie $\vec{B}$ -Feld aus dem $\vec{H}$ - und dem $\vec{M}$ -Feld zusammensetzt:

$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$.

Wir können nun das Feldlinienbild eines Stabmagneten zeichnen. Der Verlauf der magnetischen Feldlinien muss der selbe sein wie der der elektrischen bei einem Plattenpaar.

Soweit unsere Werkzeuge. Wir kommen nun zu den magnetischen Eigenschaften von Materialien. Wir beginnen mit den hartmagnetischen, kommen dann zu den weichmagnetischen und dann endlich zurück zu den supraleitenden. Wir werden sehen, dass sich letztere schön in die Reihe einordnen.

4. Drei Idealtypen magnetischer Materialien

Hartmagnetische Materialien

Man verwendet sie, um Dauermagneten herzustellen.

Sie haben eine bestimmte Magnetisierung, genauer: eine bestimmte Verteilung der Magnetisierung oder ein bestimmtes $\vec{M}$ -Feld. Dieses Magnetisierungsfeld lässt sich nicht verändern. Je schwerer es ist, es zu verändern, desto besser der Magnet. Früher konnte man noch nicht so gute Materialien herstellen. Schon durch kleine Einflüsse hat sich das Material ummagnetisiert. Um das komplette Verhalten des Materials zu beschreiben, musste man daher die komplizierte Hysteresiskurve benutzen. Sie sagte einem nicht nur, wie der Magnet im Normalzustand bei vernünftiger Behandlung aussieht, sondern auch, wie er darauf reagiert, wenn man ihn einem zu starken Feld aussetzt. Das ist ähnlich, wie wenn man bei einer Feder außer der Federkonstante noch angibt, wie sich die Feder verhält, wenn man sie überdehnt.

Weichmagnetische Materialien

Es sind bestimmte Eisensorten, Weicheisen genannt. Man braucht sie für Eisenkerne in Elektromagneten, Transformatoren, Elektromotoren, Generatoren und Drosseln. Sie haben eine dem hartmagnetischen Material völlig entgegengesetzte Eigenschaft: Die Elementarmagnetchen sind nicht eingefroren, sondern sie lassen sich sehr leicht bewegen. Das kleinste magnetische Feld genügt, um sie in Feldrichtung zu drehen. Das hat ein interessantes Verhalten zur Folge: Wenn man einen Weicheisenkörper in ein Magnetfeld

bringt, so richten sich die Elementarmagnetchen etwas aus, d.h. es entsteht eine Magnetisierung im Material, und damit entstehen an der Oberfläche Pole; in anderen Worten, die Oberfläche lädt sich magnetisch auf. Der Vorgang ist analog zur elektrischen Influenz in einem elektrischen Leiter. So wie der elektrische Leiter in seinem Innern $\vec{E}$ -feldfrei wird, so wird das Weicheisen in seinem Innern $\vec{H}$ -feldfrei. Man kann es auch so sagen:

Ein Leiter im elektrischen Feld bildet Oberflächenladungen derart, dass deren Feld das ursprüngliche Feld gerade wegkompensiert.

Entsprechend gilt:

Ein Weicheisenstück im magnetischen Feld bildet Pole oder magnetische Oberflächenladungen derart, dass deren Feld das ursprüngliche Feld gerade wegkompensiert.

Oder noch einfacher:

Der elektrische Leiter verdrängt das elektrische Feld aus seinem Innern.

Das weichmagnetische Material verdrängt das magnetische Feld aus seinem Innern.

Supraleitende Materialien

Nun sind wir so weit, dass wir das magnetische Verhalten des Supraleiters erklären können. Auch ein Supraleiter, den man in ein magnetisches Feld bringt, verdrängt das Feld aus seinem Innern. Diese Eigenschaft nennt man den Meißner-Ochsenfeld-Effekt. Allerdings benutzt er dazu einen anderen Trick als das weichmagnetische Material. Er bildet an seiner Oberfläche keine Magnetpole; das kann er gar nicht, denn das Material ist nicht ferromagnetisch. Vielmehr bildet er dicht unter seiner Oberfläche geschlossene Ströme aus. Das magnetische Feld dieser Ströme ist so, dass es das Feld, das eigentlich in den Supraleiter eindringen wollte, gerade kompensiert.

Ein Supraleiter im magnetischen Feld bildet Ströme an seiner Oberfläche derart, dass deren Feld das ursprüngliche Feld gerade wegkompensiert.

Der Supraleiter verdrängt das magnetische Feld aus seinem Innern.

Man könnte glauben, dass diese Eigenschaft einfach darauf beruht, dass der Supraleiter keinen Widerstand hat: Wenn man ihn in ein magnetisches Feld bringt, so werden nach dem Induktionsgesetz Ströme in ihm induziert, die so beschaffen sind, dass sie das Feld, das eindringen wollte, gerade kompensieren. An dieser Erklärung ist zunächst auch nichts falsch; allerdings wird sie dem supraleitenden Zustand noch nicht ganz gerecht. Das Feld

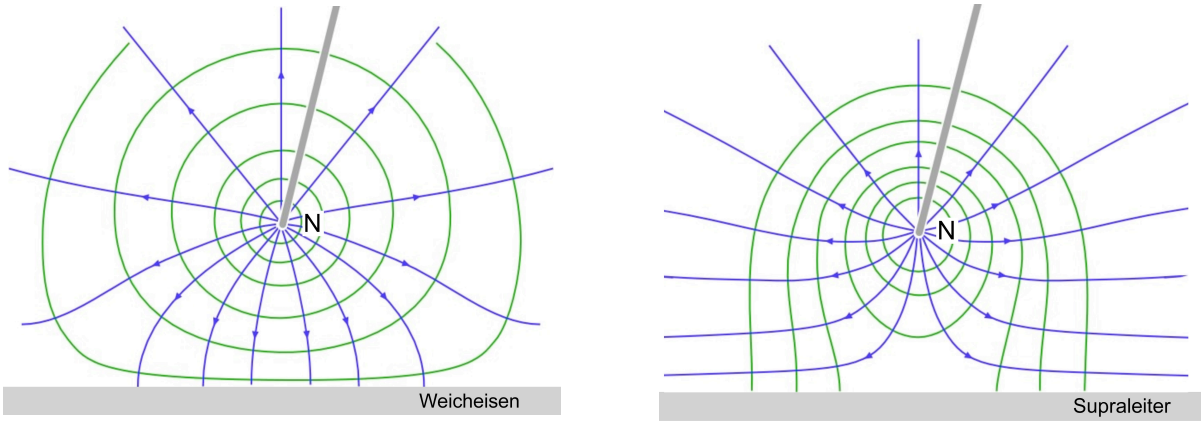

Abb. 2. (a) Magnetpol und Weicheisenplatte; (b) Magnetpol und supraleitende Platte

wird nämlich auch dann verdrängt, wenn man den Körper bei hoher Temperatur, also wenn er noch normalleitend ist, in ein magnetisches Feld bringt und dann unter die kritische Temperatur abkühlt. Diese Erscheinung ist mit dem Induktionsgesetz nicht mehr zu erklären.

Abbildung 2a zeigt das magnetische Feld, das eine magnetische „Punktladung“ in der Nähe einer weichmagnetischen Platte erzeugt. Als Punktladung nimmt man den einen Pol eines langen Stabmagneten. Der zweite Pol befinde sich in sehr großer Entfernung. In Abbildung 1b befindet sich der selbe Magnetpol über einer supraleitenden Platte. Der Vergleich zeigt: Die magnetischen Feldlinien münden senkrecht auf die Oberfläche eines weichmagnetische Körpers ein und enden dort. Damit zieht das magnetische Feld an der Oberfläche. Die Orthogonalflächen des magnetischen Feldes (die „Feldflächen“) münden senkrecht auf die Oberfläche eine Supraleiters ein und enden dort. Damit drückt das Feld auf die Oberfläche.

In Tabelle 2 werden die beiden Materialien noch einmal miteinander verglichen.

Abbildung 3 zeigt noch ein anderes Beispiel für die Komplementarität der beiden Materialien. Man kann das Feld von Abb. 2a auch erhalten, indem man die weichmagnetische Platte durch einen Magnetpol ersetzt, der durch Spiegelung an der Platte entsteht. Die Polladung des gespiegelten Pols muss das entgegengesetzte Vorzeichen des ursprünglichen Pols haben. (Das elektrostatische Analogon nennt man eine „Spiegelladung“.)

Weichmagnet	Supraleiter
verdrängt das magnetische Feld aus seinem Innern, indem er Pole an der Oberfläche bildet	verdrängt das magnetische Feld aus seinem Innern, indem er Ströme an der Oberfläche bildet
Feldlinien münden senkrecht auf Oberfläche ein und enden dort	Feldlinien umströmen ihn
Feldflächen umströmen ihn	Feldflächen münden senkrecht auf Oberfläche ein und enden dort

Tabelle 2. Vergleich von Weichmagnet und Supraleiter

Das Entsprechende kann man auch mit der supraleitenden Platte machen: Man ersetzt sie durch einen gespiegelten Pol. Nur muss die Polladung diesmal dasselbe Vorzeichen haben wie der Originalpol.

5. Flusserhaltung

Für supraleitende Stromkreise ist der magnetische Fluss eine Erhaltungsgröße. Wie ist das gemeint? Wie betrachten einen geschlossenen supraleitenden Draht. Man kann nun mit dem Draht machen was man will: verformen oder in ein äußeres Magnetfeld bringen. Der magnetische Fluss durch die Drahtschleife ändert sich dabei nicht. Der Supraleiter lässt eine Flussänderung nicht zu. Wie kann er das? Wie wehrt er sich dagegen, dass der Fluss zunimmt, wenn man die Drahtschleife so verformt, dass ihre Querschnittsfläche abnimmt, oder wenn man sie in ein Magnetfeld bringt? Er verändert den Strom so, dass der magnetische Fluss konstant bleibt, oder dass der zusätzliche Fluss, der eigentlich gern eingedrungen wäre, gerade wegkompensiert wird.

Wie schafft man es aber überhaupt, dass ein magnetischer Fluss durch ihn hindurchgeht? Man bringt den Draht, so lange er noch normal leitet, in ein magnetisches Feld und kühlt ihn dann ab. Dabei wird das Feld aus dem supraleitenden Material herausgedrängt, nicht aber auch dem Innern der Drahtschleife.

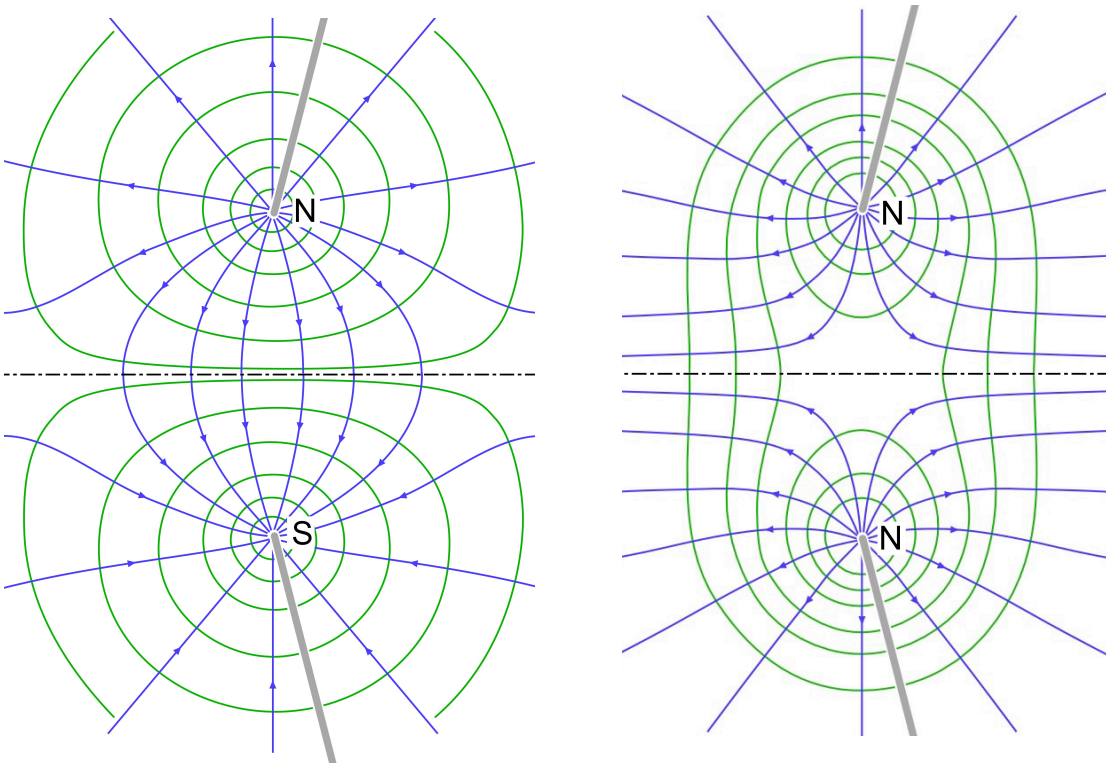

Abb. 3. Die magnetischen Spiegelladungen erzeugen dieselben Felder wie in Abbildung 2. (a) Das Vorzeichen der magnetischen Ladung wird umgekehrt; (b) das Vorzeichen wird nicht umgekehrt.

Man kann sich diese Eigenschaft ähnlich vorstellen, wie jede andere Erhaltung einer Größe. Vergleichen wir mit der elektrischen Ladung. Wenn wir einen Raumbereich haben, dessen Begrenzung für die elektrische Ladung undurchlässig ist, also einen Metallkörper zum Beispiel, so bleibt die Ladung im Körper konstant.

Wenn man nun eine Fläche hat, deren Rand für den Transport von magnetischem Fluss undurchlässig ist, so bleibt der Fluss durch die Fläche konstant.

Diese Flusserhaltung beruht allein darauf, dass der Supraleiter gut leitet. Sie tritt daher nicht nur bei Supraleitern auf, sondern auch bei nicht-supraleitenden Systemen, in denen der Energieverlust durch Dissipation keine Rolle spielt. Das kann man nicht nur dadurch erreichen, dass man den Widerstand verkleinert, sondern auch, indem man den Stromkreis geometrisch sehr groß macht.

Diese Tatsache ist so interessant, dass wir ihr noch etwas nachgehen wollen. Wir betrachten einen *RL*-Kreis, Abb. 4. Die Anschlüsse einer Spule sind mit den Anschlüssen eines Widerstandes verbunden. Der Stromkreis wird zunächst mit einer Batterie verbunden, sodass ein Strom durch Spule und Widerstand fließt. Dann wird die Batterie abgetrennt, indem der Schalter geöffnet wird. Wir haben jetzt die Spule mit Energie „geladen“. Der Strom klingt exponentiell ab, wobei die Energie im Widerstand dissipiert wird. Die Abklingzeit berechnet sich zu:

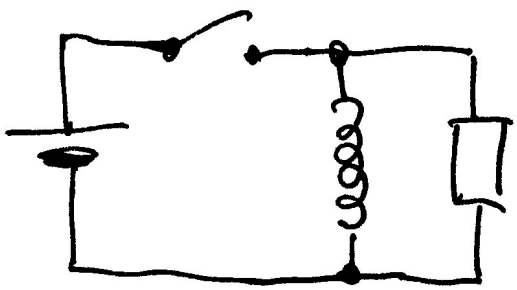

Abb. 4. *RL*-Kreis

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Wir fragen nun nach dem Verhalten der Anordnung, wenn man sie geometrisch vergrößert: Alle Längenmaße werden mit ein und demselben Faktor k multipliziert. Wir kennzeichnen die Größen des vergrößerten Stromkreises mit einem Strich. Insbesondere fragen wir nach der neuen Abklingzeit

$$\tau' = \frac{L'}{R'}$$

Nimmt sie zu, nimmt sie ab oder bleibt sie gleich? Aus dem Widerstand R, der sich berechnet zu

$$R = \rho \frac{\ell}{A}$$

wird beim Vergrößern der Widerstand

$$R' = \rho \frac{k\ell}{k^2 A} = \frac{R}{k}$$

Vergrößert man das Bauelement „Widerstand“ um einen Faktor zehn, so verringert sich der Wert von R auf 1/10.

Entsprechend kann man berechnen, wie die Induktivität L skaliert. Aus der Formel für die Induktivität folgt

$L' = k \cdot L$,

d.h. vergrößert man eine Spule um einen Faktor zehn, so vergrößert sich die Induktivität auf das Zehnfache.

Für die Abklingzeit erhalten wir damit

$$\tau' = \frac{L'}{R'} = \frac{k \cdot L}{R/k} = k^2 \tau$$

Die Abklingzeit des RL-Kreises wird also mit dem Quadrat des Skalenfaktors größer. Ein Beispiel: Wir gehen aus von einem RL-Kreis in Laborgröße, mit einer Lineardimension von etwa 0,1 m und einer Abklingzeit von 1 Millisekunde. Die Induktivität braucht dabei gar nicht zu einer Spule zu gehören. Jeder geschlossene Stromkreis hat eine Induktivität und einen Widerstand. Wir vergrößern diesen Stromkreis in Gedanken auf die kosmische Dimension von 10^6 km, d.h. um einen Faktor 10^{10}. Die Abklingzeit vergrößert sich dabei auf 10^{20} Sekunden, oder etwa $3 \cdot 10^{12}$ Jahre, also mehr als hundert mal das Alter des Universums. Geschlossene Ströme von kosmischen Dimensionen bleiben also für alle Zeiten konstant. Solche Ströme sind für die kosmischen Magnetfelder verantwortlich. In ihnen bleibt der magnetische Fluss immer erhalten, und das führt zu interessanten Erscheinungen. Speziell gilt es auch für kollabierende Sterne. Ein Stern hat ja immer ein wenn auch bescheidenes Magnetfeld. Wenn er nun in einer Supernova zusammenfällt, so werden die Stromkreise geometrisch sehr viel kleiner. Der Fluss durch sie muss also stark komprimiert werden – mit den bekannten Folgen. Das magnetische Feld eines Neutronensterns ist so konzentriert, dass ein Liter davon eine Masse von 1 kg haben kann.

Schließlich noch ein interessanter Aspekt der Flusserhaltung, der mit der Quantenphysik zu tun hat. Der magnetische Fluss durch einen geschlossenen supraleitenden Stromkreis ist ein ganzzahliges Vielfaches eines universellen Flussquantums. Sein Wert ist:

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e}\,.$$

Das klingt zunächst überraschend. Dass Masse, Ladung und Drehimpuls quantisiert sind, kann man sich leicht vorstellen; sie gehören ja zu einem Teilchen oder Körper. Aber ein

Fluss? So überraschend ist es aber gar nicht, denn schließlich ist der elektrische Fluss auch quantisiert. Wieso denn das?

Wir betrachten ein Elektron. Seine Ladung hat den Wert *e*, also das Quantum der elektrischen Ladung. Nun ist aber nach dem Stokesschen Satz die Ladung gleich dem Fluss des elektrischen Feldes. Also ist nicht nur die Ladung, sondern auch der elektrische Fluss quantisiert. Die Flussquantisierung scheint also allgemein die elementarere Erscheinung zu sein.

6. Ausblick

Wir haben uns hier auf die so genannten Supraleiter erster Art beschränkt, oder die „Meißnerphase". Sie sind in gewisser Weise ideale Repräsentanten der Supraleitung. Die Supraleiter 2. Art (Shubnikov-Phase) unterscheiden sich von denen erster Art, dass das Magnetfeld doch in sie eindringen kann, im Supraleiter aber auf „Flussschläuche" konzentriert ist. Zu diesen gehören auch die Hochtemperatursupraleiter. Ihr Verhalten ist komplizierter. Ihr Verhältnis zu den Supraleitern erster Art ist grob vergleichbar mit dem Verhältnis eines Ferromagneten mit Hysterese zu einem idealen Weichmagneten. Ihr Verhalten ist also komplizierter als das der Supraleiter erster Art.

7. Schlussbemerkungen

Aus den etwas umfangreichen Erörterungen lassen sich einige wenige einfache Schlussfolgerungen für den Unterricht ziehen:

1. Für Magnetostatik und die ferromagnetischen Erscheinungen benutze man nicht die magnetische Flussdichte, sondern die magnetische Ladung, die Magnetisierung und die magnetische Feldstärke.

2. Die magnetischen Eigenschaften von Supraleitern lassen sich dann leicht beschreiben. Wie ein idealer Weichmagnet verdrängt ein Supraleiter das magnetische Feld aus seinem Innern. Er macht das, indem er elektrische Ströme an seiner Oberfläche bildet.