

Grundlagen für die Elektrotechnik

Teil 4: Magnetisches Feld

und Induktivität

Im vorangegangenen Kapitel haben wir uns mit dem elektrischen Feld, das für den Kondensator charakteristisch ist, näher beschäftigt.

Einen weiteren, fundamentalen Bestandteil der Elektrotechnik bilden das magnetische Feld und die Induktivität. Ohne sie gäbe es keine Transformatoren, Generatoren und Elektromotoren, um nur einiges zu nennen. Weiterhin sind elektromagnetische Wirkungen ein wesentlicher Teil der elektromagnetischen Wellen in der Funktechnik.

Im nachfolgenden Teil unserer Grundlagen-Serie wollen wir uns mit den grundsätzlichen physikalischen Vorgängen bei der Spule befassen.

5. Das magnetische Feld

5.1. Magnetismus

Wir haben alle schon einmal einen Magneten in der Hand gehalten und festgestellt, daß sich hiermit Metallgegenstände bewegen lassen. Jedoch nicht alle Metalle reagieren auf die Nähe eines Magneten; so z. B. Aluminium, Messing und Kupfer. Als ferromagnetisch oder kurz magnetisch gelten nur Eisen, Nickel und Kobalt.

Die Stellen an einem Magneten, die die stärkste Anziehungskraft ausüben, bezeichnet man die Pole. Entlang des Magneten nimmt die magnetische Wirkung ab und ist in der Mitte völlig verschwunden. Um die Pole, z. B. die eines Stabmagneten, zu bestimmen, hängen wir ihn möglichst reibungslos frei im Raum auf. Nach kurzer Zeit hat sich der Magnet in Nord-Südrichtung ausgerichtet. Der nach Norden zeigende Pol wird als Nordpol und der entgegengesetzte als Südpol bezeichnet.

Um der magnetischen Eigenschaft näher auf die Spur zu kommen, stellen wir uns einmal die Halbierung eines Stabmagneten vor. Es entstehen in diesem Fall nicht etwa ein Nord- und ein Südpol, sondern zwei selbständige Magneten mit Nord- und Südpol. Denken wir uns diese Teilung nun beliebig oft fortgesetzt, dann bleiben schließlich die kleinsten Magnete, die Elementarmagnete, übrig. Mit Hilfe der Elementarmagnete läßt sich der Magnetismus nun einfach verstehen.

Ein magnetischer Werkstoff besteht also aus vielen kleinen Magneten. Solange der Werkstoff nicht magnetisiert ist, liegen alle Elementarmagnete wahllos durcheinander. Von außen ist an diesem Metall keine magnetische Wirkung festzustellen. Gelangen diese ungeordneten Elementarmagnete nun in den Einfluß eines magnetischen Feldes (z. B. von einem anderen Magneten), so werden sie alle in eine Richtung gestellt. Das Ausrichten der Elementarmagnete nennt man „magnetisieren“. Sobald alle Magnete geordnet sind, spricht man von einem magnetisch gesättigten Zustand. Fallen nach Beendigung des von außen einwirkenden Feldes alle Kleinstmagneten wieder in die ungeordnete Stellung zurück, verschwindet also der Magnetismus wieder, so handelt es sich um einen weichmagnetischen Werkstoff. Bleibt ein Restmagnetismus erhalten, dann ist es ein hartmagnetischer Stoff. Der Fachbegriff für den Restmagnetismus ist die „Remanenz“.

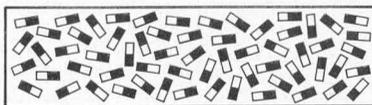


Bild 1: Elementarmagnete sind ungeordnet.

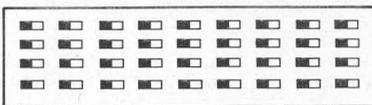


Bild 2: Elementarmagnete sind geordnet.

5.2. Das magnetische Feld

Ebenso wie das elektrische Feld hat auch das magnetische Feld eine bestimmte Richtung. Um den Richtungscharakter zu verdeutlichen, legen wir auf einen Magneten eine Glasplatte und streuen hierauf Eisenfeilspäne. Für einen Stabmagneten sieht das prinzipiell so aus, wie in Bild 3 gezeigt ist.

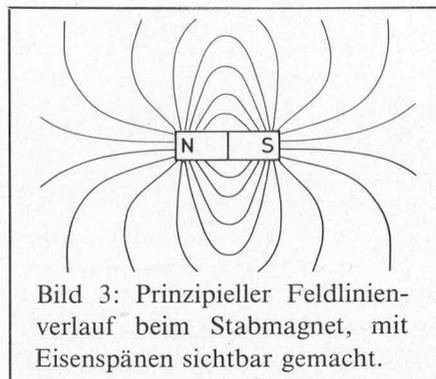


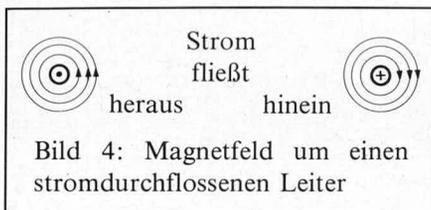
Bild 3: Prinzipieller Feldlinienverlauf beim Stabmagnet, mit Eisenspänen sichtbar gemacht.

Die sich zeigenden Linien werden Feldlinien genannt. Als Richtung für die Feldlinien wurde außerhalb des Magneten von Norden nach Süden und innerhalb des Magneten von Süden nach Norden festgelegt. Folglich handelt es sich um geschlossene Linien. An wenigen Stellen des Feldes verlaufen die Linien parallel und in gleichem Abstand; man spricht dann von einem homogenen Feld.

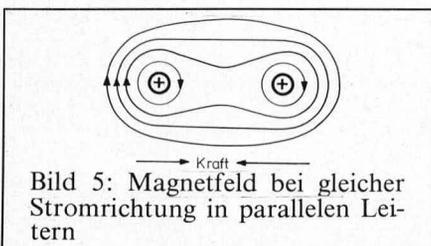
5.3. Elektromagnetismus

Die in den vorangegangenen Abschnitten erklärten magnetischen Erscheinungen lassen sich auch mit Hilfe des elektrischen Stromes hervorrufen. Eine Voraussetzung hierfür ist jedoch, daß ein Stromfluß vorhanden ist. Mit Hilfe der Eisenfeilspäne läßt sich das magnetische Feld auch hier sehr gut an einem stromdurchflossenen Leiter beobachten. Bild 4 zeigt den grundsätzlichen Feldlinienverlauf, konzentrisch um einen Leiter herum. Bei diesem elektromagnetischen Feld läßt sich mit Hilfe der Schraubenregel die Richtung leicht bestimmen.

Sie besagt: Dreht man eine Schraube mit Rechtsgewinde in Stromrichtung in den Leiter hinein, dann gibt die Drehrichtung der Schraube die Richtung der Feldlinien an.



Um die Kraftwirkung dieses elektromagnetischen Feldes zu verdeutlichen, stellen wir uns zwei parallele elektrische Leiter vor. Im ersten Fall nehmen wir an, daß der Strom in beiden Drähten die gleiche Richtung hat. Wir schauen uns hierzu das nachstehende Querschnittsbild an:



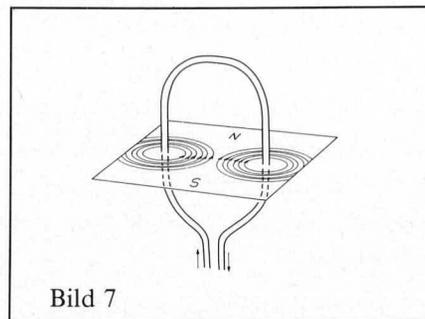
Durch die gleiche Richtung der Feldlinien kommt es zu einem Zusammenschluß, so daß beide Leiter von demselben Feld umschlossen werden und zusammenstreben. Ist die Stromrichtung in den parallelen Leitern entgegengesetzt, so ergibt sich ein Feldverlauf, wie er aus untenstehendem Bild ersichtlich ist.



Es ist deutlich zu sehen, daß zwischen den Leitern eine Feldverdichtung eintritt. Hierdurch entsteht eine Kraft, die die Kabel auseinander drückt. Unter normalen Bedingungen sind die Kräfte sehr klein. Sobald aber sehr große Ströme fließen können, wie z. B. in Strommaschinen von Starkstromversorgungsanlagen, müssen besondere Vorkehrungen für die Befestigung der durchströmten Leiter getroffen werden.

Betrachten wir nun einmal eine Leiterschleife, wie sie in Bild 7 dargestellt ist. Mit der Voraussetzung, daß das Magnetfeld innerhalb der Schleife von

Süden nach Norden (wie beim Magneten) geht, können wir sofort die Pole dieses Elektromagneten bestimmen. Die magnetische Wirkung der Schleife ließe sich nur mittels der Stromstärke erhöhen. Es gibt aber auch noch die Möglichkeit, bei gleicher Stromstärke mehrere Schleifen hintereinander zu schalten. Bei der entstandenen Spule lassen sich die Pole mit der Spulenregel (auch „Rechte-Hand-Regel“ genannt) schnell festlegen.



„Legt man die rechte Hand so um eine Spule, daß die Finger in Stromrichtung zeigen, dann deutet der abgespreizte Daumen die Richtung der inneren Feldlinien an.“

5.4. Magnetische Größen

5.4.1 Die Durchflutung H (Theta)

Ursächlich für die Stärke des magnetischen Feldes ist die Durchflutung. Sie ist das Produkt aus der Stromstärke I und der Windungszahl N.

$$H = I \cdot N \text{ (Ampere)}$$

Wir sehen deutlich, daß man mit beiden Faktoren gleichberechtigt das Magnetfeld beeinflussen kann. Da die Windungszahl keine Einheit hat, ergibt sich für die Durchflutung die Einheit Ampere (A) wie für den Strom.

5.4.2 Die magnetische Feldstärke „H“

Bei gleicher Durchflutung, jedoch verschieden langer Bauart der Spulen, sind auch die geschlossenen Feldlinien verschieden lang. Verständlicherweise sind die längeren Feldlinien schwächer als die kurzen. Somit geht die Feldlinienlänge „l“ in die Berechnungsformel für die Feldstärke ein.

$$H = \frac{I \cdot N}{l} \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$$

5.4.3 Der magnetische Fluß ϕ (Phi)

Als magnetischer Fluß wird die Gesamtzahl der aus einem Pol austretenden Feldlinien bezeichnet. Die Einheit des magnetischen Flusses ist die „Vs“ (Voltsekunde).

Die magnetische Flußdichte oder Induktion „B“

Durch die Flußdichte ist der magnetische Fluß gekennzeichnet, der eine

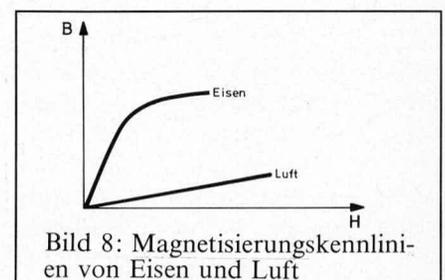
Fläche von 1 Quadratmeter senkrecht durchsetzt.

$$B = \frac{\Phi}{A} \left[\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \right]$$

5.5. Eisen im elektromagnetischen Feld

Wird in eine stromdurchflossene Spule ein Eisenkern eingeführt, so ist die magnetische Wirkung viel größer. Demnach wird der magnetische Fluß der Spule durch den Eisenkern verstärkt. Ursache hierfür ist das Ausrichten der Elementarmagnete, wie wir es unter Punkt 5.1. erläutert haben.

Bei einer Luftspule (ohne Eisenkern) nimmt die Flußdichte proportional mit der Feldstärke zu. Im Eisenkern einer Spule richten sich mit zunehmender Feldstärke (verursacht durch Stromerhöhung) immer mehr Elementarmagnete aus. Sind alle Magnete ausgerichtet, dann ändert sich die Flußdichte, trotz Erhöhung der Feldstärke, nicht mehr. Das Eisen ist dann magnetisch gesättigt. Zeichnet man die eben beschriebenen Abhängigkeiten in ein Diagramm, so entsteht folgendes Bild:



Die Flußdichte in einer Spule mit Kern ist um so größer, je größer die magnetische Leitfähigkeit oder Permeabilität „ μ “ des Materials und je größer die Feldstärke ist. Damit ergibt sich folgende Beziehung:

$$B = \mu \cdot H$$

Als magnetische Leitfähigkeit μ bezeichnet man das Produkt aus der Feldkonstanten „ μ_0 “ (Naturkonstante) und der stoffspezifischen Permeabilität „ μ_r “. Mit der dimensionslosen Zahl „ μ_r “ wird nur angegeben, wievielfach besser der vorliegende Stoff die Feldlinien leitet als Vakuum.

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \right]$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

Man bezeichnet Stoffe als diamagnetisch, wenn μ_r kleiner als 1, und als paramagnetisch, wenn μ_r größer als 1 ist. Liegt die Permeabilitätszahl wesentlich über 1, dann handelt es sich um ferromagnetische Werkstoffe (Eisen, Nickel, Kobalt).

Wir wollen nun eine eisengefüllte Spule mit einem veränderbaren Strom speisen und setzen voraus, daß der Eisenkern unmagnetisch ist.

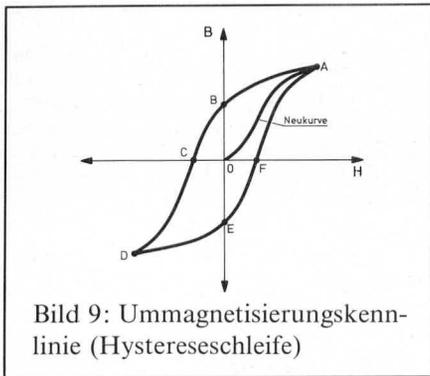


Bild 9: Ummagnetisierungskennlinie (Hystereseschleife)

Mit steigendem Strom nimmt die Feldstärke „H“ und die Induktion „B“ zu, bis im Punkt „A“ der Eisenkern gesättigt ist. Wird nun die Feldstärke wieder auf Null verringert, ist trotzdem noch immer eine Restinduktion (Remanenz), Strecke 0—B, festzustellen. Erst wenn die Feldstärke in entgegengesetzter Richtung den Punkt „C“ erreicht hat, ist die Remanenz gänzlich verschwunden. Die hierfür erforderliche Feldstärke (Strecke 0—C) heißt Koerzitivfeldstärke. Im Punkt D wird die Sättigung des Kerns in entgegengesetzter Richtung erreicht. Vermindern wir nun wieder den Strom bis auf Null, so gelangen wir an den Punkt „E“ mit der Remanenz 0—E. Bei einer erneuten Stromsteigerung durchfahren wir den Punkt „F“ und erlangen im Punkt „A“ wieder die Sättigung. Es ist festzustellen, daß die Werte der Neukurve (Strecke 0—A) nur erreicht werden, solange der Kern magnetisch neutral ist.

5.6. Induktion

Eine weitere Möglichkeit, die Wirkung des magnetischen Feldes auszunutzen, liegt in der Erzeugung einer Spannung. Bewegt man einen Leiter so durch ein Magnetfeld, daß er die Feldlinien schneidet, dann wird in ihm eine Spannung induziert, die an den Leiterenden meßbar ist. Diesen Vorgang nennt man Induktion. Ursache für das Entstehen der Spannung ist das Verdrängen der Elektronen im Leiter durch das Magnetfeld. Hierdurch entsteht an einem Leiterende ein Elektronenüberschuß (Minus) und am anderen Ende ein Elektronenmangel (Plus). Die Richtung der induzierten Spannung ist von der Bewegungsrichtung und der Magnetfeldrichtung abhängig. Mit der Geschwindigkeit des Leiters nimmt auch die induzierte Spannung zu. Ver-

ständiglicherweise erhöht sich die Spannung auch mit Zunahme der Leiterlänge, entsprechend der Windungszahl, im Magnetfeld. Eine äußerst wichtige Aussage über die grundsätzliche Richtung der Induktionsspannung wird durch die Lenzsche Regel gemacht:

„Der durch eine Induktionsspannung hervorgerufene Strom ist immer so gerichtet, daß sein Magnetfeld der Ursache der Induktion entgegenwirkt.“

Selbstverständlich ist Induktion auch in einem feststehenden Leiter möglich, wenn sich der magnetische Fluß ändert. Entscheidend ist also nur die relative Bewegung zueinander, zwischen Leiter und Magnetfeld.

5.7. Selbstinduktion und Induktivität

Zum besseren Verständnis der Selbstinduktion wollen wir die nachstehende Skizze betrachten.

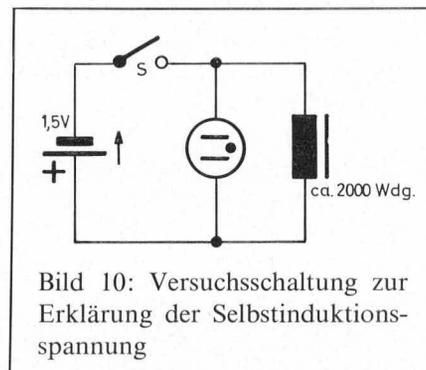


Bild 10: Versuchsschaltung zur Erklärung der Selbstinduktionsspannung

Wird der Schalter „S“ geschlossen und wieder geöffnet, dann leuchtet die Glühlampe beim Öffnen, trotz der hohen Zündspannung von ca. 80 Volt, kurz auf. Es muß demnach für kurze Zeit eine Spannung von mindestens 80 Volt vorhanden gewesen sein.

Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, wird beim Einschalten des Stromkreises ein Magnetfeld aufgebaut. Durch diese schnelle Feldänderung wird in der Spule selbst eine Spannung induziert, die so gerichtet ist, daß sie das Ansteigen des Stromes und damit den Aufbau des Magnetfeldes verzögert. Der maximale Strom kann erst fließen, wenn das Feld vollständig aufgebaut ist und die selbstinduzierte Spannung den Wert Null erreicht hat.

Nach dem Abschalten der Betriebsspannung wird das Magnetfeld wieder aufgebaut. Dabei entsteht nun eine Spannung, die so gerichtet ist, daß der Spulenstrom in gleicher Richtung aufrechterhalten wird und nur langsam

auf den Wert Null abklingt. Das Aufleuchten der Glühlampe wird also durch das zusammenbrechende Magnetfeld verursacht, welches in der Spule selbst eine Spannung induziert. Die Spule wirkt dann als speisende Spannungsquelle für den Stromkreis.

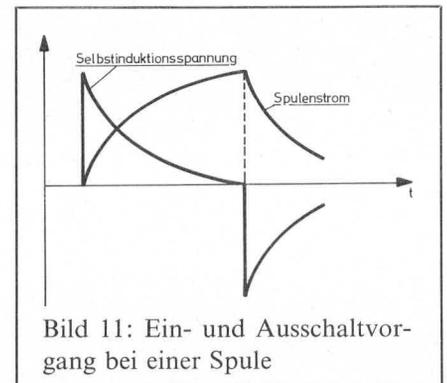


Bild 11: Ein- und Ausschaltvorgang bei einer Spule

Je schneller sich das magnetische Feld ändert und je höher die Induktivität ist, um so größer ist die Selbstinduktionsspannung (gelegentlich auch als „Gegenelektromotorische Kraft“ bezeichnet). Bestimmt wird die Induktivität durch die Windungszahl, durch Eigenschaften des Eisenkerns und von den räumlichen Abmessungen der Spule.

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu_r \cdot \mu_0 A}{l} \left[\frac{Vs}{A} \right]$$

Hierbei sind:

N die Windungszahl

μ_r die magnetische Leitfähigkeit (Permeabilität)

μ_0 die absolute Permeabilität = $1,256 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Vs}{Am} \right]$

A die Querschnittsfläche der Spule $[m^2]$

l mittlere Windungslänge [m]

Die Einheit der Induktivität ist das Henry „H“ = $\frac{Vs}{A} = \Omega s$

Als Definition für die Induktivität können wir festhalten:

Ändert sich der Strom in einer Spule innerhalb 1 Sekunde um 1 Ampere und wird dabei eine Spannung von 1 Volt induziert, so beträgt die Induktivität 1 Henry (1 H). In der Praxis jedoch sind die Größen milli-Henry (mH) und mikro-Henry (μH) gebräuchlicher.

Nachdem wir uns nun auch über den Hintergrund des Magnetfeldes und den Begriff der Induktivität klar geworden sind, wollen wir im nächsten Heft mit der Wechselstromtechnik beginnen. In diesem großen Gebiet werden wir auch die bereits vorgestellten Bauteile wiederfinden.