

AUFNAHME DER HYSTERESEKURVE

- Aufgaben:** Aufnahme der Hysteresekurve eines Transformatorkernelns;
Bestimmung von Remanenz und Koerzitivwert.
- Meßverfahren:** Messung des Magnetfeldes mittels Feldplatte
und digital anzeigendem Ohmmeter.
- Vorkenntnisse:** Magnetfeld \vec{H} , magnetische Induktion \vec{B} ,
Magnetfeld von Spulen, Ferromagnetismus;
Halbleiter.
- Lehrinhalt:** Magnetfeldmessung mittels Feldplatte;
Hystereseerscheinung.
- Literatur:** Die Lehrbücher der Experimentalphysik;
K. KÜPFMÜLLER:
Einführung in die theoretische Elektrotechnik, Springer-Verlag, Berlin;
H. HOFMANN:
Das elektromagnetische Feld, Theorie und grundlegende Anwendungen;
Springer-Verlag, Wien;
Atom- und Kernphysik, Kleine Enzyklopädie, Verlag H. Deutsch, Thun.

1. Einführung

Schickt man einen elektrischen Strom I durch eine Spule, so baut dieser ein Magnetfeld auf, das durch die magnetische Feldstärke \vec{H} (nach DIN 1325 auch als magnetische Erregung bezeichnet) und die magnetische Induktionsflussdichte \vec{B} (kurz magnetische Induktion genannt) beschrieben wird. Für H gilt im Innern einer langen dünnen Spule (Windungszahl n , Länge L) unabhängig davon ob sich in der Spule ein Eisenkern befindet:

$$H = \frac{n \cdot I}{L} \quad ;$$

im allgemeinen ist \vec{H} als Feldgröße natürlich ortsabhängig. Zwischen \vec{H} und \vec{B} besteht, sofern es sich nicht um Permanentmagnete handelt, an jeder Stelle der Zusammenhang:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} = \mu \cdot \vec{H} \quad ;$$

Dabei ist

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \quad \text{magnetische Feldkonstante}$$

$$\left(1 \frac{Vs}{Am} = 1 \frac{H}{m} \right) \quad , \quad H = \text{"Henry"} \quad ;$$

$$\mu_r := \quad \text{relative Permeabilität der Materie,}$$

z.B. des Eisens

Maßeinheiten:Für die magnetische Feldstärke H *)

$$1 \frac{A}{m}$$

(ohne besonderen Namen).

Für die magnetische Induktion B *)

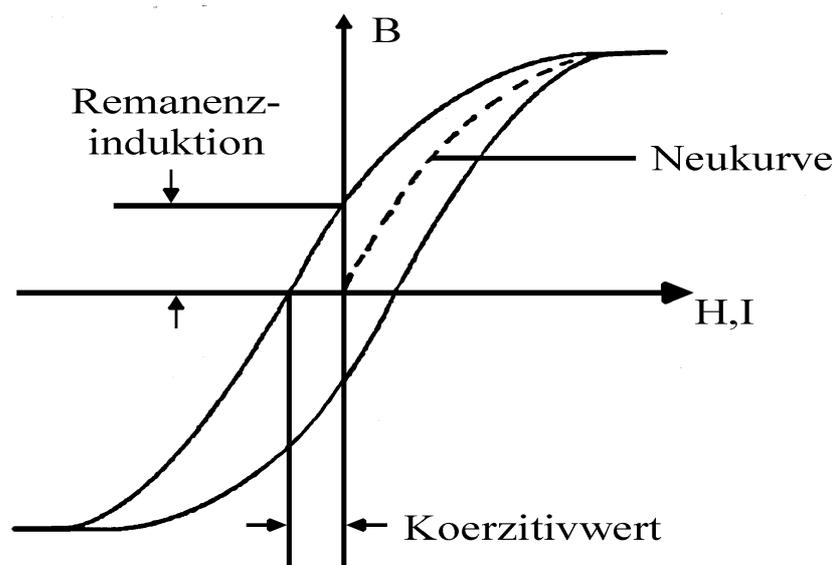
$$1 \text{ T (Tesla)} = 1 \frac{Vs}{m^2} .$$

Im Vakuum und näherungsweise auch in Luft ist $\mu_r = 1$; bei diamagnetischen Stoffen ist $0 < \mu_r < 1$, bei paramagnetischen Stoffen $\mu_r > 1$ und bei ferromagnetischen Stoffen $\mu_r \gg 1$ (10^2 bis 10^5).

Bei ferromagnetischen Stoffen ist μ_r keine Konstante. Die Induktion \bar{B} ist hier nicht nur eine nichtlineare Funktion von \bar{H} , sondern im allgemeinen nicht mehr eindeutig, d.h. sie hängt von der „Vorgeschichte“, von der vorangegangenen Magnetisierung ab (Hysteresese). Darüberhinaus tritt schon bei praktisch erreichbaren Feldstärken Sättigung ein.

Beginnt man beim Wert 0 des Magnetfeldes H bzw. des Stromes I , so nimmt B zunächst mit H zu und geht dann in die Sättigung über (sogenannte Neukurve). Bei anschließender Verringerung des Magnetfeldes H geht die magnetische Induktion jedoch nicht wieder auf denselben Wert zurück, sondern liegt über der Neukurve. Bei $H = 0$ ist B noch $\neq 0$ (Remanenz). Bei Umpolung des Stromes und damit des Magnetfeldes durchläuft B als Funktion von H schließlich die in Abb. 1 dargestellte Kurve (Hystereseschleife). Der Wert von H bzw. I , der nach der Umpolung erforderlich ist, um B zu Null zu machen, wird als Koerzitivwert bezeichnet.

Auch das Material des Trafokernes zeigt Sättigung und Hystereseseerscheinung, die in dieser Aufgabe genauer untersucht werden sollen.

Abb. 1 : Hystereseschleife $B(H)$ bzw. $B(I)$ (schemat.).

2. Aufgaben

1. Es soll die Hysteresekurve des Transformatorcores in der Darstellung $B(I)$ beidseitig bis zur Stromstärke $I = 1,25 \text{ A}$ aufgenommen werden.
2. Für die unter 1. aufgenommene Hystereseschleife sollen
 - a) die Remanenzinduktion und
 - b) der Koerzitivwert des Stromes angegeben werden.

3. Durchführung

Eine direkte Messung der magnetischen Induktion B im Eisen ist praktisch nicht möglich. Man misst deshalb das B -Feld mit einer geeigneten Sonde in einem zum Eisenkern senkrechten schmalen Luftspalt, da die B -Linien durch einen solchen Spalt praktisch ungestört hindurchgehen.

Als Magnetsonde wird hier eine sogenannte Feldplatte benutzt. Eine Feldplatte ist ein Halbleiterplättchen aus Indiumantimonid mit eingelagerten Nickelantimonidkristallen, deren elektrischer Widerstand von einem das Plättchen senkrecht durchsetzenden B -Feld abhängt (siehe Abschn.6.).

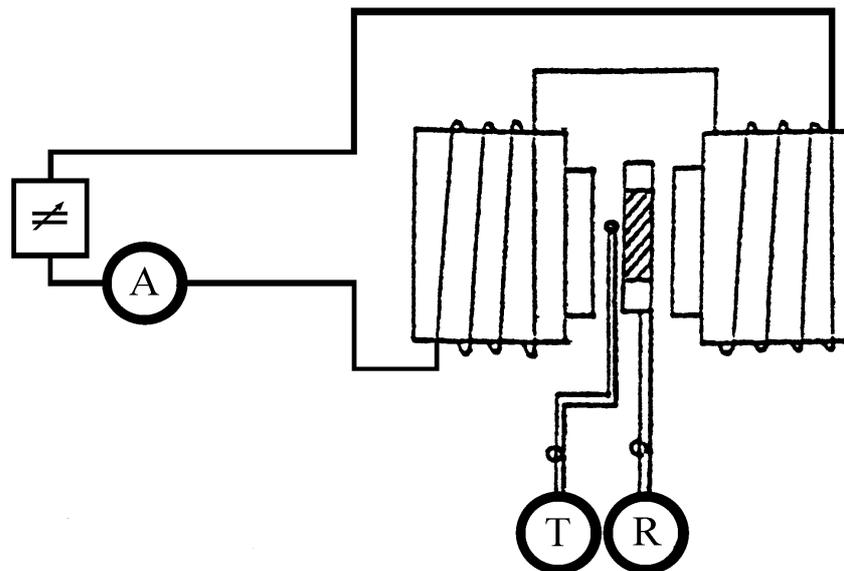


Abb.2.: Versuchsaufbau. Man achte auf richtige Polung der beiden Spulen.

Man misst den Widerstand im Magnetfeld und entnimmt aus der beigegebenen Eichkurve den zugehörigen Wert der magnetischen Induktion B . Der Zusammenhang ist temperaturabhängig. Aus diesem Grund ist neben der Feldplatte ein Thermoelement einzubringen, die Temperatur kann direkt an einem digital anzeigenden Instrument abgelesen werden.

Man nimmt zuerst die Neukurve auf. Hierbei geht der Transformatorcore in die Sättigung, so dass der Zusammenhang $B(I)$ eindeutig wird. Dann misst man unter Verringerung der Stromstärke bis $I = 0 \text{ A}$, polt um und misst weiter bis zur entgegengesetzten Sättigung. Durch neuerliche Verringerung des Stromes bis auf Null, nochmaliges Umpolen mit nachfolgender

Stromzunahme bis zum maximal einstellbaren Wert kehrt man zum Ausgangspunkt zurück. Auf diese Weise erhält man die geschlossene Hystereseurve des Magneten.

Entscheidend ist dabei, die Kurve wirklich in einem geschlossenen Umlauf in kleinen Schritten abzufahren. Auf einem aufsteigenden Ast darf man nicht etwa um vorangegangene Werte zu überprüfen, noch einmal zurückfahren; auf einem absteigenden Ast nicht noch einmal den Strom zwischenzeitlich wieder erhöhen. Hysterese bedeutet gerade die Auswirkung der „Vorgeschichte“, die Abhängigkeit des jeweiligen Zustandes vom vorangegangenen, hier der Magnetisierung des Eisens von H bzw. I und dem Wert der vorangegangenen Magnetisierung.

Der Transformator kann sich bei Betrieb erwärmen und ändert dabei seinen elektrischen Widerstand und unter Umständen seine magnetischen Eigenschaften (Permeabilität des Eisens). Da sich die Spulen von Innen erwärmen, gibt das äußerliche Anfassen keinen zuverlässigen Eindruck von der, im Innern des Magneten, bereits eingetretenen Erwärmung. Lassen Sie den Magneten erst wieder auskühlen, sobald sich die Spulenoberflächen beim Auflegen der flachen Hand heiß anfühlen.

Man nimmt die Hystereseurve möglichst zügig auf, um die Erwärmung des Magneten so gering wie möglich zu halten. Dabei notiert man jeweils den eingestellten Strom, sowie Temperatur und elektrischen Widerstand der Feldplatte. Die Auswertung anhand der Eichkurve der Feldplatte und die graphische Darstellung der Hystereseschleife erfolgen erst anschließend.

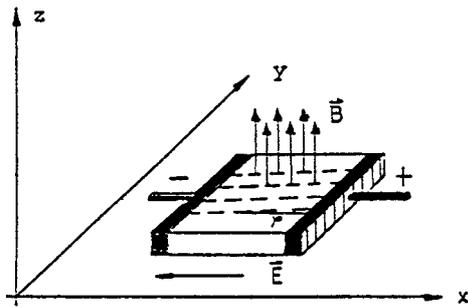
4. Fehlerbetrachtung

Um eine Abschätzung für die temperaturbedingte Unsicherheit zu erhalten nehme man die Hystereseurve mehrfach auf.

Man beginne bei der Aufnahme der Hystereseschleife auch einmal in der gegenüberliegenden Sättigung (Vorsicht: Umpolen des Stromes nur bei ausgeschaltetem oder auf den kleinsten Wert eingestellten Strom). Um die Symmetrie der Anordnung zu überprüfen, vergleiche man die beiden Zweige der Hystereseschleife im ersten und vierten Quadranten (Auflegen einer um 180 Grad gedrehten Kopie). - Kann die Hystereseschleife auch im umgekehrten Sinn durchfahren werden?

5. Anhang: Die Feldplatte

Eine Feldplatte besteht aus halbleitendem Grundmaterial hoher Ladungsträgerbeweglichkeit (vergl. am Schluß dieses Abschnittes). Legt man eine elektrische Spannung an die Enden einer Feldplatte und wird sie senkrecht von einem \vec{B} -Feld durchsetzt (siehe Abb.3), so laufen die Elektronen (in umgekehrter Richtung auch die Löcher, aber deren Beweglichkeit ist in dem benutzten InSb etwa um den Faktor 70 kleiner) aufgrund der Ablenkung durch die LORENTZ-Kraft unter dem Winkel φ schräg gegen die Richtung des elektrischen Feldes.



Magnetfeld senkrecht zur Zeichenebene in z-Richtung.

Gestrichelt: die schräg verlaufenden Strombahnen in der Feldplatte;

HALL-Winkel φ .

Abb.3. : Feldplatte (schematisch).
Elektrisches Feld in (-x) - Richtung,
Die Gleichung für den Kraftvektor \vec{F} :

$$\vec{F} = -e \cdot \vec{E} - e(\vec{v} \times \vec{B})$$

lautet hier in Komponenten:

$$F_x = -e \cdot E_x - e \cdot v_y \cdot B_z \tag{1a}$$

$$F_y = +e \cdot v_x \cdot B_z \tag{1b}$$

$$F_z = 0 \tag{1c}$$

In Leitern und Halbleitern ist andererseits unter Benutzung der Beweglichkeit b der Ladungsträger die der ungeordneten thermischen Bewegung überlagerte Driftgeschwindigkeit

$$\vec{v} = \frac{b}{e} \vec{F} \tag{2}$$

Für den Tangens des HALL-Winkels $\tan \varphi = \frac{v_y}{v_x}$ ergibt sich durch Eintragen von (1b) in die

y-Komponente der Gleichung (2) sofort die in Aufgabe 4 gesuchte Formel, unabhängig von der angelegten elektrischen Spannung. (Die gleiche Formel gilt bei der HALL-Sonde für den Winkel zwischen Stromrichtung und resultierender elektrischer Feldstärke).

Durch Kombination der Gleichungen (1) und (2) (Gleichgewicht von Feldkräften und Reibung, Vernachlässigung der Trägheitskraft; lineares Gleichungssystem für die Geschwindigkeitskomponenten) und Auflösen nach v_x erhält man eine gegenüber dem B -feldfreien Fall verringerte x-Komponente der Driftgeschwindigkeit der Elektronen. Der elektrische Widerstand der Feldplatte im Magnetfeld ist um den entsprechenden Faktor vergrößert, unabhängig von der Polung des Magnetfeldes. Die Durchführung dieser in Aufgabe 3 verlangten Rechnung ergibt:

$$R = R_0 [1 + (b \cdot B)^2] \tag{3}$$

Dieses Ergebnis kann auch anders interpretiert werden: Die Vergrößerung des Widerstandes kommt nicht nur durch die Verlängerung der Wegstrecke zustande, (Faktor $1 / \cos \varphi = \sqrt{1 + (b \cdot B)^2}$), sondern auch durch die Verringerung der Geschwindigkeit der schräg laufenden Elektronen gegenüber der Geschwindigkeit in x-Richtung ohne B -Feld aufgrund der LORENTZ-Kraft (Faktor $\sqrt{1 + (b \cdot B)^2}$). Beide Einflüsse zusammen. Geometriefaktor und Rückwirkung der LORENTZ-Kraft auf die resultierende Geschwindigkeit zusammen mit dem Reibungsgesetz (2), führen zu dem angegebenen Resultat (3). - Bei dem hier benutzten

elementaren Modell der Elektronenbewegung im Halbleiter ist von der Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen abgesehen und die Beweglichkeit b als isotrop und feldunabhängig angenommen worden.

Drückt man den Widerstand R_0 ohne Magnetfeld noch durch die Elektronendichte n , die Länge l und den Querschnitt a der Feldplatte aus, lässt sich Gleichung (3) explizit in der Form

$$R = \frac{l}{e \cdot n \cdot b(T) \cdot a} \cdot [1 + (b(T) \cdot B)^2] \quad (4)$$

schreiben. Gleichung (4) zeigt, dass die Abhängigkeit von der Temperatur T über die Beweglichkeit an zwei Stellen eingeht: sowohl im Widerstand ohne Magnetfeld, als auch im quadratisch

vom Magnetfeld abhängigen Faktor $[1 + (b(T) \cdot B)^2]$; dieser stellt dabei eine von den Abmessungen der betreffenden Sonde unabhängige Materialeigenschaft dar.

Als Halbleitermaterial wird Indium-Antimonid (InSb) wegen seiner relativ großen Elektronenbeweglichkeit benutzt ($b = 7 \text{ m}^2/\text{Vs}$), so dass bei $B = 1 \text{ T}$ ein HALL-Winkel von ca. 80° erzielt wird.

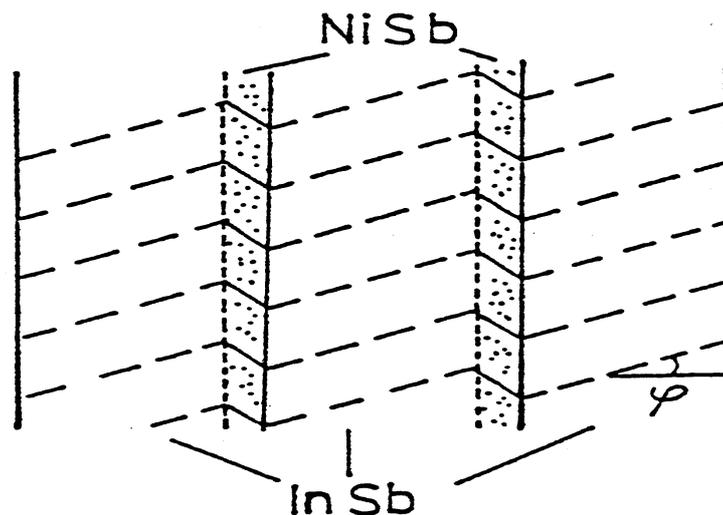


Abb.4.: Elektronenbahnen in der Feldplatte aus Indium-Antimonid (InSb) mit transversal abgeordneten Streifen aus Nickel-Antimonid (NiSb) (Rasterplatte schematisch). Tatsächlich ist das NiSb in Form von nach Länge und Lage statistisch verteilten Nadelkristallen eingelagert.

Das vorstehend skizzierte Modell vernachlässigt aber noch die transversale Aufladung der Feldplatte aufgrund des schrägen Verlaufes der Elektronenbahnen, die gerade bei HALL-Sonden zur Magnetfeldmessung ausgenutzt wird; es gilt also nur für $l/\sqrt{a} \ll 1$ (l = Länge der Feldplatte, a = Querschnitt). Um einen praktisch meßbaren Effekt zu erhalten, müßte andererseits l gerade groß sein. Hier bietet sich folgender Ausweg an: Durch beim Ziehprozeß des mit Tellur dotierten Halbleiterkristalls transversal eingelagerte Nickel-Antimonid Nadelkristalle größerer elektrischer Leitfähigkeit wird immer wieder eine Gleichverteilung der Ladungsträger über den ganzen Querschnitt erzwungen (Kurzschluß der transversalen Ladungsverschiebung), hinter dem die Elektronenbahnen im InSb von neuem schräg gerichtet sind, so bildet sich ein insgesamt sägezahnartiger Bahnverlauf aus (vergl. Abb.4): Im InSb kommt es zu der beschriebenen

Ablenkung im B -Feld (Auswirkung der LORENTZ-Kraft wegen großer Beweglichkeit); die NiSb-Nadeln bewirken transversale Kurzschlüsse (größere Leitfähigkeit wegen größerer Ladungsträgerdichte, kaum Auswirkung der LORENTZ-Kraft wegen geringerer Beweglichkeit). Durch vielfache z.B. mäanderförmige Hintereinanderschaltung solcher Sektionen gelingt es, Feldplatten mit genügender B -Empfindlichkeit herzustellen.

Feldplattensonden werden heute in den mannigfaltigsten technischen Ausführungsformen geliefert (Einzelfeldplatten, Differentialfühler, kontaktlose Potentiometer). Sie werden teilweise auf elektrisch isolierte Eisensubstrate aufgeklebt, um durch Konzentration der B -Linien die Empfindlichkeit noch weiter zu steigern (Einzelheiten z.B. in SIEMENS Informationsschriften: Bauelemente und Magnetfeldhalbleiter-Datenbuch).