

Versuch 310

Magnetismus am Ferrographen

Aufgaben

1. Bestimmen der Hysteresenschleifen und Neukurven eines Ferrit- und Trafoblechkerns.
2. Angabe von Remanenzinduktion und Koerzitivfeldstärke bei magnetischer Sättigung mittels vergrößerten Bildausschnittes (Fehlerreduzierung).
3. Berechnen und Angeben der spezifischen Permeabilität in Abhängigkeit von Feldstärke und Kurvenwegrichtung.

Vorbetrachtung

Das Magnetfeld als Modell

Neben den klassischen Kräften Gravitation und Elektrostatik, existiert eine dritte, unabhängige Kraft, der Magnetismus. Trotz dessen, dass die magnetischen Effekte durch einen (oder viele) bewegten Ladungen (also elektrischen Stromfluss) hervorgerufen werden, überlagern sich E- und Magnetfeld ungestört. Ähnlich wie bei einem elektrostatischen Feld, kann man um einen Magneten als Feldquelle Linien finden, auf denen gleiche Feldstärke herrscht (Äquipotentiallinien). Anders als beim elektrischen Feld allerdings, muss die Quelle sowohl Pol, als auch Gegenpol beinhalten. (Man spricht in Anlehnung an die historische Bedeutung des Erdmagnetfeldes in der Seefahrt von magnetischen Nord- und Südpol.) Eine einzelne magnetische „Ladung“ im Raum gibt es also nicht.

Magnetisierbarkeit von Stoffen

Wie bereits angedeutet, wird ein Magnetfeld gemäß der Lenz'schen Regel (Dreifingerregel) durch eine bewegte Ladung induziert: In der technischen Anwendung ist dies meist ein Stromfluss durch einen der Anwendung entsprechend konstruierten Leiter (z.B. Spule), in der freien Natur hingegen sind es die bewegten Elektronen im Atomgitter eines Körpers. Daraus kann man Aussagen über die Magnetisierbarkeit eines Stoffes ableiten: Gibt es in dem Stoff lediglich Elektronen, welche sich nur durch eine Induktion „widerwillig“ ausrichten und an denen zur Durchsetzung des Körpers eine induktive Arbeit verrichtet werden muss, nennt man **Diamagnetika**, da sie das Magnetfeld abschwächen. Körper aus Stoffen, in denen sich die Elektronen relativ einfach ausrichten lassen, nennt man **Paramagnetika**, sie führen zu einer leichten Verstärkung des Magnetfeldes. Hingegen Stoffe, in denen die Elektronenausrichtung „organisiert“ ist, d. h. die Ausrichtung einer großen Zahl beieinander liegenden Elektronen ist gleich (Weiß'sche Bezirke), verstärken das Magnetfeld überdeutlich und behalten ihre Magnetisierung auch nach dem Zusammenbruch des äußeren Magnetfeldes (Remanenz). Man nennt diese **Ferromagneten**.

Formeln zur Magnetostatik

Dieses Problem findet in der allgemeinen Formel zur Beschreibung der magnetischen Flussdichte Gewicht:

$$B = \mu_0 (H + M)$$

Dabei ist H die angelegte magnetische Feldstärke und M die Magnetisierung des Stoffes selbst. Verknüpft sind die beiden Größen durch eines aus der Definition eines Amperes hervorgehenden Vorfaktors, der Induktionskonstante. Dabei ist die Magnetisierung durch die Suszeptibilität auch über die Feldstärke ausdrückbar:

$$M = \chi_M \cdot H$$

$$\Rightarrow B = \mu_0 \cdot (1 + \chi_M) \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

Ferner gilt für einen Stromdurchflossenen Leiter (links), bzw. für eine Spule (rechts):

$$\text{Leiter: } H = \frac{I}{2\pi r}, \text{ Spule: } H = \frac{N \cdot I}{l}$$

Damit haben wir eine erste zarte Verknüpfung zwischen Elektrizität und Magnetismus geknüpft. Weiteres liefert uns das Induktionsgesetz:

$$U = -\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{\partial (A \cdot B)}{\partial t}$$

Versuchsprotokolle

Ferrograph

Da wir die magnetische Induktion an einem Spulenkern untersuchen möchten, nutzen wir eine Ferrographen-Schaltung, deren Grundschriftbild folgendermaßen aussieht:

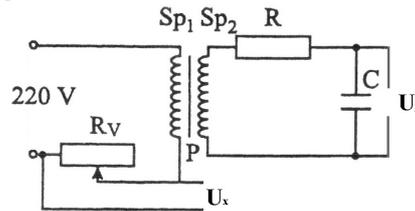


ABB I.1: Grundschriftbild des Ferrographen mit eingezeichneten Abgriffsstellen, ohne ESO

(Bearbeitet, aus „Physikalisches Grundpraktikum“)

Dabei wird die x- Komponente (H- Achse) als Spannungsabfall über dem regelbaren Widerstand abgegriffen. Das ist möglich, da bekanntlich

$$H = \frac{N_1 \cdot I}{l}$$

Mit $R_V = \frac{U_X}{I}$ folgt dem entsprechend:

$$H = \frac{N_1}{l \cdot R_V} \cdot U_X$$

$$\Rightarrow H \sim U_X$$

Etwas komplizierter wird es bei der mag. Flussdichte auf der y- Achse. Da wir nach dem Induktionsgesetz

$$U_Y = - \frac{\partial(N_2 \cdot A \cdot B)}{\partial t} = - \frac{\partial B}{\partial t} N_2 \cdot A$$

erhalten, müssen wir dafür sorgen, dass wir den Differentialbruch auflösen können. Dazu nutzen wir genialer Weise ein RC- Integrationsglied (Die Idee ist nicht von mir. Leider ;o). Wir dimensionieren den kapazitiven Widerstand viel kleiner als den ohmschen und können daraus formulieren:

$$C_Y = \frac{Q}{U}$$

$$\Rightarrow U_Y = \frac{Q}{C} = \frac{\int Idt}{C} = \frac{\int \frac{U}{R} dt}{C} = \frac{N_2 \cdot A \cdot \int - \frac{\partial B}{\partial t} dt}{RC} = - \frac{N_2 \cdot AB}{RC}$$

Durch Umpolen entfällt das negative Vorzeichen und wir erhalten:

$$B = \frac{RC}{N_2 \cdot A} \cdot U_Y$$

Ferromagnetisches Verhalten

Werfen wir noch kurz einen Blick auf das zu erwartende Ergebnis. Durch das ferromagnetische Verhalten der Spulenkern, kommt es dazu, dass die Proportionalität zur Feldstärke (bzw. die Konstanz der spezifischen Permeabilität) nicht mehr gilt. Es kommt zur Ausbildung einer sogenannten Hysteresenschleife, bei der die Restinduktion B_R nicht null ist (Remanenz), sondern erst bei einer „Neutralisationsfeldstärke“ H_C .

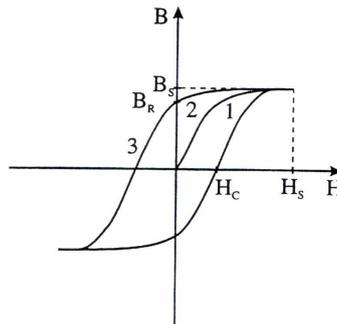


ABB I.2: erwartete Hysteresenschleife im H-B- Diagramm mit eingezeichneter Neukurve, Remanenzinduktion B_R und Koerzitivfeldstärke H_C
(© „Physikalisches Grundpraktikum“)

Versuchsprotokolle

Durchführung

Versuchsobjekt:

Ferrograph mit Oszilloskop, Spulenkern aus Trafoblech und Ferrit

Schaltungsskizze:

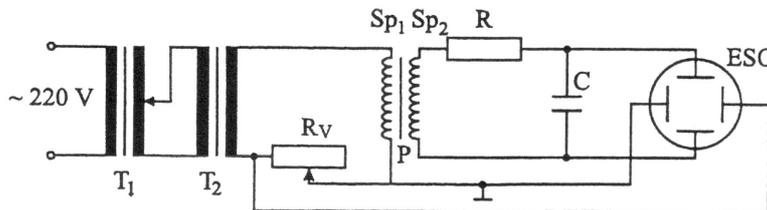


ABB I.3: Grundschiung des Ferrographen mit vorgeschalteter Spannungstransformation T_1 und T_2 (Spannungsquelle)

(© „Physikalisches Grundpraktikum“)

mögliche systematische Fehler:

1. Fehlerhafte Messgeräte
2. kapazitiver des Kondensators wird vernachlässigt
3. Ohmscher Widersand in den Leitern wird vernachlässigt.

erwartetes Ergebnis:

Bestätigung des theoretischen Kurvenverlaufs (graphisch: Hysteresenschleife) und finden der Remanenzinduktion in der Nähe der gegebenen Werte.

Versuchsablauf:

- sämtlicher (Innen-)Widerstände
- Aufbau der jeweiligen Schaltungen
- Aufnahme der Widerstands-Messreihen (U und I)

Fehlerquellen:

$$div_x, div_y$$

Messwerte

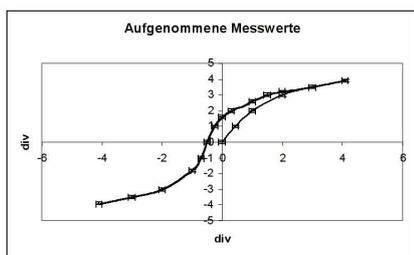


ABB II.1: Messwertreihe für „Trafoblech“

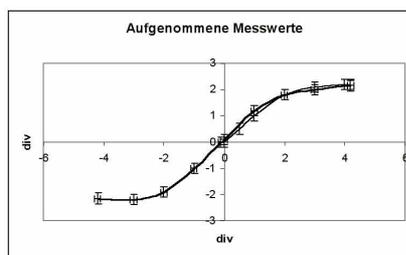


ABB II.2: Messwertreihe für Ferrit

Trafoblech

	<u>Oberer Kurvenverlauf</u>														<u>Neukurve</u>					
div_x	-4,1	-3	-2	-1	-0,7	-0,5	-0,25	0	0,3	1	1,5	2	3	4,1	0	0,45	1	2	3	4,1
div_y	-3,9	-3,5	-3	-1,8	-1	0	1	1,6	2	2,6	3	3,2	3,5	3,9	0	1	2	3	3,5	3,9
Δdiv_x	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Δdiv_y	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Ferrit

	<u>Oberer Kurvenverlauf</u>														<u>Neukurve</u>					
div_x	-4,1	-3	-2	-1	-0,7	-0,5	-0,25	0	0,3	1	1,5	2	3	4,1	0	0,45	1	2	3	4,1
div_y	-3,9	-3,5	-3	-1,8	-1	0	1	1,6	2	2,6	3	3,2	3,5	3,9	0	1	2	3	3,5	3,9
Δdiv_x	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Δdiv_y	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Versuchsprotokolle

Auswertung

Konstanten

$$R = 56000\Omega$$

$$C = 2,1\mu F$$

$$A = 1,75\text{cm}^2$$

Formeln

$$H = \frac{N_1}{l \cdot R_V} \cdot U_X$$

$$B = \frac{RC}{N_2 \cdot A} \cdot U_Y$$

$$\Delta H = \frac{N_1}{l \cdot R_V} \cdot \Delta U_X$$

$$\Delta B = \frac{RC}{N_2 \cdot A} \cdot \Delta U_Y$$

$$\mu_R = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}$$

$$\Delta \mu_R = \mu_R \cdot \left(\left| \frac{\Delta H}{H} \right| + \left| \frac{\Delta B}{B} \right| \right)$$

Rechnung

Remanenz und Koerzitivfeldstärke

	Trafoblech	Ferrit
N_1	250	200
N_2	700	200
$R_V [\Omega]$	100	50
$l [\text{m}]$	0,1	0,062
$U_X [\text{V}]$	2,3	0,25
$U_Y [\text{V}]$	0,31	0,001
ΔU_X	0,05	0,05
ΔU_Y	0,01	0,0005
$B_R [\text{T}]$	0,30	0,0034
$H_c [\text{A/m}]$	57,50	16,1290
ΔB_r	0,01	0,0017
ΔH_c	1,25	3,2258

Versuchsprotokolle

Spez. Permeabilität (Trafoblech)

(gleiche Wahl von A, l, R_V, N₁ und N₂ wie oben)

	<u>Oberer Kurvenverlauf</u>														<u>Neukurve</u>					
<i>div_x</i>	-4,1	-3	-2	-1	-0,7	-0,5	-0,25	0	0,3	1	1,5	2	3	4,1	0	0,45	1	2	3	4,1
<i>dix_y</i>	-3,9	-3,5	-3	-1,8	-1	0	1	1,6	2	2,6	3	3,2	3,5	3,9	0	1	2	3	3,5	3,9
Δdiv_x	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Δdiv_y	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>U_x/div</i>	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<i>U_y/div</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>U_x [V]</i>	-20,5	-15	-10	-5	-3,5	-2,5	-1,25	0	1,5	5	7,5	10	15	20,5	0	2,25	5	10	15	20,5
<i>U_y [V]</i>	-0,78	-0,7	-0,6	-0,36	-0,2	0	0,2	0,32	0,4	0,52	0,6	0,64	0,7	0,78	0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,78
ΔU_x	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
ΔU_y	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
<i>H [A/m]</i>	-512,5	-375	-250	-125	-87,5	-62,5	-31,3	0	37,5	125	188	250	375	513	0	56,3	125	250	375	513
<i>B [T]</i>	-0,75	-0,67	-0,58	-0,35	-0,19	0	0,19	0,31	0,38	0,5	0,58	0,61	0,67	0,75	0	0,19	0,38	0,58	0,67	0,75
ΔH	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
ΔB	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
$\mu_r(H)$	1326,3	1706	2462	4456	6048	8838	13248	19872	29808	44712	67068	100608	150912	226368	2688	2419	1846	1422	1165	
$\Delta \mu_r(H)$	72,2	119	249	1146	3661	2445	1044	537	226	156	113	71,2	50,2		880	369	156	89,8	59,5	

Spez. Permeabilität (Ferrit)

	<u>Oberer Kurvenverlauf</u>											<u>Neukurve</u>						
<i>div_x</i>	-4,2	-3	-2	-1	-0,1	0	1	2	3	4,2	0	0,5	1	2	3	4	4,2	
<i>dix_y</i>	-2,15	-2,2	-1,9	-1	0	0,1	1,2	1,8	2	2,15	0	0,5	1	1,8	2,1	2,2	2,2	
Δdiv_x	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Δdiv_y	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
<i>U_x/div</i>	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
<i>U_y/div</i>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
<i>U_x [V]</i>	-21	-15	-10	-5	-0,5	0	5	10	15	21	0	2,5	5	10	15	20	21	
<i>U_y [V]</i>	-0,043	-0,04	-0,04	-0,02	0	0	0,02	0,04	0,04	0,04	0	0,01	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	
ΔU_x	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
ΔU_y	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<i>H [A/m]</i>	1354,84	-968	-645	-323	-32,3	0	323	645	968	1355	0	161	323	645	968	1290	1355	
<i>B [T]</i>	-0,14	-0,15	-0,13	-0,07	0	0,01	0,08	0,12	0,13	0,14	0	0,03	0,07	0,12	0,14	0,15	0,15	
ΔH	32,26	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	
ΔB	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
$\mu_r(H)$	84,2	128	169	192	246	179	141	103	80,3		148	173	148	115	92,5	88,1		
$\Delta \mu_r(H)$	8,1	12,9	21,9	48,7	493	38,7	18,5	11,3	7,6		78,9	41,9	19,7	12,1	8,5	8		

Ergebnisse

Trafoblech

$$B_R = (0,30 \pm 0,01) T, H_C = (57,50 \pm 1,25) \frac{A}{m}$$

	<u>Unterer Kurvenverlauf</u>					<u>Oberer Kurvenverlauf</u>								<u>Neukurve</u>				
<i>H [A/m]</i>	512,5	375	250	125	87,5	-31,3	0	37,5	125	188	250	375	513	56,3	125	250	375	513
$\mu_r(H)$	1326,3	1706	2462	4456	6048	4838	3947	3024	2122	1846	1553	1219	1038	2688	2419	1846	1422	1165
$\Delta \mu_r(H)$	72,2	119	249	1146	3661	2445	1044	537	226	156	113	71,2	50,2	880	369	156	89,8	59,5

Versuchsprotokolle

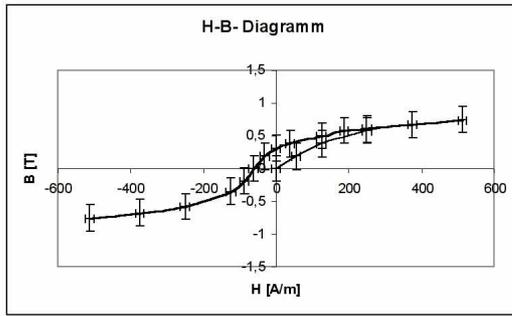


ABB III.1: H-B-Diagramm (oberer Kurvenverlauf)

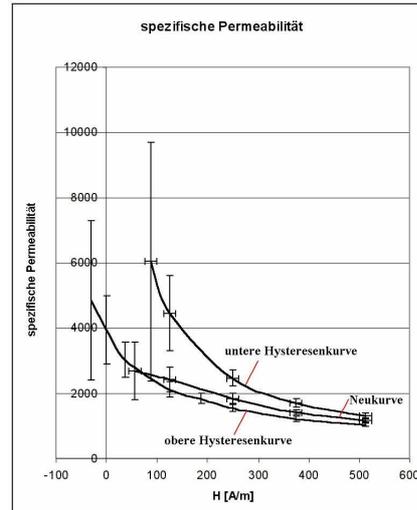


ABB III.2: spezifische Permeabilität über H

Ferrit

$$B_R = (0,0034 \pm 0,0017)T, H_C = (16,13 \pm 3,23) \frac{A}{m}$$

	<u>Unterer Kurvenverlauf</u>				<u>Oberer Kurvenverlauf</u>					<u>Neukurve</u>					
H [A/m]	1354,84	968	645	323	0	323	645	968	1355	161	323	645	968	1290	1355
$\mu_r(H)$	84,2	128	169	192	246	179	141	103	80,3	148	173	148	115	92,5	88,1
$\Delta \mu_r(H)$	8,1	12,9	21,9	48,7	493	38,7	18,5	11,3	7,6	78,9	41,9	19,7	12,1	8,5	8

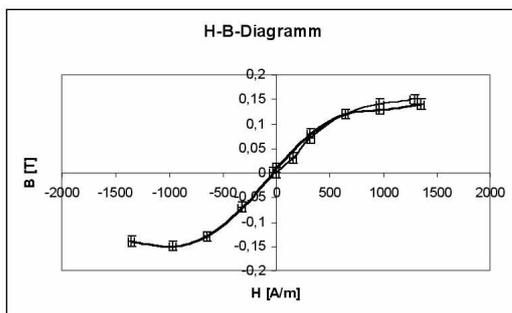


ABB III.3: H-B-Diagramm (oberer Kurvenverlauf)

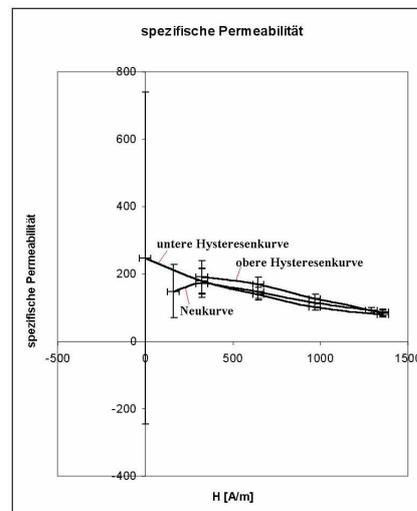


ABB III.4: spezifische Permeabilität über H

Diskussion

Der Versuch zeigte Folgendes: bei ferromagnetischen Stoffen ist die spezifische Permeabilität z.T. stark von der anliegenden magnetischen Feldstärke abhängig.

Im Experiment traten Probleme mit der Schärfe und Auflösung des Elektronenstrahls beim Versuchsteil am Ferrit auf, was sich in dem großen Fehlerintervall widerspiegelt. Ebenso nicht zu erklären sind die „Schleifen“ am Ende der Hysteresenkurve, sowie die mysteriöse Überschneidung der Ober- und Unterkurven beim Ferrit. (Es bestehen ernsthafte Zweifel an der lapidaren Erklärung, es handele sich um einen Messfehler.) Dabei wäre eine längere, experimentelle Nachuntersuchung interessant.

So sind die Ergebnisse OK, die erwarteten Hysteresen wurden beobachtet und ausgewertet.

Jena, 03.02.2002