Über magnetoelastische Effekte.

Von Karl Zschiesche in Frankfurt a. M.

2. Mitteilung ¹⁾.

Mit 14 Abbildungen. (Eingegangen am 19. September 1922.)

1. Im Anschluß an die Arbeiten von Gerlach und Lertes ¹⁾ über den magnetischen Barkhausen ²⁾-Effekt wurden Effektmessungen an Heusler-Bronze und Eisen-Nickel-Legierungen ausgeführt, weiterhin die Beziehungen zwischen „Effekt“, elastischer Beanspruchung und Torsion des Ferromagnetikums untersucht. Diese Messungen führten zur Bestätigung der von Gerlach und Lertes ¹⁾ ausgesprochenen Ansicht, daß nicht die Magnetisierung als solche, sondern magnetoelastische Effekte, die als Magnetostraktion des Ferromagnetikums bekannt sind, in Frage kommen.

Versuchsanordnung.

2. Für die Effektmessungen wurde eine ähnliche Versuchsanordnung gewählt, wie sie Gerlach und Lertes ¹⁾ bei ihren Untersuchungen

Fig. 1. Seddigröhre in Audionschaltung.

A Anode der Seddigröhre, G Gitter der Seddigröhre, K Kathode der Seddigröhre, S Effektspeule, V Verstärker, C Kapazität, W Widerstand ($5 \cdot 10^6 \Omega$), W' Regulierwiderstand ($\sim 8 \cdot 10^3 \Omega$), B_H Heizbatterie (6 Volt), B_K Kompensationsbatterie (2 Volt), H. isolierte Batterie (80 Volt), J ballistisches Galvanometer.

verwandt hatten. Zwischen den Polen eines Ruhmkorffmagnets befand sich drehbar eine enge Spule (1150 Windungen, innerer bzw. äußerer Radius 0,68 cm bzw. 1,25 cm, Widerstand 150Ω). Diese war über eine Wippe einerseits direkt mit einem ballistischen Galvano-

¹⁾ W. Gerlach und P. Lertes, 1. Mitteilung, ZS. f. Phys. 4, 383—392, 1921 (im folgenden I. c. I.); Phys. ZS. 22, 568—569, 1921 (I. c. II.)

²⁾ H. Barkhausen, Phys. ZS. 20, 401—403, 1919; s. auch v. d. Pol jr., Proc. Amst. 23, 637, 980—988, 1920.

meter verbunden, andererseits konnte sie an einen Dreifach-Lautverstärker angeschlossen werden, der mit einem Telephon verbunden war. Der verstärkte Strom wurde außerdem durch eine Seddigröhre in Audionschaltung gleichgerichtet und mit dem sehr stark gedämpften Galvanometer gemessen.

3. Wurde die erste Stellung der Wippe verwandt, so erhielt man bei Umdrehung der Spule ohne Kern relative Werte für das zwischen den Polen herrschende Feld; befand sich der Kern dagegen in der Spule, so ergaben die hierbei erhaltenen Ausschläge unter Berücksichtigung der bei Umdrehung ohne Kern gemessenen Induktion die Induktionskurven (mittlere Kommutierungskurven).

Für die Effektmessung wurde eine mittlere Umdrehungsgeschwindigkeit der Spule (l. c. I) von etwa 2 Sek. für 180° bei allen im folgenden ausgeführten Messungen des Effektes verwendet.

Messungen an weiterem Material.

4. Die zur Untersuchung kommenden Heusler-Bronzen mußten erst nach dem Takeschen Härtungsverfahren¹⁾ vorbehandelt werden.

Fig. 2. Effektkurve der Heusler-Bronze (Probe IV. 310 Std. bei 140° gealtert).

Von den vier untersuchten Proben wurden zwei (I und II) in elektrischen Öfen bei 170° bzw. 270° ²⁾, die beiden anderen (III und IV) in siedender Flüssigkeit bei 110° (Toluol) und 140° (Xylol) gealtert. Die beiden ersten ergaben eine Sättigungsmagnetisierung von $J_s = 30$, die beiden letzten von $J_s = 160$.

5. Die Effektmessungen ergaben, daß bei den Proben I und II ein Effekt weder im Telephon noch im Galvanometer wahrzunehmen war. Die Proben III und IV dagegen ergaben einen schwachen Effekt. Der Kurvenverlauf stimmt vollkommen mit dem von Gerlach für andere Ferromagnetika gefundenen überein. Der Effekt ist im Vergleich zu dem von Eisenproben von gleichen Dimensionen selbst unter

¹⁾ Take, Abh. d. Kgl. Ges. d. Wiss. zu Göttingen 8, 2, 1911 (Habilitationsschrift).

²⁾ Die Magnetisierungswerte der Proben wurden bei verschiedener Alterungsdauer gemessen. Sie ergaben eine volle Bestätigung der Takeschen Messungen bei Probe I und II. Leider ist der Effekt bei allen Heusler-Bronzen so klein, daß die beabsichtigte Untersuchung zwischen Effektstärke und Hysteresegröße, Stärke der Koerzitivkraft usw., welche sich bei Heusler-Bronzen in sehr weiten Grenzen durch das Alterungsverfahren variieren lassen, nicht gelang.

Berücksichtigung der größeren J_s -Werte von Eisen bei den Heusler-Bronzen (III und IV) wesentlich kleiner.

6. Weiterhin standen Eisen-Nickel-Legierungen verschiedener Zusammensetzung für die Effektmessungen zur Verfügung¹⁾. Diese waren aus reinstem Ausgangsmaterial (Fe- und Ni-Pulver) hergestellt, in Stäbchenform gepreßt und bei 1100 bis 1200° längere Zeit geglüht. Von der Glühtemperatur waren sie allmählich auf Zimmertemperatur abgekühlt worden. Die Stäbchen hatten sämtlich gleiche Form und ungefähr die gleiche Ausdehnung [$4,0 \times 0,4 \times 0,4 \text{ cm}^3$]. Diese Proben wurden nun auf Magnetisierung und Effekt hin untersucht, und zwar erstens bei Zimmertemperatur nach der Glühung, weiter wenn die Proben rund 2 Stunden lang auf die Temperatur der flüssigen Luft und dann wieder auf Zimmertemperatur gebracht waren, und schließlich bei der Temperatur der flüssigen Luft selbst.

7. In Fig. 3a sind die Sättigungsmagnetisierungen pro Volumeneinheit dieser drei Meßreihen zusammengestellt. Untersucht wurden die Zusammensetzungen 0, 5, 10, 20, 25, 30, 35, 36, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95 und 100 Proz. Ni.²⁾ Die ausgezogene Kurve gibt die erste Meßreihe, die gestrichelte die zweite nach Abkühlung in flüssiger Luft, und die strichpunktierte die dritte, während die Proben in flüssiger Luft lagen²⁾. Der Einschnitt bei der 33 Proz. Ni-haltigen Probe ist hier zuerst sehr scharf und wird bei der zweiten flacher, um bei der dritten Reihe nur noch als schwacher Knick vorhanden zu bleiben. Die Messung der Koerzitivkraft und der Remanenz mit

Fig. 3a. Sättigungswerte der Magnetisierung bei verschiedenen Fe-Ni-Legierungen.

- 1. Meßreihe bei Zimmertemperatur,
 - - 2. " " " nach Abkühlung auf -180° ,
 - · - 3. " " " -180° .

¹⁾ Die Proben wurden von Herrn Jonas hergestellt und in freundlicher Weise zur Verfügung gestellt. (Über die Herstellung der Legierungen s. B. Jonas, Dissertation Frankfurt.)

²⁾ Es wurden für alle Proben die ganzen Magnetisierungskurven aufgenommen. Zur Kürzung werden oben nur die Sättigungswerte J_s gegeben. Die dritte Messung wurde nicht ganz bis zur Sättigung durchgeführt. Bei dieser liegen daher die Werte etwas tiefer, während der Kurvenverlauf dadurch nicht beeinträchtigt wird.

dem Magnetometer ergab für beide den größten Betrag zwischen 25 und 30 Proz. Ni, während sie bei Legierungen von 50 bis 80 Proz. Ni sehr geringe Werte annahmen. So steigt der Hysteresisverlust stark an von 0 bis 25 Proz. Ni, nimmt bei rund 30 Proz. Ni plötzlich ab und ist verschwindend klein bei den 50 bis 80 Proz. Ni-haltigen Proben.

Fig. 3b. Remanenz und Koerzitivkraft bei Fe-Ni-Legierungen.

Fig. 4. Effektwerte bei Sättigungsmagnetisierung an Fe-Ni-Legierungen.

8. Der Effekt wurde bei den gleichen Proben unter den gleichen Bedingungen wie die Magnetisierung (unter 6. und 7. angegeben) gemessen. Die zweite und dritte Meßreihe, also die Messung bei Zimmertemperatur nach Abkühlung auf -180° und die Messung in flüssiger Luft, ergaben hier genau die gleichen Werte. Fig. 4 bringt daher nur die Resultate von den ersten beiden Meßreihen. Wie man

hieraus sieht, wird durch die Abkühlung im wesentlichen nur der Effekt im Bereich von 25 bis 40 Proz. Ni beeinflusst. Auch hier wird das bei rund 33 Proz. Ni liegende Minimum weniger ausgeprägt nach Abkühlung auf 180°. Aus den Messungen über Hysteresisverlust einerseits, den Effekt andererseits geht hervor, daß beide parallel zueinander verlaufen: ein Effekt- und Verlustmaximum bei rund 20 Proz. Ni, ein verschwindend kleiner Hysteresisverlust und Effekt bei 50 bis 80 Proz. Ni. Die unmagnetische Probe liegt bei rund 33 Proz. Ni, an der gleichen Stelle zeigt auch der Effekt ein Minimum.

Rein mechanischer Effekt.

9. Nach Gerlach und Lertes¹⁾ entsteht durch Dehnen und Zusammendrücken eines ferromagnetischen Drahtes in der Spule *S* (Fig. 1) ein Geräusch, das vollständig dem durch Ummagnetisieren erzeugten Effekte entspricht. Der Versuch war ausgeführt, ohne daß sich ein Magnetfeld in der Nähe befand. Derselbe Effekt wurde nun auch an einem rund 30 cm langen Eisendraht festgestellt, wenn dieser gedehnt wurde.

Die hierbei verwandte Versuchsanordnung war folgende: In einem aus zwei Holzstäben bestehenden Gestelle *G* war an einem Torsionskopfe *T* und einer Führung *F* der Versuchsdraht angelötet. *F* war über eine Rolle *R* mit dem Ende eines einarmigen Hebels *H* verbunden, auf dem ein Laufgewicht *L* verschoben werden konnte. Die ganze Apparatur war so aufgebaut, daß der Draht sich in Ost-Westlage befand. Mit dieser Anordnung konnte der Draht einer kontinuierlich veränderlichen und beliebig großen Längsspannung unterworfen werden. *S* war die Spule, welche wie immer zur Messung des Effektes mit der oben beschriebenen Anordnung (Fig. 1) verbunden war.

Fig. 5. Meßanordnung für die Abhängigkeit des Effektes von Dehnung und Torsion.
T Torsionskopf, *D* Versuchsdraht, *F* Führung, *R* Rolle, *H* Hebel (einarmig), *L* Laufgewicht, *G* Holzgestell, *S* Effektspule, *M* um die Vertikalachse α drehbarer Elektromagnet.

10. Wurde der Eisendraht in Sprüngen zunehmend belastet, so trat im Telefon in gewissen Grenzen der Belastung ein Rauschen, der Effekt, auf. Die gleiche Erscheinung zeigte sich auch beim Entlasten. Da bei Belastungszyklen von 0 bis 2 kg und bei solchen

¹⁾ l. c. I, S. 391.

von 3 kg an aufwärts bis 8 kg ein solches Geräusch nicht auftrat, so ist sein Erscheinungsbereich auf 2 bis 3 kg ($\sim 12,5 \text{ kg/mm}^2$) Belastung beschränkt. Durch gleiches Vorgehen wurde beim Entlasten der Effekt auf den Belastungsbereich von 2 bis 1 kg ($\sim 7,5 \text{ kg/mm}^2$) lokalisiert. Das Auftreten des Effektes ist weiterhin auch von der Vorgeschichte des Drahtes abhängig; mechanisch noch nicht beanspruchter Draht zeigte bei der ersten Belastung einen stärkeren Effekt, der allmählich an Stärke einbüßte und schließlich nach rund fünfmaliger Belastung eine konstante Lautstärke erreichte. Messungen mit dem Galvanometer ließen sich nicht ausführen, da der Effekt hierzu zu schwach war.

11. An dem gleichen Versuchsdrahte wurde die Längenänderung infolge Belastung gemessen. Die Elastizitätsgrenze wurde an dem Drahte bei 10 kg/mm^2 beobachtet; sie verschob sich allmählich nach mehreren Belastungszyklen bis 12 kg/mm^2 . Aus der Längenänderung ergab sich für den Elastizitätsmodul der Wert $E = 20\,000 \text{ kg/mm}^2$.

12. Ein Vergleich des Ergebnisses über den magnetischen Effekt mit dem über die mechanische Längenänderung zeigt, daß der Effekt nur beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze auftritt, in beiden Fällen bei rund 12 kg/mm^2 . Eine ähnliche Erscheinung wurde weder bei Nickel noch bei Chromnickeldraht beobachtet, dagegen wurde sie in genau gleicher Weise bei einem reinen Eisendraht (99,85 Proz. Fe) bestätigt gefunden.

13. Untersuchungen darüber, ob auch Torsion des Versuchsdrahtes wieder wie Dehnung ein Auftreten des Effektes bedingte, führten bei Fehlen eines jeden äußeren Magnetfeldes zu einem negativen Resultate. Ein Effekt war weder bei Eisen noch bei Nickel und Chromnickel vorhanden, d. h. er war weder mit Galvanometer noch mit dem Telefon wahrzunehmen.

Effekt und Belastung.

14. Während im vorigen Abschnitte das Auftreten des Effektes bei rein mechanischen Vorgängen ohne Vorhandensein eines Magnetfeldes beobachtet wurde, wird jetzt die Abhängigkeit des Effektes, der durch Ummagnetisieren des Drahtes in normaler Weise erzeugt wird, von der Spannung des Versuchsdrahtes untersucht. In der oben beschriebenen Anordnung (Fig. 5) wurde das ummagnetisierende Feld durch einen Elektromagnet hervorgerufen, der auf einem Drehtisch um eine Vertikalachse gedreht werden konnte. Die Polschuhe befanden sich rund 1 cm unter dem Drahte, symmetrisch zur Spule S. Wieder befand sich der Draht in Ost-Westrichtung.

15. Es wurden nun die Effektkurven (Abhängigkeit der Effektintensität von der Maximalstärke des ummagnetisierenden Feldes) in Abhängigkeit von der Belastung des Drahtes aufgenommen. Dabei ergaben sich für Eisendraht die in Fig. 6 und Tabelle 1 gegebenen Werte. Die Kurvenform bleibt bei den verschiedenen Belastungszyklen im wesentlichen erhalten. Die Effektstärke bei verschiedenem $\mathfrak{H}$ nimmt zwischen 0 und 2 kg Belastung für alle $\mathfrak{H}$ größere Werte als für den unbelasteten Draht an. Eine Belastung von 3 kg erhöht die Effektwerte von $\mathfrak{H} = 5$ bis $\mathfrak{H} = 12$, während bei höheren Feldern die gleiche Belastung den Effekt verringert. Bei noch höheren Belastungen wird der Effekt dann bei jeder Feldstärke geschwächt.

Tabelle 1.

	$\mathfrak{H} = 5$	$\mathfrak{H} = 6,8$	$\mathfrak{H} = 7,6$	$\mathfrak{H} = 9,8$	$\mathfrak{H} = 13,1$	$\mathfrak{H} = 16,1$	$\mathfrak{H} = 20,5$	$\mathfrak{H} = 26$
$P = 0$	51	132	147	163	162	158	164	145
1	130	204	212	214	202	196	195	182
2	191	235	243	233	228	202	196	188
3	218	240	237	246	214	206	195	179
5	190	225	222	221	188	185	169	155
6	156	190	203	187	174	167	160	163
7	134	179	201	200	160	169	168	155

Eine entsprechende Erscheinung existiert [z. B. nach den Messungen von Ewing¹⁾] für die Abhängigkeit der Magnetisierung von der Belastung. Auch hier liegt jede Kurve bei kleineren Feldern niedriger, bei größeren Feldern höher als alle anderen, die einer größeren Belastung entsprechen. Bei mittleren Feldern findet ein Überschneiden der einzelnen Magnetisierungskurven statt, eine Erscheinung, die man gewöhnlich als Villarische Umkehr bezeichnet.

Die Villarische Umkehr zeigt sich also bei Eisendraht auch für die Effektkurven.

16. Die Messungen an dem reinen Eisendraht ergaben genau das gleiche Resultat, so daß sie nicht angeführt zu werden brauchen.

17. Die gleichen Messungen an Nickeldraht ergaben, daß bei Nickel mit steigender Belastung eine Schwächung des Effektes eintritt. Bis zu einer gewissen Feldstärke ($\mathfrak{H} = 7$) tritt überhaupt kein mit

Tabelle 2.

	$\mathfrak{H} = 5$	$\mathfrak{H} = 6$	$\mathfrak{H} = 7$	$\mathfrak{H} = 10$	$\mathfrak{H} = 12$	$\mathfrak{H} = 15$	$\mathfrak{H} = 18$	$\mathfrak{H} = 22$	$\mathfrak{H} = 32$
$P = 0,0 \text{ kg}$	0	0	0	18	20	20	21	20	19
0,5 "	0	0	0	9	12	14	14	14	15
0,8 "	0	0	0	2	3	5	6	7	7

¹⁾ Ewing, Magnetische Induktion, S. 192 (Berlin 1892).

dem Galvanometer meßbarer Effektausschlag auf; nach starkem Anwachsen des Effektwertes von 7 bis 12 Gauß behält der Effekt seine Intensität annähernd bei (Tabelle 2). Noch deutlicher ergibt sich das Abfallen der Effektstärke aus Fig. 7 b. Auch bei Nickel findet sich

Fig. 6. Effektkurven bei verschiedener Belastung für Fe.

• — • 0 kg (0 kg/mm²);
 ○ — ○ 3 kg (15 kg/mm²);
 × — × 2 kg (10 kg/mm²);
 + — + 6 kg (30 kg/mm²).

Fig. 7 a. Effektkurven bei verschiedener Belastung für Ni.

○ — ○ 0 kg (0 kg/mm²);
 × — × 0,5 kg (16 kg/mm²);
 + — + 0,8 kg (26 kg/mm²).

Fig. 7 b. Effektstärke als Funktion der Belastung bei Nickel.

Fig. 8. Effektkurven bei Chromnickeldrah für verschiedene Belastung.

○ — ○ 0 kg; × — × 0,5 kg;
 + — + 1,0 kg; · — · 1,4 kg.

die entsprechende Erscheinung in der Abhängigkeit der Magnetisierung von der Belastung. Die Villarische Umkehr war dagegen weder bei Effekt noch bei Magnetisierung festzustellen¹⁾.

¹⁾ Es wurde nach der Existenz des Villaripunktes bei Nickel sorgfältig, jedoch ohne positiven Erfolg, gesucht. Literatur vgl. Heydweiller, Phys. ZS. 5, 255, 1904; K. Honda u. Shimizu, Phys. ZS. 5, 254, 1904; Ann. d. Phys. 14, 791, 1904.

18. Schließlich wurde noch ein Chromnickeldraht (Nichromheizdraht, gegläht) untersucht. Dieser gab folgende von Nickel gänzlich verschiedene Kurvenformen; die Effektintensität wächst mit steigender Belastung, das heißt also bezüglich der Magnetostriktion, daß $\frac{\delta \lambda}{\lambda} > 0$ ist, während es bei Nickel stets < 0 anzunehmen ist.

19. Eine Erscheinung ist hierbei noch zu erwähnen. Wurde frischer Chromnickeldraht belastet, so beobachtete man zunächst bis 0,8–1,0 kg einen verhältnismäßig kleinen Effekt; wurde dann weiter belastet, so stieg der Effekt plötzlich sprunghaft um rund 50 Proz. Auch bei späteren Belastungszyklen blieb die Effektstärke auf der dem größeren Werte entsprechenden Höhe, der niedrigste Effektwert war bei einem derart einmal überlasteten Drahte nicht wieder zu erreichen (Tabelle 3).

Tabelle 3.

P . .	0	0,2	0,6	1,0	1,4
E . .	56	56,5	61	61,5	90,7

Dieser Sprung in der Effektstärke war wie bisweilen durch paralleles Hören mit dem Telefon festgestellt, von einem Knacken begleitet, der Draht zog sich dabei; es war also die Fließgrenze des Metalls überschritten.

Fig. 9. Abhängigkeit des Effektes von der Torsion bei Eisendraht.

Effekt und Torsion.

20. Eine Torsion des Versuchsdrahts beeinflusst ebenfalls die Stärke des Effektes. Wurde nämlich an einem Eisendraht bei einer Feldstärke von 5 Gauß des ummagnetisierenden Feldes der Effekt bei

Tabelle 4.

φ	φ/l	$E_{\text{(langsam)}}$	$E_{\text{(schnell)}}$
0	0	33	52
180	4,5	57,5	67
360	9	58	61
720	18	61,5	59
1080	27	50,5	59
1440	36	45,5	54,5
1800	45	43	51

verschiedener Torsion gemessen, so ergaben sich für schnelle und langsame Ummagnetisierung die Stärken des Effekts (Tabelle 4).

Auch bei der Drillung erkennt man das Parallelgehen von Effekt und Magnetisierung, wie sich durch Vergleichung der Messungen von Ewing¹⁾ und den obenstehenden Messungen ergibt.

Magneto-elastische Hysteresis des Effektes.

21. Mit dem Galvanometer wurden weiter die Effektwerte aufgenommen, wenn der Eisendraht bis zu einer Höchstbelastung gedehnt und dann wieder entlastet wurde. Es wurde wieder der bei Ummagnetisierung auftretende Effekt beobachtet und gemessen. Hierzu wurden die in Fig. 2 und 5 dargestellten Versuchsanordnungen verwandt. Dabei ergaben die Kurven der Belastung und die der Entlastung, jede für sich genommen, den in Fig. 6 dargestellten Typus. Das Maximum des Effektes lag bei abnehmender Belastung an einer anderen Stelle als bei zunehmender Belastung, es ist nach kleineren Gewichten hin verschoben.

Wurden nun Belastungszyklen ausgeführt, die innerhalb der Elastizitätsgrenze blieben, so ergab sich eine normale Hysteresis, d. h. kein Überschneiden der Belastungs- und Entlastungskurve. Eine solche Erscheinung trat vielmehr nur dann auf, wenn man die Grenze bedeutend überschritt. Das Maximum der Belastungskurve lag dabei in der Nähe der Elastizitätsgrenze. Die Resultate der Meßreihen ergeben sich aus Fig. 10. Es wurde hierbei der Draht zunächst bis $8,75 \text{ kg/mm}^2$ belastet, und dann entlastet. Nach einiger Zeit folgte ein zweiter Belastungszyklus bis $15,0 \text{ kg/mm}^2$ und weiterhin ein solcher bis zu $25,0 \text{ kg/mm}^2$. Die Meßreihen wurden bei $\mathfrak{H} = 5$ Gauß ausgeführt.

22. Auch diese Hysteresis des Effektes steht in vollkommener Analogie zu der Magnetisierung, wie ein Vergleich mit den Messungen von Ewing²⁾ lehrt. Dieser erhielt für Eisendraht in einem Felde von 3 Gauß das Magnetisierungsmaximum bei einer Belastung von 20 kg/mm^2 , und aus Fig. 10 ergibt sich ein Effektmaximum bei 5 Gauß und $17,5 \text{ kg/mm}^2$ Belastung. Beachtet man, daß bei höheren Feldern das Maximum der Magnetisierung wie auch das des Effektes bei kleinen Belastungen eintritt, so ergibt sich ein vollständiges Parallelgehen von Effekt und Magnetisierung als Funktion der Belastung. Das gleiche gilt auch von der Entlastungskurve. Die Erscheinung, daß Belastungs- und Entlastungskurve bei der Magnetisierung gegen-

¹⁾ Ewing, l. c.

²⁾ Ewing, l. c., S. 197.

Fig. 10. Magnetoelastische Hysterisis des Effektes bei Eisen.

Fig. 11. Magnetoelastische Hysterisis bei Nickel.

Fig. 12. Effektkurven bei konstanter Belastung und variiertem zirkularemagnetischen Felde.

$\times - \times$ $H_z = 0$;
 $+ - +$ $H_z = 2,2$;
 $o - o$ $H_z = 11,7$.

Fig. 13. Effektstärke bei $H = 5 \Gamma$ in Abhängigkeit von der Zirkularmagnetisierung.

einander verschoben sind, wird als magneto-elastische Hysteresis bezeichnet. Aus den Messungen ergibt sich, daß dieselbe Hysteresis auch in der Stärke des Effektes zu Tage tritt.

23. Eine gleiche Erscheinung, aber ohne Überschneidung der Kurven, zeigte sich bei Nickeldraht. Auch hier stimmt die magneto-elastische Hysteresis für Magnetisierung und Effekt vollkommen überein (siehe Fig. 11). Das Fehlen der Überschneidung entspricht dem vorher erwähnten Fehlen des Villarischen Punktes bei Nickel.

Zirkularmagnetisierung und Effekt.

24. Nach Gerlach und Lertes¹⁾ sowie nach v. d. Pol²⁾ hat auch eine Zirkularmagnetisierung des Drahtes Einfluß auf den Effekt.

Fig. 14. Belastungszyklen bei hoher Zirkularmagnetisierung eines Fe-Drahtes.
 $H_z = 44$.

Die Zirkularmagnetisierung des Drahtes wurde mit einem durch den Versuchsdraht geschickten Gleichstrom erzeugt. Durch die dabei entstehende Erwärmung des Drahtes war möglicherweise eine Fehlerquelle gegeben, indem auch der Effekt allein durch die Temperaturerhöhung abnehmen konnte. Da aber eine Erwärmung um rund 150° , wie sie für die folgenden Versuche als obere Grenze thermoelektrisch festgestellt wurde, nach Messungen von Gerlach und Lertes¹⁾ den Effekt um weniger als 5 Proz. schwächte, eine Zahl, die innerhalb der mit dem Galvanometer erreichbaren Meßgenauigkeit lag, konnte dieser Einfluß vernachlässigt werden³⁾.

25. In Fig. 12 sind die Effektkurven bei verschiedener Zirkularmagnetisierung gezeichnet. Der Effekt wird, wie man

¹⁾ Gerlach u. Lertes, l. c., S. 390.

²⁾ v. d. Pol jr., Proc. Amst. **23**, 637 und 980—988, 1920.

³⁾ Die Temperatur des Drahtes wurde thermoelektrisch bestimmt, sie war nie über 150°C .

hieraus ersieht, mit wachsendem Zirkularfelde kleiner. Bei kleinem äußeren Felde $\mathfrak{H}$ ist die Wirkung des zirkularen Feldes bedeutend stärker als bei mittleren und höheren Feldern (bei $\mathfrak{H} = 5$ Gauß, Abnahme um 70 Proz., bei $\mathfrak{H} = 10$ um 26 Proz. und bei $\mathfrak{H} = 25$ Gauß um 20 Proz.).

26. Wird der zirkular magnetisierte Draht noch Belastungszyklen unterworfen, so bleiben die in 23 bis 25 erhaltenen Kurvenformen bestehen, nur die Intensität des Effektes wird verringert. Die drei Einflüsse: Feld ($\mathfrak{H}$), Zirkularmagnetisierung $\mathfrak{H}_z$ und Belastung P superponieren sich. Selbst bei einer Zirkularmagnetisierung von $\mathfrak{H}_z = 44$ Gauß, bei der der Effekt auf $1/200$ geschwächt ist, ist ein Einfluß der Belastung noch deutlich wahrnehmbar.

Zusammenstellung der Ergebnisse.

27. a) Heusler-Schmiedebronze zeigt den Effekt als besonders schwaches Rauschen.

b) Bei den verschiedenen prozentigen Eisennickellegierungen gehen Hysterisisverlust und Effekt einander parallel.

c) Beim Dehnen eines Eisendrahtes bei Abwesenheit jedes künstlichen Feldes tritt ein „rein mechanischer Effekt“ bei Überschreiten der Elastizitätsgrenze ein. Beim Tordieren wurde ein entsprechender Effekt nicht beobachtet (vielleicht infolge seiner Kleinheit).

d) Dehnung und Torsion wirken bei einem ferromagnetischen Drahte auf Magnetisierung und Effekt in gleicher Weise ein. Fe zeigt die Villarische Umkehr, bei Ni konnte sie nicht beobachtet werden.

e) Bei Belastungszyklen ergab sich auch für den Effekt die bekannte normale magnetoelastische Hysterisis.

f) Zirkularmagnetisierung des Versuchsdrahtes schwächt den Effekt bedeutend (nach einer e -Funktion).

g) Belastungszyklen behalten auch bei zirkularmagnetisierten Drähten ihre Form bei.

Zur Deutung des Effektes.

28. Wie aus den Untersuchungen von Honda feststeht, ist mit jeder Magnetisierung eine Volumenänderung verbunden. Diese Erscheinung an ferromagnetischen Stoffen bezeichnet man als Magnetostriktion. Als eine Folge dieser Erscheinung ist der „Effekt“ aufzufassen.

Beim Überschreiten des magnetischen Umwandlungspunktes ändert sich die Kristallgitterstruktur des Metalls. Durch die Magnetisierung als solche wird eine Gitterstrukturänderung dagegen nicht hervor-

gerufen. Auch für das Auftreten des Effektes ist also eine solche nicht verantwortlich zu machen; sonst müßten ja auch der Länge nach unterteilte Eisenkerne und fein verteiltes Eisenpulver, dessen Teile ja immer noch aus Kristallen bestehen, einen Effekt zeigen. Ein solcher wurde aber schon von Gerlach und Lertes¹⁾ nicht gefunden. Man muß also nicht Vorgänge im Kristall, sondern makroskopische gegenseitige Verlagerungen der Kristallite mit dem Effekt in Beziehung bringen.

Man wird nun durch den Versuch mit unterteilten Eisenkernen dazu geführt, erst einen durch die Reibungen bei der Umlagerung erzeugten Schwingungsvorgang des Ferromagnetikums als Ursache anzunehmen. Dieser bildet sich um so besser aus, je länger die Teilstücke sind oder je fester sie aneinandergedreht werden.

Der Effekt geht schließlich weitgehend mit den Hysteresisverlusten des Ferromagnetikums parallel und diese wieder mit dem makroskopischen Kristallgefüge²⁾. Gerlach und Lertes haben schon die Abhängigkeit des Effektmaximums von Koerzitivkraft und Remanenz gefunden, die durch obenstehende Versuche durchaus bestätigt wird. Das Parallelgehen von Hysteresis und Effekt spielt weiter bei den Eisen-Nickel-Legierungen eine große Rolle und kommt zum Ausdruck in der Vernichtung des Effektes durch zirkuläre Magnetisierung.

Das Parallelgehen von Magnetostriktion und Effekt ist nach obenstehenden Messungen vollständig: 1. bei den mechanischen Beanspruchungen, 2. bei der magnetoelastischen Hysteresis. Schließlich zeigen 3. auch die Fe-Ni-Legierungen von 50 bis 80 Proz. Ni eine sehr kleine Magnetostriktion; in dem gleichen Gebiete ist auch der Effekt verschwindend klein.

Der Barkhausensche Effekt ist also zu bezeichnen als „magnetisches Zinngeschrei“³⁾. Wir glauben, daß die physikalische Natur des Vorganges hiermit aufgeklärt und treffend gekennzeichnet ist.

Die Arbeit ist im physikalischen Institut der Universität Frankfurt ausgeführt. Herrn Geh. Reg.-Rat Wachsmuth bin ich für das entgegengebrachte rege Interesse sowie für die Bereitstellung der Mittel zu vorliegender Arbeit, Herrn Prof. Gerlach, auf dessen Anregung die Arbeit entstand, für die lebhafteste Unterstützung mit Rat und Tat zu bestem Danke verpflichtet.

Frankfurt a. M., 31. August 1922.

¹⁾ l. c. I.

²⁾ Gerlach, l. c. II.

³⁾ Gerlach, Verh. d. D. Phys. Ges. 3, 1922, S. 64.