

## ÜBER DEN EINFLUSS DER PLASTISCHEN VERFORMUNG AUF DEN REMANENTEN MAGNETISCHEN ZUSTAND POLYKRISTALLINER EISENDRAHTE

LADISLAV POTOCKÝ, Košice

In der vorliegenden Arbeit wird an drahtförmigen polykristallinen Eisenproben der Einfluß der plastischen Verformung auf die Magnetisierung des remanenten Zustandes sowie der Einfluß der plastischen Verformung auf die durch geringe äußere Zugspannung hervorgerufene Veränderung der Remanenz verfolgt. Die experimentell erzielten Ergebnisse werden auf Grund der Ergebnisse der Arbeiten anderer Autoren, die eine ähnliche Problematik an Ni-Proben untersuchten, sowie auf Grund der Auswertung bekannter quantitativer Beziehungen, die unter bestimmten vereinfachenden Voraussetzungen eine Abschätzung der Werte innerer Spannungen aus den gewonnenen Abhängigkeiten zulassen, interpretiert.

### EINLEITUNG

In der Arbeit [1] wurde der Einfluß der plastischen Verformung auf die Magnetisierung des remanenten Zustandes von Nickeldraht studiert. Es wurde festgestellt, daß die Remanenz, ähnlich wie andere den Zustand des Ferromagnétikums charakterisierende Größen, neben anderen Faktoren auch mit der Struktur des Materials in engem Zusammenhang steht, wobei wir unter der Struktur nicht nur die Korngröße, sondern auch die Textur des Materials und die Verteilung innerer Spannungen verstehen. Die erhaltenen Abhängigkeiten werden von den Verfassern mit den Veränderungen der Bereichstruktur, die durch die Veränderung der inneren Spannungen im Laufe des Prozesses der plastischen Verformung verursacht wurden, in Zusammenhang gebracht.

In den Arbeiten [2—5] wird darauf hingewiesen, daß der Wert der inneren Spannungen im plastisch verformten Ferromagnétiken aus den experimentell gewonnenen Abhängigkeiten der remanenten Magnetisierung von der äußeren Zugspannung abgeschätzt werden kann. Von den Autoren der Arbeiten [2], [5] werden auch die betreffenden, an drahtförmigen Nickelproben gewonnenen experimentellen Ergebnisse angeführt. Die aus diesen Ergebnissen bestimmten Werte der inneren Spannungen werden von den Autoren mit denjenigen Werten der inneren Spannungen verglichen, die bei der Messung der Anfangspermeabilität

an denselben Proben festgestellt wurden. Es erwies sich, daß die aus beiden Messungen erhaltenen Ergebnisse miteinander gut übereinstimmen. Die quantitativen Beziehungen, mit deren Hilfe in diesem Fall die Werte der inneren Spannungen bestimmt wurden, gehen daraus hervor, daß die inneren Spannungen im Verhältnis zur Kristallanisotropie groß sind. So werden Veränderungen der Magnetisierung infolge der einwirkenden äußeren Spannung vor allem durch die Verdrillung der spontanen Magnetisierungsvektoren verursacht. Dies kann, wie bekannt, im Falle von Nickel angenommen werden [4], [6].

Bei den Ferromagneten, bei denen die Kristallenergie im Verhältnis zu den inneren Spannungen groß ist, ändert sich die Magnetisierung durch die Einwirkung der äußeren mechanischen Spannung durch die Verschiebung der Blochwände [4], [6]. Die Autoren der Arbeiten [3], [4] zeigten, daß auch bei den Ferromagneten dieser Art der Wert der inneren Spannungen aus der Messung der Abhängigkeit der remanenten Magnetisierung von der aufgelegten äußeren Zugspannung sowie aus den experimentell gewonnenen Werten der Anfangspermeabilität bestimmt werden kann. Bei der Ableitung der betreffenden quantitativen Beziehungen geht man dabei davon aus, daß sowohl an den durch die einwirkende äußere Zugspannung hervorgerufenen Veränderungen der remanenten Magnetisierung als auch an der Bildung der Anfangspermeabilität nur die Verschiebungen der 90°-igen Blochwände beteiligt sind. Ferner wird dabei eine homogene Spannung in allen Kristalliten vorausgesetzt, was nicht genau erfüllt werden kann, da durch die Verschiebung von 90°-igen Wänden in dem Material weitere Magnetostriktionsspannungen entstehen und außerdem die gleichmäßige Verteilung der äußeren Spannung durch die elastische Anisotropie des Einkristalls verhindert wird. Nach [4] kann man im Falle des Ferromagnets des erwogenen Typs für die Veränderung der remanenten Magnetisierung  $J_R$  durch die Einwirkung der äußeren Zugspannung  $\sigma$  schreiben:

$$\frac{dJ_R}{d\sigma} = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{\lambda_{100}}{|\lambda_{100}|} \cdot \frac{J_s}{\sigma_i} \quad (1)$$

$\lambda_{100}$  ist die Konstante der Magnetostriktion,  $J_s$  — die Sättigungsmagnetisierung,  $\sigma_i$  — die Amplitude der inneren Spannungen. Für die Abhängigkeit der Anfangsuszeptibilität von  $\sigma_i$  folgt aus derselben Arbeit:

$$\chi_a = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{J_s^2}{|\lambda_{100}| \sigma_i} \quad (2)$$

Durch die Verbindung der Gleichungen (1) und (2) erhalten wir:

$$\frac{dJ_R}{d\sigma} = \frac{9}{16} \cdot \frac{\lambda_{100}}{J_s} \cdot \chi_a \quad (3)$$

Zweck der vorliegenden Arbeit ist: a) die Untersuchung der Einwirkung der plastischen Verformung auf die Magnetisierung des remanenten Zustandes von Eisendrähnen und da das Eisen zu solchen Ferromagneten gehört, bei denen anzunehmen ist, daß die inneren Spannungen im Vergleich mit der Kristallenergie gering sind [4], [6] auch b) die experimentelle Untersuchung der durch die aufgelegte äußere Zugspannung auf verschiedenartig plastisch verformte Proben hervorgerufenen Remanenzveränderungen und deren Vergleich mit den aus dem Modell der Verschiebungen der 90°-igen Wände abgeleiteten Ergebnissen. Es wäre zu erwarten [4], daß die gewonnenen Ergebnisse zwischen den äußersten Grenzfällen der homogenen Spannungen, aus welchen die Gleichung (3) hervorgeht, und dem äußersten Wert der homogenen Verformungen liegen werden, der ein von der Beziehung (3) um etwa 35% [3], [4] unterschiedliches Resultat gibt. Die Verhältnisse im realen Ferromagnetikum erweisen sich jedoch als noch komplizierter.

#### PROBEN UND METHODEN

Die Messungen wurden an drahtförmigen polykristallinen Eisenproben von 344 mm Länge und 1,5 mm Durchmesser durchgeführt. Sämtliche Proben wurden vor der Messung einer 5 Stunden langen Glühbehandlung bei einer Temperatur von 650 °C in einer Argonatmosphäre unterzogen. Die Abkühlungsgeschwindigkeit der Proben war kleiner als 2 °C/min. Die chemische Zusammensetzung der angewendeten Proben ist aus der Tabelle 1 ersichtlich. Die chemische Analyse wurde von Výchumný ústav hutnictví železa in Prag durchgeführt.

Tabelle 1.

C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	Cr [%]	Al [%]	Cu [%]
0,13	0,56	0,06	0,027	0,01	0,01	0,2

Die mechanischen Eigenschaften der Proben im Ausgangszustand wurden durch die Messung der Spannung-Verlängerungskurve untersucht. Die Elastizitätsgrenze der angewendeten Proben betrug 23,2 kp/mm<sup>2</sup>, die Festigkeitsgrenze 36,6 kp/mm<sup>2</sup>.

Die magnetische Induktion des remanenten Zustandes wurde mit der

ballistischen Methode mit Hilfe einer in der Mitte der Probe angebrachten Abtastspule gemessen. Die Proben wurden im Solenoid magnetisiert; dieses lieferte in der Längsrichtung der Probe ein Magnetfeld von einer Homogenität besser als 99,4 %. Um den remanenten Zustand zu erhalten wurden die Proben mit einem Magnetfeld von 454 Oe Intensität magnetisiert. Wie die Messungen erwiesen, reichte dieses Feld vollkommen dazu aus, daß die remanente Magnetisierung ihren Höchstwert erreichte.

Mit Rücksicht auf die geometrischen Ausmaße der angewendeten Proben konnte der Entmagnetisierungseinfluß der freien Enden auf die magnetischen Messungen in der Mitte der Proben vernachlässigt werden.

Bei allen Proben wurde der Wert der Remanenzinduktion nach der Glühbehandlung gemessen. Die Unterschiede in den Anfangswerten der Remanenz betragen nicht mehr als 3 %. Den einzelnen Proben wurden dann teils im Bereich der elastischen und teils im Bereich der plastischen Verformung verschiedene Zugspannungen aufgelegt. Nach Abschaffung der Spannung  $\sigma_0$  wurde so eine Serie von Proben mit verschiedengradiger plastischer Verformung bzw. plastisch nicht verformte Proben, sofern der Spannungswert  $\sigma_0$  nicht die Elastizitätsgrenze des Materials überschritt, hergestellt. An den so erhaltenen Proben konnte dann die Einwirkung der plastischen Deformation auf den remanenten Zustand verfolgt werden.

#### EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE UND IHRE AUSWERTUNG

a) Die experimentell erhaltene Abhängigkeit der relativen Remanenz von den Spannungswerten  $\sigma_0$  ist in Abb. 1 dargestellt. Wie ersichtlich ist der Anfangswert der Remanenz bei der nicht beanspruchten Probe etwa der Hälfte der Sättigungsmagnetisierung gleich. Dieser Wert unterscheidet sich in bedeutendem Maße von dem theoretischen Wert des isotropen Materials (bei welchem  $J_{R1}/J_s = 0,831$  [7]), stimmt jedoch mit dem von Bozorth [8] für gegühtes Eisen angeführten theoretischen Wert gut überein. Auf Grund der Vorstellungen über die Bereichsstruktur des Ferromagnetikums im remanenten Zustand [1], [9—14] ist nicht zu erwarten, daß die relative Remanenz des realen Ferromagnetikums dem theoretischen Wert gleich ist, der dem isotropen Material zukommt. Im remanenten Zustand eines realen polykristallinen Ferromagnetikums existieren immer inverse Bereiche, Schließungsbereiche, verschiedene Defekte der Struktur und Restspannungen, die den Wert der remanenten Magnetisierung herabsetzen. Aus der gewonnenen Abhängigkeit ist ersichtlich, daß nach der Beseitigung der Zugspannung  $\sigma_0$ , die eine elastische Verformung hervorgerufen hatte, keine bleibende Veränderung der Remanenz

eintritt. \*) Die Beanspruchung durch eine Zugspannung, die mit der Elastizitätsgrenze annähernd übereinstimmt, führt schon zu einem raschen Herabsinken der Remanenz. Also auch im Falle des Eisens ist die remanente Magnetisierung ein empfindlicher Anzeiger des Beginns der plastischen Verformung. Mit ansteigendem  $\sigma_0$  wächst auch der Grad der plastischen Verformung an, und wie ersichtlich, die Remanenz sinkt weiter ab.

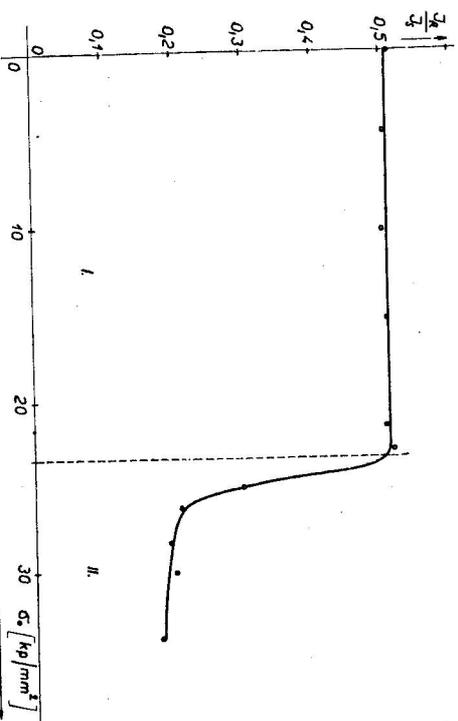


Abb. 1. Abhängigkeit der relativen Remanenz von dem Wert der vorher angelegten Zugspannung  $\sigma_0$ . (Die senkrechte Strichlinie bezeichnet die Elastizitätsgrenze.)

Die an Eisen gewonnene Abhängigkeit erinnert in ihrem Verlauf an die Abhängigkeit, die von den Autoren der Arbeit [1] auf ähnliche Weise an Nickeldraht gewonnen wurde. Während jedoch bei Ni drei charakteristische Teile dieser Abhängigkeit zu unterscheiden waren, sind im Falle von Eisen nur zwei Teile, bezeichnet als I. und II., zu beobachten.

Der Verlauf des ersten Teils zeigt davon, daß die Spannungen im Bereich der elastischen Verformung keine bleibenden Veränderungen der Struktur hervorrufen [1]. Das rasche Herabsinken der Remanenz, zu dem es im Bereich der plastischen Verformung in einem verhältnismäßig schmalen Bereich der Spannungen  $\sigma_0$  kommt, steht offensichtlich auch im Falle des Eisens mit dem

\*) Die Unterschiede in den einzelnen Werten der relativen Remanenz im Bereich der elastischen Verformung sind nur durch die verschiedenen Anfangswerte der remanenten Magnetisierung der einzelnen Proben bedingt.

Verlauf der plastischen Verformung in Zusammenhang. Nach den in [1] zitierten Arbeiten verläuft die plastische Verformung durch Abgleiten bei geringen Verformungen weniger in der Nähe der Kongrenze als im inneren der Körner. So entstehen zu Beginn der plastischen Verformung in der Nähe der Kongrenzen starke innere Spannungen, die and diesen Stellen eine neue Verteilung der Vektoren der spontanen Magnetisierung, neue Streufelder und somit auch neue Schließungsbereiche hervorrufen. Dieser Prozeß führt dann zu einem Herabsinken der Magnetisierung des remanenten Zustandes. Im Falle von Nickel wurde im Bereich der plastischen Verformung auch noch ein Ansteigen der Remanenz bis zu dem Grenzwert  $J_R/J_s = 0,5$  [1] beobachtet. Beim Eisen wird jedoch kein Ansteigen der Remanenz im Bereich der plastischen Verformung mehr beobachtet. Dies hängt offensichtlich mit dem Umstand zusammen, daß, wie bekannt, sich das Eisen durch wesentlich andere mechanische Eigenschaften sowie durch andere Verformungserscheinungen im Prozeß der plastischen Verformung auszeichnet. Bei den untersuchten Eisenproben beträgt das Verhältnis zwischen der Elastizitäts- und Festigkeitsgrenze  $\sim 0,6$ , während bei geglühtem Nickel dieses Verhältnis  $\sim 0,034$  beträgt. Nickel kann also durch Zugspannung verformt werden, die seine Elastizitätsgrenze wesentlich überschreitet; beim Eisen ist dies nicht möglich. Bei der plastischen Verformung des Nickeldrahtes durch Zugspannung kommt es zur Bildung einer Textur, und zwar so, daß sich die Richtung [111] in Richtung zur Drahtachse dreht. Bei Fe-Draht führt die plastische Verformung zur Drehung der Richtung [110] in Richtung zur Drahtachse und die letztere ist nicht diejenige der leichten Magnetisierung [15].

Zur Veranschaulichung wird in Abb. 2 noch die Abhängigkeit der bleibenden Verformung  $\epsilon_t = \Delta l/l_0$  ( $l_0$  ist die ursprüngliche Länge der Probe,  $\Delta l$  ihre

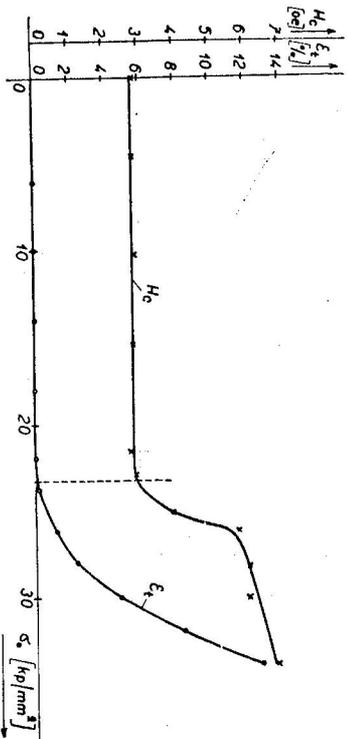


Abb. 2. Abhängigkeit der bleibenden Verformung  $\epsilon_t$  und der Koerzitivkraft  $H_c$  von dem Wert der vorher angelegten Zugspannung  $\sigma_0$ .

Verlängerung) und der Koerzitivkraft  $H_c$  von dem Spannungswert  $\sigma_0$  deutlich gemacht.

b) In Zusammenhang mit der Untersuchung der Wirkung der durch die plastische Verformung hervorgerufenen inneren Spannungen auf die Magnetisierung des remanenten Zustandes an den einzelnen Proben (charakterisiert durch verschiedene  $\sigma_0$  Werte) wurden auch die Abhängigkeiten der Magnetisierung des remanenten Zustandes von den Werten der äußeren Zugspannung  $\sigma$  gemessen. Die Ergebnisse der Messungen sind im Abb. 3 angeführt. \*) Die Neigung der zu den gewonnenen Abhängigkeiten im Punkt  $\sigma = 0$  konstruierten Tangente stellt für die betreffende Probe die Veränderung der Remanenz

$$\left(\frac{dJ_R}{d\sigma}\right)_{\sigma=0}$$

dar. Wie ersichtlich, bleibt der linear ansteigende Charakter der Abhängigkeit der remanenten Magnetisierung von der Zugspannung bei einer stark verformten Probe bis zu wesentlich höheren Spannungen erhalten als dies bei plastisch nicht verformten Proben der Fall ist. Eine plastisch verformte Probe ist durch starke innere Spannungen gekennzeichnet. Wenn wir in

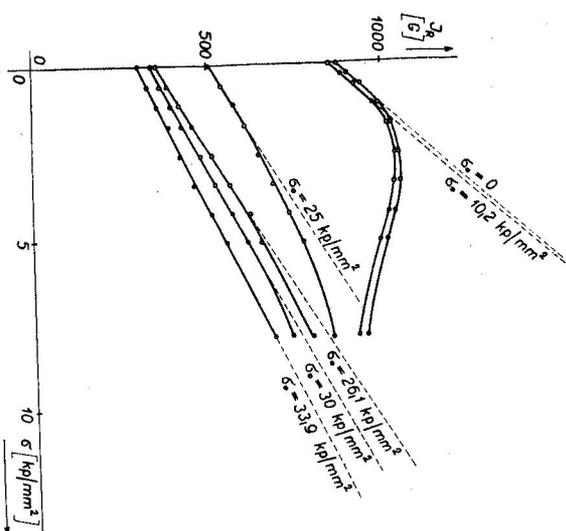


Abb. 3. Abhängigkeit der remanenten Magnetisierung von dem Wert der äußeren Zugspannung  $\sigma$  für eine durch verschiedene Werte der vorher angelegten Zugspannung  $\sigma_0$  charakterisierte Probenreihe.

\*) In dieser Abbildung werden der besseren Übersichtlichkeit wegen nur die experimentell an sechs Proben erhaltenen Kurven dargestellt. Die Messungen wurden selbstverständlich an sämtlichen Proben der betreffenden Serie durchgeführt.

Erwägung ziehen, daß der Grad der magnetischen Textur, die infolge der Verschiebungen der 90°-igen Wände zustande kommt, annähernd durch die Ungleichheit  $|\sigma| > |\sigma'|$  [16] (hierbei  $\sigma'$  ist die innere Spannung) bestimmt wird, so wird die fallende Neigung zu Beginn der Kurven mit dem Anwachsen der inneren Spannungen leicht verständlich. Bei höheren inneren Spannungen der inneren Spannungen leicht verständlich. Bei höheren inneren Spannungen wird, um eine Verschiebung von 90°-igen Wänden hervorzurufen, eine höhere äußere Spannung benötigt. Die Unterschiede im Verlauf der einzelnen Abhängigkeiten, insbesondere bei höheren Spannungen zeugen davon, daß an den Veränderungen der remanenten Magnetisierung durch die Einwirkung der äußeren mechanischen Spannungen auch andere Magnetisierungsprozesse als durch die Verschiebung der 90°-igen Wände dargestellt sind. Es ist auch zu beachten, daß bei verschiedenen inneren Spannungen auch die verhältnismäßige Vertretung der 90°-igen Wände verschieden sein kann.

In Abb. 4 (Kurve a) ist die Abhängigkeit  $\left(\frac{dJ_R}{d\sigma}\right)_{\sigma=0}$  von dem Wert  $\sigma_0$ , der aus den in Abb. 3 dargestellten experimentell gemessenen Kurve gewonnen wurde, angeführt. Es ist ersichtlich daß im Bereich der elastischen Verformung die Größe  $\left(\frac{dJ_R}{d\sigma}\right)_{\sigma=0}$  von dem Wert  $\sigma_0$  unabhängig ist; im Bereich der plas-

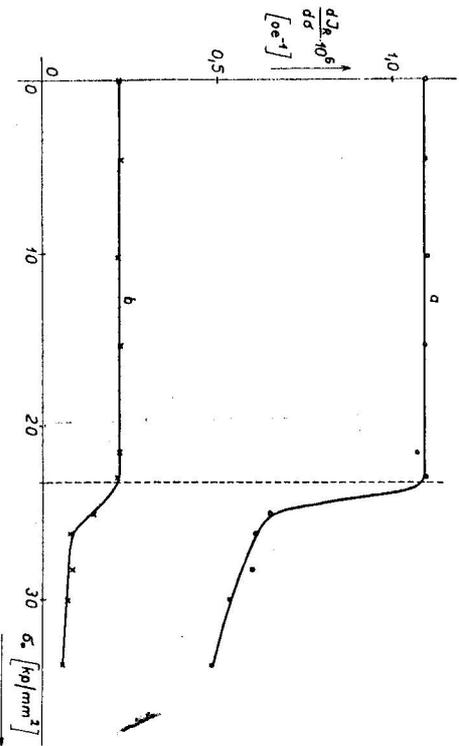


Abb. 4. Abhängigkeit  $\left(\frac{dJ_R}{d\sigma}\right)_{\sigma=0}$  von der vorher angelegten Zugspannung  $\sigma_0$ . Die Kurve a wurde aus den experimentell gemessenen, in Abb. 3 dargestellten Abhängigkeiten gewonnen, die Werte für die Kurve b wurden anhand der gemessenen Werte der Anfangspermeabilität errechnet.

tischen Verformung ist die Abhängigkeit von der plastischen Verformung sehr markant. Der Wert  $\left(\frac{dJ_R}{d\sigma}\right)_{\sigma=0}$  kann, unter der Voraussetzung, daß an den Magnetisierungsprozessen nur Verschiebungen der 90°-igen Wände beteiligt sind, auch aus dem Ausdruck (3) errechnet werden. In Abb. 4 wird durch die

Kurve b die Abhängigkeit  $\left(\frac{dJ_R}{d\sigma}\right)_{\sigma=0}$  von dem Wert  $\sigma_0$ , der durch Errechnung auf Grund der gemessenen Werte der Anfangspermeabilität gewonnen wurde, dargestellt. (Für  $J_s$  wurde dabei  $J_s = 1700$  G und für  $\lambda_{100} = 20,7 \cdot 10^{-6}$  eingesetzt [6], [9]). Wie ersichtlich, der Charakter der gewonnenen Abhängigkeit ist gleich wie im Falle der Kurve a. Auch hier wird der Einfluß der plastischen Verformung sehr deutlich sichtbar. Ein quantitativer Vergleich der Werte

$\left(\frac{dJ_R}{d\sigma}\right)_{\sigma=0}$ , die auf zwei Wegen gewonnen wurden, weist jedoch bedeutende Unterschiede auf. In der Tabelle 2 werden die errechneten Werte der inneren Spannungen angeführt, die teils aus den Messungen der Anfangspermeabilität (Werte  $\sigma_i(\omega)$ ) und teils aus den Messungen der Abhängigkeiten  $J_R = J_R(\sigma)$  (Werte  $\sigma_i(\sigma)$ ) nach den Beziehungen (1) und (2) gewonnen wurden.

Wie ersichtlich, der Höchstunterschied erreicht nicht einmal eine Ordnung, wobei die Unterschiede bei größeren Verformungen relativ größer sind. Die experimentell erhaltenen Ergebnisse zeigen, daß die inneren Spannungen  $\sigma_i$  für die Entstehung der plastischen Verformung eine bestimmte Barriere darstellen. Nach Auflegung einer äußeren mechanischen Spannung  $\sigma_0$  die erwarten, daß plastische Verformung eintritt, wenn, die äußere Spannung  $\sigma_0$  die Werte der inneren Spannung  $\sigma_i$  erreicht. Bei einem weiteren Anwachsen der äußeren Spannung vergrößert sich die plastische Verformung und ruft ein rasches

Tabelle 2

$\sigma_0$ [kp/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_i(\omega)$ [kp/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_i(\sigma)$ [kp/mm <sup>2</sup> ]
0	18,70	3,72
4,52	18,15	3,72
10,20	18,15	3,71
15,30	18,43	3,74
21,50	18,75	3,81
22,90	19,35	3,72
25,00	28,50	6,27
26,10	54,50	6,68
28,20	46,10	6,79
30,00	57,00	7,61
33,90	70,50	8,40

Ansteigen der inneren Spannungen hervor. Dies ist nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ in der Spalte  $\sigma(\omega)$  zu beobachten, während es in der Spalte  $\sigma(\omega)$  nur qualitativ sichtbar ist.

Die Beziehungen (1) und (2) wurden unter der Voraussetzung abgeleitet, daß sich nur die 90°-igen Blochwände bewegen. Die Gleichung (2) bezieht sich dabei nur auf den entmagnetisierten Zustand, die Gleichung (1) auf den wahren remanenten Zustand. Im entmagnetisierten sowie im remanenten Zustand existiert beim Eisen außer den 90°-igen Wänden auch ein bestimmter Prozentsatz von 180°-igen Blochwänden. Im remanenten Zustand ist jedoch die relative Verteilung der 180°-igen Blochwände viel größer als dies im entmagnetisierten Zustand der Fall ist und diese Tatsache hat zur Folge, daß im gegebenen Fall die Beziehung (2) die physikalische Realität besser beschreibt als die Beziehung (1).

Das experimentelle Studium der Veränderungen der Bereichstruktur im remanenten Zustand unter Einwirkung der äußeren Zugspannung erwies, daß es außer der Verschiebung der 90°-igen Wände durch die Einwirkung der mechanischen Spannung auch zu sehr ausgeprägten Verschiebungen der 180°-igen Wände kommt. Ferner erwies es sich, daß die mechanischen Spannungen auch eine erhöhte Parallelität der Spine im Rahmen der eigentlichen Bereiche sowie solche Veränderungen der Bereichstruktur hervorrufen, die mit der Entstehung der Ummagnetisierungskurve und deren Wachstum zusammenhängen [17]. Selbstverständlich sind alle diese Prozesse auch an den Veränderungen der Magnetisierung, die durch eine äußere Spannung hervorgerufen werden, beteiligt. Größere Unterschiede bei höheren  $\sigma_0$  Werten sind dadurch zu erklären, daß bei größeren äußeren Spannungen auch das Verhältnis der magnetischen Energie, die mit den inneren Spannungen verbunden ist, und der Kristallenergie ansteigt, was bei ansteigender plastischer Verformung immer zur größeren Abweichung von der Voraussetzung, daß die inneren Spannungen im Vergleich zu der Kristallenergie gering sind, auf Grund deren die Ableitung der Gleichungen (1) und (2) erfolgt, führt.

#### ZUSAMMENFASSUNG

In der Arbeit wurde a) der Einfluß der plastischen Verformung auf die Magnetisierung des remanenten Zustandes von Eisendrahten und b) der Einfluß der plastischen Verformung auf die durch geringe äußere Zugspannung hervorgerufene Remanenz untersucht. Die experimentellen Ergebnisse führen im wesentlichen zu folgenden Schlußfolgerungen:

1) Die Abhängigkeit der remanenten Magnetisierung von der plastischen

Verformung am Eisen ist ähnlich der Abhängigkeit, die die Autoren der Arbeit [1] an drahtförmigen Nickelproben erhielten. Während jedoch beim Ni drei charakteristische Teile dieser Abhängigkeit deutlich zu unterscheiden waren, beim Fe erscheinen nur zwei Teile; und zwar der I. Teil, der dem Bereich der elastischen Verformung entspricht und der II. Teil, der die sich entwickelnde plastische Verformung darstellt. Der qualitativ gleiche Verlauf des I. und II. Teils an Ni und Fe steht mit dem charakteristischen Verlauf des Anfanges der plastischen Verformung des polykristallinen Material im Zusammenhang, was die Verteilung der spontanen Magnetisierungsvektoren im remanenten Zustand beeinflusst. Da sowohl die mechanischen Eigenschaften als auch die Verformungseigenschaften im Prozeß der plastischen Verformung bei Ni unterschiedlich sind von jenen des Fe, ist darin die Ursache dessen zu sehen, daß im Bereich der plastischen Verformung beim Eisen kein Ansteigen der Remanenz mehr zu beobachten ist.

2) Die remanente Magnetisierung ist ein empfindlicher Anzeiger des Beginns der plastischen Verformung.

3) Die Beanspruchung im Bereich der elastischen Verformung ruft keine Veränderung der an entlasteten Proben gemessenen Werte  $\left(\frac{dJ_R}{d\sigma}\right)_{\sigma=0}$  hervor.

Demgegenüber führt die plastische Verformung zu einer markanter Veränderung der Remanenz, die durch geringe Zugspannung hervorgerufen wird. Die

Abhängigkeit  $\left(\frac{dJ_R}{d\sigma}\right)_{\sigma=0} = \left(\frac{dJ_R}{d\sigma}\right)_{\sigma=0}(\sigma_0)$ , die experimentell durch die Messung der Abhängigkeit  $J_R = J_R(\sigma)$  an verschiedenen elastisch und plastisch

verformten Proben gewonnen wurde sowie die Abhängigkeit  $\left(\frac{dJ_R}{d\sigma}\right)_{\sigma=0} =$

$= \left(\frac{dJ_R}{d\sigma}\right)_{\sigma=0}(\sigma_0)$ , errechnet auf Grund der Messungen der Anfangspermeabilität, haben qualitativ denselben Verlauf. Ein quantitativer Vergleich zeigt jedoch bedeutende Unterschiede. Diese Ergebnisse werden auf Grund der Auswertung bekannter quantitativer Beziehungen, die es unter vereinfachenden Bedingungen gestatten, den Wert der inneren Spannungen aus den gewonnenen

Abhängigkeiten abzuschätzen, interpretiert.

Abschließend möchte ich Herrn Prof. Dr. V. Hajko für sein anhaltendes Interesse für diese Arbeit sowie für seine wertvollen Anregungen meinen Dank aussprechen. Ebenso danke ich Herrn Dr. R. Garber für seine anregenden Bemerkungen zur vorliegenden Arbeit.

- [1] Schwink Ch., Zankl G., Z. f. Phys. 158 (1960), 181.
- [2] Kersten M., Z. f. Phys. 82 (1933), 723.
- [3] Döring W., Z. f. Phys. 114 (1939), 579.
- [4] Becker R., Döring W., Ferromagnetismus. Springer-Verlag, Berlin 1939.
- [5] Förster F., Stambke K., Z. f. Metallkde 33 (1941), 97.
- [6] Kneller E., Ferromagnetismus. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1962.
- [7] Schüller K., Techn. Berichte DEW 5 (1965), 136.
- [8] Bozorth R. M., Z. f. Phys. 124 (1948), 519.
- [9] Бозорт Р. М., Ферромагнетизм. Изд. Инстр. Дитр., Москва 1956.
- [10] Шур Я. С., Старцева И. Е., ФММ 3 (1956), 568.
- [11] Шур Я. С., Абелъс В. Р., Зайкова В. А., Изв. АН СССР, сер. физ. 21 (1957), 1462.
- [12] Шур Я. С., Старцева И. Е., Изв. АН СССР, сер. физ. 21 (1957), 1240.
- [13] Старцева И. Е., Шур Я. С., Изв. АН СССР, сер. физ. 22 (1958), 1189.
- [14] Шур Я. С., Старцева И. Е., ФММ 6 (1958), 614.
- [15] Eisenkolb F., *Náuka o kovoch*. SNTL Bratslava, SNTL Praha 1962.
- [16] Дунаев Ф. Н., Изв. АН СССР, сер. физ. 23 (1961), 1502.
- [17] Potocký L., Dissertation. Přírodovědecká fakulta UPJŠ, Košice 1969.

Eingegangen am 13. 1. 1969

*Ústav experimentálnej fyziky SAV,*  
Košice