

3. *Über den Einfluß der Torsion auf das magnetische Moment zirkular magneti- sierter Nickel- und Eisendrähte; von H. Gerdien.*

(Auszug aus der Göttinger Inaugural-Dissertation, 1903.)

Einleitung.

Von den physikalischen Eigenschaften stark magnetischer Metalle, die sich an Drähten als Wechselwirkungen der longitudinalen und zirkularen magnetischen Feldstärke und Magnetisierung, der Längsdehnung und Torsion der Beobachtung darbieten, sind bisher untersucht worden:

1. die Magnetostriktion im longitudinalen und zirkularen Felde;¹⁾
2. die longitudinale und zirkulare Magnetisierung gedehnter und tordierter Drähte im longitudinalen Felde;²⁾
3. die longitudinale Magnetisierung tordierter Drähte im zirkularen oder gleichzeitig zirkularen und longitudinalen Felde.³⁾

Während für die beiden erstgenannten Erscheinungsgruppen schon ein fast lückenloses Beobachtungsmaterial vor-

1) G. Wiedemann, *Elektrizität*, 3. p. 683. 1895; G. Wiedemann, *Pogg. Ann.* 103. p. 571. 1858; l. c. 106. p. 161. 1859; S. Bidwell, *Proc. Roy. Soc.* 40. p. 109 u. 257. 1886; l. c. 47. p. 469. 1890; S. Bidwell, *Phil. Trans.* p. 205. 1888; J. A. Ewing, *Magn. Ind. in Eisen u. verw. Metallen*, Deutsche Ausg., p. 225 u. ff.; P. Drude, *Wied. Ann.* 63. p. 9. 1897.

2) G. Wiedemann, *Elektrizität*, 3. p. 671 u. ff.; L. Zehnder, *Wied. Ann.* 41. p. 210. 1890; L. Zehnder, *Wied. Ann.* 38. p. 68. 1889; H. Nagaoka, *Journ. Coll. of Science, Imperial Univ. of Japan* 3. p. 335. 1890; H. Nagaoka, *Wied. Ann.* 53. p. 481. 1894; J. A. Ewing, *Magn. Ind. in Eisen u. verw. Metallen*, Deutsche Ausg., p. 216, 219—225.

3) G. Wiedemann, *Elektrizität* 3. p. 680; G. Wiedemann, *Wied. Ann.* 27. p. 376. 1886; J. A. Ewing, *Magn. Ind. in Eisen u. verw. Metallen*, Deutsche Ausg., p. 214.

liegt und die Experimental-Untersuchungen sich bis in die neueste Zeit hinein erstrecken, ist die Kenntnis der letztgenannten Phänomene noch wenig ausgedehnt und seit der ersten Erforschung dieses Gebietes durch G. Wiedemann nicht mehr wesentlich erweitert worden; ihm gebührt auch das Verdienst, nachdrücklich auf die Bedeutung der magnetisch-elastischen Wechselwirkungen für eine Theorie des Magnetismus hingewiesen zu haben. Wenn es auch bisher noch nicht gelungen ist, aus den merkwürdigen, von ihm erkannten Analogien zwischen Torsion und Magnetisierung neue, der experimentellen Prüfung zugängliche Folgerungen zu ziehen, so wird man doch nicht versäumen dürfen, bei Aufstellung einer neuen Theorie des Magnetismus sich dieser Beziehungen zu erinnern. Das Arbeitsfeld wurde soweit begrenzt, daß Nickel- und Eisendrähte verschiedenen Durchmessers in reinem zirkularen Magnetfelde, ohne jede longitudinale Feldstärke, allein der zyklischen Torsion, ohne longitudinalen Zug unterworfen wurden. Die Erweiterung der Versuchsbedingungen entsprechend den Arbeiten von Zehnder und Nagaoka über die Wechselwirkung von longitudinalem Felde, Torsion und *Zug* steht demnach noch aus.

Von den beiden zur Verfügung stehenden Untersuchungsmethoden, der ballistischen und der magnetometrischen, konnte nur letztere in Betracht kommen, da auch langsame Änderungen des magnetischen Moments beobachtbar sein sollten und das Eintreten zyklischer Änderungen des Moments bei zyklischer Torsion durch die magnetometrische Methode sicherer festgestellt werden kann, als durch die ballistische, die nur die Änderungen zu summieren gestattet, nicht aber den zu jeder Zeit bestehenden Zustand angibt.

Bei der experimentellen Anordnung wurde besonderer Wert darauf gelegt, das Meßinstrument vor äußeren magnetischen Störungen zu schützen und zugleich seine Empfindlichkeit einer jederzeit leicht ausführbaren Kontrollmessung unterziehen zu können. Erstere Aufgabe wurde dadurch erleichtert, daß die Größe der zu beobachtenden magnetischen Momente die Benutzung eines hochempfindlichen Magnetometers nicht erforderlich machte.

Versuchsanordnung.

Als Meßinstrument bewährte sich eine einfache permanent magnetisierte Stahlnadel, die an einem Quarzfaden in der Horizontalebene frei drehbar aufgehängt war. Für die Orientierung der Nadel und des Versuchsdrahtes waren folgende Überlegungen maßgebend. Durch die Forderung, daß der untersuchte Draht im longitudinalen Felde $R = 0$ ausgespannt sein sollte, war seine Lage in der magnetischen Ost-West-Richtung bestimmt; zur Messung des Momentes kann dann die Magnetometernadel am besten in der Horizontalebene des Drahtes und zwar „in erster Hauptlage“ angeordnet werden. Es kamen somit von Störungen, die durch Änderungen der Elemente des Erdmagnetismus veranlaßt werden, nur die Variationen der Horizontalintensität und der Deklination in Betracht. Bei der Lage der Nadel in der Nähe des magnetischen Meridians kommen die an sich sehr kleinen Variationen der Horizontalintensität nicht merklich zur Geltung, sofern die Ablenkungen der Nadel aus der Nord-Südrichtung nur klein bleiben. Größere Störungen kann eine Änderung der Richtung der erdmagnetischen Horizontalkomponente hervorrufen, die sich um so schwieriger berücksichtigen lassen, als die Ablesung eines in entsprechender Entfernung von dem Magnetometer aufgestellten Deklinations-Variometers in einem von großen Eisenmassen vielfach durchsetzten Gebäude nicht unbedingt die zur Korrektur der Ruhelage der Magnetometernadel notwendigen Winkelwerte liefert. In einem Raume, innerhalb dessen sich dem Felde des Erdmagnetismus örtlich und zeitlich mit der Temperatur variierende Feldstärken lokalen Ursprungs überlagern, kann man das Variometer nur als ein Instrument benutzen, das anzeigt, ob zur Zeit der Beobachtung merklich ruhige magnetische Witterung herrscht, oder nicht. Will man das Magnetometer von Deklinations-Variationen möglichst unabhängig machen, so genügt es, dem Aufhängefaden ein im Verhältnis zur Richtkraft des Erdmagnetismus beträchtliches Torsionsmoment zu geben. Dadurch wird gleichzeitig die Empfindlichkeit des Magnetometers gegen vorübergehende lokale Störungen herabgemindert; natürlich würde auch die Empfindlichkeit des Instruments für Meßzwecke entsprechend

kleiner werden, wollte man die gebräuchlichen großen Abstände des Versuchsdrahtes vom Magnetometer beibehalten; man muß also durch genügende Annäherung des zu untersuchenden Drahtes die Empfindlichkeit des Magnetometers zu erhöhen suchen. Dieses Verfahren schließt allerdings die gewöhnliche Beobachtungsmethode der Nadelablenkungen aus¹⁾, da es nicht erlaubt ist, in Entfernungen des Drahtes, die vergleichbar sind mit den Dimensionen der Magnetometernadel, bei der Berechnung der gemessenen Momente einfach das Potential der Magnetometernadel als das eines Polpaares zu behandeln. Man darf bei kleinen Entfernungen nur mit konstant erhaltener Konfiguration des Systems arbeiten, muß also die Magnetometernadel durch meßbare Kräfte in die unabgelenkte Lage zurückführen; als einfachstes Mittel zur Erreichung dieses Zieles stellt sich die Kompensation durch Tordieren des Aufhängefadens dar. Von magnetischen Störungen bleiben somit nur noch solche lokalen Ursprungs wirksam, die eine beträchtliche Komponente senkrecht zur Drehungsachse und zur magnetischen Achse der Nadel geben; diese lassen sich nicht beseitigen und zwingen dazu, die Beobachtungen während der Abend- und Nachtstunden anzustellen und vorkommendenfalls während der Dauer der Störungen, die sich bei mäßig gedämpftem Nadelsystem leicht bemerkbar machen, einfach zu unterbrechen. Auch die mechanischen Erschütterungen, die infolge der Nähe einer verkehrsreichen Straße bei Tage die Ablesung oft minutenlang unmöglich machten, waren in den Nachtstunden nur selten und vorübergehend fühlbar.

Die experimentelle Anordnung, die sich im Laufe der Vorversuche bewährt hatte, ist in der Dissertation ausführlich beschrieben.

Arbeitsplan und Beobachtungsmethode.

Die bei den orientierenden Versuchen¹⁾ gesammelten Erfahrungen wurden zur Aufstellung des folgenden Planes für die definitiven Versuchsreihen verwendet.

1) Vgl. den Abschnitt: „Theoretisches zur Versuchsanordnung“ der Dissertation.

2) Die Vorbereitung der Drähte für die definitiven Messungen ist in dem Abschnitt „Vorversuche“ der Dissertation beschrieben.

Nachdem der Versuchsdraht unter den in der Dissertation erörterten Vorsichtsmaßregeln gestreckt, eingespannt und gegläht worden war, wurde er zunächst bei *kleinem* Torsionsintervall in verschiedenen zirkularen Feldstärken untersucht. Dann wurde bei den folgenden Versuchsreihen das Torsionsintervall bis zu dem bei den Vorversuchen für die betreffende Drahtsorte ermittelten zulässigen Maximalwerte gesteigert unter Beibehalten einer Einheitsfeldstärke des zirkular magnetisierenden Stromes, dessen Intensität so klein gewählt war, daß durch ihn die Drähte geringsten Querschnitts, die zur Untersuchung bestimmt waren, noch keine merkliche Erwärmung erfuhren. Nach Erreichen des Maximalwertes für das Torsionsintervall wurde dasselbe wieder bis zu den Ausgangswerten verringert, wobei in allen Versuchsreihen die gleiche Feldstärke zur Verwendung kam; bei einzelnen Versuchsreihen wurden für das maximale Torsionsintervall außer der Einheitsfeldstärke noch andere Feldstärken benutzt. Durch diese Anlage des Arbeitsplanes war es ermöglicht, die Wechselwirkung von Torsion und zirkularer Magnetisierung zunächst am weichen Drahte, dann die Änderung der Erscheinungen bei dem Übergange zu torsionshartem Material und schließlich die Eigenschaften des torsionsharten Drahtes zu studieren. Für gleichartige Drähte von anderem Querschnitt wurde ebenfalls eine Anzahl Versuchsreihen mit der Einheitsstromstärke und für solche Werte des Torsionsintervalls angestellt, die zum Teil schon bei anderen Drahtstärken untersucht waren, so daß sowohl für Nickel als auch für Eisen eine Serie von Versuchsreihen mit gleicher Stromstärke und gleichem Torsionsintervall geschaffen wurde, welche die Abhängigkeit der untersuchten Erscheinungen von dem Durchmesser und dem Material der Drähte hervortreten ließ.¹⁾

Diskussion der Resultate.

Qualitatives.

Die Wechselwirkung von zirkularer Magnetisierung und Torsion bei Nickel- und Eisendrähnen folgt dem einfachen qualitativen Gesetz:

1) Die Beobachtungsmethode und Verwertung des Materiales ist in der Dissertation an dem Beispiel einer vollständigen Versuchsreihe erläutert.

Bei zirkular magnetisierten *Nickeldrähten*¹⁾ erzeugt die Torsion zur Rechtsschraube eine dem magnetisierenden Strome *entgegengerichtete* longitudinale Magnetisierung; bei zirkular magnetisierten *Eisendrähten* erzeugt die Torsion zur Rechtsschraube eine dem Strome *gleichgerichtete* longitudinale Magnetisierung.²⁾

Nickeldraht. Begleiterscheinungen.

Der quantitativen Verwertung der erhaltenen Resultate muß die Erörterung einiger Phänomene vorausgeschickt werden, die sich als allgemeine Begleiterscheinungen der Wechselwirkung von Magnetisierung und elastischer Beanspruchung darstellen und vorerst einfache quantitative Gesetze nicht erkennen lassen. In den Diagrammen sind die an der Trommerteilung des Torsionskopfes eingestellten Torsionswinkel des Versuchsdrahtes (46,5 cm lang) als Abszissen, als Ordinaten die in den zusammengehörigen Versuchsreihen + 0,8 Amp. (ausgezogene Kurve) und - 0,8 Amp. (gestrichelte Kurve) erhaltenen Magnetometerangaben aufgetragen; diese sind auf Bogenminuten des im Sinne des Uhrzeigers negativ gerechneten, von der Ruhelage der Nadel aus gezählten Kompensationswinkels abgerundet. —

Beginnen wir mit den an *Nickeldrähten* erhaltenen Resultaten, so ist zunächst aus den Diagrammen unmittelbar ersichtlich, daß der Wert, den das Moment innerhalb einer einzelnen Versuchsreihe für einen bestimmten Torsionswinkel annimmt, bei Torsion im allgemeinen ein anderer ist als bei Detorsion; das Moment ist also innerhalb eines Torsionszykels keine eindeutige Funktion des Torsionswinkels. Inwiefern diese Abhängigkeit des Moments von dem Torsionssinn beeinflußt wird durch die Größe des Torsionsintervalls, soll weiter unten dargelegt werden, nachdem wir eine andere, ebenfalls mit dem Torsionsintervall variierende Erscheinung untersucht

1) G. Wiedemann, l. c.

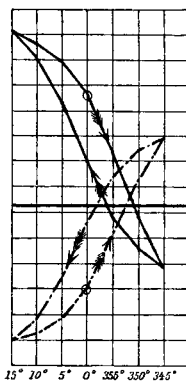
2) Die untersuchten Nickel- und Eisendrähte waren von E. Merck in Darmstadt bezogen; die ursprünglich beabsichtigte Ausdehnung der Untersuchung auf Kobalt mußte unterbleiben, da Kobaltdraht, wie die Anfrage bei den in Betracht kommenden Firmen (E. Merck, Darmstadt; C. A. F. Kahlbaum, Berlin; W. C. Heräus, Hanau; Hartmann und Braun, Frankfurt a. M.; Johnson und Matthey, London E. C. Hatton-Garden) ergab, im Handel zur Zeit nicht erhältlich ist.

haben werden, die anscheinend auf Nebenwirkungen zurückzuführen ist und als Komplikation, die den Überblick über die wesentlichen Eigenschaften der Wechselwirkung von zirkularer Magnetisierung und Torsion erschwert, zunächst aufgeklärt und eliminiert werden muß.

Bei Betrachtung der für die Stromstärke 0,8 Amp. an dem Nickeldraht von 1,5 mm Dicke bei kleinen Torsionsintervallen erhaltenen Diagramme¹⁾ fällt sofort auf, daß die für eine Stromrichtung geltenden Kurvenzüge eine asymmetrische Lage zur Nulllinie des Moments in *einem* Sinne, die für die *entgegengesetzte* Stromrichtung geltenden eine entsprechende asymmetrische Lage im *anderen* Sinne zeigen (vergl. Diagramm A). Diese Asymmetrie nimmt mit wachsenden Torsionsintervallen ab; sie ist merklich unabhängig von dem Sinne, in welchem die Torsionszykeln durchlaufen werden, wie die für entgegengesetzte Umlaufungsrichtungen aufgenommenen Diagramme der Dissertation erkennen lassen.

Bei steigenden Torsionsintervallen verschwindet diese Asymmetrie mehr und mehr (vergl. Diagramm B), tritt aber im entgegengesetzten Sinne auf, sobald man auf die Schar der Versuchsreihen mit wachsenden Torsionsintervallen wieder eine Versuchsreihe mit erheblich verringertem Torsionsintervall folgen läßt (vergl. Diagramm C). Sie tritt ebenfalls im entgegengesetzten Sinne wie bei steigenden Torsionsintervallen auf, wenn man nach Erreichen des maximalen Torsionsintervalles wieder von Stufe zu Stufe das Torsionsintervall verkleinert und zeigt eine Zunahme mit der Abnahme des Torsionsintervalls, nur ist ihr Betrag bei stufenweise verringerten Intervallen nicht so erheblich, als wenn man von einem großen Torsionsintervall unvermittelt zu einem beträchtlich kleineren übergeht. Untersucht man diese Erscheinung der Asymmetrie bei verschiedenen zirkularen Feldstärken

Versuchsreihe A.
Torsionsintervall: 30°.
1,5 mm Ni-Draht 0,8 Amp.



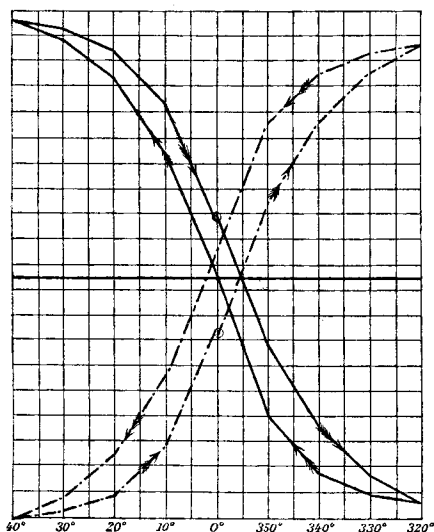
1) Von den 40 Diagrammen der Dissertation sind hier nur die typischen aufgenommen.

innerhalb des gleichen Torsionsintervalls, so zeigt sich, daß dieselbe nicht merklich von der Feldstärke abhängt.

Neben dieser Asymmetrie der Lage zeigen die Kurven auch eine Asymmetrie der Gestalt; die Kurven sind an den Torsionen zur Rechtsschraube bez. Linksschraube entsprechenden Spitzen ungleich ausgebildet derart, daß die Zunahme und Abnahme des Moments kurz vor und kurz nach dem Erreichen des extremen Torsionswinkels bei Torsionen entgegengesetzten Vor-

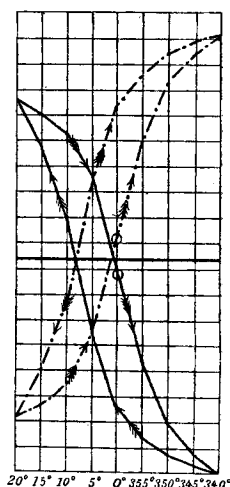
Versuchsreihe B.

1,5 mm Ni-Draht 0,8 Amp.
Torsionsintervall 80°.



Versuchsreihe C.

1,5 mm Ni-Draht 0,8 Amp.
Torsionsintervall 40°.



zeichens mit ungleicher Geschwindigkeit erfolgt. Regelmäßig zeigt das Moment in der Nähe derjenigen Spitzen, die infolge der Asymmetrie der Lage sich in *größerem* Abstände von der Nulllinie des Moments befinden, *langsamere* Änderung als in der Nachbarschaft der *näher* an der Nulllinie gelegenen Spitzen. Die Asymmetrie der Gestalt zeigt einen ähnlichen Verlauf bei Änderung des Torsionsintervalls wie die Asymmetrie der Lage; sie ist am stärksten entwickelt bei kleinen Torsionsintervallen (vergl. Versuchsreihe A), nimmt ab mit wachsendem Torsionsintervall (vergl. Versuchsreihe B), um dann bei großen Torsions-

intervallen fast vollständig zu verschwinden. Sie ist ebenfalls merklich unabhängig von der Umlaufungsrichtung des Torsionszykels. Nachdem die Asymmetrie der Gestalt für große Torsionsintervalle unmerklich geworden war, tritt sie bei unvermittelter Verringerung des Intervalls wieder deutlich auf, nur findet jetzt die *schnelle* Änderung des Moments bei demjenigen Vorzeichen des Torsionswinkels statt, für welches bei *wachsenden* Torsionsintervallen die *langsame* Änderung sich zeigte (vergl. Versuchsreihe C). Verringert man nach Erreichen des maximalen Wertes das Torsionsintervall wieder von Stufe zu Stufe, so macht sich auch jetzt, wenn auch nicht so deutlich wie bei unvermittelter Verkleinerung die Asymmetrie der Gestalt bemerkbar — und zwar wieder im entgegengesetzten Sinne wie bei steigenden Torsionsintervallen; von der zirkularen Feldstärke scheint sie ebenso wenig abhängig zu sein wie die Asymmetrie der Lage. Beide Erscheinungen sind nicht als typische zu betrachten, die qualitativ und quantitativ bei übrigens gleichen Nickeldrähten in gleicher Weise auftreten; sie sind vielmehr als Begleiterscheinungen anzusehen, die, bedingt durch vorläufig unbekannte Nebenumstände, sich bei der Wechselwirkung von zirkularer Magnetisierung und Torsion bald in stärkerem, bald in schwächerem Grade einstellen. Anscheinend besteht eine Regel nur insofern, als übereinstimmend bei allen untersuchten Drähten die *absoluten Maxima* und die *langsamen Änderungen* des Moments miteinander verbunden und bei wachsenden und abnehmenden Torsionsintervallen für Torsionswinkel entgegengesetzten Vorzeichens auftreten.

Ursache der Begleiterscheinungen.

Als Ursache dieser Begleiterscheinungen könnte zunächst ein longitudinales Magnetfeld in Frage kommen; ein solches läßt sich in praxi nur schwierig vollkommen ausschließen — sicher ist nur, daß bei der sorgfältigen Orientierung der Versuchsdrähte senkrecht zur magnetischen Meridianebene nur eine äußerst kleine longitudinale Feldkomponente wirksam gewesen sein kann. Ein longitudinales Magnetfeld von merklicher Stärke würde den Verlauf des Moments bei Durchlaufen eines Torsionszykels insofern ändern, als sich den Erscheinungen der Wechselwirkung von *zirkularem* Magnetfelde und Torsion die-

jenigen der Wechselwirkung von *longitudinalem* Felde und Torsion überlagern würden — wenn man sekundäre Wechselwirkungen, die möglich wären, jedenfalls aber bei kleinen longitudinalen Feldern für rein qualitative Betrachtungen außer acht gelassen werden können, unberücksichtigt läßt. Nun ist, wenn man von den durch Hysteresis und verwandte Erscheinungen verursachten Komplikationen absieht, das Moment bei der Wechselwirkung von Torsion und *zirkularem* Felde eine *ungerade* Funktion, bei der Wechselwirkung von *longitudinalem* Felde und Torsion eine *gerade* Funktion des Torsionswinkels; es würde also durch Superposition beider Wirkungen ein Verlauf des Moments entstehen, wie ihn die erhaltenen Diagramme zeigen, — nur würden die bei entgegengesetzt gerichteten zirkularen Feldern erhaltenen Kurvenzüge bei *gleicher* Richtung des longitudinalen Feldes auch in *gleicher* Richtung verschoben und in *gleichem* Sinne deformiert sein müssen. Ein solcher Verlauf des Moments wurde während der Vorversuche solange erhalten, als die Orientierung der Versuchsdrähte senkrecht zur magnetischen Meridianebene nur mangelhaft durchgeführt war; jede einseitige Verschiebung und Deformation der Diagramme verschwand aber, sobald nach Verbesserung der Orientierung eine merkliche longitudinale Feldstärke ausgeschlossen wurde. Aus dieser Erfahrung und aus dem Umstande, daß die Asymmetrie der Lage und der Gestalt bei den für entgegengesetzt gerichtete zirkulare Felder erhaltenen Kurven sich in entgegengesetztem Sinne geltend macht, darf geschlossen werden, daß diese Erscheinungen nicht durch ein longitudinales Magnetfeld hervorgerufen werden. — Aufklärung erhält man durch die Betrachtung der eigentümlichen Abhängigkeit dieser Erscheinungen von den Änderungen des Torsionsintervalls. Nimmt man nach W. Thomson¹⁾ als Ursache der bei den Wechselwirkungen von Torsion und Magnetfeld auftretenden Erscheinungen die „magnetische Äolotropie“ an, welche durch die Zug- und Druckspannungen, die bei der Torsion im Drahte entstehen, hervorgerufen wird, so bietet sich folgende Erklärung für die Asymmetrie der Lage und der Gestalt. Zyklisch variierende Torsionen bedingen zyklische und symmetrisch zur Torsion Null gelegene

1) W. Thomson, Reprint of Papers, 2. p. 374.

Zug- und Druckspannungen nur solange, als bei dem Hin- und Hertordieren die Deformationen merklich elastische bleiben; sobald die Deformationen dauernde werden, geht der Draht in den „torsionsharten“ Zustand über — nach einigen vorbereitenden Torsionszykeln wird für jedes neue Torsionsintervall wieder ein zyklischer Verlauf der Zug- und Druckspannungen erreicht, nur liegt das System der Spannungen jetzt nicht mehr notwendig symmetrisch zum Torsionswinkel Null. Die Asymmetrie der Zug- und Druckspannungen wird von der Art abhängen, in welcher der Draht den neuen, dem betreffenden Torsionsintervallentsprechenden torsionsharten Zustand erreichte; offenbar wird die erste dauernde Deformation, die während der Vorbereitung für eine Versuchsreihe in einem neuen Torsionsintervall dem Drahte erteilt wird, für den Sinn, in welchem sich die Asymmetrie der Spannungen bemerkbar macht, in erster Linie maßgebend sein. Durch die asymmetrische Lage der Zug- und Druckspannungen wird nun jeder der beiden Richtungen des zirkularen Feldes eine ausgezeichnete Richtung der longitudinalen Magnetisierung zugeordnet; bei jeder Richtung des zirkularen Feldes entwickelt sich die ihr zugeordnete longitudinale Magnetisierung vorzugsweise und bewirkt so die in den Diagrammen bemerkbare Asymmetrie der Lage. Auf diese longitudinale Magnetisierung wirkt wiederum die Torsion ein, es superponiert sich über die Wechselwirkung von zirkularer Magnetisierung und Torsion diejenige der longitudinalen Magnetisierung und Torsion, wodurch auch die Asymmetrie der Gestalt erklärt wird. Mit Umkehrung des zirkularen Feldes muß sich die ausgezeichnete Richtung der longitudinalen Magnetisierung ebenfalls umkehren und der Verlauf des Moments muß, falls inzwischen keine Änderung an dem bisher bestehenden asymmetrischen Verlauf der Spannungen eintreten konnte, spiegelbildlich symmetrisch zu demjenigen erfolgen, der sich vor Umkehrung des zirkularen Feldes eingestellt hatte. Bei Vergrößerung des Torsionsintervalls wird die Asymmetrie der Spannungen und des Moments stets im *gleichen* Sinne erfolgen, sofern die erste dauernde Deformation beim Übergang zu dem größeren Torsionsintervall immer bei dem gleichen Vorzeichen des Torsionswinkels vorgenommen wird. Für sehr große Torsionsintervalle scheint der Einfluß der ersten dauernden

Deformation zu verschwinden — der Verlauf der Zug- und Druckspannungen wird anscheinend für den harten Draht wieder ein merklich symmetrischer. Verkleinert man das Torsionsintervall, so wird, falls der Übergang von dem größeren zum kleineren Torsionsintervall wieder bei Torsionen des gleichen Vorzeichens vorgenommen wird, bei welchem vorher die Vergrößerung des Intervalls erfolgte, der Verlauf der Zug- und Druckspannungen eine Asymmetrie entgegengesetzten Sinnes zeigen als bei wachsenden Torsionsintervallen. Unvermittelter Übergang von großen zu erheblich kleineren Torsionsintervallen bedingt anscheinend eine stärker ausgeprägte Asymmetrie der Spannungen als stufenweise Verkleinerung des Intervalls. Der Sinn, in welchem sich die Asymmetrie zuerst bemerkbar macht, wird während des Durchlaufens der ersten vorbereitenden Torsionszykeln bestimmt, die dem erstmaligen Erreichen des zyklischen Zustandes vorausgehen müssen; offenbar herrschen während dieser Periode labile Zustände, deren eingehende Untersuchung erst einen Aufschluß über die Ursachen geben könnte, die das Auftreten der ersten Asymmetrie bald in einem und bald im entgegengesetzten Sinne bei gleicher Behandlung übrigen gleicher Drähte bedingen.

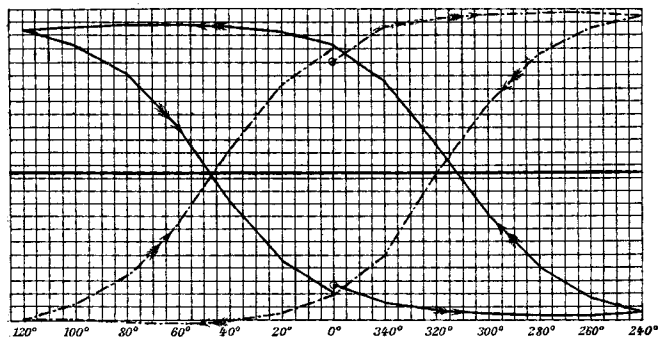
Zurückbleiben und Voraneilen des Moments gegenüber dem Torsionswinkel.

Nach Erörterung dieser auf Nebenwirkungen beruhenden Begleiterscheinungen kehren wir zur Beschreibung der wesentlichen Eigenschaften der Wechselwirkung von zirkularer Magnetisierung und Torsion zurück. Wir hatten oben gefunden, daß das Moment innerhalb eines Torsionszykels für einen bestimmten Wert des Torsionswinkels im allgemeinen bei entgegengesetztem Torsionssinn verschiedene Werte annimmt, und wollen nunmehr verfolgen, inwiefern diese Mehrdeutigkeit des Moments mit dem Torsionsintervall variiert. Für kleine Torsionsintervalle zeigt das Moment ein ausgeprägtes Zurückbleiben (Hysteresis) hinter dem Torsionswinkel (vergl. Versuchsreihe A, B, C), das unabhängig von dem Durchlaufungssinn des Torsionszykels ist. Mit wachsendem Torsionsintervall nimmt das Zurückbleiben ab, um bei weiterer Vergrößerung des Torsionsintervalls in ein Voraneilen (negative

Hysteresis) überzugehen (vergl. Versuchsreihe D); der Übergang erfolgt bei dem Nickeldraht von 1,5 mm Dicke etwa für das

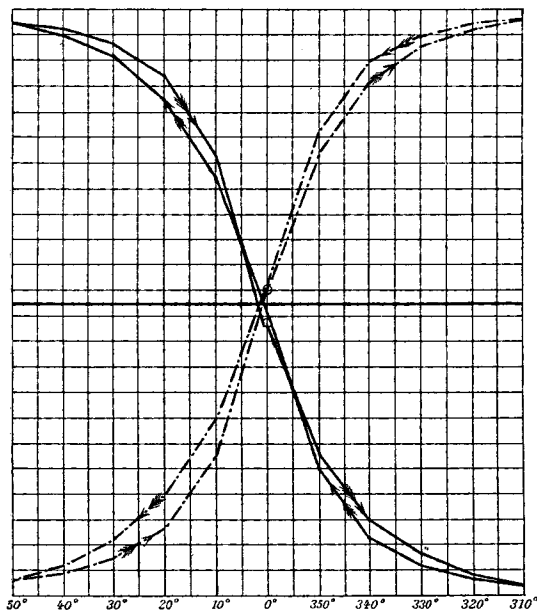
Versuchsreihe D.

1,5 mm Ni-Draht 0,8 Amp. Torsionsintervall 240° .



Versuchsreihe E.

Torsionsintervall 100° . 1,5 mm Ni-Draht 0,8 Amp.



Torsionsintervall von 100° (vergl. Versuchsreihe E). Bei Verkleinerung des Torsionsintervalls nimmt das Voraneilen ab,

um dann nahezu für das gleiche Torsionsintervall, bei dem für wachsende Torsionsintervalle der Übergang von Hystereseis zu deren Gegenteil stattfand, wieder in ein Zurückbleiben umzuschlagen, das mit abnehmendem Torsionsintervall noch eine deutliche Zunahme aufweist. Von dem zirkularen Felde scheint die Hystereseis nicht merklich abhängig zu sein. Die Nickeldrähte von 1,0 und 0,5 mm Dicke zeigen ein entsprechendes Verhalten; bei ersterem findet der Übergang von Hystereseis zu negativer Hystereseis etwa für das Torsionsintervall von 240° , bei letzterem für ein Intervall statt, das nur wenig kleiner als 480° ist.

Es ist bemerkenswert, daß auch bei der Wechselwirkung von *zirkularem* Magnetfelde und Torsion sowohl ein Voraneilen als auch ein Zurückbleiben des Moments möglich ist; man kann darin ein Analogon zu den Resultaten Zehnders erblicken, der bei der Wechselwirkung von longitudinalem Felde und Torsion ebenfalls bei kleinen Torsionsintervallen Hystereseis des magnetischen Moments und bei großen Torsionsintervallen „negative Hystereseis“ beobachtete¹⁾. Das vorliegende Resultat bildet eine Ergänzung der Beobachtungen von Wiedemann, der nur das Voraneilen des Moments finden konnte, da er die Wechselwirkung von zirkularem Felde und Torsion nur bei großen Torsionsintervallen untersuchte²⁾.

Der Übergang von dem Zurückbleiben zu dem Voraneilen des Moments findet sowohl bei der Wechselwirkung von longitudinalem Felde und Torsion als auch bei derjenigen von zirkularem Felde und Torsion sehr nahe für die gleichen Torsionsintervalle statt, und zwar sind dieses diejenigen Intervalle, bei welchen die Deformationen der Drähte schon merklich dauernde zu werden beginnen.

Die eigentümliche Abhängigkeit, in welcher der Verlauf des Moments innerhalb eines Torsionszykels von dem Torsionsintervall steht, findet eine Deutung durch die Annahme, daß Änderungen des Moments wesentlich nur von Änderungen der durch die Torsion entstehenden *Zug- und Druckspannungen* abhängig sind und daß *Deformationen* nur insofern den Ver-

1) L. Zehnder, l. c. 41. p. 233.

2) G. Wiedemann, l. c. 27. p. 376 u. ff.

lauf des Momentes beeinflussen, als durch diese dauernde Änderungen der Magnetisierungs- und Elastizitätskonstanten hervorgerufen werden. Solange die Deformationen noch vorwiegend elastische sind, zeigt das Moment — wie unten bei der quantitativen Verwertung der Resultate noch deutlicher hervortreten wird — von einer Grenze des Torsionsintervalls bis zur anderen eine gleichförmige Zunahme beziehungsweise Abnahme entsprechend dem für den elastischen Zustand charakteristischen Verlauf der Zug- und Druckspannungen; die Änderungen des Moments werden wie bei allen Magnetisierungsprozessen in ferromagnetischer Materie durch die Hysteresis modifiziert. Werden die Deformationen mit wachsendem Torsionsintervall merklich unelastische, so treten wesentliche Änderungen der Spannungen nur in denjenigen Teilen des Torsionszykels auf, die unmittelbar auf die Umkehrung des Torsionssinnes folgen; offenbar nehmen bei der Detorsion die vorhandenen Spannungen schnell ab, wechseln ihr Zeichen und wachsen im entgegengesetzten Sinne bis zu denjenigen Werten, bei welchen dauernde Deformationen eintreten. Weitere Torsion vermehrt nun die Spannungen nicht mehr erheblich, sondern bewirkt bis zum Erreichen der Grenze des Torsionswinkels vorwiegend nur noch wachsende Deformationen; der Rückweg bis zur andern Grenze des Torsionsintervalls wird in analoger Weise durchlaufen. Nimmt man nun an, daß das Moment wesentlich nur durch die Zug- und Druckspannungen bestimmt ist, so werden ersichtlich schnelle Änderungen des Moments nur in denjenigen Teilen des Torsionszykels auftreten, die auf eine Umkehrung des Torsionssinnes unmittelbar folgen; der absolute Wert des Moments nimmt schnell ab, das Moment wechselt das Zeichen und wächst in entgegengesetztem Sinne schnell bis zu demjenigen Werte, der dem System von Zug- und Druckspannungen entspricht, bei welchem dauernde Deformationen eintreten. Weiteres Tordieren bis zur Grenze des Torsionsintervalls vermehrt das Moment nicht mehr erheblich; der Rückweg bis zur anderen Grenze des Torsionsintervalls wird in analoger Weise durchlaufen. Wäre keine Hysteresis vorhanden, so würde schon bei kleineren Torsionsintervallen, als es in Wirklichkeit geschieht, das Voraneilen des Moments deutlich

werden, denn die Hysteresis besteht wohl merklich unverändert auch für große Torsionsintervalle fort und kompensiert das Voraneilen noch bei Torsionsintervallen, bei denen dasselbe schon erkennbar sein würde, wenn man die Hysteresis beseitigen könnte; in diesem Falle würde in denjenigen Torsionsintervallen, bei welchen sich jetzt schon das Voraneilen zeigt, voraussichtlich der Abfall des absoluten Wertes des Moments nach Umkehrung des Torsionssinnes noch rapider erfolgen. Man kann die gedachten Verhältnisse durch Erschüttern des Versuchsdrahtes angenähert verwirklichen; bei der Ausführung der Versuche wurde jedoch darauf verzichtet, weil die Erschütterung einerseits die Hysteresis auch in kleinen Torsionsintervallen nicht vollständig beseitigt, andererseits aber auch die Werte, die das Moment für die Grenzen des Torsionswinkels annimmt, in einer Weise beeinflußt, die exakte Resultate solange unmöglich macht, als man nicht imstande ist, die Erschütterungen in stets gleichbleibender Stärke vorzunehmen. Immerhin ist es bemerkenswert, daß eine Verringerung der Hysteresis sich durch stärkeres Hervortreten des Voraneilens in großen Torsionsintervallen wirklich nachweisen ließ. Vielleicht würde die Anwendung eines longitudinalen, von einem hochfrequenten Wechselstrom erzeugten Magnetfeldes analog dem Vorgehen von Gerosa und Finzi¹⁾ den gewünschten Erfolg besser erzielen lassen.

Bei diesen Überlegungen ist außer acht gelassen worden, daß das Überschreiten der Elastizitätsgrenze wahrscheinlich zunächst in den äußeren Schichten des tordierten Drahtes eintritt und daß erst bei weiterer Torsion auch das Innere des Drahtes mehr und mehr dauernd deformiert wird; eine quantitative Berücksichtigung solcher Vorgänge ist leider noch nicht möglich, da noch keine Spezialuntersuchungen darüber vorliegen. Qualitativ steht die Annahme dieser Vorgänge der hier gegebenen Erklärung des magnetischen Verhaltens der Drähte nicht im Wege; offenbar muß, wenn man ein langsames Vordringen der dauernden Deformation nach dem Innern des Drahtes annimmt, das Moment nach dem Aufhören der schnellen Änderung, das durch Eintritt dauernder

1) Vergl. J. A. Ewing, *Magn. Ind.*, deutsche Ausg., p. 304 u. ff.

Deformation in den äußeren Schichten bewirkt wird, bei weiterer Torsion noch eine kleine Änderung infolge der weiteren Änderung der Zug- und Druckspannungen im Innern des Drahtes zeigen, die in dem Maße abnehmen muß, als die dauernde Deformation auch das Innere ergreift.

Abhängigkeit des Momentintervalles von dem Torsionsintervall.

Die dargelegte Auffassung von dem Zustandekommen des Voraneilens des Moments bei großen Torsionsintervallen wird gestützt durch die quantitative Verwertung der Beobachtungsergebnisse. Verfolgen wir zunächst das Anwachsen der Extremwerte, die das Moment innerhalb jedes Torsionszykels erreicht, mit dem Torsionsintervall. Bildet man für jedes Torsionsintervall das Mittel aus den Differenzen der bei entgegengesetzten Feldrichtungen von dem Moment an den Grenzen des Torsionsintervalls erreichten Werten, so erhält man eine von der oben erörterten Asymmetrie befreite Reihe von Zahlen, die zur Gewährung eines ersten Überblicks geeignet erscheinen. Für den Nickeldraht von 1,5 mm Dicke und die Stromstärke 0,8 Amp. ergibt sich bei steigenden Torsionsintervallen folgende Tabelle:

Torsionsintervall	Momentintervall	Momentintervall Torsionsintervall
30°	861	28,7
40°	1131	28,2
60°	1562	26,0
80°	1883	23,5
[100°]	[2201]	[22,0]
120°	2139	17,8
160°	2224	13,9
240°	2221	9,3

Zu der Tabelle ist zu bemerken, daß das Torsionsintervall 100° nach dem Intervall 160° untersucht wurde; der Draht hatte also schon einen größeren Härtegrad erreicht, als dem Intervall 100° entsprochen hätte, wenn es unmittelbar nach dem Torsionsintervall 80° untersucht worden wäre. Die Tabelle läßt deutlich erkennen, daß der Anstieg des Moment-

intervalls anfänglich, solange die Deformationen noch vorwiegend elastische sind, proportional dem Torsionsintervall erfolgt; schon für das Torsionsintervall 80° nimmt der Quotient $\frac{\text{Momentintervall}}{\text{Torsionsintervall}}$ erheblich ab, um für größere Torsionsintervalle schnell zu fallen. Das Momentintervall wächst aber nur solange, als durch Vergrößerung des Torsionsintervalls unterhalb der Elastizitätsgrenze das Intervall der Zug- und Druckspannungen merklich vergrößert werden kann. Von dem Torsionsintervall 80° an bleibt das Wachstum des Momentintervalls erheblich hinter demjenigen des Torsionsintervalls zurück — also gerade von demjenigen Torsionsintervall an, bei welchem sich das Voraneilen des Moments vor dem Torsionswinkel zuerst zeigen würde, wenn es nicht durch Hysteresis verdeckt wäre. Noch schärfer würde die Grenze für das lineare Anwachsen des Momentintervalls bei dem Torsionsintervall 80° — das man als Sättigungsintervall bezeichnen könnte — hervortreten, wenn nicht die infolge der dauernden Deformationen bei großen Torsionsintervallen zunehmende Härtung des Drahtes ihrerseits noch nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze eine Zunahme des Intervalls der Spannungen und damit ein schwaches Anwachsen des Momentintervalls hervorrufen würde.

Daß das Momentintervall unter übrigens gleichen Umständen im gehärteten Draht ein größeres ist als im weichen, erkennt man aus einem Vergleich der bei aufsteigenden und absteigenden Torsionsintervallen bei gleicher Stromstärke für das gleiche Intervall erreichten Momentintervalle:

Torsionsintervall	Momentintervall bei	
	aufsteigenden	absteigenden
	Torsionsintervallen	
40°	1131	1750
60°	1562	2090
80°	1883	2257
120°	2139	2351
160°	2224	2315
240°	2221	

Die Differenz der Momentintervalle für den weichen und den gehärteten Draht ist am größten für das kleinste Torsions-

intervall, da hier der noch völlig ungehärtete Draht dem gehärteten gegenübersteht, sie nimmt ab, je mehr mit wachsendem Torsionsintervall der weiche Draht in seiner Härtung fortschreitet. Das Momentintervall erfährt, wie aus der Tabelle ersichtlich ist, für abnehmende Torsionsintervalle noch eine kleine Steigerung gegenüber dem für das maximale Torsionsintervall angenommenen Werte; das Maximum des Momentintervalls mit 2351 wird erst für das Torsionsintervall 120° erreicht. Nimmt man hinzu, daß bei der Vergrößerung des Torsionsintervalls von 160° auf 240° keine Steigerung, sondern schon eine geringe Verminderung des Momentintervalls erhalten wurde, so wird man darin die Begründung dafür finden, daß von einer Überschreitung des Torsionsintervalls 240° Abstand genommen wurde. Bei weiterer Vergrößerung des Torsionsintervalls tritt, wie die Vorversuche gezeigt hatten, eine rasche Abnahme des Momentintervalls ein; offenbar ist dann die Grenze der Duktilität des Materials überschritten und es treten Diskontinuitäten auf — eine Vermutung, die dadurch gestützt wird, daß eine rein zyklische Änderung des Moments bei diesem Zustande des Drahtes nicht mehr erhalten werden kann.

Abhängigkeit des Moments von dem Torsionswinkel.

Nach dieser allgemeinen Übersicht wenden wir uns zur Verfolgung der Abhängigkeit des Moments von dem Torsionswinkel innerhalb eines bestimmten Torsionsintervalls. Zur Erleichterung der Übersicht ist es wünschenswert, das Beobachtungsmaterial in wenigen, charakteristischen Zahlenwerten zusammenzufassen, vor allem aber die Wirkung der als unwesentlich erkannten Asymmetrien der Lage und Gestalt sowie diejenige der Hysteresis wenigstens für kleine Torsionsintervalle auszuschneiden; dieses kann durch Bilden geeigneter Mittelwerte versucht werden. Bildet man zunächst innerhalb jeder zu einer bestimmten Stromrichtung gehörenden Versuchsreihe die arithmetischen Mittel aus den Werten des Moments, die dieses für jeden Torsionswinkel beim Hin- und Zurücktordieren annimmt, so kann man die durch diese Ordinaten gegebene Kurve näherungsweise als diejenige Kurve des Moments betrachten, zu der sich die in Wirklichkeit erhaltene Hysteresis-

schleife zusammenziehen würde, wenn keine Hysteresis vorhanden wäre. Natürlich ist dieses Verfahren nur innerhalb derjenigen Torsionsintervalle berechtigt, bei denen ein Voran-eilen des Moments von dem Torsionswinkel noch nicht merklich wird; in großen Torsionsintervallen würde dieses Verfahren geradezu den natürlichen Verlauf des Moments ent-stellt wiedergeben, denn in großen Torsionsintervallen würde auch nach Fortfallen der Hysteresis das Moment niemals eine eindeutige Funktion des Torsionswinkels werden. Hier hat man vorerst kein Mittel, den Einfluß der Hysteresis näherungsweise auszuschneiden.

Die von Hysteresis befreite Kurve des Moments (in kleinen Torsionsintervallen) zeigt nun noch die Asymmetrie der Lage und der Gestalt; erstere läßt sich vollkommen aus den Beobachtungsdaten eliminieren, indem man nicht an die Werte der Ordinaten selbst, sondern an die Differenzen der zu entgegengesetzt gleichen Torsionswinkeln gehörigen Momente die Diskussion anknüpft; durch dieses Verfahren werden auch alle Glieder gerader Ordnung, die von der Wechselwirkung der Torsion und der longitudinalen Magnetisierung herrühren, eliminiert, falls die Kurve des Moments, welche diese Wechselwirkung allein darstellt, symmetrisch zur Ordinatenachse gelegen ist. So erhält man bei jedem in $4n$ -Unterabteilungen durchlaufenen Torsionsintervall aus den beiden bei entgegengesetzten Stromrichtungen angestellten Versuchsreihen $2 \cdot n$ Zahlwerte, die durch Mittelnehmen aus je zwei entsprechenden auf n -Werte reduziert werden, die den Verlauf der Wechselwirkung von Torsion und zirkularem Magnetfelde bei kleinen Torsionsintervallen unter den gemachten Einschränkungen genügend darstellen.¹⁾ In den folgenden Tabellen sind mit $\Delta \tau$ Differenzen der Torsionswinkel (symmetrisch zur Torsion Null), mit ΔM die Mittelwerte aus den zugehörigen Momentdifferenzen (nach Elimination der Hysteresis) bezeichnet.

Der Verlauf des Moments bei der Stromstärke 0,8 Amp. in den Torsionsintervallen 30° , 40° , 60° und 80° bei dem Nickeldraht von 1,5 mm Dicke stellt folgende Tabelle dar:

1) Über Nachwirkungserscheinungen wird Disert. p. 87 berichtet.

$\Delta \tau$	ΔM_{30}	ΔM_{40}	ΔM_{60}	ΔM_{80}
10°	379	418	486	—
20°	674	74	845	980
30°	860	969	1136	—
40°		1131	1337	1500
50°			1473	—
60°			1562	1756
70°				—
80°				1883

Aus jeder Vertikalreihe wird das Wachsen des Moments innerhalb des betreffenden Torsionsintervalls ersichtlich, aus jeder Horizontalreihe das Wachsen des Moments für den betreffenden Torsionswinkel mit dem Torsionsintervall. Es ist ersichtlich, wie das Wachstum des Moments gegen die Grenze des Torsionsintervalls hin eine Abnahme aufweist. Ein ähnliches Wachstum wie für das Momentintervall mit dem Torsionsintervall, zeigt sich auch für die Momentdifferenzen; auch dieses Anwachsen zeigt eine Abnahme mit wachsenden Torsionsintervallen.¹⁾

Wesentlich anders gestaltet sich der Verlauf des Momentes innerhalb der großen Torsionsintervalle. So ändert sich in dem Torsionsintervall von 120° das Moment beim Hin- und Hertordieren des Drahtes zwischen den Torsionswinkeln 330° und 30° um 1773, 1760, 1804, 1829 — im Mittel um 1794; das Momentintervall beträgt im Mittel 2139, während also nur die Hälfte des Torsionsintervalls durchlaufen wurde, hat sich das Moment schon um 84 Proz. der Gesamtänderung geändert. Bei dem maximalen Torsionsintervall 240° (Versuchsreihe D) ändert sich das Moment während des Durchlaufens der ersten Hälfte des Torsionsintervalls nach jeder Umkehrung des Torsionssinnes um 2076, 2039, 2069, 2097, im Mittel um 2070, das sind 93 Proz. des Momentintervalls 2221. Für den torsionsharten Draht änderte sich in dem Torsionsintervall 160° das Moment um 1936, 1915, 1925, 1891 im Mittel 1917, während der Draht zwischen den Torsionen 320° und 40° hin- und hergedrillt wurde; die Änderung entspricht 83 Proz. des Momentintervalls 2315.

1) Vergl. Dissert. p. 88 u. 89.

Für große Torsionsintervalle ergibt sich also das Resultat, daß der Hauptanteil an der Gesamtänderung des Moments bei Durchlaufen des ganzen Torsionsintervalls schon während des Durchlaufens der Hälfte des Intervalls erreicht wird; während des Durchlaufens der anderen Hälfte des Torsionsintervalls ändert sich das Moment nur noch sehr langsam. Bei den Torsionsintervallen 120° und 160° tritt infolge der Hysteresis die schnelle Änderung des Moments nicht unmittelbar nach Umkehrung des Torsionssinnes ein; bei dem Torsionsintervall 240° ändert sich das Moment während des Durchlaufens der ersten Hälfte des Intervalls schon um mehr als $\frac{9}{10}$ des Momentintervalls, und trotz der Verzögerung durch die Hysteresis setzt hier die schnelle Änderung des Moments unmittelbar nach der Umkehrung des Torsionssinnes ein.

Der Verlauf des Moments im harten Draht bei kleinen Torsionsintervallen (Stromstärke 0,8 Amp.) ist aus folgender Tabelle ersichtlich, die wieder wie oben unter ΔM die nach Elimination der Hysteresis gebildeten Momentdifferenzen enthält:

$\Delta \tau$	ΔM_{80}	ΔM_{60}	ΔM_{40}
10°	—	822	784
20°	1369	1395	1318
30°	—	1678	1586
40°	1873	1874	1750
50°	—	1995	
60°	2134	2090	
70°	—		
80°	2257		

Das Moment wächst, wie die Zahlen der Vertikalreihen zeigen, anfangs innerhalb jedes Torsionsintervalls schnell; gegen die Grenze des Torsionsintervalls hin wird das Wachstum geringer. Wie die Zahlen der Horizontalreihen lehren, wird mit abnehmendem Torsionsintervall auch das für einen bestimmten Torsionswinkel erreichte Moment im allgemeinen kleiner; doch gilt dieser Satz nicht ohne Ausnahme. Das Anwachsen des Moments innerhalb eines bestimmten Torsionsintervalls erfolgt im harten Draht erheblich schneller als unter sonst gleichen Bedingungen im weichen Draht. Dieses Verhalten wird durch folgende Tabellen veranschaulicht, in welchen

je zwei Versuchsreihen unter Anwendung der gleichen Stromstärke (0,8 Amp.) in gleichen Torsionsintervallen einerseits für den weichen, andererseits für den harten Draht zusammengestellt sind:

Torsionsintervall 80°.

$\Delta \tau \cdot 100$	$\Delta M \cdot 100$	$\Delta M \cdot 100$
Torsionsintervall	Momentintervall weicher Draht	Momentintervall harter Draht
25 Proz.	52 Proz.	61 Proz.
50 „	80 „	83 „
75 „	93 „	95 „

Nach Durchlaufen von 25 Proz. des Torsionsintervalls hatte der weiche Draht also erst 52 Proz., der harte schon 61 Proz. des Momentintervalls erreicht.

Torsionsintervall 60°.

$\Delta \tau \cdot 100$	$\Delta M \cdot 100$	$\Delta M \cdot 100$
Torsionsintervall	Momentintervall weicher Draht	Momentintervall harter Draht
16,7 Proz.	31 Proz.	39 Proz.
33,3 „	54 „	67 „
50,0 „	73 „	80 „
66,7 „	86 „	90 „
83,3 „	94 „	95 „

Der Unterschied zwischen dem Verhalten des weichen und des harten Drahtes macht sich, wie zu erwarten war, mit abnehmenden Torsionsintervallen mehr bemerkbar:

Torsionsintervall 40°.

$\Delta \tau \cdot 100$	$\Delta M \cdot 100$	$\Delta M \cdot 100$
Torsionsintervall	Momentintervall weicher Draht	Momentintervall harter Draht
25 Proz.	37 Proz.	45 Proz.
50 „	66 „	75 „
75 „	86 „	91 „

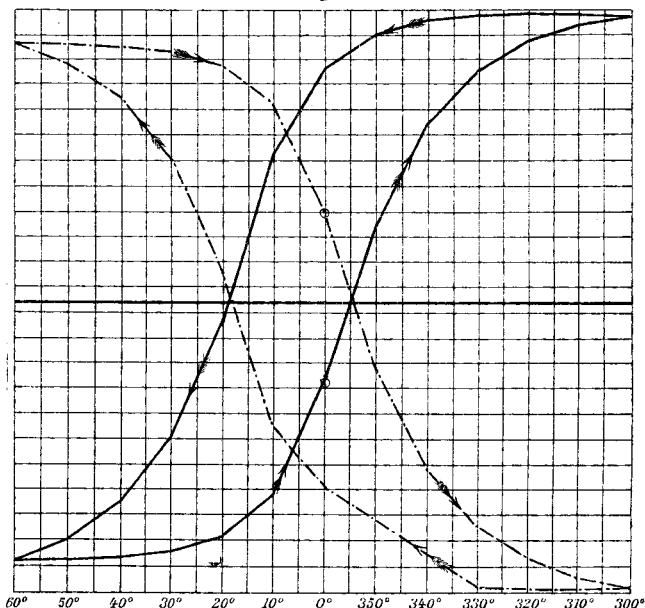
Über die Abhängigkeit des Moments von der zirkularen Feldstärke und dem Drahtdurchmesser wird Dissert. p. 92—95 berichtet.

Eisendraht. Begleiterscheinungen.

Die an dem *Eisendrahte* von 1,5 mm Dicke erhaltenen Resultate zeigen ähnliche von Nebenwirkungen herrührende Begleiterscheinungen, wie solche auch bei Nickel auftraten; doch machen sich diese Begleiterscheinungen bei Eisen nicht so auffällig bemerkbar, weil man in der Methode des Entmagnetisierens des Versuchsdrahtes in einem longitudinalen, von kommutiertem und langsam bis auf Null abgeschwächtem

Versuchsreihe F.

1,5 mm Fe-Draht 0,8 Amp. Torsionsintervall 120°.



Gleichstromerregten Magnetfelder ein vortreffliches Mittel besitzt, das die Nachwirkung vorangegangener magnetischer und elastischer Prozesse im Eisen bis zu einem gewissen Grade unschädlich zu machen gestattet.

Auch an einigen Diagrammen, die an dem untersuchten Eisendrahte aufgenommen wurden, macht sich Asymmetrie der Lage und der Gestalt bemerkbar — teils in der schon bei Nickel erörterten Art, teils im Sinne einer einseitigen Verschiebung der beiden zu entgegengesetzten Stromrichtungen gehörigen Kurvenzüge (vergl. Versuchsreihe F). Für die Abhängigkeit dieser

Asymmetrieen von dem Wachsen und Abnehmen des Torsionsintervalls besteht keine Regel; nur treten sie häufiger in kleinen als in großen Torsionsintervallen auf. Es ist dadurch wahrscheinlich gemacht, daß diese Asymmetrieen bei Eisen nicht durch eine asymmetrische Verteilung der Zug- und Druckspannungen im tordierten Drahte hervorgerufen werden oder im Zusammenhange mit der ersten dauernden Deformation stehen, die dem Drahte erteilt wurde — denn Nachwirkungen dieser Art können durch Entmagnetisieren völlig beseitigt werden — vielmehr ist als Ursache dieser regellos auftretenden Asymmetrieen eine von dem Entmagnetisierungsprozeß im Drahte zurückgebliebene longitudinale Magnetisierung anzusehen. Gelingt es doch selbst bei sorgfältigstem Abschwächen des Entmagnetisierungsstromes nicht immer, dem Drahte jede merklliche Spur einer longitudinalen Magnetisierung zu nehmen; und selbst in solchen Fällen, wo dieses anscheinend geglückt war, trat häufig bei der geringsten Erschütterung des entmagnetisierten Drahtes plötzlich eine mehr oder minder starke, spontane Magnetisierung bald in *einem*, bald im *entgegengesetzten* Sinne auf.

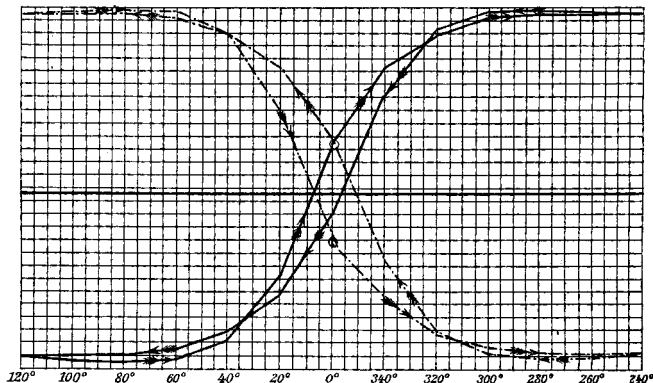
Voraneilen und Zurückbleiben des Moments gegenüber dem Torsionswinkel.

Auch der Eisendraht zeigt in kleinen Torsionsintervallen ein Zurückbleiben des Moments hinter dem Torsionswinkel (vergl. Versuchsreihe F); und zwar ist die Hysteresis bei gleichen Torsionsintervallen in Eisen stärker ausgeprägt als in Nickel. Das Zurückbleiben des Moments nimmt mit wachsendem Torsionsintervall ab (vergl. die Dissertation), um dann bei großen Torsionsintervallen in ein Voraneilen überzugehen (vergl. Versuchsreihe G); doch findet das Voraneilen bei den hier untersuchten Torsionsintervallen noch nicht unmittelbar nach Umkehrung des Torsionssinnes statt. Es herrscht vielmehr während des ersten Teiles der Detorsion noch das Zurückbleiben vor, bis dann etwa nach Durchlaufen des vierten Teiles des Torsionsintervalls die für die Detorsion geltende Kurve diejenige der Torsion schneidet, wodurch das Voraneilen eingeleitet wird. Offenbar ist dieses Verhalten des Eisens durch die im Vergleich zu Nickel starke Hysteresis

zu erklären, die das Voraneilen infolge der Überschreitung der Elastizitätsgrenze noch bei großen Torsionsintervallen zum größten Teil zu kompensieren imstande ist. Bei weiterer Vergrößerung des Torsionsintervalls kann man auch im Eisen das Zurückbleiben völlig zum Verschwinden bringen, doch wurde bei den definitiven Versuchen das Torsionsintervall nicht

Versuchsreihe G.

1,5 mm Fe-Draht, 1,2 Amp. Torsionsintervall 240° .



über die Grenze von 240° hinaus gesteigert, da, wie die Versuche gezeigt hatten, bei weiterer Vergrößerung rein zyklischer Verlauf des Moments nicht mehr erhalten werden kann, was das Eintreten von Diskontinuitäten im Material wahrscheinlich macht. Bei abnehmenden Torsionsintervallen verwandelt sich das Voraneilen wieder in ein Zurückbleiben, das mit der Abnahme des Torsionsintervalls eine deutliche Zunahme zeigt.

Abhängigkeit des Momentintervalls von dem Torsionsintervall.

Die Abhängigkeit des Momentintervalls von dem Torsionsintervall bei gleicher Stromstärke geht aus folgender Tabelle hervor:

Torsionsintervall	Momentintervall	Momentintervall Torsionsintervall
40°	545	13,6
80°	1503	18,8
120°	1985	16,5
160°	2189	13,7
240°	2302	9,6

Das Momentintervall wächst anfänglich schneller als das Torsionsintervall — vermutlich infolge der Härtung des Drahtes, die bei Eisen schon merklich wird, ehe die Elastizitätsgrenze überschritten wird — dann nimmt das Wachstum des Momentintervalls nach Überschreiten des Torsionsintervalls 80° wieder ab, um bei Vergrößerung des Torsionsintervalls auf 120° , 160° und 240° immer mehr nachzulassen.

In dem gehärteten Draht läßt sich für gleiche Torsionsintervalle wieder ein größeres Momentintervall erzielen als im weichen, wie aus folgender Zusammenstellung ersichtlich ist:

Torsionsintervall	Momentintervall bei	
	aufsteigenden	absteigenden
	Torsionsintervallen	
40°	545	—
80°	1503	1681
120°	1985	2153
160°	2189	2296
$[180^\circ]$	—	$[2319]$
200°	—	2315
240°	2302	

Zu der Tabelle ist zu bemerken, daß das Torsionsintervall 180° bei absteigenden Intervallen nicht unmittelbar nach dem Intervall 200° untersucht wurde, sondern erst am Schlusse der mitgeteilten Versuchsreihen. Die Tabelle läßt deutlich eine Vermehrung des Momentintervalls im gehärteten Drahte erkennen, nur ist dieselbe bei Eisen nicht so groß als für Nickel. Auch tritt der Unterschied zwischen den Momentintervallen bei hartem und bei weichem Draht hier nicht bei kleinen Intervallen besser hervor als bei großen — die Härtung vollzieht sich zum größten Teil schon unterhalb des Torsionsintervalls 80° und wird anscheinend durch weitere Vergrößerung des Intervalls nicht mehr erheblich gefördert. Das Maximum des Momentintervalls tritt erst für abnehmende Torsionsintervalle und zwar für das Intervall 180° mit 2319 ein.

Abhängigkeit des Moments von dem Torsionswinkel.

Zur Darstellung der Abhängigkeit des Moments von dem Torsionswinkel innerhalb eines bestimmten Torsions-

intervalls soll wieder — wenigstens in kleinen Torsionsintervallen — wie oben erörtert wurde, durch Mittelbildung aus den bei Torsion und Detorsion für jeden Torsionswinkel erhaltenen Momentwerten der „hysteresisfreie“ Verlauf des Moments hergestellt und wie oben durch Differenzbildung zwischen den für symmetrisch zur Torsion Null gelegene Torsionswinkel geltenden Ordinaten der hysteresisfreien Kurve etwa vorhandene Asymmetrie eliminiert werden. Den Verlauf des Moments innerhalb der steigenden Torsionsintervalle 40° , 80° , 120° , 160° verdeutlicht folgende Tabelle:

$\Delta \tau$	ΔM_{40}	ΔM_{80}	ΔM_{120}	ΔM_{160}
10°	150	—	—	—
20°	304	592	686	—
30°	442	—	—	—
40°	545	1072	1289	1427
60°	—	1353	1629	—
80°	—	1503	1818	1977
100°	—	—	1927	—
120°	—	—	1985	2150
160°	—	—	—	2189

Das Wachstum des Moments nimmt wieder, wie die Vertikalreihen zeigen, innerhalb jedes Torsionsintervalls gegen die Grenzen des Intervalls hin stark ab; für das Anwachsen der zu einem bestimmten Torsionswinkel gehörigen Momentdifferenz mit dem Torsionsintervall gilt eine ähnliche Regel, wie sie oben für das Wachsen des Momentintervalls mit dem Torsionsintervall angegeben wurde.¹⁾

In den großen Torsionsintervallen 240° und 200° ist der Verlauf des Moments innerhalb eines Torsionszykels wesentlich geändert; z. B. ändert sich in dem Torsionsintervall 240° das Moment beim Hin- und Hertordieren zwischen den Torsionswinkeln 320° und 40° um 1910, 1928, 1928, 1953, im Mittel 1930. Da das Momentintervall 2302 beträgt, hat sich das Moment, während der dritte Teil des Torsionsintervalls durchlaufen wurde, schon um 84 Proz. des Gesamtbetrages geändert. Bemerkenswert ist die erhebliche

¹⁾ Vergl. Dissert. p. 100 u. 101.

Zunahme des absoluten Wertes des Moments kurz nach Umkehrung des Torsionssinnes, die bewirkt, daß das Maximum der Momentdifferenz nicht für die Grenzwerte des Torsionswinkels erreicht wird. Die Änderungen des Moments in der Nachbarschaft der Grenzen des Torsionsintervalls sind außerordentlich geringe sowohl bei Torsion als auch bei Detorsion.

Den Verlauf des Moments im harten Draht bei kleinen Torsionsintervallen veranschaulicht folgende Tabelle:

$\Delta \tau$	ΔM_{180}	ΔM_{120}	ΔM_{80}
10°	—	—	—
20°	—	787†	659
30°	—	—	—
40°	1605	1421†	1191
60°	—	1791	1506
80°	2123	1994	1681
100°	—	2100	—
120°	2269	2153	—
160°	2296	—	—

Die durch † gekennzeichneten Zahlen sind infolge magnetischer Störungen unsicher. Die Vertikalreihen der Tabelle zeigen, wie das Moment auch im harten Draht anfänglich innerhalb jedes Torsionsintervalls schnell wächst, um dann gegen die Grenzen des Intervalls hin nur noch langsam zuzunehmen. Aus den Horizontalreihen der Tabelle geht hervor, daß mit abnehmendem Torsionsintervall auch die für einen bestimmten Torsionswinkel erreichten Momentdifferenzen abnehmen. Auch im Eisendraht erfolgt im gehärteten Zustande das Anwachsen des Moments innerhalb eines bestimmten Torsionsintervalls unter übrigens gleichen Umständen anfangs schneller als im weichen Zustande, wie folgende Zusammenstellung zeigt:

Torsionsintervall 160°.

$\Delta \tau \cdot 100$	$\Delta M \cdot 100$	$\Delta M \cdot 100$
Torsionsintervall	Momentintervall weicher Draht	Momentintervall harter Draht
25 Proz.	65 Proz.	70 Proz.
50 „	90 „	92 „
75 „	98 „	99 „

Nach Durchlaufen von 25 Proz. des Torsionsintervalls hatte der weiche Draht also erst 65 Proz., der harte schon 70 Proz. des Momentintervalls erreicht.

Torsionsintervall 120°.

$\Delta \tau \cdot 100$	$\Delta M \cdot 100$	$\Delta M \cdot 100$
Torsionsintervall	Momentintervall weicher Draht	Momentintervall harter Draht
16,7 Proz.	35 Proz.	37 Proz. †
33,3 „	65 „	66 „ †
50,0 „	82 „	83 „
66,7 „	92 „	93 „
83,3 „	97 „	98 „

Der Unterschied zwischen dem Verhalten des gehärteten und des weichen Drahtes ist bei Eisen nicht so deutlich als bei Nickel erkennbar. Dieser Unterschied wird auch nicht wie bei Nickel mit abnehmenden Torsionsintervallen immer deutlicher erkennbar — im Gegenteil: bei Eisen zeigt sich für das Torsionsintervall 80° in den auf ganze Prozente abgerundeten Werten kein Unterschied zwischen dem Verlauf des Moments im weichen und demjenigen im harten Draht:

Torsionsintervall 80°.

$\Delta \tau \cdot 100$	$\Delta M \cdot 100$	$\Delta M \cdot 100$
Torsionsintervall	Momentintervall weicher Draht	Momentintervall harter Draht
25 Proz.	39 Proz.	39 Proz.
50 „	71 „	71 „
75 „	90 „	90 „

Über die Abhängigkeit des Moments von der zirkularen Feldstärke ist berichtet Dissert. p. 103 u. 104.

Vergleich der Momentintervalle bei Nickel- und Eisendrähten.

Endlich sollen noch die an dem Nickeldraht von 1,5 mm Dicke erhaltenen Momentintervalle mit den bei gleicher Stromstärke (0,8 Amp.) bei aufsteigenden und absteigenden Torsionsintervallen an dem Eisendraht von 1,5 mm Dicke erhaltenen

Momentintervallen verglichen werden; die Querschnitte der beiden Drähte stimmten nicht überein und es sind in der folgenden Tabelle die an dem Eisendraht erhaltenen Werte des Momentintervalls durch Multiplikation mit 1,04 auf den Querschnitt des Nickeldrahtes reduziert.

Torsions- intervall	Momentintervall		Momentint. Ni
	Nickel	Eisen	Momentint. Fe
40°	1131	567	1,99
80°	1883	1563	1,20
120°	2139	2064	1,04
160°	2224	2277	1,00
240°	2221	2394	0,93
160°	2315	2388	0,97
120°	2351	2239	1,05
80°	2257	1748	1,29

Für kleine Torsionsintervalle übertrifft das Momentintervall in Nickel dasjenige in Eisen ganz erheblich; der Überschuß verschwindet mit wachsenden Torsionsintervallen. Für große Torsionsintervalle überwiegt das Momentintervall in Eisen dasjenige in Nickel, doch wird mit abnehmenden Torsionsintervallen wieder das Momentintervall in Nickel das größere. —

Prüfung der Theorie an den Beobachtungsdaten.

Es entsteht nun die Frage, inwiefern die erhaltenen Beobachtungsergebnisse zur Prüfung der Ansätze dienen können, die man zur theoretischen Behandlung der Wechselwirkung von Torsion und Magnetisierung gemacht hat. Offenbar können die bei großen Torsionsintervallen angestellten Versuchsreihen zur Prüfung der Grundlagen der Theorie nicht verwendet werden, solange die Kenntnis des Zusammenhanges von Deformation und Spannung nicht die erforderliche Ausdehnung auf das Gebiet der unelastischen Deformationen erfahren hat; selbst wenn man die Wechselwirkungen magnetisch-elastischer Art auch nach Überschreitung der Elastizitätsgrenze nur in ihrer Abhängigkeit von den Deformationen behandeln wollte, wäre zunächst die Abhängigkeit der Magnetisierungszahl von der Deformation bei reiner Längsdehnung oder Kompression bis in das Gebiet der dauernden Deformationen hinein experimentell

zu verfolgen, ehe man zur Verwertung der bei der Wechselwirkung von Torsion und Magnetisierung in großen Torsionsintervallen gewonnenen Resultate schreiten könnte. Immerhin lassen diese Resultate es vielleicht vorteilhaft erscheinen, in Zukunft die theoretische Behandlung dieser Wechselwirkungen nicht an die Deformationen sondern an die Spannungen als unabhängige Variabeln anzuknüpfen, da so der Übergang von der Behandlung elastischer zu derjenigen dauernder Deformationen erleichtert werden dürfte. Solange man die Betrachtung nur auf elastische Deformationen beschränkt, ist es offenbar gleichgültig, ob man die Deformationen oder die Spannungen der Rechnung zu Grunde legt; aber auch hier stehen der quantitativen Vergleichung der Resultate von Beobachtung und Rechnung große Schwierigkeiten entgegen, da die Magnetisierungszahl und die Zusatzkonstante, welche die Wirkung der Deformation auf die Magnetisierungszahl bestimmt, in ferromagnetischer Materie Funktionen der Feldstärke sind.

Immerhin wird man die Resultate der bisher vorhandenen theoretischen Behandlung¹⁾ der Wechselwirkung von Torsion und Magnetisierung in erster Annäherung der Diskussion der Beobachtungsergebnisse zugrunde legen dürfen.

Bezeichnen A, B, C die Komponenten der magnetischen Kraft R nach den Koordinatenachsen, α, β, γ die Komponenten der Magnetisierung μ nach den Koordinatenachsen, \mathfrak{f} die Magnetisierungszahl, $\mathfrak{f}^{(2)}$ die Zusatzkonstante, welche die Wirkung der Deformation auf die Magnetisierungszahl bestimmt, δ die Drehung zweier um die Längeneinheit voneinander entfernten Querschnitte des Versuchsdrahtes gegeneinander, r den halben Durchmesser des Versuchsdrahtes, so gilt für einen langen stromdurchflossenen Kreiszyylinder, dessen Achse wir in die Z -Achse gelegt denken, wenn wir innerhalb des Drahtes konstante Stromdichte $i/r^2\pi$ annehmen und von Änderungen der elektrischen Leitfähigkeiten durch die Deformation absehen:

$$\alpha = -y \cdot \frac{2i}{r^2} \mathfrak{f}, \quad \beta = +x \cdot \frac{2i}{r^2} \mathfrak{f},$$

$$\gamma = \mathfrak{f}^{(2)} \cdot \frac{i}{r^2} (x^2 + y^2) \cdot \delta;$$

1) W. Voigt, Compendium der theoretischen Physik, 2. p. 203. 1896.

dabei ist vorausgesetzt, daß die Rückleitung des zirkular magnetisierenden Stromes im Unendlichen oder in einem zu dem Versuchsdraht coaxialen Hohlzylinder stattfindet.¹⁾

Der Messung mittels des Magnetometers ist unmittelbar zugänglich das Gesamtmoment des Versuchsdrahtes nach der *Z*-Achse:

$$I = \iiint \gamma \cdot dx dy dz = \frac{1}{2} f^{(2)} i \cdot r^2 \pi l,$$

wobei *l* die Länge des Versuchsdrahtes bezeichnet; bei der Integration ist unberücksichtigt gelassen, daß der Ausdruck für γ streng nur für einen unendlich langen Kreiszylinder gültig ist.

Für konstantes $f^{(2)}$ ist also ceteris paribus das Moment dem Querschnitt des Drahtes proportional; aus der mangelhaften Übereinstimmung der Beobachtung mit dieser Regel (vergl. die Dissertation) wird man auf eine starke Veränderlichkeit von $f^{(2)}$ mit der Feldstärke selbst in schwachen Feldern (die allein bei der zirkularen Magnetisierung in Betracht kommen können) schließen dürfen, eine Annahme, die auch durch diejenigen Versuchsreihen bestätigt wird, in welchen unter übrigens gleichen Versuchsbedingungen mit verschiedenen zirkularen Feldstärken gearbeitet wurde. Sieht man von der offenkundigen Inkonstanz des $f^{(2)}$ ab, so würde sich für das Verhältnis der Konstante bei Nickel und derjenigen bei Eisen aus den innerhalb der Elastizitätsgrenze liegenden Versuchsreihen für die weichen Drähte ergeben:

$$\frac{f^{(2)} \text{ Ni}}{f^{(2)} \text{ Fe}} = -1,99,$$

für die harten Drähte:

$$\frac{f^{(2)} \text{ Ni}}{f^{(2)} \text{ Fe}} = -1,29,$$

(vergl. p. 81). Leider liegen zur Zeit noch keine anderweitigen Messungen der Konstanten $f^{(2)}$ bei kleinen Feldstärken im homogenen Felde vor (die hier angewandten Feldstärken betrugen für die Stromstärke 0,8 Amp. in der Oberfläche der Drähte von 1,5 mm Dicke 2,13 c.g.s.-Einheiten); doch geht aus obigen Zahlen mit Sicherheit hervor, daß auch in kleinen

1) Vergl. P. Drude, Physik des Äthers, p. 97 u. ff. 1894.

Feldstärken $|\mathfrak{f}^{(2)}\text{Ni}|$ größer ist als $|\mathfrak{f}^{(2)}\text{Fe}|$, nur ist der Unterschied zwischen beiden nicht so erheblich wie in großen Feldstärken.¹⁾ Das Vorzeichen von $\mathfrak{f}^{(2)}\text{Ni}$ bei kleinen Feldstärken stimmt überein mit dem in großen Feldstärken gefundenen; das Vorzeichen von $\mathfrak{f}^{(2)}\text{Fe}$ stimmt ebenfalls mit dem bei großen Feldstärken unterhalb des Villarischen kritischen Punktes gefundenen überein. Wäre $\mathfrak{f}^{(2)}$ als Funktion der Feldstärke R auch in kleinen Feldstärken genügend bekannt, so würde die Nachprüfung der hier vorliegenden Resultate keine Schwierigkeiten bieten; man erhält dann:

$$I = \iiint \gamma \, dx \, dy \, dz = \frac{2\pi i \cdot \delta \cdot l}{r^2} \int_0^r \varrho^3 \mathfrak{f}^{(2)}(R) \, d\varrho,$$

oder da R als Funktion von ϱ bekannt ist ($R = 2i\varrho/r^2$):

$$I = \frac{2\pi i \cdot \delta \cdot l}{r^2} \int_0^r \varrho^3 \mathfrak{f}^{(2)}(\varrho) \, d\varrho,$$

worin $\varrho^2 = x^2 + y^2$ gesetzt ist. Die Formel gestattet auch, unter Heranziehung derjenigen Versuchsreihen, die innerhalb des gleichen Torsionsintervalls bei verschiedenen Stromstärken angestellt wurden, den Verlauf der Funktion $\mathfrak{f}^{(2)}(R)$ zu diskutieren. Man hat für die Stromstärken i^1, i^2, \dots

$$\frac{I_1}{i_1} : \frac{I_2}{i_2} : \dots = \int_0^r \varrho^3 \mathfrak{f}^{(2)}\left(\frac{2i_1 \varrho}{r^2}\right) d\varrho : \int_0^r \varrho^3 \mathfrak{f}^{(2)}\left(\frac{2i_2 \varrho}{r^2}\right) d\varrho : \dots$$

Unter Rücksicht auf die Tabellen von p. 93 und 94 der Dissertation wird man also bei Nickel auf eine Abnahme von $\mathfrak{f}^{(2)}$ mit wachsender Feldstärke schließen dürfen — innerhalb der hier angewandten Feldstärken.

Ein näheres Eingehen auf die absoluten Werte der $\mathfrak{f}^{(2)}\text{Ni}$ und $\mathfrak{f}^{(2)}\text{Fe}$ wäre zwecklos, da die Resultate der Beobachtung sowohl für den weichen als auch für den gehärteten Draht einen von dem Torsionsintervall abhängigen Verlauf des Moments ergeben haben — ein Verhalten, das durch die Theorie bisher ebensowenig erklärt werden kann, als der eigentümliche Verlauf des Moments innerhalb eines jeden Torsionsintervalls.

1) Vergl. Winkelmann, Handbuch der Physik, Artikel „Magnetostriktion“ von Auerbach.

Zusammenfassung der Ergebnisse.

In stromdurchflossenen (zirkular magnetisierten) Nickel- und Eisendrähten erzeugt zyklisch variierende Torsion ein zyklisch variierendes longitudinales Moment; bei der Torsion zur Rechtsschraube entsteht in Nickeldrähten eine dem magnetisierenden Strome entgegengerichtete, bei der Torsion zur Linksschraube eine dem magnetisierenden Strome gleichgerichtete Magnetisierung. In Eisendrähten ist der Verlauf des Moments der entgegengesetzte als bei Nickeldrähten.

In kleinen Torsionsintervallen zeigt das Moment ein Zurückbleiben, in großen Torsionsintervallen — bei merklich unelastischen Deformationen — ein Voraneilen gegenüber dem Torsionswinkel.

Das Momentintervall wächst bei gleicher Stromstärke anfänglich rasch, nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze nur noch langsam mit dem Torsionsintervall und ist bei gleichem Torsionsintervall im torsionsharten Draht größer als im weichen.

Die Änderung des Moments mit dem Torsionswinkel ist bei kleinen Torsionsintervallen in der Nachbarschaft der Torsion Null stärker als in der Nähe der Grenzen des Torsionsintervalls; dieser Verlauf ist im gehärteten Draht mehr ausgeprägt als im weichen.

In großen Torsionsintervallen wird der größte Teil des Momentintervalls schon während der Torsion des Drahtes um einen Bruchteil des Torsionsintervalls durchlaufen — während der Torsion um den übrigen Bruchteil ändert sich das Moment nur noch wenig.

Der Verlauf des Moments innerhalb eines Torsionsintervalls hängt bei den angewandten kleinen Feldstärken qualitativ nicht merklich von der zirkularen Feldstärke ab; diese bestimmt die Größe des Momentintervalls, welches mit wachsender Feldstärke zunimmt, aber langsamer als diese.

Die von der Theorie geforderte Proportionalität des Moments (unter übrigens gleichen Versuchsbedingungen) mit dem Quadrat des Drahtdurchmessers bestätigt die Beobachtung nur mangelhaft.

Die Konstante $\mathfrak{f}^{(2)}$, welche die Wirkung der Deformation auf die Magnetisierungszahl bestimmt, erweist sich als Funktion der Feldstärke.

Benutzt man die Theorie in erster Annäherung zur Diskussion der Resultate der Beobachtung, so ergibt sich für weiche Drähte $\mathfrak{f}^{(2)} \text{Ni} / \mathfrak{f}^{(2)} \text{Fe} = -1,99$, für harte Drähte $= -1,29$.

Am Schlusse der Arbeit spreche ich Herrn Geheimrat Voigt für die Anregung zu dieser Untersuchung und sein dauerndes Interesse an den Fortschritten derselben meinen ehrerbietigsten Dank aus.

Ferner danke ich Herrn Prof. Kaufmann herzlich für die Förderung, die auch von seiner Seite meiner Arbeit zuteil geworden ist.

(Eingegangen 20. Januar 1904.)
