

die Punkte sich z. T. ziemlich beträchtlich von der Ausgleichslinie entfernen, so daß es nicht schwer fällt, Materialien aus der Zusammenstellung herauszufinden, die im Gegensatz zu dieser Regel trotz hoher Zahl  $\eta$  größeres  $\mu_{max}$  haben, als andere Stoffe mit geringerer Steinmetzscher Zahl  $\eta$ .

Daraus folgt, daß ein Material bezüglich seines magnetischen Verhaltens nicht etwa durch die Zahl  $\eta$  allein gekennzeichnet wird, sondern daß zu seiner genauen Kenntnis die ganze  $\xi$ ,  $\mathfrak{B}$ -Linie erforderlich ist, aus der sich ja die Werte für  $\eta$ ,  $\xi_c$ ,  $\mathfrak{B}_r$ ,  $\mu_{max}$  ergeben.

Schaubild 475 versinnlicht im unteren Teil die Beziehung zwischen zurückbleibendem Magnetismus  $\mathfrak{B}_r$  und der Steinmetzschers Zahl  $\eta$ . Die Punkte liegen ziemlich regellos durcheinander, so daß aus dem vorhandenen Versuchsmaterial kein Gesetz erkannt werden kann. Sämtliche Werte von  $\mathfrak{B}_r$  liegen zwischen den Grenzen von etwa 13000 und 7000 CGS, soweit schmiedbare Eisenlegierungen in Betracht kommen. Selbst die abgeschreckten Kohlenstoffstähle haben innerhalb dieser Grenzen liegende Werte von  $\mathfrak{B}_r$ . Der zurückbleibende Magnetismus der untersuchten Gußeisensorten liegt in den Grenzen 4000 bis 6000 (geglühte und nicht geglühte Proben).

Die Lage der den Eisensorten Nr. 1, 2 und 3 (Analysen s. oben) entsprechenden Punkte zeigt, daß

mit steigendem Kohlenstoffgehalt schwaches Ansteigen des zurückbleibenden Magnetismus nebenher geht.

In Abb. 475 oben ist noch der Zusammenhang zwischen dem spezifischen elektrischen Leitwiderstand  $\omega$  (Abs. 400) in Ohm bezogen auf m und qmm und der Zahl  $\eta$  veranschaulicht. Die vorliegenden Versuchswerte lassen nur einen Schluß zu für Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit geringen Kohlenstoffgehalten. Hier steigt mit wachsendem  $\eta$  auch der Leitwiderstand  $\omega$  an; er liegt innerhalb der Grenzen 0,11 und 0,22. Wesentlich größer sind die Leitwiderstände der untersuchten Gußeisensorten; sie bewegen sich innerhalb der Grenzen 0,8 und 1,0.

Von besonderem Interesse ist der durch einen Pfeil bezeichnete, nicht ausgefüllte Kreis. Er entspricht einer kohlenstoffarmen Legierung des Eisens mit etwa 3% Silizium. Ihr Leitwiderstand beträgt 0,425 Ohm und weicht stark ab von dem Widerstand der siliziumarmen übrigen Legierungen.

Die Größen  $\eta$ ,  $\mu_{max}$ ,  $\xi_c$  und  $\mathfrak{B}_r$  haben bei den siliziumreichen Legierungen nahezu dieselben Werte, wie die siliziumarmen mit ungefähr gleichem Kohlenstoffgehalt, wie die Lage der mit Kreis und Pfeil und der Zahl 4 bezeichneten Punkte in den Abb. 473 bis 475 dartun. Daraus folgt, daß

Siliziumzusatz bis 4% die magnetischen Eigenschaften der kohlenstoffarmen schmiedbaren Eisensorten nicht verschlechtert. Durch den Siliziumzusatz wird aber die elektrische Leitfähigkeit stark verringert, wodurch der Energieverlust durch Wirbelströme kräftig vermindert wird.

Bleche aus Siliziumlegierung, sogenannte legierte Bleche, bilden demnach ein wertvolles Baumaterial für Transformatorkerne und Dynamoanker.

## C. Abhängigkeit der magnetischen Eigenschaften von der Temperatur.

390. Bei den ferromagnetischen Stoffen gibt es ein Temperaturgrenzgebiet, oberhalb dessen sie sehr kleine Werte der magnetischen Durchlässigkeit  $\mu$  aufweisen und als paramagnetisch zu betrachten sind. Unterhalb dieses Grenzgebietes haben dagegen diese Stoffe hohe Werte von  $\mu$ , also die Eigenschaften der ferromagnetischen Körper. Man nennt dieses Grenzgebiet der Temperatur, das meist



nicht einer einzigen Temperatur, sondern einem größeren oder kleineren Temperaturbereich entspricht, die magnetische Umwandlungstemperatur.

Sehr kohlenstoffarmes Eisen ist z. B. oberhalb  $780\text{ C}^\circ$  paramagnetisch. Bei der Abkühlung setzt bei  $780\text{ C}^\circ$  unter dem Einfluß eines magnetischen Feldes plötzlich starker Ferromagnetismus ein, der unterhalb  $780\text{ C}^\circ$  noch weiter anwächst. Die magnetische Umwandlung beginnt sonach bei  $780\text{ C}^\circ$ , setzt sich aber unterhalb dieser Temperatur fort. Der Beginn der magnetischen Umwandlung bei  $780\text{ C}^\circ$  während der Abkühlung ist mit Wärmeentbindung verknüpft, die sich mit Hilfe der  $z, t$ - und der  $\Delta z, t$ -Linien deutlich feststellen läßt (146 bis 161).

Abb. 48 gibt ein  $c, t$ -Bild, das dem der Eisen-Kohlenstoff-Legierungen ähnlich ist. Hier ist der Gehalt an Kohlenstoff als Abszisse zu denken. Der Punkt  $J_2 = 780\text{ C}^\circ$  entspricht für reines Eisen dem Beginn der magnetischen Umwandlung bei der Abkühlung und der gleichzeitigen Wärmetbindung. Tritt zum Eisen Kohlenstoff hinzu, so setzt die Umwandlung zunächst unverändert bei der gleichen Temperatur ein, so daß die diese Umwandlung darstellende Linie  $J_2 H''$  wagrecht verläuft bis zum Schnittpunkt  $H''$  mit der Umwandlungslinie  $J_1 H'' O''$ . Bei höheren Kohlenstoffgehalten setzt der Beginn der magnetischen Umwandlung bei den Punkten der Linie  $H'' O'' R$  ein. (84 und 85.)

a) Nach der Deutung von Osmond wandelt sich während der Abkühlung das reine, kohlenstofffreie Eisen bei  $J_1$  aus der  $\gamma$ -Allotropie in die  $\beta$ -Form und diese wiederum bei  $J_2$  aus der  $\beta$ - in die  $\alpha$ -Form um (84, 85). Die Allotropieen  $\gamma$  und  $\beta$  sind paramagnetisch, nur die  $\alpha$ -Allotropie ist ferromagnetisch.

Bei Anwendung der Phasenregel in der Form, wie sie in Abs. 28 besprochen wurde, müßte die Umwandlung bei  $J_2$  vom Freiheitsgrad 1 sein, denn die Zahl  $n$  der Stoffe ist 1 (der einzige Stoff ist Eisen) und die Zahl der Phasen  $r = 2$  ( $\beta$ - und  $\alpha$ -Eisen nebeneinander). Der Freiheitsgrad  $f$  ist dann  $f = n + 2 - r = 1 + 2 - 2 = 1$ . Nach Festlegung des Druckes  $p$  auf 1 wird die eine vorhandene Freiheit aufgebraucht und  $f = 0$ . Der Übergang  $\beta \rightarrow \alpha$  müßte sich also bei unveränderlicher Temperatur vollziehen. Erst nach vollendeter Umwandlung des ganzen  $\beta$ -Eisens in  $\alpha$ -Eisen könnte die Temperatur wieder sinken. Wenn nun die  $\alpha$ -Phase die einzige ferromagnetische ist, so müßte auch bei der Temperatur  $J_2 = 780\text{ C}^\circ$  der Magnetismus des Eisens von dem niederen Wert oberhalb  $780\text{ C}^\circ$  auf den hohen Wert steigen, der dem  $\alpha$ -Eisen zukommt. Wie aber die Schaulinien 476 (nach P. Curie, *L<sub>8</sub> 17*) erkennen lassen, steigt der Wert  $\mathfrak{S}'$  der Stärke der Magnetisierung (bezogen auf die Einheit der Masse) während der Abkühlung bei  $J_2 = 780\text{ C}^\circ$  plötzlich hoch<sup>1)</sup>, erreicht aber erst ziemlich tief unterhalb  $J_2$  seinen Höchstwert. Die Temperatur, bei der der Höchstwert von  $\mathfrak{S}'$  erreicht wird, sinkt mit steigender Feldstärke  $\mathfrak{H}$  und scheint bei sehr starken Feldern bis zu gewöhnlicher Temperatur herabgedrückt zu werden.

Dies deutet darauf hin, daß die magnetische Umwandlung  $\beta \rightarrow \alpha$  zwar bei der Temperatur  $J_2$  einsetzt, sich aber je nach der Stärke des Feldes  $\mathfrak{H}$  bis zu mehr oder weniger tiefen Temperaturen fortsetzt. Es müßten somit auch bis zu diesen Temperaturen herab noch gewisse Mengen  $\beta$ -Eisen neben dem neugebildeten  $\alpha$ -Eisen vorhanden sein. Die Umwandlung müßte sich allmählich vollziehen, entgegen der Anforderung der Phasenregel, nach der die Umwandlung bei einer Temperatur vollendet sein muß.

Der Widerspruch könnte dadurch behoben werden, daß man annimmt, die Umwandlung  $\beta \rightarrow \alpha$  leide an starker Verzögerung. Es gibt ja zahlreiche Umwandlungen in festen Körpern, die so träge verlaufen, daß man die oberhalb des Umwandlungspunktes beständige Phase unterhalb dieses Punktes längere Zeit im metastabilen Zustand erhalten kann, das endgültige Gleichgewicht stellt sich nur langsam ein (z. B. die Umwandlung von monoklinem Schwefel in rhombischen).

Wenn die Annahme bez. des trägen Verlaufs der Umwandlung berechtigt wäre, so müßte bei langsamer Abkühlung der Übergang  $\beta \rightarrow \alpha$  bei einer bestimmten unterhalb  $J_2$  gelegenen Temperatur weiter fortgeschritten sein, als bei rascherer Abkühlung. Je nach der Abkühlungsgeschwindigkeit müßte dann der bei einer bestimmten Temperatur  $t$  gebildete Betrag an ferromagnetischem  $\alpha$ -Eisen und mithin auch die Stärke des Magnetismus  $\mathfrak{S}'$  veränderlich sein. Bei genügend schneller Abkühlung von Temperaturen oberhalb  $J_2 = 780\text{ C}^\circ$  müßte wegen des voraus-

<sup>1)</sup> Im Schaubild liegt  $J_2$  bei etwa  $760\text{ C}^\circ$ ; nach neueren Messungen liegt der Punkt bei etwa  $780\text{ C}^\circ$ . Als Abszissen sind die Temperaturen verwendet, als Ordinaten die Stärke  $\mathfrak{S}'$  der Magnetisierung des Eisens unter der Einwirkung der den Linien beige-schriebenen Feldstärken  $\mathfrak{H}$  bei Abkühlung von Temperaturen über  $800\text{ C}^\circ$ .



gesetzten trägen Verlaufs der Umwandlung  $\beta \rightarrow \alpha$  die Bildung von ferromagnetischem  $\alpha$ -Eisen ganz unterdrückt werden können, so daß das Eisen auch bei gewöhnlicher Temperatur vorwiegend aus paramagnetischem Eisen aufgebaut wäre.

Hier gelangt man aber in einen Widerspruch mit dem Versuch. Es ist bisher noch nicht gelungen, selbst durch die schroffste Abschreckung sehr kohlenstoffarmes Eisen bei gewöhnlicher Temperatur paramagnetisch zu erhalten; es ist immer stark ferromagnetisch. Ja es übt sogar die Abkühlungsgeschwindigkeit nicht einmal einen wesentlichen Einfluß auf die Stärke des Magnetismus  $\mathfrak{J}'$  unter einer gegebenen Feldstärke aus. Daraus folgt, daß die Annahme, die Umwandlung  $\beta \rightarrow \alpha$  verlaufe träge, fallen gelassen werden muß. Die Umwandlung muß sogar mit großer Schnelligkeit vor sich gehen.

Es bliebe somit ein Widerspruch zwischen der Osmondschen Deutung und den Anforderungen der Phasenregel bestehen. Dieser Widerspruch kann aber sehr wohl nur ein scheinbarer sein. Die Phasenregel  $f = n + 2 - r$  ist ausdrücklich geknüpft an die Voraussetzung, daß von der Einwirkung

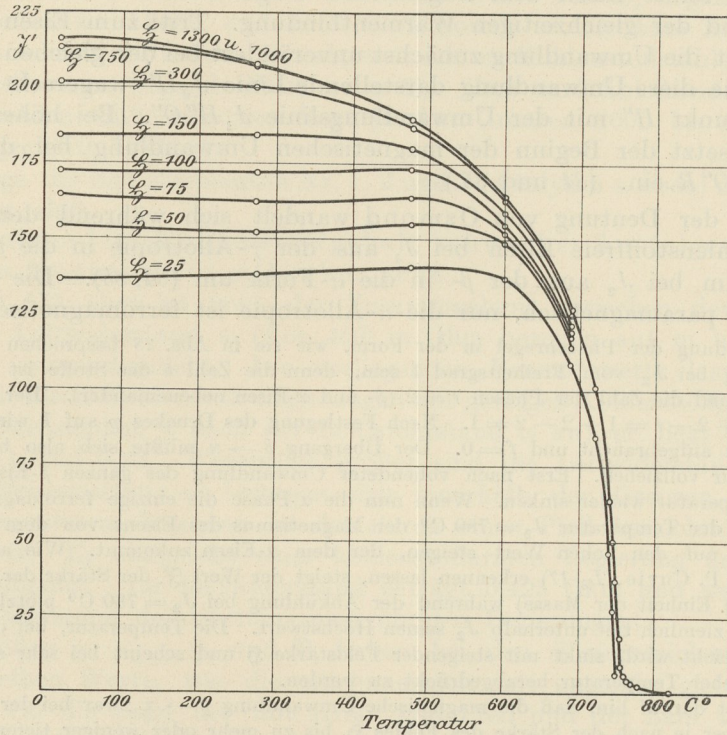


Abb. 476. Magnetische Umwandlung in Eisen mit 0,04 Prozent Kohlenstoff.

(Einen Tag lang in Eisenpulver bei 1200 C° geglüht.) Nach P. Curie.

$\mathfrak{H}$ : Feldstärke.  $\mathfrak{J}'$ : Stärke der Magnetisierung, bezogen auf die Einheit der Masse.

osmotischer, elektrischer und magnetischer Kräfte abgesehen werden darf (26). Dies ist aber im vorliegenden Falle nicht ohne weiteres zulässig. Es ist sogar sehr wahrscheinlich, daß die hinzutretende magnetische Energie die Phasenregel so ändert, daß der Freiheitsgrad um eine Einheit vermehrt wird. Man würde alsdann im vorliegenden Falle bei  $n = 1$  und  $r = 2$  den Freiheitsgrad  $f = 2$  haben können. Der obige Widerspruch wäre dann gelöst; das Gleichgewicht zwischen den beiden Phasen  $\beta$  und  $\alpha$  kann dann bei verschiedenen Temperaturen bestehen. Die Umwandlung von  $\beta$  in  $\alpha$  vollzieht sich innerhalb eines größeren Temperaturbereichs.

b) Es ist nun aber noch mit einer anderen Möglichkeit der Deutung zu rechnen. Bisher ist nicht zweifelsfrei festgestellt, ob bei der Temperatur  $J_2$  überhaupt zwei Phasen im Gleichgewicht stehen, und daß unterhalb dieser Temperatur eine andere Phase auftritt, als oberhalb derselben. Das Kleingefüge läßt keine sicheren Schlüsse zu. Man kann deswegen auch die Sachlage dahin deuten, daß die Umwandlung  $\beta \rightarrow \alpha$  in einer einzigen Phase vor sich geht. Über die Energieänderungen, die sich in einer einzigen Phase abspielen, sagt die Phasenlehre nichts aus. So kann z. B. ein explosives Gemisch der beiden Gase  $\text{CO} + \text{O}$ , das wegen der großen Mischbarkeit der Gase eine einzige Phase darstellt, bei Erwärmung auf eine bestimmte Temperatur zur Explosion gebracht werden. Es vollzieht sich dann unter Abgabe großer Energiemengen die chemische Um-



wandlung in  $\text{CO}_2$ , ohne daß eine neue Phase auftritt. Der ganze Vorgang spielt sich in einem Einphasensystem ab.

In analoger Weise könnte sich auch bei der Abkühlung des Eisens von einer bestimmten Temperatur  $J_2$  abwärts innerhalb der einen Phase des Eisens unter Änderung des Energieinhaltes und demzufolge unter Wärmeentbindung der Übergang aus dem paramagnetischen Eisen in das ferromagnetische vollziehen, ohne daß eine neue Phase auftritt. Durch die theoretischen Erörterungen von Pierre Weiß (*L<sub>8</sub> 19*) ist die Möglichkeit eines solchen Vorganges sehr wahrscheinlich geworden.

Jedenfalls ist durch die Erörterungen von Weiß gezeigt worden, daß man den Übergang eines Stoffes aus einer paramagnetischen Erscheinungsform in eine ferromagnetische nicht ohne weiteres als Kennzeichen für den Übergang einer Phase in eine andere auffassen darf, sondern daß sich ein solcher Übergang auch innerhalb einer Phase vollziehen kann.

Falls die obige Auffassung von der magnetischen Umwandlung innerhalb einer Phase zutrifft, so würden nur noch zwei allotropische Zustände des Eisens vorhanden sein, das paramagnetische  $\gamma$ -Eisen, das oberhalb des Umwandlungspunktes  $J_1 = 900 \text{ C}^\circ$  beständig ist, und eine zweite Allotropie des Eisens  $B$ , die oberhalb  $J_2 = 780 \text{ C}^\circ$  paramagnetisch, unterhalb dieser Temperatur ferrromagnetisch ist.

Diese Auffassung hat vieles für sich. Trotzdem sollen in diesem Buche die Ausdrücke  $\beta$ - und  $\alpha$ -Eisen im Osmondschen Sinne weiter gebraucht werden, weil sie Bürgerrecht erworben haben. Der Unterschied in den Auffassungen a) und b) ist ja nur formell; welche Form vorzuziehen ist, bleibt vorläufig unentschieden. Eine Änderung in der Bezeichnungsweise würde deswegen im gegnerwärtigen Zeitpunkt nur Verwirrung, aber keinen Nutzen stiften.

Für die praktische Materialienkunde hat die Frage, welcher der beiden Auffassungen der Vorzug zukommt, nur ganz untergeordnete Bedeutung. Ob nun nach a)  $\alpha$ - und  $\beta$ -Eisen verschiedene, oder nach b) eine und dieselbe Phase vor und nach der magnetischen Umwandlung sind, auf alle Fälle ist wegen der starken Änderung der Energie bei dem Übergang aus dem para- in den ferromagnetischen Zustand auch eine wesentliche Änderung der übrigen physikalischen Eigenschaften zu erwarten. Ich würde die Streitfrage gar nicht angeschnitten haben, wenn ich nicht wüßte, daß sie in der nächsten Zeit in der Literatur in den Vordergrund treten wird. Da nun solche Fragen in der Literatur manchmal so behandelt werden, als ob die früheren Lehren gerade noch gut für den Papierkorb seien, so will ich den Leser wenigstens darauf aufmerksam gemacht haben, worum es sich eigentlich handelt.

Auch die übrigen ferromagnetischen Stoffe, wie Nickel, Kobalt, Magnetit usw., zeigen eine magnetische Umwandlung, d. h. sie sind oberhalb einer Grenztemperatur para-, darunter ferromagnetisch. Für Nickel liegt diese Temperatur bei etwa  $350 \text{ C}^\circ$  (Kotaro Honda, *L<sub>8</sub> 20*) und für Kobalt bei etwa  $1100 \text{ C}^\circ$ . Der natürlich vorkommende Magnetisenstein (Magnetit) verliert bei der Erhitzung seinen Ferromagnetismus bei  $557 \text{ C}^\circ$  nach Barton und Williams (*L<sub>8</sub> 22*) und bei  $535 \text{ C}^\circ$  nach P. Curie (*L<sub>8</sub> 17*).

Die mit der magnetischen Umwandlung während der Abkühlung verknüpfte Wärmeentbindung ist bei Nickel und Kobalt wesentlich schwächer als bei Eisen. Baikow (*L<sub>8</sub> 23*) fand die Wärmeentbindung des Nickels bei  $360 \text{ C}^\circ$ , also in naher Übereinstimmung mit dem obengenannten magnetischen Umwandlungspunkt. Dagegen stimmt die von Shukoff (*L<sub>8</sub> 24*) für Kobalt angegebene Wärmeentbindung bei  $985 \text{ C}^\circ$  mit der von Honda gefundenen magnetischen Umwandlungstemperatur von  $1100 \text{ C}^\circ$  nicht genügend überein. Hierüber ist noch Aufklärung zu schaffen.

**391.** Die Temperatur der magnetischen Umwandlung  $t_u$  ist bei kohlenstoffarmem, sehr reinem Eisen bei der Erhitzung fast dieselbe, wie bei der Abkühlung. Zeichnet man  $\mathfrak{B}$  oder  $\mathfrak{H}$  für eine bestimmte Feldstärke  $\mathfrak{S}$  in Abhängigkeit von der Temperatur auf (ähnlich wie in Abb. 476), so decken sich die bei der Abkühlung und die bei der Erhitzung gewonnenen Schaulinien fast vollständig (Curie, *L<sub>8</sub> 17*).

Bei manchen Legierungen des Eisens dagegen liegt die Umwandlungstemperatur  $t_u$  bei der Erhitzung höher als bei der Abkühlung. Bei manchen Legierungen wird der Abstand der beiden Temperaturen sogar sehr beträchtlich. Man bezeichnet die Erscheinung als Temperaturhysteresis. Ein anschauliches Beispiel hierfür bietet die Abb. 477. Sie ist von Hopkinson (*L<sub>8</sub> 25, 26, 4*) entlehnt. Die untersuchte Eisen-Nickel-Legierung enthält  $4,7\%$  Nickel neben  $0,22\%$  Kohlen-



stoff. Die Magnetisierung wurde bei der unveränderlichen Feldstärke von  $\mathcal{H} = 0,12$  vorgenommen. Die Pfeile geben an, ob die Messung der Induktion  $\mathcal{B}$  bei steigender oder bei sinkender Temperatur erfolgte. Bei der Erhitzung verschwand der Magnetismus etwa bei  $800\text{ C}^\circ$  und erschien bei der Abkühlung erst bei etwa  $600$  bis  $650\text{ C}^\circ$  wieder.

Bei noch höheren Nickelgehalten werden die beiden Umwandlungspunkte für Erhitzung und Abkühlung noch weiter auseinandergerückt. Die Temperatur der

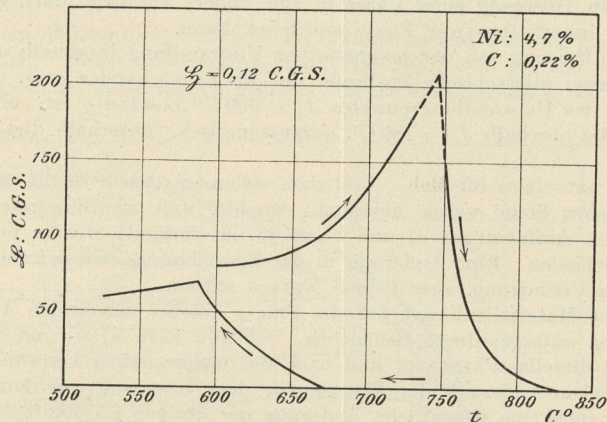


Abb. 477. Temperaturhysterisis bei Nickelstahl.  
(Nach Hopkinson.)

Umwandlung bei der Abkühlung kann dadurch sogar bis unterhalb der Zimmerwärme herabgedrückt werden; Hopkinson ( $L_8$  26) beschreibt z. B. eine Legierung des Eisens mit 25% Nickel, die bei der Erwärmung den Ferromagnetismus bei  $580\text{ C}^\circ$  verlor und bei der Abkühlung erst einige Grad unter Null zurückgewann. Die Umwandlung bei der Erhitzung und bei der Abkühlung liegt hier also um  $600\text{ C}^\circ$  auseinander.

**392.** Den Hysterisisverlust kann man sich dadurch entstanden denken, daß sich der Einstellung der einzelnen magnetischen Teilchen (Elementarmagnete) eines Stoffes in die Richtung des äußeren magnetischen Feldes ein Widerstand entgegengesetzt, der überwunden werden muß. Es ist wohl anzunehmen, daß dieser Widerstand mit der inneren Reibung der kleinsten Teilchen des zu magnetisierenden Stoffes in einem gewissen Zusammenhange steht (381). Im allgemeinen nimmt nun aber diese Reibung mit steigender Temperatur ab. Es wäre sonach wohl zu erwarten, daß das Eisen bei höheren Wärmegraden, die natürlich unterhalb der magnetischen Umwandlungstemperatur liegen müssen, der Magnetisierung geringeren Widerstand entgegengesetzt, daß also die Hysterisis ab- und die unter der Einwirkung des magnetischen Feldes bei der höheren Temperatur erzeugte Induktion zunimmt. Diese letztere Erscheinung ist bereits von Gore ( $L_8$  27) erkannt worden.

Die Abnahme der Hysterisis während der Magnetisierung bei höheren Temperaturen ist ersichtlich aus Schaubild 478, das einer Arbeit von Morris ( $L_8$  28) entlehnt ist. Die Versuche wurden mit einem Eisenblech für Transformatoren von  $0,35\text{ mm}$  Dicke angestellt. Das Eisen war sehr arm an Fremdstoffen. Es wurde in drei verschiedenen Zuständen der Vorbehandlung untersucht: 1. im ursprünglichen Zustand, 2. nach 6stündigem Erhitzen bei  $840\text{ C}^\circ$  und langsamer Abkühlung, und 3. nach Erhitzung auf  $1150\text{ C}^\circ$  und ebenfalls langsamer Abkühlung. Die den drei Behandlungszuständen entsprechenden Schaulinien sind in der Abbildung mit 1, 2 und 3 bezeichnet. Die Temperatur, bei der die Magne-



tisierung vorgenommen wurde, ist als Abszisse, die dabei beobachtete Energievergeudung durch Hysteresis als Ordinate aufgezeichnet. Bei der Versuchsreihe a) beobachtete man die Energievergeudung  $E$  bei je einem magnetischen Kreisvorgang innerhalb der Grenzen der Feldstärke  $\xi = \pm 6,83$  CGS. Bei der Versuchsreihe b) erfolgte schwächere Magnetisierung. Der Kreisvorgang wurde innerhalb der Grenzen für die Induktion  $\mathfrak{B} = \pm 4550$  CGS vorgenommen.

In allen Fällen läßt die Abb. 478 erkennen, daß mit steigender Temperatur der Magnetisierung durch Energieverlust durch Hysteresis abnimmt.

**393.** Bei Dauermagneten aus magnetisch harten Materialien (gehärteten Kohlenstoffstählen oder Spezialstählen) wird der hohe Wert des zurückbleibenden Magnetismus und der Rückhaltkraft künstlich dadurch erreicht, daß man durch Abschrecken der Stähle von Temperaturen oberhalb  $700\text{ C}^\circ$  die innere Reibung erhöht, so daß nach Aufhören der magnetisierenden Kraft dieser Widerstand der Reibung ausreicht, um einen großen Teil des induzierten Magnetismus festzuhalten. Dieser Rest des induzierten Magnetismus (der zurückbleibende Magnetismus) strebt entgegen der Reibung einem niedrigeren Werte zu. Mit der Zeit wird deswegen der zurückbleibende Magnetismus kleiner und nähert sich asymptotisch einem Grenzwert. In der Abb. 484 sind z. B. in den Schaulinien 1, 1' sowie 2 und 2' relative Vergleichswerte für den zurückbleibenden Magnetismus  $\mathfrak{B}_r$ , abgeschreckter Wolframstähle in Abhängigkeit von dem Gehalt an Wolfram gezeichnet. Die oberen Linien 1 und 2 geben den gemessenen Vergleichswert des zurückbleibenden Magnetismus zu einer bestimmten Zeit nach der Abschreckung und Magnetisierung an. Die Linien 1' und 2', die unterhalb 1 und 2 verlaufen, geben die entsprechenden Werte nach Verlauf von acht Tagen. Der zurückbleibende Magnetismus ist sonach während dieser Zeit um einen merkbaren Betrag (zum Teil mehrere Prozent) gesunken. Man nennt diesen Vorgang das Altern der Magnete.

Für Dauermagnete, die z. B. in elektrischen Meßinstrumenten unveränderliche magnetische Felder liefern sollen, ist die mit dem Altern verbundene Änderung des Feldes ein Übelstand, den man auf das geringste Maß zurückführen muß.

Für Dauermagnete, die z. B. in elektrischen Meßinstrumenten unveränderliche magnetische Felder liefern sollen, ist die mit dem Altern verbundene Änderung des Feldes ein Übelstand, den man auf das geringste Maß zurückführen muß.

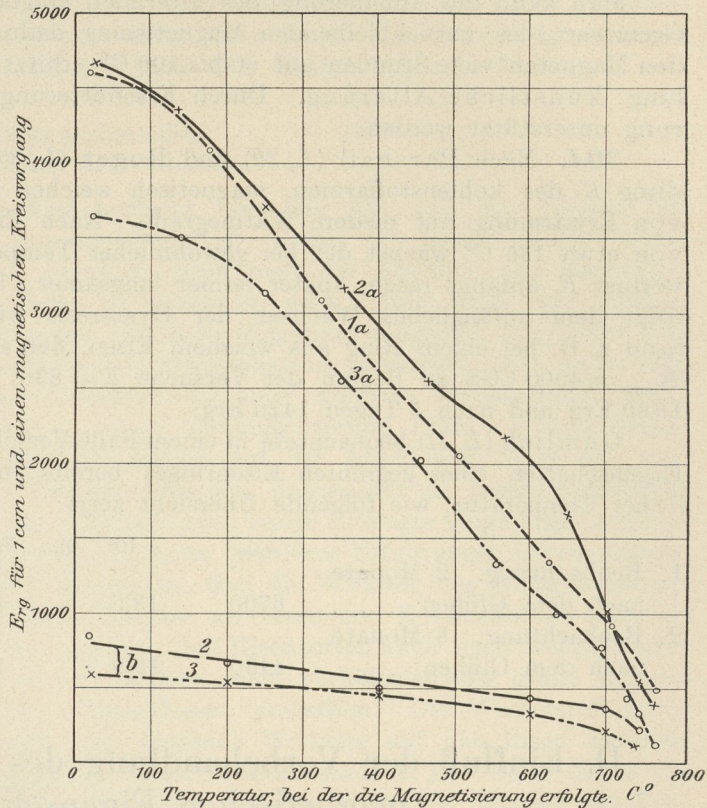


Abb. 478. Abhängigkeit der Hysteresis von der Temperatur.

(Nach Morris.)

Sehr reines Transformatoreisen. Feinblech 0,35 mm dick.

- Vorbehandlung:   
 { 1. Ursprünglicher Zustand.   
 { 2. 6 Stunden bei  $840\text{ C}^\circ$  gegläht, langsam abgekühlt.   
 { 3. Bis  $1150\text{ C}^\circ$  erhitzt, dann langsam abgekühlt.

- a) Magnetisierung innerhalb der Grenzen  $\xi = \pm 6,83$  CGS.   
 b) Desgl. innerhalb der Grenzen  $\mathfrak{B} = \pm 4550$  CGS.



Man verwendet daher die Magnete nicht sofort, sondern überläßt sie während längerer Zeit der freiwilligen Alterung.

Man kann die Annäherung des alternden Magneten an den asymptotischen Grenzwert des zurückbleibenden Magnetismus dadurch beschleunigen, daß man den Magneten viele Stunden auf 90 bis 100 C° erhitzt. Man nennt diese Behandlung: künstliche Alterung. Durch Erschütterungen kann die künstliche Alterung unterstützt werden.

394. Nach Parshall ( $L_8$  29) und Roget ( $L_8$  30) wächst die Energievergeudung  $E$  des kohlenstoffarmen, magnetisch weichen Eisens mit der Zeit infolge von Erwärmung auf niedere Wärmegrade. Nach Erhitzen bis zu Wärmegraden von etwa 135 C° wächst der bei gewöhnlicher Temperatur gemessene Hysteresisverlust  $E$  anfangs rasch, später immer langsamer; bei Temperaturen bis 260 C° folgt dem anfänglichen Wachsen der Hysteresis wiederum ein Abfall. Roget fand z. B. bei einem Ring aus weichem Eisen, der auf 200 C° erhitzt wurde, bei  $\mathfrak{B}_{max} = 4000$  CGS zu Beginn der Versuche  $E = 830$ , nach 19stündiger Erhitzung 1580 Erg und nach 5 Tagen 1420 Erg.

Gumlich ( $L_8$  11) beobachtete in einem Falle Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften eines geglühten Eisenringes bereits infolge Lagerung bei gewöhnlicher Temperatur, wie folgende Übersicht zeigt:

	$\mu_{max}$	$\eta \cdot 10^4$	$\mathfrak{B}_{max}$ für $\mathfrak{H}_{max} = 130$	$\mathfrak{H}_c$	$\mathfrak{B}_r$
1. Beobachtung. 2 Monate nach dem Glühen . . .	6700	13,5	17 810	0,82	13 680
2. Beobachtung. 8 Monate nach dem Glühen . . .	4450	13,9	17 710	0,88	10 280

## D. Einfluß der Vorbehandlung des Materials auf die magnetischen Eigenschaften.

395. Kaltrecken (293) macht das Eisen magnetisch härter, d. h. vermehrt  $E$ ,  $\mathfrak{H}_c$ ,  $\mathfrak{B}_r$  und vermindert  $\mu$ . Ewing fand folgende Zahlen bei einem Draht aus kohlenstoffarmem Eisen, der um 10% seiner Länge kaltgestreckt wurde:

	$\mu_{max}$ bei $\mathfrak{H}$	$\mathfrak{H}_c$
vor dem Kaltstrecken	3080	2,6
nach „ „	670	11,0
		4,5

Da beim Auf- und Zurollen von Blechtafeln, bei der Verladung und beim Transport durch unvorsichtige Verletzungen oder Drücke sehr leicht unbeabsichtigtes örtliches Kaltrecken eintreten kann, so muß man Dynamobleche vor solchen Einwirkungen sorgfältig schützen, wenn man die magnetischen Eigenschaften nicht verschlechtern will ( $L_8$  11). Auch beim Herausschneiden von Probestreifen und -ringen aus den Blechtafeln zum Zweck der Probenahme für die magnetische Prüfung kann örtliches Kaltrecken mit seinen Folgeerscheinungen eintreten, und zwar je nach dem Grade der Vorsicht, mit der diese Arbeit ausgeführt wird, in stärkerem oder schwächerem Maße (Gumlich,  $L_8$  11).

Inwieweit Reckspannungen (301 bis 307) die magnetischen Eigenschaften beeinflussen, ist noch nicht festgestellt.

Da, wie früher erwähnt (314), auch beim Warmrecken, je nach der Endtemperatur, bei der das Recken vor sich ging, ähnliche, wenn auch schwächere Wirkungen wie beim Kaltrecken im Material zurückbleiben und die magnetischen Eigenschaften verschlechtern können, so ist es erklärlich, daß Glühen in der Regel die magnetischen Eigenschaften gegenüber denen des warmgerekten (geschmie-