

ist auch nach dem Abschrecken noch ausgeprägt, so daß die Körnung im Bruch der abgeschreckten Stahlproben um so gröber ausfällt, je stärker der vorausgegangene Grad der Überhitzung war. In der Schaulinie für Kugeldruckhärte in der Mitte der Abb. 480 sind Angaben über die Größe des Bruchkorns gemacht. Es bedeutet: *gg* sehr grobkörnig, *g* grobkörnig, *k* körnig, *f* feinkörnig, *sf* sehr feinkörnig und *ff* äußerst feinkörnig. Man erkennt, daß längs der Linie 1 (möglichst kurze Dauer *z* der Erhitzung bei den Temperaturen *t*) das Korn des zwischen 900 und 1000 C° abgeschreckten Stahles am feinsten ist (*ff*). Bei weiterer Steigerung der Temperatur *t* macht sich trotz der kurzen Erhitzungsdauer *z* die Wirkung des Überhitzens bereits schwach geltend; das Korn ist nur noch als *sf* zu bezeichnen. Viel deutlicher treten die Wirkungen des Erhitzens bei der Linie 2 zutage, für welche die Dauer *z* der Erhitzung 10 Minuten betrug. So feine Körnung wie bei der Behandlungsart 1 ist hierbei überhaupt nicht zu erzielen. Das feinste Korn kann nur mit *f* bezeichnet werden und entspricht der Abschreckhitze von 900 bis 950 C°. Bei höheren Abschreckhitzen wird das Korn gröber und bei der Abschreckhitze von 1200 C° ist es bereits sehr grob *gg*. Der Einfluß der Überhitzung macht sich in der Kugeldruckhärte und auch, wie die Abweichung der Linien 1 und 2 der Schaulinie \mathfrak{B} , zeigt, in dem Maß des zurückbleibenden Magnetismus geltend.

Will man den höchsten Grad des zurückbleibenden Magnetismus bei dem vorliegenden Stahl erzielen, so ist die Abschrecktemperatur 900 bis 950 C° zu wählen. Der Stahl ist nur bis zu dieser Temperatur zu erhitzen, jedes längere Verweilen bei dieser Temperatur vermindert den zurückbleibenden Magnetismus infolge der Überhitzung.

Die starke Steigerung des zurückbleibenden Magnetismus durch geeignete Abschreckung, wie sie sich in Abb. 480 kundgibt, ebenso die Steigerung der magnetischen Rückhaltskraft ist der Grund, warum man zur Herstellung von Dauermagneten ausschließlich abgeschreckte Stähle verwendet, und zwar entweder abgeschreckte Eisen-Kohlenstoff-Legierungen, oder zur weiteren Steigerung des zurückbleibenden Magnetismus Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit bestimmten Legierungszusätzen wie Wolfram, Chrom, Wolfram und Chrom gleichzeitig usw. (400).

Wesentlich ist bei der Herstellung der Dauermagnete nicht nur der Betrag des unmittelbar nach der Magnetisierung des Magneten feststellbaren zurückbleibenden Magnetismus, sondern vor allen Dingen der Betrag, der längere Zeit nach erfolgter Magnetisierung noch meßbar ist, und der Grad der Unveränderlichkeit dieses zurückbleibenden Magnetismus. Es treten Alterungserscheinungen unter Änderung dieser Größe ein. Derjenige Stahl ist der geeignetste für Dauermagnete, der bei größtem Betrag an zurückbleibendem Magnetismus diesen auch mit dem geringsten Verlust auf die Dauer festhält.

E. Einfluß der chemischen Zusammensetzung der Eisenlegierungen auf ihre magnetischen Eigenschaften.

a) Magnetisch weiche Materialien.

1. Schmiedbare Eisenlegierungen.

398. Der Einfluß des Kohlenstoffgehaltes ist bereits in Abs. 389 dargelegt worden. Im allgemeinen macht der Kohlenstoff (gleiche Vorbehandlung der Legierung vorausgesetzt) das Eisen magnetisch härter, indem er die Hysterisis und die magnetische Rückhaltskraft steigert und die magnetische Durchlässigkeit vermindert. Abb. 479, die auf Grund der Versuche von Benedicks (L_8 31) zusammengestellt ist, läßt den Einfluß des Kohlenstoffs auf \mathfrak{B}_r und die Stärke der

Magnetisierung \mathfrak{S} (für eine Feldstärke von $\mathfrak{H} = 206$ CGS) in den Linien *a* für geglähtes und in den Linien *c* für abgeschrecktes Metall erkennen. Als Abszissen sind die Kohlenstoffgehalte, als Ordinaten die betr. magnetischen Eigenschaften gewählt.

Ergänzt werden diese Versuche durch die von Sklodowska Curie (L_8 33) in Abb. 481, die sich nur auf abgeschreckte Eisen-Kohlenstoff-Legierungen beziehen. Als Abszissen dienen hier wiederum die Kohlenstoffgehalte, als Ordinaten die Rückhaltskraft \mathfrak{H}_c und die Stärke des zurückbleibenden Magnetismus. Der letztere ist hier nicht, wie in den früheren Abbildungen, durch den Wert \mathfrak{B}_r , der zurückbleibenden magnetischen Induktion nach Absinken der Feldstärke \mathfrak{H} auf den

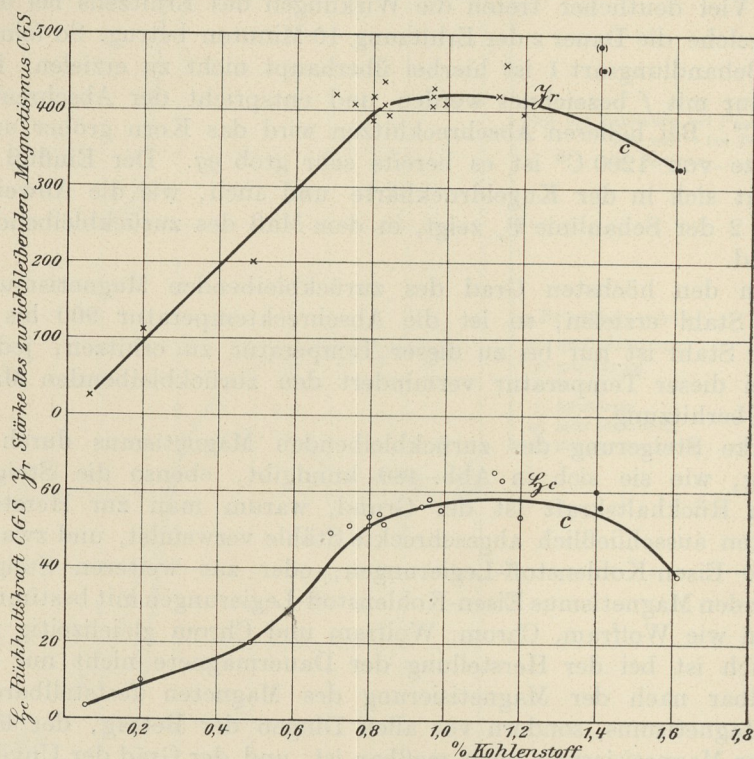


Abb. 481. Magnetische Eigenschaften von abgeschreckten Eisen-Kohlenstoff-Legierungen. (Nach Sklodowska Curie.)

Größte Feldstärke $\mathfrak{H}_{max} = 700$ CGS. Stäbe: 20 cm lang, 1×1 cm nur in den mit \bullet bezeichneten Fällen: $0,85 \times 0,85$ cm.

Wert Null, sondern durch die Stärke der bei $\mathfrak{H} = 0$ zurückbleibenden Magnetisierung $\mathfrak{S}_r = \frac{\mathfrak{B}_r}{4\pi}$ gekennzeichnet. Beachtenswert ist, daß in der Nähe von 1%

Kohlenstoff (der eutektischen Legierung) sowohl \mathfrak{S}_r , als auch \mathfrak{H}_c der abgeschreckten Legierungen einen Höchstwert aufweisen. Auch bei den geglähten Legierungen (Linie *a* in Abb. 479) zeigt \mathfrak{H}_c bei etwa 1,2% Kohlenstoff seinen Höchstwert (322).

Sehr deutlich zeigt sich der Einfluß des Kohlenstoffgehaltes auf den Sättigungswert des Magnetismus \mathfrak{S}_0 , der nach den Versuchen von Hadfield und B. Hopkinson (L_8 34) proportional mit dem steigenden Kohlenstoffgehalt abnimmt. Vgl. Abb. 482, in der als Abszissen die Kohlenstoffgehalte, als Ordinaten die Werte von \mathfrak{S}_0' (Sättigungswerte bezogen auf die Einheit der Masse) eingezeichnet sind. Die Kreise gelten für die nicht abgeschreckten Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit ziemlich geringem Gehalt an sonstigen Beimengungen, die Kreise mit Pfeil entsprechen Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit höheren Gehalten an Silizium und

Mangan, und die Kreuze stellen die Ergebnisse mit den abgeschreckten Legierungen dar. Die Werte für die letzteren liegen ganz außerhalb der geraden Linie, so daß für sie das genannte Gesetz nicht gilt.

Der Siliziumgehalt bewirkt ohne Schmälerung der magnetischen Durchlässigkeit und ohne Steigerung der Energievergeudung durch Hysteresis erhebliche Steigerung des elektrischen Leitwiderstandes ω und dadurch, wie bereits erwähnt, Verminderung des Wirbelstromverlustes (389). Die Untersuchungen von Hadfield, Barret und Brown (L_8 35) gaben den Anstoß, kohlenstoffarmes Eisen ($C = 0,1\%$ und weniger), das mit 1 bis 4% Silizium legiert ist, zu Dynamoblechen zu verwenden. Man nennt vielfach die Legierungen mit Siliziumgehalt von etwa 1,5%

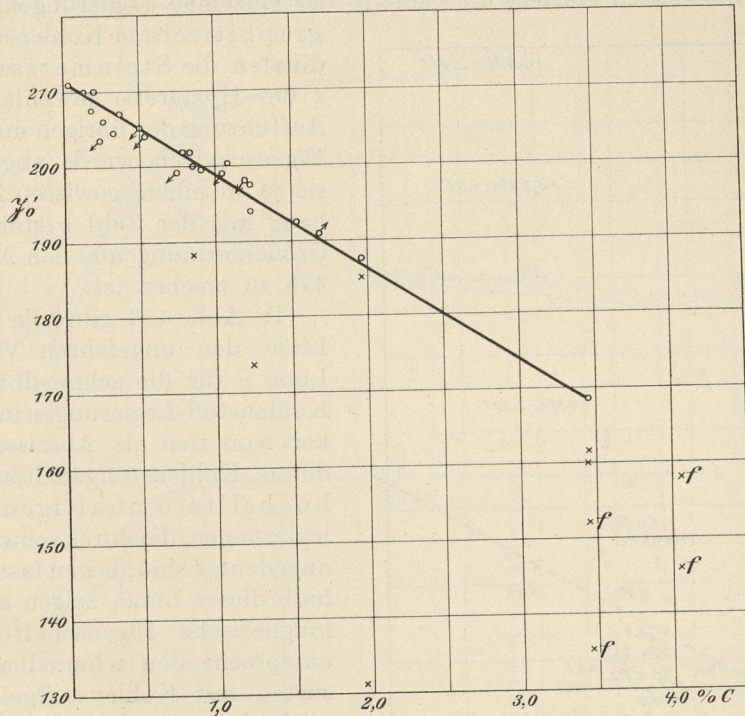


Abb. 482. Einfluß des Kohlenstoffgehaltes auf die Stärke des Magnetismus bei der Sättigung. (Nach Hadfield und B. Hopkinson.)

- o Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit wenig Fremdstoffen
- o " " " " Si: 0,13—0,65
- o " " " " Mn: 0,58—1,11
- x Legierungen abgeschreckt.
- x f " aus dem flüssigen Zustand abgeschreckt.

halblegierte und die mit höheren Gehalten legierte Bleche. Wegen des höheren Preises der legierten Bleche sucht man sich bei ihrer Verwendung Beschränkung aufzulegen; man verwendet sie namentlich zu Transformatorkernen und sucht für andere Zwecke, z. B. für Anker von Wechselstromdynamos, mit halblegierten Blechen zum Ziel zu gelangen.

Nach Burgess und Aston (L_8 36) wächst der Leitungswiderstand nahezu proportional mit dem Siliziumgehalt. Ihre Versuche, bei denen elektrolytisch erzeugtes Eisen in verschiedenen Verhältnissen mit Silizium legiert wurde, ergaben den spezifischen Leitwiderstand:

$$\omega = 0,12 + 0,11 \text{ Si}$$

worin 0,12 Ohm den Leitwiderstand auf 1 m Länge bei 1 qm Querschnitt für das siliziumfreie Elektrolyteisen und Si den Siliziumgehalt in Prozenten angibt. Die Gleichung stellt die Versuchsergebnisse bis zu $\text{Si} = 4,6\%$ dar.

Ähnliche Wirkung wie das Silizium übt auch Aluminium auf das Eisen aus (L_8 35). Nach Versuchen von Burgess und Aston (L_8 38 und 39) scheinen auch Zusätze von Arsen, Wismut und Zinn ähnliche Wirkung hervorzubringen, wie das Silizium. Sie untersuchten Transformatorbleche mit Gehalten bis zu 2% Wismut, oder 5% Arsen, oder 2% Zinn.

2. Gußeisen.

399. In Abb. 483 ist eine Übersicht zusammengestellt über die Ergebnisse der magnetischen Untersuchung einer Reihe von Gußeisensorten durch Nathusius (L_8 40). Das Schaubild ist auf Grund der in der Quelle enthaltenen Tabelle gezeichnet. Als Abszissen wurden die Gehalte der einzelnen Legierungen an nicht-

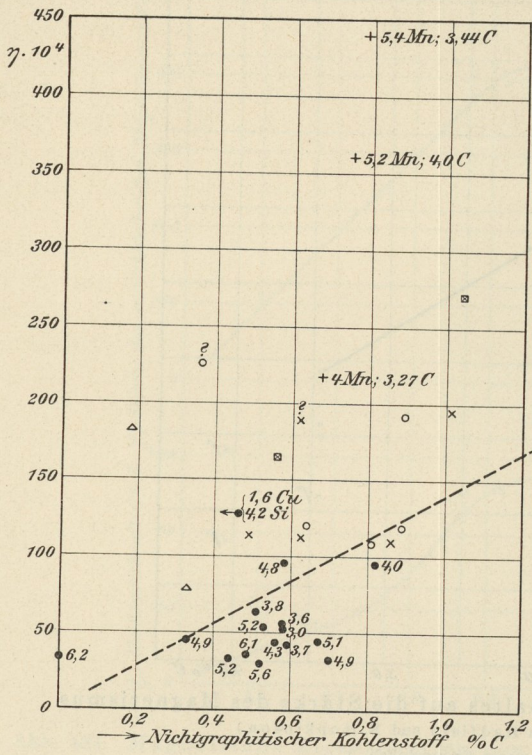


Abb. 483. Steinmetzsche Zahl η verschiedener Gußeisensorten. (Nach Nathusius.)

- C: < 3,5 Proz.; Si: < 3 Proz.; Mn: < 3 Proz.
- Si: ≥ 3 „ ● n n = Proz. Si.
- + Mn: ≥ 3 „ + n n = Proz. Mn.
- × Gesamtkohlenstoff: > 3,5 Proz.
- „ > 4,0 „
- △ P: 0,9—2 Proz.
- ← Cu: > 1 Proz.
- Ungefähre Größe von η für schmiedbare Eisen-Kohlenstoff-Legierungen.

graphitischem Kohlenstoff, als Ordinaten die Steinmetzschen Zahlen η der Hysterisis gewählt. Von der Aufführung der übrigen magnetischen Eigenschaften wurde abgesehen, da sie ja in einem gewissen Zusammenhang mit der Zahl η stehen, dessen Größenordnung aus den Abb. 473 bis 475 zu ersehen ist.

In Abb. 483 gibt die punktierte Linie den ungefähren Verlauf der Linie η für die schmiedbaren Eisen-Kohlenstoff-Legierungen in Abhängigkeit von den als Abszissen verwendeten Kohlenstoffgehalten an. Die hochsiliziumhaltigen Gußeisenlegierungen, die durch schwarze Kreise angedeutet sind, liegen fast alle unterhalb dieser Linie, zeigen also bessere magnetische Eigenschaften als die entsprechenden schmiedbaren Eisensorten mit Kohlenstoffgehalten von 0,36 bis 0,7%. Die hochmanganhaltigen Legierungen (bezeichnet mit +) liegen sämtlich weit oberhalb der punktierten Linie, zeigen also schlechteres magnetisches Verhalten als die manganärmeren.

Es geht sonach mit einiger Sicherheit aus den Versuchen hervor:

daß größerer Gehalt an Silizium die magnetischen Eigenschaften des Gußeisens verbessert, Mangan sie dagegen verschlechtert.

Das Silizium kann bei der obengenannten Wirkung entweder die unmittelbare Ursache sein, oder die mittelbare dadurch, daß es die Aufnahmefähigkeit des Gußeisens gegenüber Kohlenstoff verringert. Wahrscheinlich kommen beide Ursachen in Frage.

Die Wirkung des Mangans ist zweifellos unmittelbar, denn auch in schmiedbaren Eisensorten wirkt Mangan stark vermindern auf den Magnetismus ein, und Legierungen mit etwa 12% Mangan sind fast unmagnetisch.

b) Materialien für Dauermagnete.

400. Für Herstellung von Dauermagneten kommen ausschließlich abgeschreckte Eisenlegierungen in Frage, und zwar abgeschreckte Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit hohem Kohlenstoffgehalt, oder Legierungen des Eisens und Kohlenstoffs mit den Stoffen Wolfram und Chrom. Man hat auch versucht, Dauermagnete aus Gußeisen herzustellen, was natürlich nur für solche Zwecke angängig ist, wo es weniger darauf ankommt, daß die Stärke des zurückbleibenden Magnetismus unveränderlich ist (A. Campbell L₈ 41). Verwendet wurde gewöhnliches Gußeisen, das auf 1000 C° erhitzt und dann in Wasser abgeschreckt wurde.

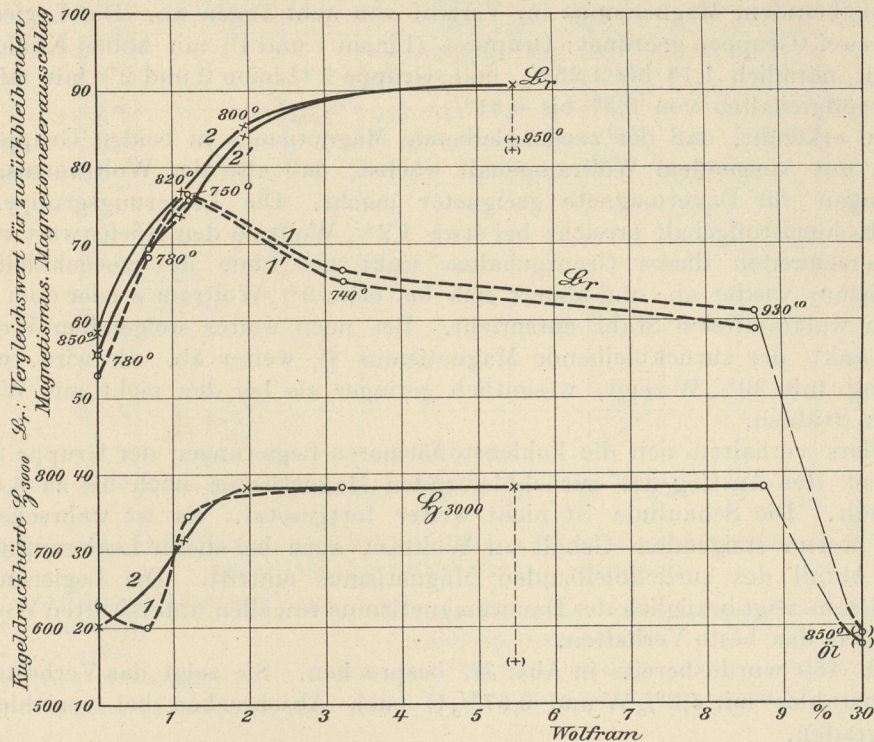


Abb. 484. Zurückbleibender Magnetismus und Kugeldruckhärte abgeschreckter Wolframstähle. (Nach Mars.)

- 1 ○ — ○ Kohlenstoff: 1,15—1,25 Proz.
- 2 × — × „ 0,57—0,61 „
- 1 L_r; 2 L_r: Sogleich gemessen.
- 1' L_r; 2' L_r: Nach 8 Tagen gemessen.

Sämtliche Proben geschmiedet und dann in Wasser abgeschreckt. Nur die in () gesetzten Punkte entsprechen gegossenen und dann abgeschreckten Proben.
 Die den Linien B_r beigeschriebenen Zahlen geben die Abschrecktemperatur an.
 Für die Kugeldruckhärte H₃₀₀₀ war der Druck P = 3000 kg, und der Kugeldurchmesser D = 10 mm.

Abb. 484, zusammengestellt nach einer Arbeit von Mars (L₈ 32), läßt den Einfluß eines Wolframzusatzes zu den Eisen-Kohlenstoff-Legierungen erkennen. Als Abszissen sind die Prozentgehalte der Legierungen an Wolfram, als Ordinaten im oberen Teile des Schaubildes die Vergleichswerte für den zurückbleibenden Magnetismus B_r, im unteren Teile des Schaubildes die Werte der Kugeldruckhärte H₃₀₀₀ verwendet. Sämtliche Stähle wurden bei den den einzelnen Punkten beigeschriebenen Wärmegraden abgeschreckt, die zuvor als die günstigsten ermittelt worden waren. Die Abschreckung geschah in Wasser, nur die Legierung mit 30% Wolfram wurde von 850 C° aus in Öl abgeschreckt. Die Legierungen lagen in Form geschmiedeter Stäbe vor, die zu Hufeisenmagneten verarbeitet und alsdann abgeschreckt worden waren. Nur die mit + bezeichnete Legierung war gegossen

und wurde in diesem Zustande abgeschreckt. Die Hufeisenmagneten wurden durch Abstreichen am Elektromagneten magnetisch gemacht und alsdann nach einer bestimmten Zeit im Magnetometer auf die Größe des zurückbleibenden Magnetismus \mathfrak{B}_r untersucht. Die angegebenen Werte für \mathfrak{B}_r sind nicht in CGS-Einheiten angegeben; sie sind nur Vergleichswerte und geben unmittelbar die Größe des Ausschlages am Magnetometer an. Acht Tage später wurden die Messungen des zurückbleibenden Magnetismus wiederholt. Die Linien für \mathfrak{B}_r sind deswegen doppelt gezeichnet. Die Linien 1 und 2 entsprechen den zuerst, die Linien 1' und 2' den nach acht Tagen gemessenen Werten. Der Unterschied in den Ordinaten der Linien 1 und 1', 2 und 2' zeigt sonach den Verlust an zurückbleibendem Magnetismus im Verlauf von acht Tagen an. Die Legierungen sind in zwei Gruppen geordnet: Gruppe 1 (Linien 1 und 1') mit hohem Kohlenstoffgehalt, nämlich 1,15 bis 1,25%, und Gruppe 2 (Linien 2 und 2') mit mittleren Kohlenstoffgehalten von 0,57 bis 0,61%.

Man erkennt, daß der zurückbleibende Magnetismus in beiden Gruppen anfänglich mit steigendem Wolframgehalt wächst, daß also der Wolframzusatz die Legierungen für Dauermagnete geeigneter macht. Die Legierungsgruppe 1 mit hohem Kohlenstoffgehalt erreicht bei etwa 1,2% Wolfram den Höchstwert von \mathfrak{B}_r ; bei Überschreiten dieses Grenzgehaltes sinkt die Linie des zurückbleibenden Magnetismus wieder ab, und nähert sich bei etwa 9% Wolfram wieder dem Werte, der dem wolframfreien Stahl entspricht. Bei noch weiter steigendem Wolframgehalt sinkt der zurückbleibende Magnetismus \mathfrak{B}_r weiter ab. Er wird, wie die Legierung mit 30% W zeigt, wesentlich geringer als bei den nicht mit Wolfram legierten Stählen.

Anders verhalten sich die kohlenstoffärmeren Legierungen der Gruppe 2. Bei diesen ist der Anstieg des zurückbleibenden Magnetismus noch bis zu 5,5% W festgestellt. Die Schaulinie ist nicht weiter fortgesetzt. Es ist wahrscheinlich, daß bei weiter steigendem Gehalt an Wolfram auch bei dieser Legierungsgruppe wieder Abfall des zurückbleibenden Magnetismus eintritt. Die Legierung mit 5% Wolfram zeigt bezüglich des Dauermagnetismus von allen untersuchten Wolframlegierungen das beste Verhalten.

Abb. 480 wurde bereits in Abs. 397 besprochen. Sie zeigt das Verhalten des Wolframstahles mit 5,5% W und 0,57% C nach Abschrecken bei verschiedenen Wärmegraden.

Die Abb. 485 ist ebenfalls auf Grund der obengenannten Arbeit von Mars zusammengestellt. Sie gibt Aufschluß über die Größe des zurückbleibenden Magnetismus in verschiedenen Eisenlegierungen, die außer Eisen und Kohlenstoff noch Wolfram, Chrom, Molybdän, Vanadium, Mangan, Nickel und Silizium enthalten. Man bezeichnet solche Legierungen vielfach als „legierte Stähle“, „Sonderstähle“ oder „Spezialstähle“, Sämtliche Legierungen wurden abgeschreckt, und zwar in Wasser bei den beigeschriebenen Temperaturen. Nur wenn der Abschrecktemperatur das Zeichen 0 beigefügt ist, erfolgte das Abschrecken in Öl. Der Kohlenstoffgehalt der Legierungen ist als Abszisse gewählt. Die Eisen-Kohlenstoff-Legierungen ohne wesentliche Mengen von Fremdstoffen sind durch nicht ausgefüllte Kreise, die Wolframstähle durch +, die Chromstähle durch ausgefüllte Kreise •, die Chromwolframstähle durch †, die übrigen durch × angedeutet. Der Gehalt an den Zusatzstoffen ist den einzelnen Punkten beigeschrieben. Durch die Punkte für Eisen-Kohlenstoff-Legierungen ist die Ausgleichsline gezogen.

Man erkennt, daß Wolframstahl mit 0,6% C und 5,5% W hohe Werte von \mathfrak{B}_r aufweist. Ähnliche Eigenschaften zeigen noch einige Chromstähle mit 0,6 bis 1% C und 1,3 bis 2,1 Cr, ferner auch ein Chromwolframstahl mit 1,2% C, 1,23% Cr und 1% W.

Der untersuchte Vanadiumstahl mit 0,37% Vd bei 0,8% C zeigte bezüglich des zurückbleibenden Magnetismus keine Vorteile gegenüber den vanadiumfreien Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit gleichem Kohlenstoffgehalt. Auch der unter-

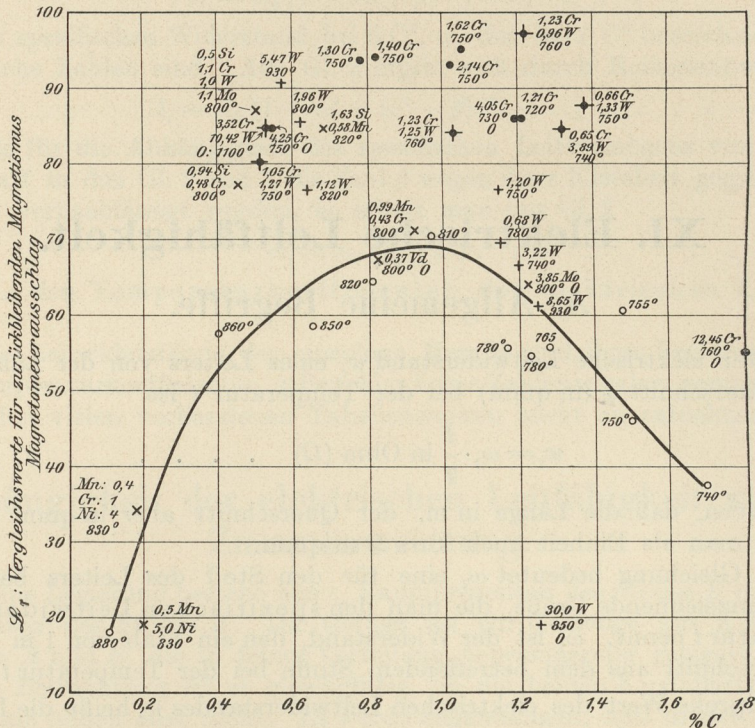


Abb. 485. Vergleich des zurückbleibenden Magnetismus verschiedener abgeschreckter Stahlsorten. (Nach Mars.)

- Eisen-Kohlenstoff-Legierungen.
- + Wolframstähle.
- Chromstähle.
- ✦ Chrom-Wolfram-Stähle.
- × Verschiedene Stähle.

Sämtliche Stähle sind bei den beige-schriebenen Temperaturen abgeschreckt und zwar:
 in Wasser, wenn nichts besonderes vermerkt,
 in Öl, wenn das Zeichen O beigefügt ist.

suchte Molybdänstahl mit 3,85% Mo bei 1,2% C zeichnete sich vor den molybdän-freien Legierungen gleichen Kohlenstoffgehalts nicht aus. Das billigere Wolfram und Chrom scheinen sonach den Stahl für Dauermagnete geeigneter zu machen als das teure Molybdän. Im übrigen bedarf wohl die Abb. 485 keiner weiteren Erläuterung.