

## Zur Frage der Koerzitivkraft homogener Metalle

VON CHRISTOPH SCHWINK

II. Physikalisches Institut der Universität München  
(Z. Naturforsch. 16 a, 718—719 [1961]; eingegangen am 26. Juni 1961)

In dieser Mitteilung wird gezeigt, daß die Bereichsstruktur homogener ferromagnetischer Metalle von großer Bedeutung für deren Koerzitivkraft  $H_c$  ist. Ein neuer Mechanismus wird hypothetisch eingeführt, der in bestimmten Fällen die Koerzitivkraft solcher Metalle bestimmen soll. Die Voraussetzungen, unter denen der neue Mechanismus wirksam werden kann, werden dargelegt und es wird gezeigt, daß sich damit Schwierigkeiten und noch unerklärte Meßergebnisse der neueren Koerzitivkraftforschung qualitativ deuten und verstehen lassen.

Wir beschränken die Diskussion auf so tiefe Temperaturen, daß die Kristallanisotropie gegenüber der Spannungsanisotropie so groß ist, daß man die Bloch-Wände als nahezu starr ansehen und somit von Wandwölbungsvorgängen<sup>1</sup> absehen darf, die aber bei höheren Temperaturen wahrscheinlich mit ins Spiel kommen<sup>2, 3</sup>.

Ausgehend von den fundamentalen Betrachtungen von NÉEL<sup>4</sup> und DIJKSTRA und WERT<sup>5</sup> hat als erster VICENA<sup>6</sup> eine Versetzungstheorie der Koerzitivkraft entworfen, nach der die Koerzitivkraft homogener Metalle durch die Wechselwirkung zwischen Versetzungen und Bloch-Wänden festgelegt ist, wenn sich letztere beim Ummagnetisierungsvorgang durch die Probe hindurchbewegen. In den folgenden Jahren wurden dann von verschiedenen Autoren diese Ideen theoretisch erweitert und vertieft<sup>3, 7, 8</sup> und durch Experimente an Einkristallen geprüft<sup>2, 9</sup>. Dabei ergab sich, daß die Abhängigkeit der Koerzitivkraft einer Probe von deren Verformung, dargestellt als Schubspannungsabhängigkeit, in recht guter, zumindest qualitativer Übereinstimmung mit der Theorie steht, und zwar sowohl für Teil II der Verfestigungskurve<sup>9, 10</sup> wie neuerdings auch für deren Teil I<sup>11, 12</sup>. Auch für die Temperaturabhängigkeit stellte sich eine bemerkenswerte Übereinstimmung von Theorie und Experiment insofern heraus, als die bei Nickel gefundene Abnahme von  $H_c$  bei sehr tiefen Temperaturen aus dem starken Anwachsen der Kristallenergie  $K_1$  dort folgen soll. Jedoch ist es gerade die Temperaturabhängigkeit von  $H_c$ , die dem Verständnis noch besondere Schwierigkeiten, die schon bei Nickel beginnen, entgegengesetzt. Einige dieser Schwierigkeiten seien aufgezählt.

1. Ganz unverständlich für die bestehenden Theorien ist die Tatsache, daß kürzlich an eckenorientierten ( $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ ) Nickeleinkristallen — und zwar erstmals an Nickeleinkristallen — ein Anwachsen von  $H_c$  zwischen Zimmertemperatur und  $-183^\circ\text{C}$  mit abnehmender Temperatur festgestellt wurde<sup>11</sup>.

2. Bei gut ausgeglühten, rekristallisierten Nickel-Vielkristallen steigt  $H_c$  mit abnehmender Temperatur monoton an, wobei der Absolutwert bei Zimmertemperatur keineswegs über dem Absolutwert der Einkristalle liegt<sup>9</sup>. Der Anstieg ist um so steiler, je kleiner die Kristallitgröße ist, er fällt und wird sogar negativ bei zunehmender Verformung. Ansätze zu einem Verständnis dieser Ergebnisse an Vielkristallen<sup>9</sup> erscheinen vom Modell her und hinsichtlich der Spannungsabhängigkeit noch nicht sehr befriedigend.

Die besondere Schwierigkeit, die diese Tatsachen dem Verständnis zur Zeit entgegensetzen, ergibt sich daraus, daß alle bisher aufgestellten Theorien der Koerzitivkraft homogener Kristalle ohne Einschlüsse auf Ausdrücke führen, die dann, wenn die Kristallenergie die Spannungsenergie im Material überwiegt, die Kristallanisotropiekonstante  $K_1$  mit einem Exponenten größer als Null im Nenner haben<sup>13</sup>. Die Koerzitivkraft muß danach mit ansteigendem  $K_1$ , in den genannten Beispielen also mit abnehmender Temperatur, ebenfalls stets abnehmen. Die den Theorien zugrunde liegenden Modelle haben gemeinsam, daß sie  $H_c$  aus einer Art Reibung ableiten, die bei der Bewegung einer  $180^\circ$ -Bloch-Wand durch den Kristall zufolge der (zusammen mit den Versetzungen) stets anwesenden Spannungs- und Streufelder auftritt.

Nach Theorie und Experimenten scheint es daher, daß es noch einen, von der „Wandreibung“ grundsätzlich verschiedenen Mechanismus gibt, der für das Zustandekommen der Koerzitivkraft in gewissen Fällen verantwortlich ist. Es soll hier die Behauptung aufgestellt und näher gestützt werden, daß dieser neue Mechanismus in der unstetigen Umordnung der Bereichsstruktur zu sehen ist.

Aus der Bereichstheorie weiß man, daß sich ferromagnetische Kristalle aus einer endlichen Anzahl von Elementarbereichen zusammensetzen, deren Größe und Form durch ein Minimalprinzip der Gesamtenergie gegeben ist. Daraus folgt, daß wesentliche Magnetisierungsänderungen, wie sie im Feldbereich um  $H_c$  auftreten, stets mit unstetigen Änderungen der Bereichsanordnung verbunden sind. Diese Tatsache ist neuerdings durch Versuche mit BITTERSchen Streifen unmittelbar belegt<sup>14</sup>. Da andererseits auch die endliche Be-

<sup>1</sup> M. KERSTEN, Z. angew. Phys. **8**, 313, 382, 496 [1956]. — H.-D. DIETZE, Z. Phys. **149**, 276 [1957].

<sup>2</sup> E. KNELLER, Berichte der AG Ferromagnetismus 1958.

<sup>3</sup> G. RIEDER, Berichte der AG Ferromagnetismus 1959.

<sup>4</sup> L. NÉEL, Ann. Univ. Grénoble **22**, 299 [1947].

<sup>5</sup> L. J. DIJKSTRA u. C. WERT, Phys. Rev. **79**, 979 [1950].

<sup>6</sup> F. VICENA, Czechosl. J. Phys. **4**, 419 [1954]; **5**, 480 [1955].

<sup>7</sup> G. RIEDER, Z. angew. Phys. **10**, 140 [1958].

<sup>8</sup> H. TRÄUBLE, Vortrag auf der Tagung in Gemen im März 1960.

<sup>9</sup> H. DIETRICH u. E. KNELLER, Z. Metallkde. **47**, 716 [1956].

<sup>10</sup> G. SCHMELZER u. E. KNELLER, Z. Metallkde. **51**, 342 [1960].

<sup>11</sup> CH. SCHWINK u. D. KRAUSE, II. Phys. Inst. Univ. München, noch nicht veröffentlichte Messungen.

<sup>12</sup> Wegen der Nomenklatur zur plastischen Verformung vgl. z. B. A. SEEGER, Handb. d. Phys. VII/2.

<sup>13</sup> Die Gleitflächen-Koerzitivkraft nach RIEDER liefert für tiefe Temperaturen eine konstante Koerzitivkraft<sup>3</sup>.

<sup>14</sup> G. HAACKE u. J. JAUMANN, Z. angew. Phys. **12**, 289 [1960].



wegung einer starren Bloch-Wand mit einer Umordnung der Konfiguration der Abschlußbezirke verknüpft ist, scheint es prinzipiell denkbar, daß in gewissen Fällen nicht die Reibung der Bloch-Wand, sondern die zur Bereichumordnung nötige Energie die Größe von  $H_c$  festlegt.

Mit anderen Worten heißt das, und darin besteht die Hypothese des vorgeschlagenen Mechanismus, daß in manchen Fällen die realen Bereichanordnungen beim Ummagnetisierungsprozeß erst dann instabil werden, wenn ein bestimmtes minimales Gegenfeld erreicht ist und daß in diesen Fällen die Koerzitivkraft  $H_c$  im wesentlichen gleich jenem Minimalfeld ist<sup>15</sup>.

Zur unstetigen Bereichumordnung ist eine Energie nötig, die dem Energieinhalt der Abschlußbezirke der Bereichanordnung entspricht und in einfachen Fällen berechenbar ist<sup>16, 17</sup>. Ihre für die vorliegende Untersuchung charakteristischen Eigenschaften sind, daß sie mit dem Volumenanteil der Abschlußbezirke, der Kristallenergie und der magnetoelastischen Energie der Probe anwächst. Es ist sofort klar, daß die Wandreibung hinreichend klein sein muß, wenn die unstetige Bereichumordnung die energetisch entscheidende Rolle bei der Ummagnetisierung spielen soll.

Bei einem Material mit sehr hoher Kristallenergie, wie z. B. Kobalt, ist nach dem Gesagten gleichzeitig die Wandreibung gering und die Energie zur unstetigen Bereichumordnung groß. Die Voraussetzungen für ein Überwiegen des Mechanismus der unstetigen Bereichumordnung scheinen daher in diesem Fall besonders günstig und man sollte bei Kobalt einen Anstieg der Koerzitivkraft mit zunehmender Kristallenergie, d. h. abnehmender Temperatur, beobachten.

Bei Nickel sind die Voraussetzungen dafür, daß die unstetige Bereichumordnung in Erscheinung tritt, wegen der relativ kleinen Kristallenergie wesentlich ungünstiger als bei Kobalt.

Zu 2. Ein verhältnismäßig günstiger Fall sollte allerdings bei ausgeglühten, rekristallisierten Vielkristallen mit kleinem Korn bei tiefer Temperatur vorliegen, da dann der Volumenanteil der Abschlußbezirke (Korn Grenzen!) und die Kristallenergie hoch sind, die inneren Spannungen klein. Das beobachtete Ansteigen der Koerzitivkraft solcher Proben mit abnehmender Temperatur spricht dafür, daß hier tatsächlich die unstetigen Bereichumordnungen überwiegen. Auch daß  $H_c$  zusammen mit dem Temperaturgradienten sich bei abnehmendem Kristallitdurchmesser  $D$  ungefähr wie  $1/D$  verhalten muß, folgt aus dem Modell. Ferner sollte man aber danach erwarten, daß bei stärkerer Verformung des Vielkristalls die inneren Spannungen so groß werden, daß die Wandreibung der beherrschende Vorgang wird. Dann muß aber  $H_c$  bei sehr tiefen Temperaturen abfallen und genau das zeigt das Experiment<sup>9</sup>.

Zu 1. Soll auch bei gut ausgeglühten Nickeleinkristallen die unstetige Bereichumordnung in Erscheinung treten, so muß man einen Fall suchen, wo die Wandreibung besonders klein wird. Nach den statistischen Vernetzungstheorien der Koerzitivkraft ist diese, abgesehen von anderen Größen, um so kleiner, je größer der mittlere Bereichdurchmesser ist<sup>18</sup>. Eine Bereichstruktur beim Ummagnetisierungsvorgang mit besonders großen Bereichen erwartet man z. B., wenn sich eine Kristallprobe längs einer leichten Magnetisierungsrichtung erstreckt und in dieser Richtung magnetisiert wird, da sich dann sehr lange Bereiche parallel zur Kristallachse einstellen werden. Diese Bedingung ist bei Nickelkristallen erfüllt, deren längste Ausdehnung in der  $\langle 111 \rangle$ -Richtung liegt. Gerade bei so einer Probe fand KRAUSE<sup>11</sup> das Ergebnis, daß  $H_c$  nach tiefen Temperaturen zu ansteigt, was nach der Wandreibungsvorstellung nie der Fall sein kann. Der Anstieg kehrt sich jedoch in einen Abfall um, wenn man die Probe verformt. Dann überwiegt nämlich, wie im Fall des Vielkristalls, wieder die Wandreibung.

Wie entscheidend die Bereichstruktur für die Koerzitivkraft ist, erhellt aus folgendem: Ein runder Nickel-Einkristallstab mit der Achse in  $\langle 100 \rangle$ - oder  $\langle 110 \rangle$ -Richtung zeigt im unverformten Zustand einen Temperaturgang von  $H_c$ , der von dem mittellorientierter Einkristalle kaum abweicht. Gibt man dem Kristall aber einen prismatischen Querschnitt mit magnetisch ausgezeichneten Prismenflächen, so hat er eine ganz andere Bereichstruktur mit im Mittel wesentlich größeren Hauptbereichen. Damit ist wieder die Möglichkeit für ein Überwiegen der unstetigen Bereichumordnung gegenüber der Wandreibung gegeben und tatsächlich findet man<sup>11</sup> bei vielen dieser Kristalle ein starkes Anwachsen der Koerzitivkraft mit abnehmender Temperatur, bei einem  $\langle 100 \rangle$ -Kristall z. B. von etwa 0,1 Oe bei 100 °C auf 0,4 Oe bei -183 °C, was ein Vielfaches des gemessenen  $H_c$ -Abfalls der mittellorientierten Proben darstellt. Diese Experimente stellen daher eine weitere Stütze der aufgestellten Hypothese dar.

Der neu vorgeschlagene Mechanismus der unstetigen Bereichumordnung tritt somit nach unserem Bild neben die Wandreibungsvorgänge und bestimmt zusammen mit ihnen das Verhalten der Koerzitivkraft als Funktion von Schubspannung (Verformung) und Temperatur bei Vorliegen ebener Bloch-Wände. Selbstverständlich können erst weitere experimentelle und theoretische Untersuchungen quantitative Aussagen zu dem oben bewiesenen starken Einfluß der Bereichstruktur auf die Koerzitivkraft liefern und über Richtigkeit und Wert der aufgestellten Hypothese entscheiden.

Herrn Prof. Dr. ROLLWAGEN und Herrn Dipl.-Phys. D. KRAUSE danke ich sehr für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

<sup>15</sup> Sekundäreffekte, die z. B. zu einem Verrunden des abfallenden und aufsteigenden Astes der Hysterese führen, interessieren im Rahmen dieser Arbeit noch nicht. Ebenso wird über den näheren Prozeß der Bereichumordnung, der z. B. mit Keimbildungs- und Wachstumsvorgängen zusammenhängen kann, noch nichts ausgesagt.

<sup>16</sup> L. NÉEL, J. Phys. Radium 5, 241 [1944].

<sup>17</sup> J. KOCIŃSKI, Acta Phys. Polonica 18, 169 [1959].

<sup>18</sup> Bei besonders großen Wänden, wie z. B. in bestimmten Rahmenkristallen, hängt  $H_c$  sicher nicht mehr von den Wanddimensionen ab, was auch Experimente unmittelbar zeigen. Für Wände beliebiger Größe kommt zu diesem Schluß eine Theorie von H.-D. DIETZE (Vortrag Tagung AG Ferromagnetismus, Weinheim 1961).