

(19)



(11)

EP 2 643 839 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Patenterteilung:
26.09.2018 Patentblatt 2018/39

(51) Int Cl.:
H01F 1/153 ^(2006.01) **H01F 41/02** ^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **11799328.7**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/IB2011/055166

(22) Anmeldetag: **17.11.2011**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2012/069967 (31.05.2012 Gazette 2012/22)

(54) **WEICHMAGNETISCHES METALLBAND FÜR ELEKTROMECHANISCHE BAUELEMENTE**

SOFT MAGNETIC METALLIC RIBBON FOR ELECTROMECHANIC ELEMENT

RUBAN MAGNETIQUE METALLIQUE DOUX POUR ÉLÉMENT ÉLECTROMÉCANIQUE

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**

(30) Priorität: **23.11.2010 DE 102010060740**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
02.10.2013 Patentblatt 2013/40

(73) Patentinhaber: **Vacuumschmelze GmbH & Co. KG
63450 Hanau (DE)**

(72) Erfinder: **HERZER, Giselher
63486 Bruchköbel (DE)**

(74) Vertreter: **Moore, Joanne Camilla et al
Jensen & Son
366-368 Old Street
London EC1V 9LT (GB)**

(56) Entgegenhaltungen:
**EP-A1- 1 925 686 EP-A1- 2 015 321
EP-A2- 0 392 204**

EP 2 643 839 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Anmeldung betrifft ein weichmagnetisches Metallband für elektromechanische Bauelemente, insbesondere Wechselstromfehlstromschalter.

[0002] Die EP 2 015 321 A1 offenbart einen Magnetkern für einen Stromtransformator, der aus einer amorphen Legierung zusammengesetzt ist, wobei die Zusammensetzung durch die allgemeine Formel $\text{Fe}_{100-x-z}\text{Ni}_x\text{X}'_z$ dargestellt wird, wobei X' aus Si und B zusammengesetzt ist.

[0003] Ein Verfahren zum Herstellen eines Magnetkerns für Wechselstromfehlstromschalter aus weichmagnetischen Legierungen ist in der US 5,922,143 offenbart. Ein amorphes Band aus einer Eisen-basierten Legierung wird mit einer Rascherstarrungstechnologie hergestellt, gewickelt zu einem Magnetkern und anschließend wärmebehandelt, um ein nanokristallines Gefüge zu erzeugen.

[0004] Dieser Magnetkern ist weniger beeinträchtigt von mechanischen Spannungen, so dass der gewünschte Permeabilitätswert zuverlässiger erreicht wird. Es besteht jedoch noch Bedarf für weitere Verbesserungen.

[0005] Aufgabe der Anmeldung ist es, ein weichmagnetisches Metallband für elektromechanische Bauelemente, das insbesondere für Anwendungen bei 50 Hz, wie AC Fehlstromschaltern geeignet ist, zu schaffen, das sich reproduzierbar herstellen lässt.

[0006] Erfindungsgemäß wird ein weichmagnetisches Metallband für elektromechanische Bauelemente geschaffen. Das weichmagnetische Metallband weist eine nanokristalline oder eine amorphe Struktur und Verhältnisse von Banddicken zu Rauigkeiten d/Ra von ≤ 5 $d/\text{Ra} \leq 25$ auf, wobei Ra der Mittenrauheitswert ist. Das Metallband weist ein Fischschuppenmuster mit einer quer und schräg zur Bandlängsrichtung angeordneten Struktur auf.

[0007] Magnetisierungseigenschaften dieses weichmagnetischen Metallbands sind von einer Banddicke d und einer Rauigkeit Ra abhängig. Ein Verhältnis von Banddicken zu Rauigkeiten d/Ra von ≤ 5 $d/\text{Ra} \leq 25$ ermöglicht die Verbesserung der Permeabilität bei Wechselstromanwendungen sowie das zuverlässige Erzeugen dieser verbesserten Permeabilität.

[0008] Die Rauigkeit Ra dieses Verhältnisses ist die gemessene Rauigkeit der Unterseite des weichmagnetischen Metallbands, wobei die Unterseite die Seite des weichmagnetischen Metallbands ist, die bei der Erstarrung einer Schmelze auf einem Gießrad liegt.

[0009] Dieses weichmagnetische Metallband hat den Vorteil, dass elektromechanische Bauelemente mit kurzen Ansprechzeiten wie Fehlerstromschalter oder Drehzahlsensoren mit einem Ringbandkern realisiert werden können, die bei geringer Koerzitivfeldstärke von wenigen 10 Milliampere pro Zentimeter einen Schaltvorgang auslösen können bzw. das Vorbeidrehen eines Permanentmagneten signalisieren können, um Drehzahlmessungen anstelle von Hallgeneratoren zu ermöglichen.

[0010] Das weichmagnetische Metallband weist eine nanokristalline oder amorphe Struktur auf. Das weichmagnetische Metallband zeichnet sich durch eine nahezu rechteckige Hystereseschleife und niedrige Wirbelstromverluste aus, was beides für schnellreagierende elektromechanische Bauelemente, wie Fehlstromschalter, die bei 50 Hz verwendet werden, genutzt werden kann.

[0011] In einer Ausführungsform weist das weichmagnetische Metallband einen Maximalwert der magnetischen Induktionswerte bei einer mittleren Rauigkeit von etwa $1\text{ }\mu\text{m}$ bedeutet dies eine Banddicke d des weichmagnetischen Metallbands zwischen $10\text{ }\mu\text{m} \leq d \leq 20\text{ }\mu\text{m}$.

[0012] Das Metallband kann ein Verhältnis $\text{Br}/\text{Bm} > 80\%$ aufweisen, wobei Bm bei 200 mA/cm gemessen ist.

[0013] Das Metallband weist ein Fischschuppenmuster mit einer quer und schräg zur Bandlängsrichtung angeordneten Struktur auf. Solch ein Muster kann zum Beispiel durch Reduktion des Gießdruckes und/oder Erhöhung der Gießradgeschwindigkeit gezielt eingestellt werden. Weitere Möglichkeiten, die Oberflächentopologie des Bandes gezielt zu beeinflussen, bieten zum Beispiel eine Oberflächenstrukturierung der Gießwalze oder nachträgliches Laser-Scribing des weichmagnetischen Metallbands.

[0014] Durch entsprechende Vergleichsversuche konnte ermittelt werden, dass der Einfluss dieser geometrischen Parameter stärker ist, als der Einfluss der Legierungszusammensetzung des Metallbands mit Legierungsbestandteilen von Silizium, Bor, Niob und Kupfer in über 73 Atomgew. % Eisen.

[0015] Somit ergeben sich für ein Metallband einer Legierung, die $\text{Fe}_{75,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{12,5}\text{B}_8$ aufweist, und ein Metallband, das eine Legierung mit $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ aufweist, keine gravierenden Unterschiede, sodass beide Legierungen in den oben angegebenen Dicken zum Rauigkeitsverhältnis maximale Induktionswerte aufweisen. Vergleichsweise weisen Bandqualitäten von dünnerem und rauherem Metallband bessere Wechselstrommagnetwerte auf, Legierung mit $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ aufweist, keine gravierenden Unterschiede, so dass beide Legierungen in dem oben angegebenen Dicken zu Rauigkeitsverhältnis maximale Induktionswerte aufweisen. Vergleichsweise weisen Bandqualitäten von dünnerem und rauherem Metallband bessere Wechselstrommagnetwerte auf, als ein glattes mit einer gegen Null gehenden Rauigkeit und ein mehr als $50\text{ }\mu\text{m}$ dickes Metallband.

[0016] Dazu ist es von Vorteil, das Metallband thermisch bei einer Temperatur zwischen 500°C und 600°C für eine Dauer von 0,5 Std. bis 2 Std. in einem Längsfeld von 5 A/cm bis 15 A/cm zu glühen. Nach der Glühbehandlung weist

das Metallband eine quasistationäre Koerzitivfeldstärke unabhängig von einer Bandqualität in Bezug auf Banddicke und Rauigkeit auf, wobei eine wechselstrombestimmte Koerzitivfeldstärke des Metallbands mit einem Verhältnis von Banddicke zu Rauigkeit d/R_a linear zunimmt.

[0017] Das Metallband nach einem der vorhergehenden Ausführungsbeispiele kann gewickelt werden, um einen Magnetkern anzugeben. Dieser Magnetkern kann bei verschiedenen Anwendungen verwendet werden, beispielsweise bei Anwendungen bei Frequenzen von kleiner als 1000Hz, wie bei einem Wechselstromfehlstromschalter, da der Magnetkern auch bei 50 Hz eine gute Permeabilität aufweist, oder bei Verteilertransformatoren.

[0018] Es ist vorgesehen, dass dieses weichmagnetische Metallband für wechselstromsensitive elektromechanische Bauelemente mit einem weichmagnetischen Ringbandkern verwendet wird. Das weichmagnetische Metallband kann wie oben bereits ausgeführt für Fehlerstromschalter mit einem Fehlerstromgrenzwert $I_{\max} \leq 30$ mA verwendet werden. Ferner ist auch eine Verwendung des weichmagnetischen Metallbands für einen Drehzahlsensor in Zusammenwirken mit einer segmentierten Permanentmagnetenscheibe möglich.

[0019] Ein wechselstromsensitiver Fehlstromschuttschalter wird auch angegeben, der einen Magnetkern aus einem gewickelten weichmagnetischen Band nach einem der vorherstehenden Ausführungsbeispiele aufweist.

[0020] In einem Ausführungsbeispiel weist bei einer Frequenz von kleiner als 1000Hz, insbesondere bei 50 Hz, der Magnetkern des wechselstromsensitiven Fehlstromschuttschalters ein Verhältnis $B_r/B_m > 80\%$ auf.

[0021] Ein Verteilertransformator wird auch angegeben, der einen Magnetkern aus einem gewickelten weichmagnetischen Band nach einem der vorherstehenden Ausführungsbeispiele aufweist.

[0022] Der Magnetkern des Verteilertransformators kann bei einer Frequenz von kleiner als 1000Hz, insbesondere bei 50 Hz, ein Verhältnis $B_r/B_m > 80\%$ aufweisen.

[0023] Der Erfindung liegen Diagramme nachfolgender Figuren zugrunde, die im einzelnen zeigen:

Fig. 1 zeigt ein Diagramm zur Definition einer dynamischen Koerzitivfeldstärke;

Fig. 2 zeigt ein Diagramm mit Werten von Banddicke und Rautiefe an verschiedenen Stellen eines untersuchten Metallbands;

Fig. 3 zeigt ein Diagramm mit Induktionsamplituden (Figur 3a) und Amplitudenpermeabilitäten (Figur 3b) als Funktion der erregenden Feldamplitude bei sinusförmiger Erregung mit 1 Hz für unterschiedliche Metallbandqualitäten;

Fig. 4 zeigt ein Diagramm mit Induktionsamplituden (Figur 4a) und Amplitudenpermeabilitäten (Figur 4b) als Funktion der erregenden Feldamplitude bei sinusförmiger Erregung mit 50 Hz für die Metallbandqualitäten aus Figur 3;

Fig. 5 zeigt ein Diagramm der dynamischen Koerzitivfeldstärke als Funktion des Verhältnisses von Banddicke und Rautiefe einer einzelnen Charge;

Fig. 6 zeigt ein Diagramm mit Induktionsamplituden bei einer erregenden Feldstärke von 10 mA/cm als Funktion des Verhältnisses von Banddicke und Rautiefe einer ersten Metallbandlegierung;

Fig. 7 zeigt ein Diagramm mit Werten von Banddicke und Rautiefe unterschiedlicher Chargen von Metallband;

Fig. 8 zeigt ein Diagramm mit Induktionsamplituden und Amplitudenpermeabilitäten als Funktion der erregenden Feldamplitude bei sinusförmiger Erregung mit 50 Hz für unterschiedliche Metallbandqualitäten im Vergleich einer nanokristallinen Legierung zu einer grobkristallinen NiFe-Legierung Ultraperm 10 mit der Kennlinie 020;

Fig. 9 zeigt ein Diagramm der dynamischen (50 Hz) und statischen (dc) Koerzitivfeldstärke als Funktion des Verhältnisses von Banddicke und Rautiefe unterschiedlicher Chargen;

Fig. 10 zeigt ein Diagramm mit Induktionsamplituden bei einer erregenden Feldstärke von 10 mA/cm als Funktion des Verhältnisses von Banddicke und Rautiefe einer zweiten Metallbandlegierung;

Fig. 11a zeigt ein Diagramm mit Induktionsamplituden bei 50 Hz von drei nanokristallinen Metallbandqualitäten im Vergleich zu einem grobkristallinen Ultraperm 200 Metallband der NiFe-Legierung;

Fig. 11b zeigt ein Diagramm der Änderungen der Induktionsamplituden nach einem Gleichfeldstoß und nach Klopfbelastung;

Fig. 12 zeigt ein Diagramm der dynamischen Koerzitivfeldstärke als Funktion des Verhältnisses von Banddicke und Rautiefe eines amorphen VITROVAC 6030 Z Bandmaterials;

Fig. 13 zeigt ein Diagramm mit Induktionsamplituden bei einer erregenden Feldstärke von 10 mA/cm als Funktion des Verhältnisses von Banddicke und Rautiefe eines amorphen VITROVAC 6030 Z Bandmaterials.

[0024] Im Rahmen der Fertigungsüberleitung der nanokristallinen Legierung $\text{Fe}_{75,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{12,5}\text{B}_8$ wurde ein Stichversuch zum Einfluss von Banddicke und Bandrauigkeit auf die nach Wärmebehandlung erzielbare Magnetqualität durchgeführt. Hierzu wurde bei einer Bandcharge (KA 1283, Einsatz 7 kg, Bandbreite 15 mm) durch Erniedrigung der Walzengeschwindigkeit während des Schussverlaufes die Banddicke von ca. 16 μm (Mikrometer) auf ca. 35 μm variiert. Durch Absenkung des Gießdruckes gegen Schussende wurde schließlich versucht, die Bandrauigkeit bei gleichbleibender Dicke (um 35 μm) zu erhöhen. Aus dieser Charge wurden über den Schussverlauf hinweg Bandproben verschiedener Dicke und Rauigkeit entnommen und hieraus Ringbandkerne (RBK) mit der Abmessung 22 mm x 16 mm x Bandbreite für weitere magnetische Untersuchungen gewickelt.

[0025] In die Untersuchungen mit einbezogen waren auch eine Reihe von verschiedenen KA-Chargen der Legierung $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$, bei denen die Herstellparameter im Hinblick auf eine Verbesserung der Duktilität im Herstellzustand variiert wurden. Aus diesen Chargen wurden ebenfalls Ringbandkerne der Abmessung 22 mm x 16 mm x Bandbreite für die magnetischen Untersuchungen hergestellt.

[0026] Die Ringbandkerne wurden in einem Fertigungssofen unter Wasserstoff-Atmosphäre im Längsfeld angelassen. Die genauen Anlassbedingungen waren: 1h Haltezeit bei 540°C im Längsfeld (Wechselfeld von ca. 10 A/cm), Abkühlung mit 1 K/min.

[0027] Gemessen wurden die quasistatischen Hystereseschleifen, sowie die 50Hz-Kommutierungskurven. Die 50Hz-Kennlinien wurden im "abnehmenden erregenden Feld gemessen", was einer Messung des entmagnetisierten Kernes entspricht. Aus den Kommutierungskurven wurde entsprechend **Figur 1** die dynamische Koerzitivfeldstärke H_c ausgewertet, d.h. in den nachfolgenden Diagrammen der Figuren bezeichnet $H_c(\text{dyn})$ diejenige erregende Feldstärke, bei welcher gerade in etwa die Sättigung bzw. die Maximalpermeabilität erreicht wird.

[0028] Zur Charakterisierung der Bandgeometrie wurde die mittlere Banddicke aus dem Metergewicht bestimmt sowie die Rauigkeit an der Bandunterseite (quer zur Bandrichtung) gemessen.

Beispiel 1

[0029] Dem Beispiel 1 liegen Untersuchungen in Bezug auf Rauigkeit und Banddicke mit der Legierung $\text{Fe}_{75,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{12,5}\text{B}_8$ als Charge KA 1283 zugrunde

[0030] Das Verhältnis von Banddicke zu Rautiefe d/R_a reicht von etwa 10 bis 60. Die **Figur 2** zeigt die zugehörige Variation von Banddicke d und Rautiefe R_a . Es ist in **Figur 2** erkennbar, dass die dünneren Bänder in der Regel auch eine absolut größere Rauigkeit aufweisen.

[0031] Die mittlere, quasistatisch gemessene Koerzitivfeldstärke beträgt

$$H_c = 7.5 \pm 1 \text{ mA/cm (bei } H_{\text{max}} = 50 \text{ mA/cm)}$$

[0032] Das mittlere, quasistatisch gemessene Remanenzverhältnis liegt bei

$$B_r/B_m = 0.97 \pm 0.01 \text{ (bei } H_{\text{max}} = 200 \text{ mA/cm) .}$$

[0033] **Figur 3** zeigt die bei 1 Hz (sinusförmige Feldstärke) gemessene Kommutierungskurve (B_{max} über H), sowie die zugehörige Amplitudenpermeabilität μ .

[0034] Bei den dickeren und glatteren Bändern sind andeutungsweise etwas bessere Magnetwerte zu erkennen. Insgesamt ist der hier festgestellte Einfluss von Banddicke und Bandrauigkeit auf die quasistatischen und 1Hz-Meßwerte jedoch nur gering und geht fast in der Messgenauigkeit unter. Im Gegensatz hierzu wurde in Vergleichsuntersuchungen an amorphen Werkstoffen wie VC 6150 Z und VC 6030 Z eine deutliche Verschlechterung von H_c und B_r mit zunehmendem Verhältnis von R_a/d festgestellt.

[0035] Bei höheren Messfrequenzen sieht die Situation deutlich anders aus. Schon bei 50 Hz ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Bandqualitäten. **Figur 4** zeigt hierzu die bei 50 Hz (sinusförmige Feldstärke) gemessene Kommutierungskurve (B_{max} über H), sowie die zugehörige Amplitudenpermeabilität μ . Der Vergleich der 1Hz- und 50Hz-Kennlinien zeigt, dass die 50Hz-Kennlinie praktisch vollständig durch anomale Wirbelströme bestimmt ist. Wie bereits oben erläutert wurde, sind die klassischen Wirbelstrombeiträge zu vernachlässigen. Es fällt auf, dass

insbesondere die dünnen und rauen Bänder mit Abstand deutlich bessere 50Hz-Magnetwerte liefern als die dickeren glatten Bänder.

[0036] **Figur 5** zeigt die dynamische Koerzitivfeldstärke H_c (gemäß Definition in **Figur 1**) in Abhängigkeit des Verhältnisses d/R_a . Die Werte für $f = 1$ Hz fallen mit den quasistatisch gemessenen Werten zusammen und zeigen, wie schon erwähnt, praktisch keine Abhängigkeit von d/R_a . Die wirbelstrombestimmten 50 Hz-Werte hingegen nehmen linear mit d/R_a zu, was den oben dargelegten theoretischen Erwartungen entspricht. Die Extrapolation der 50Hz-Werte für $d/R_a \geq 0$ führt auf einen Wert, der in etwa der quasistatischen Koerzitivfeldstärke entspricht.

[0037] Für die mögliche Anwendung in 30mA-Fehlerstromschaltern ist die Induktionsamplitude B_{10} bei einer erregenden Feldamplitude von 10 mA/cm relevant. Die Konsequenzen des Verhältnisses d/R_a für diese Größe sind in **Figur 6** dargestellt. B_{10} nimmt mit abnehmender Banddicke und zunehmender Rauigkeit deutlich zu. Der maximale Wert von B_{10} , d.h. B_{10} ungefähr gleich B_s , ist zu erwarten, wenn die dynamische Koerzitivfeldstärke H_c kleiner als 10 mA/cm wird. Dies ist z.B. für kleinere Frequenzen realisiert.

Beispiel 2

[0038] Dem Beispiel 2 liegen Untersuchungen in Bezug auf Rauigkeit und Banddicke mit der Legierung $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ aus verschiedenen Chargen, sowie Untersuchungen weiterer Einflussparameter zugrunde.

[0039] Die an verschiedenen Chargen der Legierung $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ gewonnenen Ergebnisse sind in den **Figuren 7-11** dargestellt. Es ergibt sich auch hier die eben diskutierte Abhängigkeit der Magnetwerte von Bandrauigkeit und Banddicke. Im Unterschied zum oben diskutierten Fall kommt hier der Einfluss der Rauigkeit etwas expliziter zum Ausdruck, da die mittlere Banddicke nicht so stark wie in Beispiel 1 variiert (**Figur 7**).

[0040] Die Werte der statischen Koerzitivfeldstärke liegen bei etwa 3,5 mA/cm. Dieser im Vergleich zur Legierung des Beispiels 1 $Fe_{75,5}Cu_1Nb_3Si_{12,5}B_8$ deutlich niedrigere Werte ist zum Teil dadurch bedingt, dass die statische Schleife nur mit etwa 20 mA/cm angesteuert wurde. Bei einer vergleichbaren Aussteuerung von $H_{max} = 50$ mA/cm ergeben sich etwas höhere H_c -Werte um $H_c = 5$ mA/cm.

[0041] Die 50Hz-Magnetwerte liegen im vorliegenden Fall ($Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$) etwas günstiger als diejenigen der Legierung $Fe_{75,5}Cu_1Nb_3Si_{12,5}B_8$. Dies kommt am deutlichsten beim Vergleich der B_{10} -Werte bei demselben d/R_a -Verhältnis zum Ausdruck (vgl. **Figur 8 und 10**). Hierzu ist anzumerken, dass die Legierung mit 13,5 Atomgew. % Si und mit $\lambda_s = 2 \times 10^{-6}$ und $K_u = 20$ J/m³, sowohl eine um den Faktor zwei kleinere Magnetostruktionskonstante λ_s , als auch eine kleinere magnetfeldinduzierte Anisotropie K_u aufweist (die entsprechenden Werte für die Legierung mit 12,5 Atomgew. % Si sind: $\lambda_s = 3,5 \times 10^{-6}$ und $K_u = 40$ J/m³). Damit besitzt die Legierung mit Si 13,5 Atomgew. % sowohl für die reinen weichmagnetischen Eigenschaften wie auch für die dynamischen Eigenschaften günstigere Grundvoraussetzungen.

[0042] Bei genauerer Betrachtung der **Figuren 9 und 10** fällt ein Ausreißer auf (gekennzeichnet durch ein Ausrufungszeichen); es handelt sich hierbei um ein Band aus einer Charge KA 1114. Auffällig sind die, trotz relativ kleinem d/R_a -Verhältnis, relativ schlechten dynamischen Eigenschaften, wie auch die im Vergleich zu den anderen Chargen mehr als doppelt so hohe statische Koerzitivfeldstärke. Ferner wies dieses Band auch eine bezüglich des Feldnullpunktes stark verschobene Hystereseschleife auf. Auffällig an der Bandgeometrie war eine mehr als 5 μ m tiefe Längsriefe, die im R_a -Wert nicht enthalten war, d.h. es wurde bei der Messung nicht über diese Riefe hinweg gemessen. Diese Riefe rührt von Schlacketeilchen in der Düse her, was schließlich zu einer Spaltung des Bandes und letztlich zum vorzeitigen Schussabbruch führte.

[0043] Bei Werkstoffen mit rechteckförmiger Hystereseschleife ist die Magnetisierungskennlinie relativ empfindlich von den genauen Messbedingungen und dem Zustand des Kernes vor der Messung abhängig. Die bislang diskutierten Kennlinien wurden im abnehmenden Magnetfeld gemessen (entspricht einer Messung des entmagnetisierten Kernes) an Kernen im Zustand "wie getempert, einige Tage danach". Im Vergleich zu einer derartigen Referenzkurve ergibt sich:

1. Eine Reduzierung der Induktionswerte um bis zu 50-100 mT nach Gleichfeldvorbelastung (im vorliegenden Fall ca. 1A/cm).

2. Eine Anhebung der Induktionswerte bis zu 100-200 mT nach Klopfen des Kernes.

[0044] **Figur 11** zeigt diese Änderungen als Funktion des erregenden Feldes zusammen mit der B-H-Kommutierungskurve im Vergleich mit Ultraperm 200. Es ist erkennbar, dass die Änderungen des weichmagnetischen nanokristallinen Metallbands deutlich größer als bei dem grobkristallinen Ultraperm 200 Metallband einer NiFe-Legierung sind.

[0045] Bemerkenswert sind die Änderungen der Magnetwerte nach einem Klopfen des Metallbands. Während die hier untersuchten Chargen der Legierungszusammensetzung $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ eine deutliche Änderung der Magnetwerte zeigten, war bei der Legierung $Fe_{75,5}Cu_1Nb_3Si_{12,5}B_8$ (trotz höherer Magnetostruktion) wie auch bei Ultraperm 200 praktisch keine Änderung zu beobachten. Momentan kann das Phänomen nur als Hinweis verstanden werden, dass das Handling der Kerne die Magnetwerte fallweise beeinflussen kann.

[0046] Der Einfluss eines Gleichfeldstoßes hingegen war wesentlich reproduzierbarer und bei allen untersuchten Kernen zu beobachten. Das Phänomen spiegelt den irreversiblen Charakter der zugrunde liegenden Magnetisierungsprozesse wieder (Pinning von Domänen-Wänden, Nachwirkungseffekte). Dieser Effekt kann beim Messen unter Umständen unkontrolliert auftreten, nämlich beim Ein- und Ausschalten des Stromes in einem bestimmten Arbeitspunkt, abhängig von der ohmschen Last im Primär- und Sekundärkreis. Ursächlich hierfür sind durch induktive Rückwirkung bedingte Stromstöße, die das Material kurzzeitig in die Sättigung fahren können.

[0047] Praktisch gesehen bedeuten diese Effekte, dass die Induktionswerte bei nanokristallinen Werkstoffen mit rechteckförmiger Hystereseschleife in einem gegebenen Arbeitspunkt für ein- und denselben Kern momentan nur mit einer Toleranz von ca. ± 100 mT angegeben werden können.

Beispiel 3

[0048] Dem Beispiel 3 liegen Untersuchungen an einem amorphen Vergleichswerkstoff VITROVAC 6030 Z (Z steht für Werkstoff mit rechteckförmiger Hystereseschleife) in Bezug auf Rauigkeit und Banddicke zugrunde.

[0049] Zum Vergleich mit dem nanokristallinen Material zeigen die **Figuren 12 und 13** eine entsprechende Auswertung bei 50 Hz an VITROVAC 6030 Z gemessener Daten. Für $d/R_a > 15$ ergibt sich ein analoges Bild. Für $d/R_a < 15$ ($d = 15$ μm , $R_a = 1,5$ μm bis 3 μm) ist jedoch hier wieder eine Verschlechterung der Magnetwerte im Gegensatz zu dem linearen Anstieg bei nanokristallinen Metallbändern festzustellen. Dies ist im wesentlichen durch den Einfluss der Rauigkeit auf die quasistatische Koerzitivfeldstärke und die Remanenzmagnetisierung bedingt.

[0050] Die Ergebnisse für VITROVAC 6030 Z machen deutlich, dass der Verbesserung der dynamischen Eigenschaften durch Reduktion der Banddicke und im Falle von amorphen Metallbändern mit rechteckförmigen Hystereseschleifen durch Anhebung der Bandrauigkeit Grenzen gesetzt sind.

[0051] Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass die 50Hz-Eigenschaften von amorphen und nanokristallinen Werkstoffen mit rechteckförmiger Hystereseschleife entscheidend vom Verhältnis Banddicke d zu Rautiefe R_a bestimmt werden. Dabei fällt dem Einfluss von d/R_a mindestens eine genauso wichtige Rolle zu wie dem früher festgestellten Einfluss der in Bandrichtung induzierten uniaxialen Anisotropie K_u . Im Hinblick auf die Fertigungssicherheit erlangt d/R_a fast eine entscheidende Rolle, da dieser Parameter wesentlich schwieriger zu beherrschen ist, als die durch die Legierungszusammensetzung und Anlassbehandlung wohl definierte induzierte Anisotropie K_u .

[0052] Die besten Magnetwerte wurden bislang an dünnen (15 bis 20 μm) und rauen Bändern ($R_a = 1$ bis $1,5$ μm) mit d/R_a -Verhältnissen zwischen 10 und 20 beobachtet. Dabei weisen frühere Untersuchungen an VITROVAC 6030 Z jedoch auch darauf hin, dass bei zu kleinen d/R_a -Verhältnissen die Magnetwerte aufgrund anwachsender Hystereseverluste wieder verschlechtert werden. Die kritische Grenze für nanokristalline Legierungen wurde noch nicht erreicht.

[0053] Die physikalische Ursache für die Verbesserung der Magnetwerte mit zunehmender Rauigkeit und abnehmender Banddicke könnte auf dynamische Domänenverfeinerung in dem nanokristallinen Metallband zurückzuführen sein. Letzteres resultiert vermutlich aus den um Oberflächendefekten herum (wie Lufttaschen an der Bandunterseite, gröbere kristalline Ausscheidungen u.a.) vorhandenen Abschlussdomänenstrukturen und vergleichbaren Magnetisierungsinhomogenitäten.

[0054] Für gute Magnetwerte sollte nach möglichst dünnem Band (möglichst unter 20 μm mittlere Banddicke) mit "definierter" Rauigkeit (um oder über $R_a = 1$ μm) gestrebt werden.

[0055] Die Forderung nach rauem Band führt zu einer Verbesserung der dynamischen Magnetwerte, wenn der Magnetisierungsprozess maßgeblich durch Wandverschiebungen getragen wird. Dies trifft voll für Werkstoffe mit rechteckförmiger Hystereseschleife und bedingt für runde Hystereseschleifen zu.

[0056] Eine mögliche Magnetisierungsprozess bei rechteckförmigen Hystereseschleifen besteht darin, dass die Magnetisierung über die Bewegung von 180° -Domänenwänden quer zur Bandlängsrichtung abläuft. Aufgrund der hiermit verbundenen starken räumlichen Lokalisierung der Magnetisierungsänderungen ergeben sich überhöhte, sogenannte anomale Wirbelstromverluste. Dabei ist die Überhöhung der Verluste umso größer, je weniger Domänen am Magnetisierungsprozess beteiligt sind.

[0057] Die Untersuchung der Frequenzabhängigkeit zeigt, dass die Magnetisierungskennlinie von nanokristallinen ferromagnetischen Werkstoffen mit rechteckförmiger Hystereseschleife sehr gut im Rahmen der schon für amorphe Legierungen erfolgreich eingesetzten Theorie von Bertotti aus Bertotti, J. Magn. Mat., 1556, 1986, Seiten 54 bis 57, beschrieben werden kann. Hiernach ergibt sich der Beitrag der anomalen Wirbelstromverluste als

$$P_{\text{Fe}}^{\text{nano}} \propto \sqrt{\frac{V_0}{\rho_{\text{el}} \cdot n_0}} \cdot (f \cdot \hat{B})^{3/2} \quad (1)$$

Dabei bezeichnen

- ρ_{el} den spezifischen elektrischen Widerstand,
- n_0 die Zahl der Domänen pro Flächeneinheit beim quasi - statischen Durchlaufen der Hystereseschleife,
- V_0 einen Mindestwert, um den das äußere Feld erhöht werden muss, um eine neue Domäne zu bilden, bzw. eine gepinnte Wand in Bewegung zu setzen, V_0 ist damit letztlich eng verknüpft mit der statischen Koerzitivfeldstärke,
- f die Ummagnetisierungsfrequenz und
- $\hat{B}$ die Induktionsamplitude.

[0058] Die Verlustleistung ist allgemein durch $H \, dB/dt$ gegeben, wobei die Ummagnetisierungsgeschwindigkeit dB/dt proportional zu $f \cdot B$ ist. H ist das äußere Feld, das nötig ist um die lokal erzeugten Wirbelstromfelder zu kompensieren. Aus Gleichung (1) folgt hierfür:

$$H - H_c^{stat}(B) \propto \sqrt{\frac{V_0 \cdot f \cdot \hat{B}}{\rho_{el} \cdot n_0}} \quad (2)$$

[0059] Dabei bezeichnet $H_c^{stat}(B)$ den Verlauf der quasistatischen Hystereseschleife, der hauptsächlich durch Koerzitivfeldmechanismen bestimmt wird. Der Beitrag der sogenannten klassischen Wirbelströme wird hierbei vernachlässigt, was für nicht zu große Frequenzen ($f < 1000$ Hz) gerechtfertigt ist. Zum Beispiel liefert eine Abschätzung für $f = 50$ Hz und $B = 1$ T für das aus klassischen Wirbelströmen resultierende Wirbelstromfeld nur Bruchteile von mA/cm.

[0060] Die letztlich entscheidenden Parameter in Gleichung (1) und (2) sind die Domänenendichte n_0 , wie auch die Keimbildungsfeldstärke V_0 . Zu klären ist im Nachfolgenden, wie beide Größen mit der Oberflächenrauigkeit und der Banddicke in Verbindung stehen.

[0061] Bei in Bandedene liegender Magnetisierung bilden sich an geometrischen Abweichungen von einer ideal planen Oberfläche magnetische Oberflächenpole aus, was zu lokalen Streufeldern führt. Zur Reduktion der hiermit verbundenen Streufeldenergie bilden sich an den Oberflächendefekten Magnetisierungsinhomogenitäten, im Extremfall sind dies zipfelartige Abschlussdomänen z.B. an den Lufttaschen der Bandunterseite. Damit ist die Konsequenz einer langsameren Einmündung in die ferromagnetische Sättigung und insbesondere eine Reduktion des Remanenzverhältnisses gemäß

$$J_r/J_s \approx 1 - \frac{1}{2} N_{eff} \sqrt{\frac{J_s^2}{2\mu_0 K}} \quad (3a)$$

verbunden, wobei

$$N_{eff} \approx \frac{\pi^3}{8} \cdot \frac{R_a^2}{\lambda \cdot d} \quad (3b)$$

ein mittlerer durch die Oberflächenrauigkeit bedingter Entmagnetisierungsfaktor ist. Es bezeichnen ferner d die Banddicke, K die Anisotropie in Bandlängsrichtung und λ eine effektive Wellenlänge, die ein Maß für die Ausdehnung und den Abstand der Oberflächendefekte darstellt.

[0062] In diesem Fall sollte eine erhöhte Bandrauigkeit auch eine erhöhte Keimbildungswahrscheinlichkeit für neue Domänen mit sich ziehen. Untersuchungen der dynamischen Domänen-Struktur an FeSi-Blech und amorphen Metallen geben auch Hinweise darauf, dass mit steigender Frequenz neue Domänen vorzugsweise an Oberflächenunregelmäßigkeiten entstehen.

[0063] Zur Abschätzung des Einflusses von R_a auf die Domänenendichte n_0 kann z.B. von folgender stark vereinfachten Modellvorstellung ausgegangen werden:

Domänen, welche die Ummagnetisierung einleiten, bilden sich vorzugsweise an den Oberflächenunregelmäßigkeiten und besitzen somit in etwa deren effektive Ausdehnung λ . Für N_0 Domänen ergibt sich damit ein Querschnittsanteil $N_0 \cdot \lambda \cdot b = \eta_0 \cdot \lambda \cdot d$ (b = Bandbreite, $n_0 = N_0/(b \cdot d)$). Dieser Querschnittsanteil reduziert andererseits die Remanenzmagnetisierung und ist damit proportional zu $1 - J_r/J_s$. Damit folgt:

$$n_0 \approx \frac{1 - J_r / J_s}{\lambda \cdot d} \propto \frac{R_a^2 \cdot J_s}{(\lambda \cdot d)^2 \cdot \sqrt{K}} \quad (4)$$

[0064] Zu einem hinsichtlich der R_a , d und K -Abhängigkeit ähnlichen Ausdruck gelangt man, wenn man von der mittleren Streufeldenergie $1/2 N_e J_s^2$ ausgeht und diese gleich der Domänenwandenergie setzt, die notwendig ist, um n_0 Domänen pro Querschnitt zu erzeugen.

[0065] Außerdem sind für den Einfluss auf die Wirbelstromverluste noch die maßgeblichen Koerzitivfeldmechanismen zu berücksichtigen. Hier ist im wesentlichen zwischen zwei Fällen zu unterscheiden:

a) H_c ist durch Pinning an Oberflächendefekten bestimmt

[0066] Dabei ist die Koerzitivfeldstärke im Wesentlichen durch Pinning an den Oberflächendefekten bestimmt. Die Mindestfeldstärke V_0 um eine neue, bislang gepinnte Domäne am Magnetisierungsprozess zu beteiligen, ist dann anlog zu H_c durch

$$V_0 \propto H_c \propto \frac{R_a}{\lambda \cdot d} \frac{\sqrt{A \cdot K}}{J_s} \quad (5a)$$

gegeben. Dann folgt aus Gl. (2) für das Wirbelstromfeld

$$H - H_c^{stat}(B) \propto \sqrt{\frac{\lambda \cdot d}{R_a} \cdot K_u \cdot f \cdot \hat{B}} \quad (5b)$$

[0067] Hierbei ist zu beachten, dass H_c^{stat} entsprechend Gleichung (5a) proportional zu R_a/d ist, also letztlich stärker von R_a/d abhängig ist als die anomalen Wirbelstromverluste. Damit ergeben sich für zu raue Bänder, aufgrund der zunehmenden Hystereseverluste wieder schlechtere Magnetwerte.

b) H_c ist von Oberflächendefekten unabhängig

[0068] In diesem Fall ist H_c durch Keimbildung bzw. durch Pinning an intrinsischen Anisotropiefluktuationen bestimmt. Dann ist

$$V_0 \propto H_c \propto K / J_s \quad (6a)$$

womit das Wirbelstromfeld als

$$H - H_c^{stat}(B) \propto \frac{\lambda \cdot d}{R_a} \sqrt{K^{3/2} \cdot f \cdot \hat{B}} \quad (6b)$$

folgt. Dieser Fall ist insbesondere für nanokristalline Werkstoffe wichtig, bei denen auf Grund der endlichen Korngröße die mittlere Kristallanisotropie (K_1) einen entscheidenden Beitrag zu H_c liefern kann, im Gegensatz etwa zu amorphen Systemen. Bei konsequenter Rechnung wäre hier entsprechend der Term $K^{3/2}$ durch $K_u^{1/2} \langle K_1 \rangle$ zu ersetzen.

[0069] In diesem Grenzfall ist die Koerzitivfeldstärke und somit sind auch die Hystereseverluste unabhängig von der Rauigkeit. Entsprechend ergibt sich eine effizientere Reduktion der Gesamtverluste mit zunehmender Rauigkeit, als im oben diskutierten Fall der amorphen Werkstoffe.

[0070] Insgesamt scheinen sich die generellen Aussagen der obigen Modellrechnung mit dem nachfolgenden Experiment übereinzustimmen. Man muss sich aber dennoch der stark vereinfachenden Annahmen, die in obige Formeln eingehen, bewusst sein.

[0071] Zusammenfassend ist festzustellen, dass die 50Hz-Kennlinie nanokristalliner (wie auch amorpher) Werkstoffe mit rechteckförmiger Hystereseschleife entscheidend von anomalen Wirbelstromverlusten geprägt ist. Die obigen Untersuchungen lassen es feststellen, dass hierbei das Verhältnis von Banddicke d zu Oberflächenrauigkeit R_a einen wesentlichen Einflussparameter bildet, der weit über den Einfluss der Legierungszusammensetzung hinausgehen kann.

Die besten Magnetwerte wurden für Verhältnisse $d/R_a < 20$ gefunden, d.h. für dünne Bänder (um $20\text{ }\mu\text{m}$ und kleiner) mit relativ rauer Oberfläche (R_a um $1\text{ }\mu\text{m}$ oder etwas größer). Mit der Legierungszusammensetzung $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ können so in dem für wechselstromsensitive 30 mA Fehlerstromschalter relevanten Arbeitspunkt bei $H_c = 10\text{ mA/cm}$ etwa doppelt so hohe Induktionswerte wie bei grobkristallinen NiFe-Legierungen (wie Ultraperm 10, 200) erreicht werden. Die Möglichkeit, derartige Spitzenwerte zu erreichen und entscheidende Ansatzpunkte für ihre reproduzierbare Herstellung zu schaffen, kann somit erreicht werden.

Patentansprüche

1. Weichmagnetisches Metallband, wobei das weichmagnetische Metallband eine nanokristalline oder amorphe Struktur aufweist, wobei das Metallband Verhältnisse von Banddicken zu Rauigkeiten d/R_a von $5 \leq d/R_a \leq 25$, vorzugsweise zwischen $10 \leq d/R_a \leq 20$ aufweist,
dadurch gekennzeichnet, dass
das Metallband ein Fischschuppenmuster mit einer quer und schräg zur Bandlängsrichtung angeordneten Struktur aufweist.
2. Metallband nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, wobei das Metallband Legierungsbestandteile von Silizium, Bor, Niob und Kupfer in über 73 Atomgew.% Eisen aufweist.
3. Metallband nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei das Metallband eine Legierung mit $\text{Fe}_{75,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{12,5}\text{B}_8$ oder $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ aufweist.
4. Metallband nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Banddicke zwischen $5\text{ }\mu\text{m} < d < 30\text{ }\mu\text{m}$, vorzugsweise zwischen $5\text{ }\mu\text{m} < d \leq 20\text{ }\mu\text{m}$ liegt und/oder die Rauigkeit R_a zwischen $0,6\text{ }\mu\text{m} < d < 2,5\text{ }\mu\text{m}$, vorzugsweise zwischen $1\text{ }\mu\text{m} < d < 2\text{ }\mu\text{m}$ liegt.
5. Metallband nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei $Br/B_m > 80\%$ ist.
6. Metallband nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine Oberfläche des Metallbands eine Oberflächen-topologie einer Oberflächenstrukturierung einer Gießwalze aufweist.
7. Magnetkern, umfassend ein gewickeltes weichmagnetisches Metallband, nach einem der Ansprüche 1 bis 6.
8. Verwendung des weichmagnetischen Metallbands gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6 für Fehlerstromschalter mit einem Fehlerstromgrenzwert $I_{\text{max}} \leq 30\text{ mA}$.
9. Verwendung des weichmagnetischen Metallbands gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6 für einen Drehzahlsensor in Zusammenwirken mit einer segmentierten Permanentmagnetscheibe.
10. Verwendung des weichmagnetischen Metallbands gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6 für wechselstromsensitive elektromechanische Bauelemente mit einem weichmagnetischen Ringbandkern.
11. Wechselstromsensitiver Fehlstromschutzschalter, der einen Magnetkern nach Anspruch 7 aufweist.
12. Wechselstromsensitiver Fehlstromschutzschalter nach Anspruch 11, wobei bei einer Frequenz von kleiner als 1000Hz der Magnetkern ein Verhältnis $Br/B_m > 80\%$ aufweist.
13. Verteilertransformator, der einen Magnetkern nach Anspruch 7 aufweist.
14. Verteilertransformator nach Anspruch 13, wobei bei einer Frequenz von kleiner als 1000Hz der Magnetkern ein Verhältnis $Br/B_m > 80\%$ aufweist.

Claims

1. Soft magnetic metal strip, wherein the soft magnetic metal strip has a nanocrystalline or amorphous structure, wherein the metal strip has strip thickness-to-roughness ratios d/Ra of $5 \leq d/Ra \leq 25$, preferably $10 \leq d/Ra \leq 20$,
characterised in that
the metal strip has a fish scale pattern with a structure arranged across and at an angle to the strip longitudinal direction.
2. Metal strip according to claim 1 or claim 2, wherein the metal strip contains alloy constituents of silicon, boron, niobium and copper in more than 73 % iron by atomic weight.
3. Metal strip according to any of claims 1 to 3, wherein the metal strip contains an alloy with $Fe_{75.5}Cu_1Nb_3Si_{12.5}B_8$ or $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$.
4. Metal strip according to any of the preceding claims, wherein the strip thickness lies between $5 \mu m < d < 20 \mu m$ and/or the roughness Ra lies between $0.6 \mu m < d < 2.5 \mu m$, preferably between $1 \mu m < d < 2 \mu m$.
5. Metal strip according to any of the preceding claims, wherein Br/Bm is $> 80\%$.
6. Metal strip according to any of the preceding claims, wherein one surface of the metal strip has a surface topology of a surface structuring of a casting roller.
7. Magnet core comprising a wound soft magnetic strip according to any of claims 1 to 6.
8. Use of the soft magnetic strip according to any of claims 1 to 6 for earth leakage circuit breakers with a leakage current limit value $I_{max} \leq 30$ mA.
9. Use of the soft magnetic strip according to any of claims 1 to 6 for a speed sensor acting together with a segmented permanent magnet disc.
10. Use of the soft magnetic strip according to any of claims 1 to 6 for AC-sensitive electromechanical components with a soft magnetic annular strip core.
11. AC-sensitive earth leakage circuit breaker having a magnet core according to claim 7.
12. AC-sensitive earth leakage circuit breaker according to claim 11, wherein the magnet core has a Br/Bm ratio $> 80\%$ at a frequency of less than 1000 Hz.
13. Distribution transformer having a magnet core according to claim 7.
14. Distribution transformer according to claim 13, wherein the magnet core has a Br/Bm ratio $> 80\%$ at a frequency of less than 1000 Hz.

Revendications

1. Ruban métallique magnétique doux, le ruban métallique magnétique doux présentant une structure nanocristalline ou amorphe, le ruban métallique présentant des rapports d'épaisseur de ruban par rapport à la rugosité d/Ra compris entre $5 \leq d/Ra \leq 25$, de préférence entre $10 \leq d/Ra \leq 20$, caractérisé en ce que le ruban métallique présente un motif d'écailles de poisson ayant une structure disposée obliquement et transversalement par rapport à la direction longitudinale du ruban.
2. Ruban métallique selon la revendication 1 ou la revendication 2, le ruban métallique présentant des composants d'alliage de silicium, bore, niobium et cuivre dans plus de 73 % de fer en poids atomique.
3. Ruban métallique selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, le ruban métallique présentant un alliage de $Fe_{75.5}Cu_1Nb_3Si_{12.5}B_8$ ou $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$.

EP 2 643 839 B1

4. Ruban métallique selon l'une quelconque des revendications précédentes, l'épaisseur de ruban se situe entre $5\text{ }\mu\text{m} < d < 30\text{ }\mu\text{m}$, de préférence entre $5\text{ }\mu\text{m} < d < 20\text{ }\mu\text{m}$ et/ou la rugosité R_a se situe entre $0,6\text{ }\mu\text{m} < d < 2,5\text{ }\mu\text{m}$, de préférence entre $1\text{ }\mu\text{m} < d < 2\text{ }\mu\text{m}$.
- 5 5. Ruban métallique selon l'une quelconque des revendications précédentes, $Br / Bm > 80\%$.
6. Ruban métallique selon l'une quelconque des revendications précédentes, une surface de la bande de métal présentant une topologie de surface d'une structuration de surface d'un cylindre de coulée.
- 10 7. Noyau magnétique, comprenant un ruban métallique magnétique doux, selon l'une quelconque des revendications 1 à 6.
8. Utilisation du Ruban métallique magnétique doux selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 pour un interrupteur à courant de défaut ayant une valeur limite de courant de défaut $I_{max} \leq 30\text{ mA}$.
- 15 9. Utilisation du Ruban métallique magnétique doux selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 pour un capteur de vitesse en coopération avec un disque d'aimant permanent segmenté.
- 20 10. Utilisation du ruban métallique magnétique doux selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 pour des composants électromagnétiques sensibles au courant alternatif ayant un tore bobiné magnétique doux.
11. Interrupteur à courant de défaut sensible au courant alternatif présentant un noyau magnétique selon la revendication 7.
- 25 12. Interrupteur à courant de défaut sensible au courant alternatif selon la revendication 11, à une fréquence inférieure à 1 000 Hz , le noyau magnétique présente un rapport $Br / Bm > 80\%$.
13. Transformateur de distribution présentant un noyau magnétique selon la revendication 7.
- 30 14. Transformateur de distribution selon la revendication 13, à une fréquence inférieure à 1 000 HZ , le noyau magnétique présente un rapport $Br/Bm > 80\%$.

35

40

45

50

55

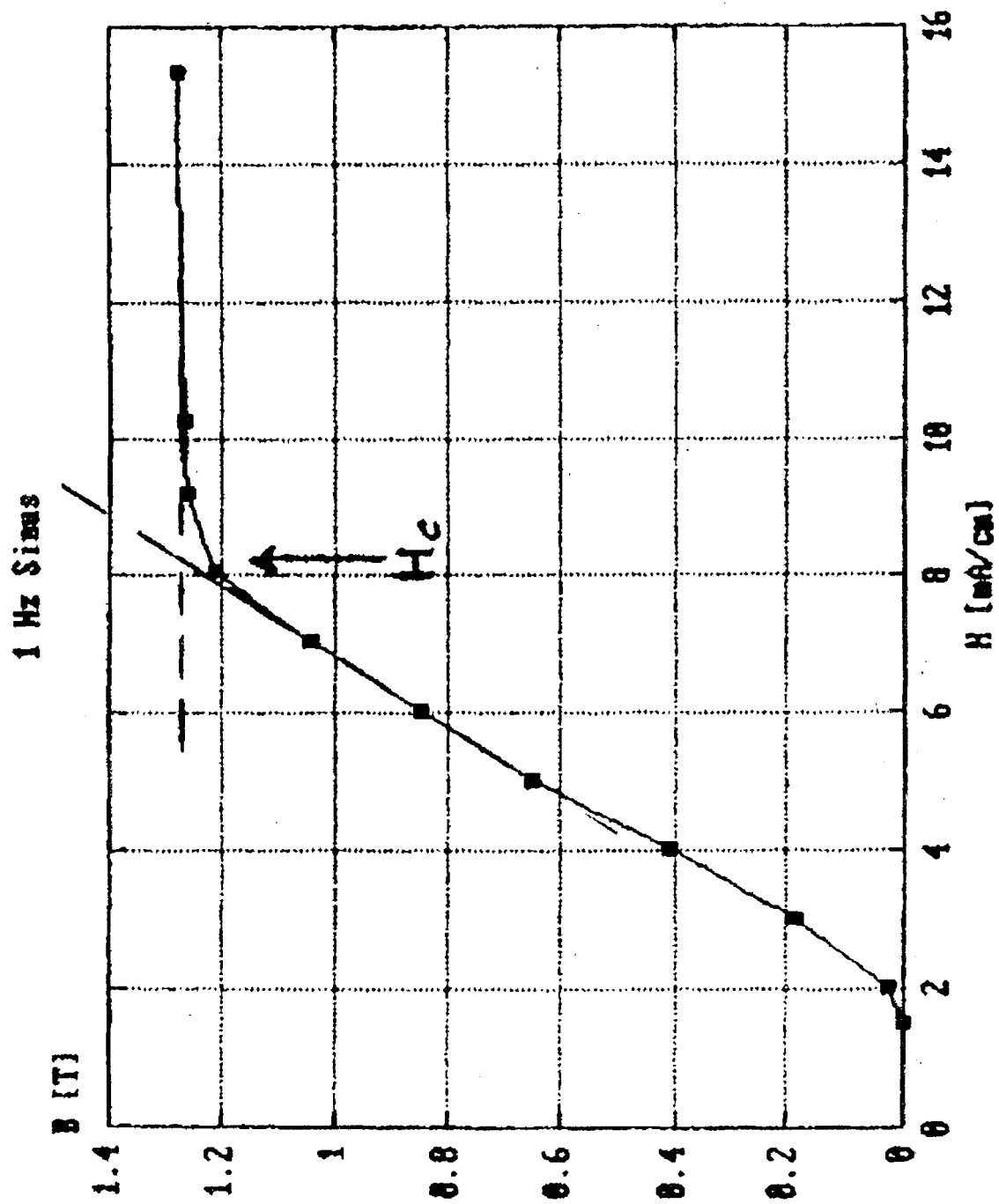


FIG. 1

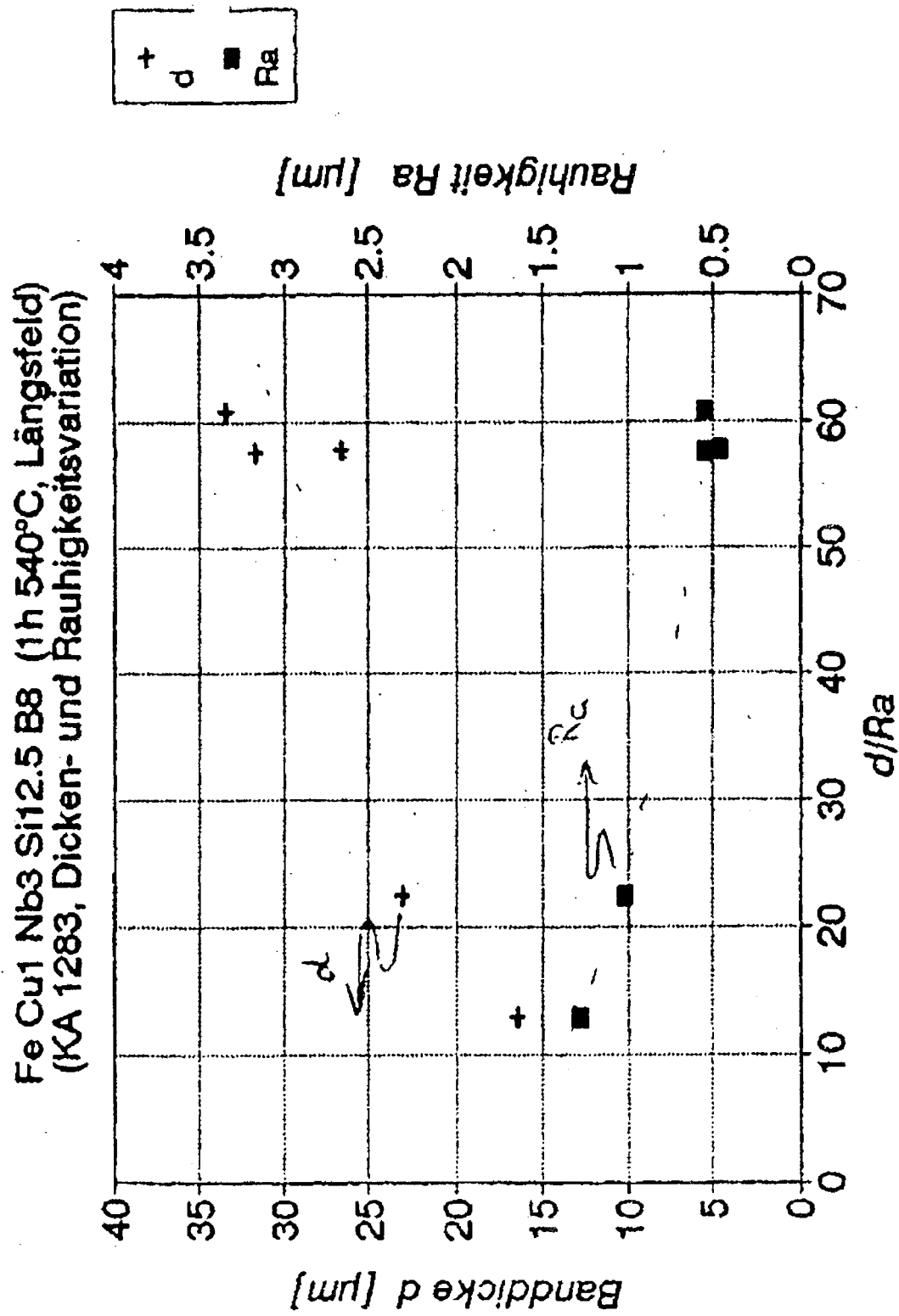


FIG. 2

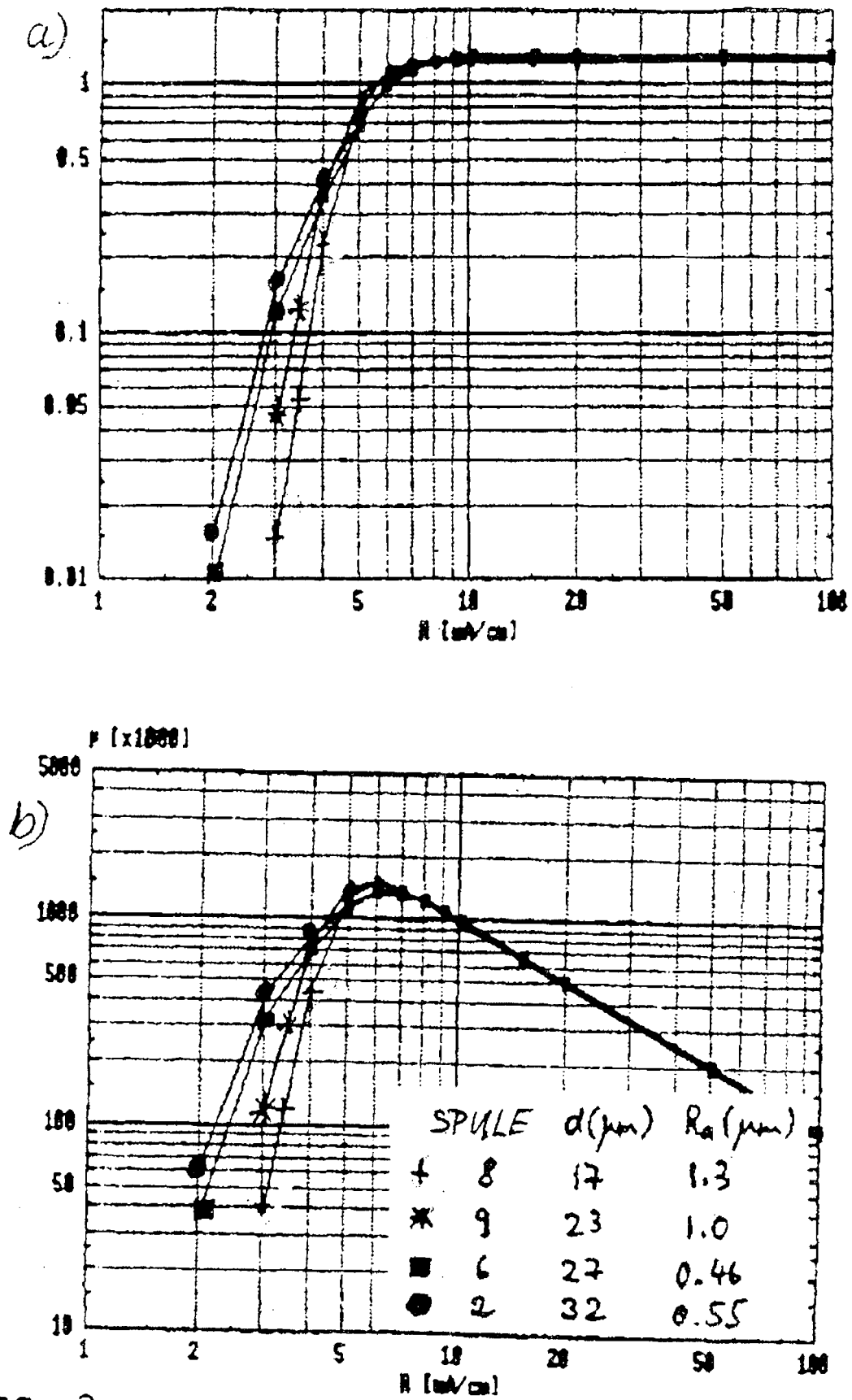


FIG. 3

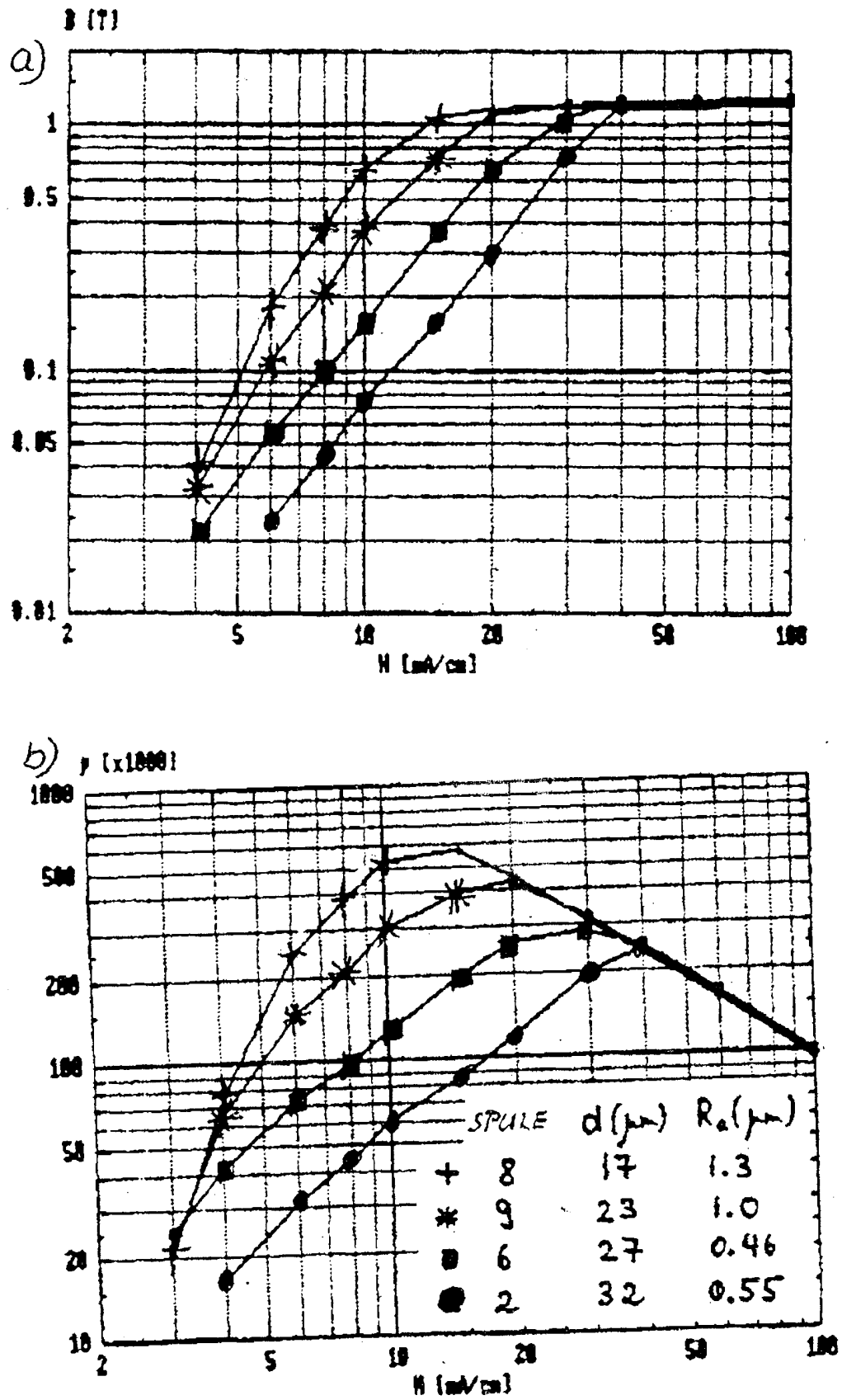


FIG. 4

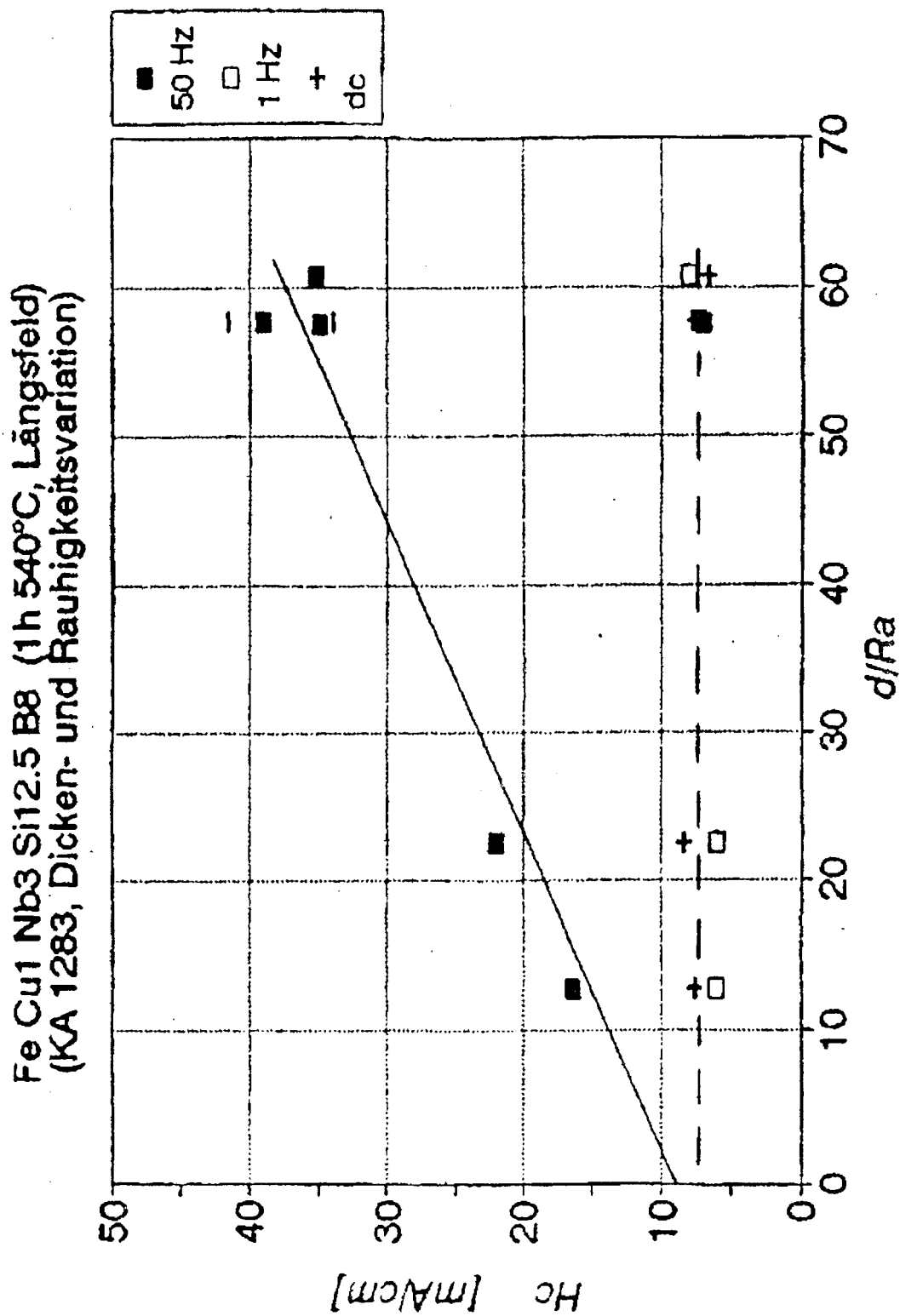


FIG. 5

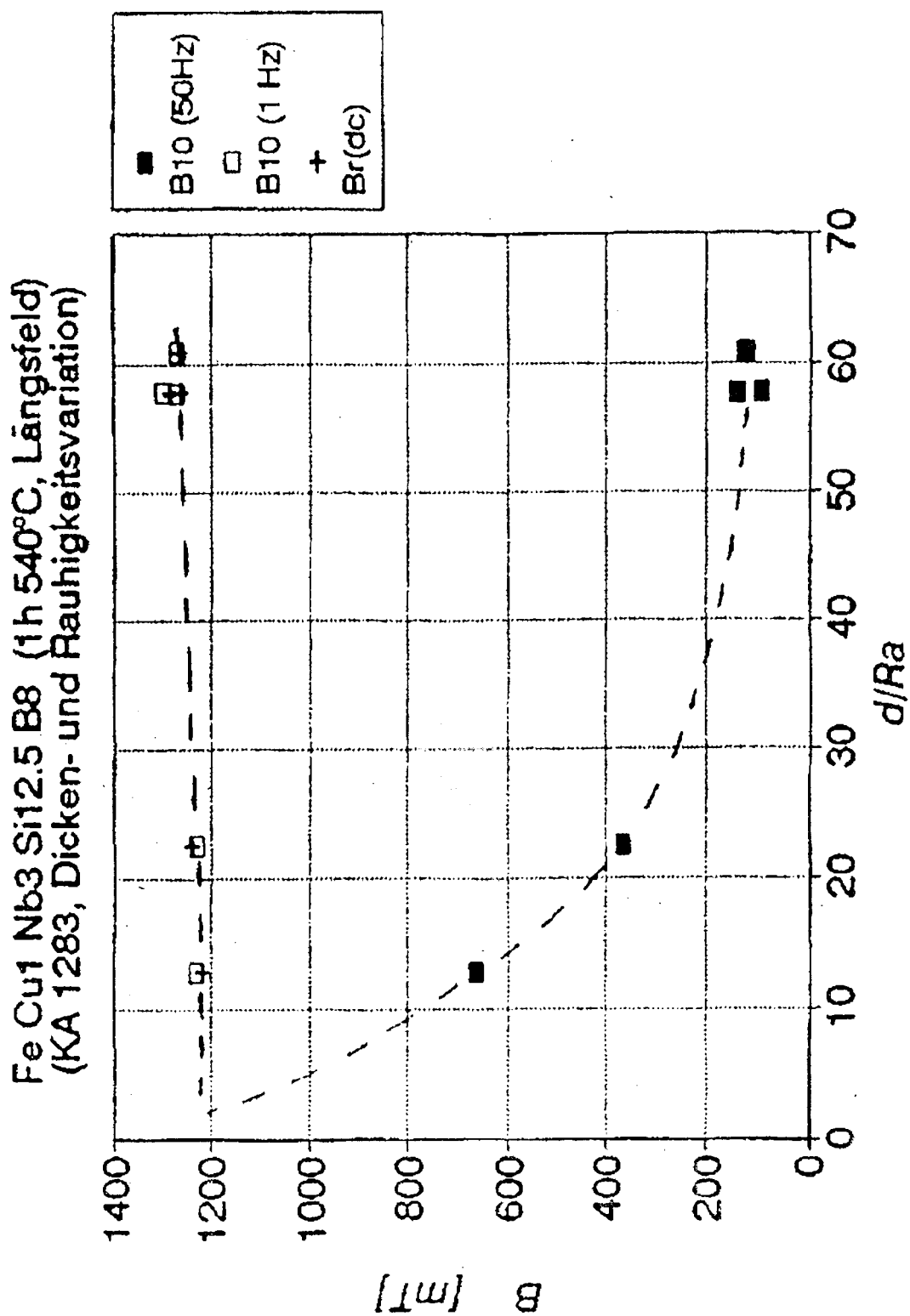


FIG. 6

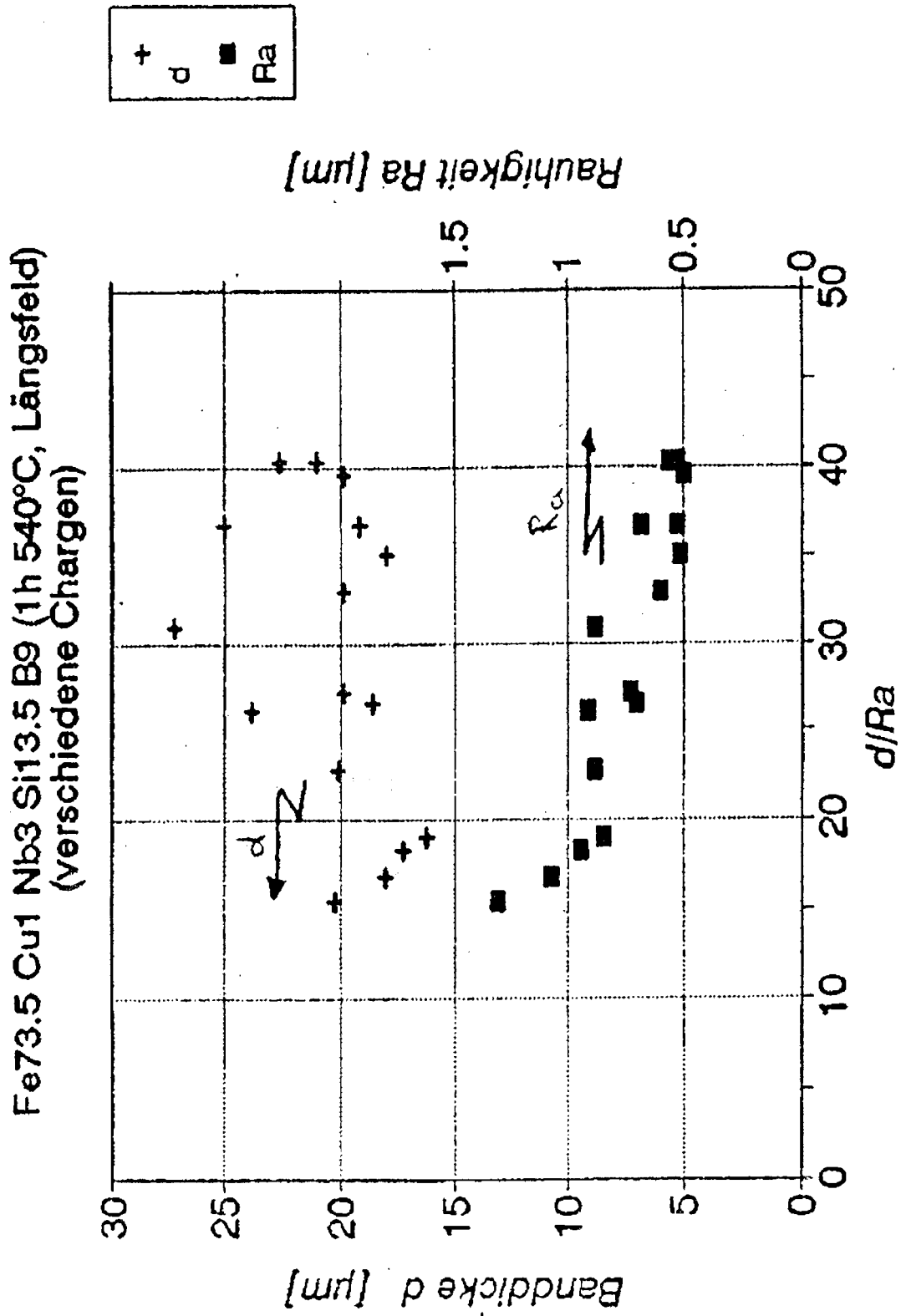


FIG. 7

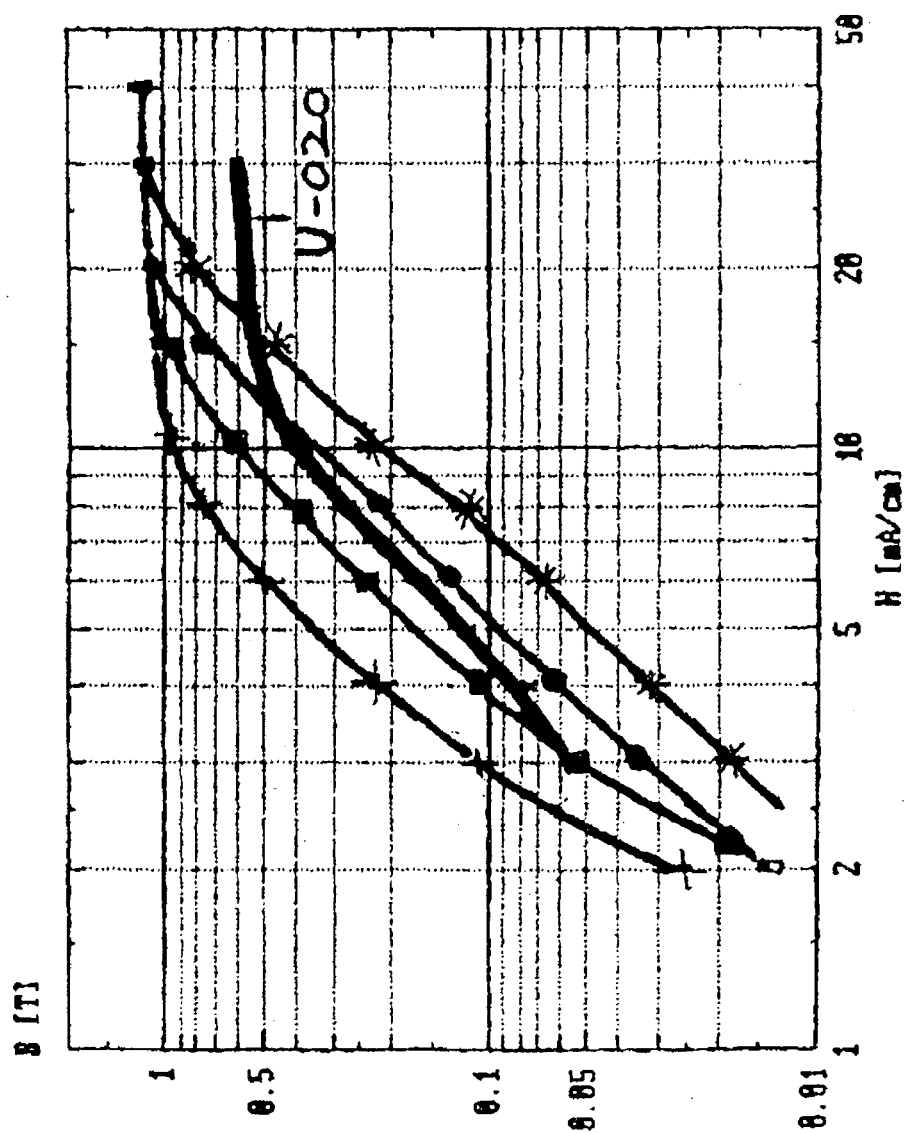


FIG. 8

mit $d/Ra = 15$, $\blacksquare$ $d/Ra = 22$, $\bullet$ $d/Ra = 30$, $\ast$ $d/Ra = 40$

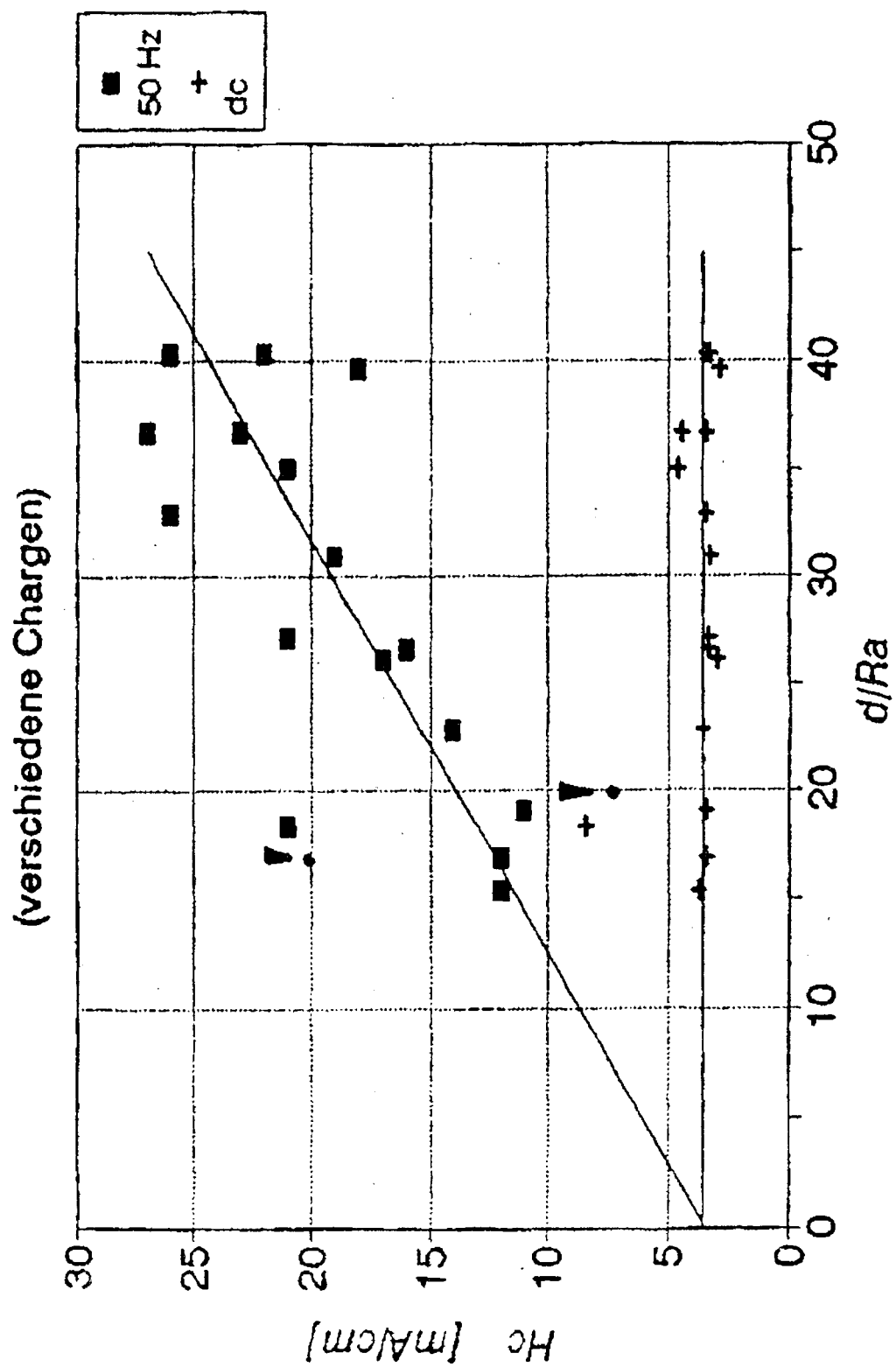


FIG. 9

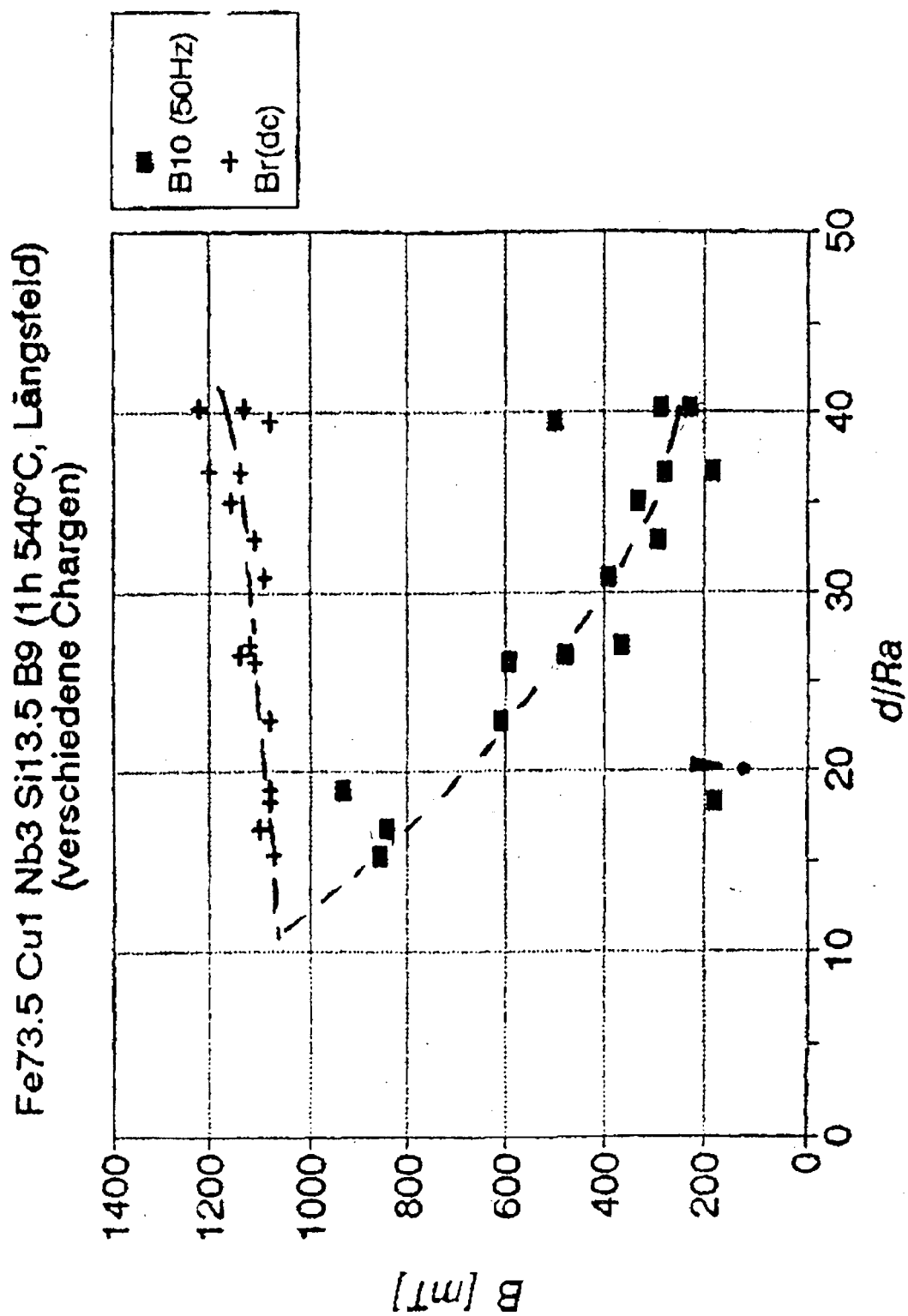


FIG. 10

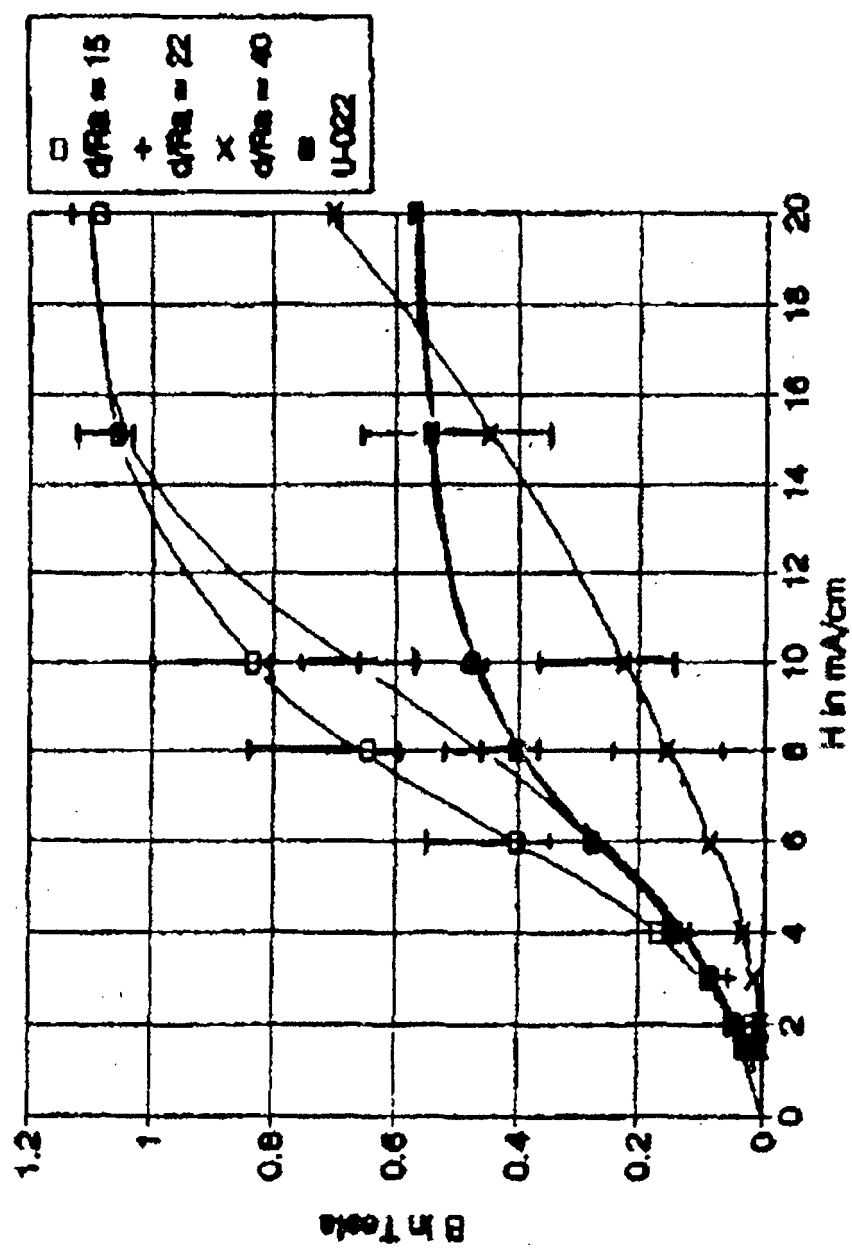
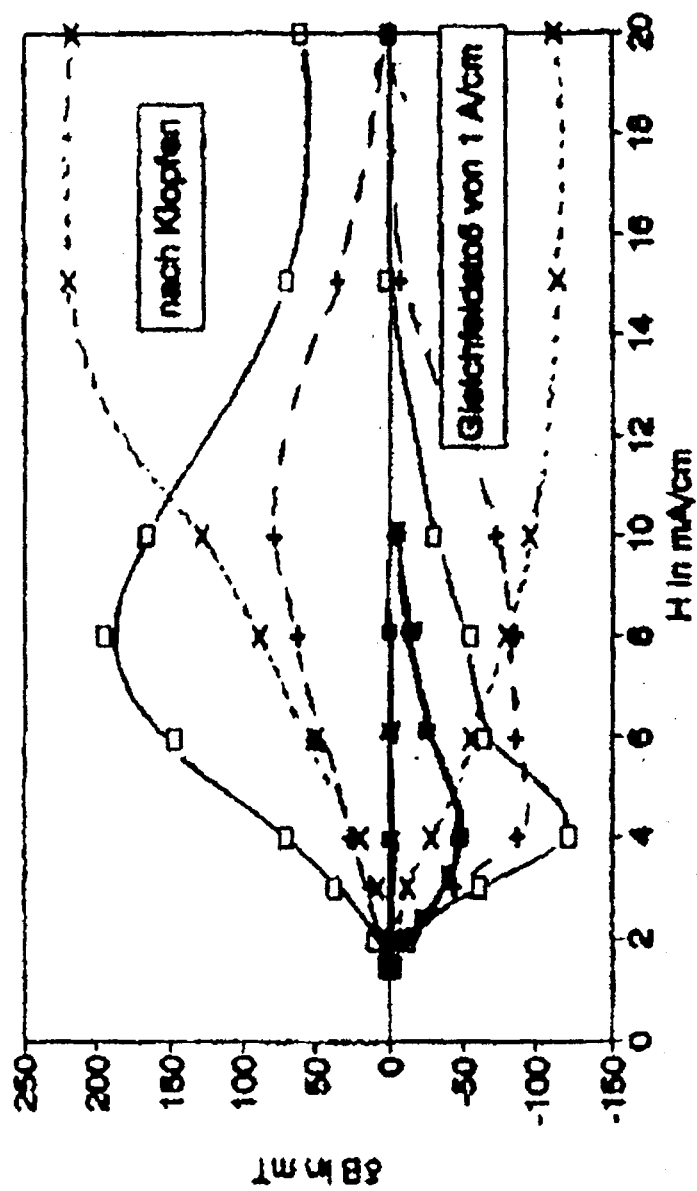


FIG. 11a



$B_{10}/H_c =$

$\square$ 830 mT / 12 mA/cm + 680 mT / 15 mA/cm $\times$ 280 mT / 25 mA/cm

$\blacksquare$ $\mu = 0.22$

FIG. 11b

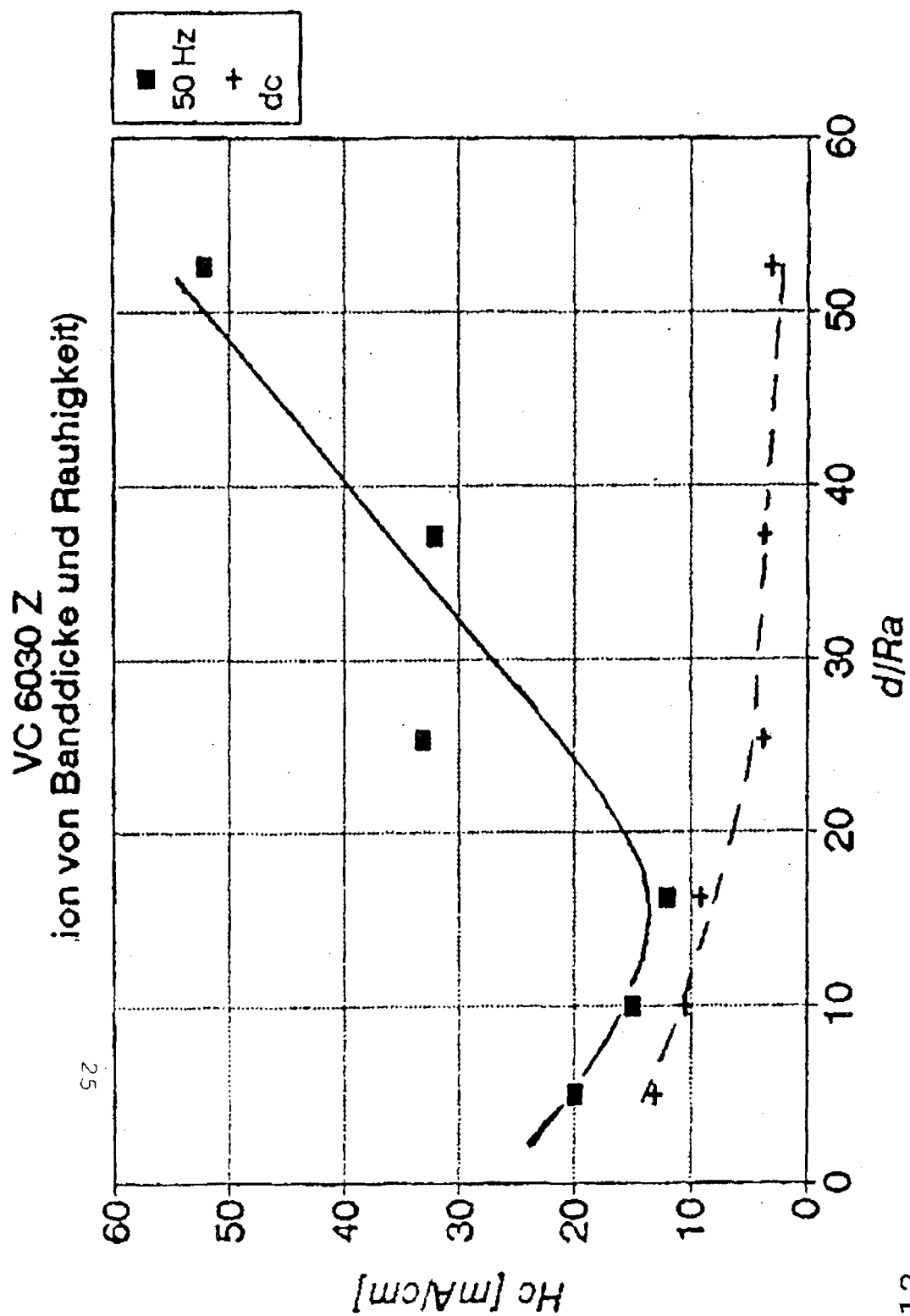


FIG. 12

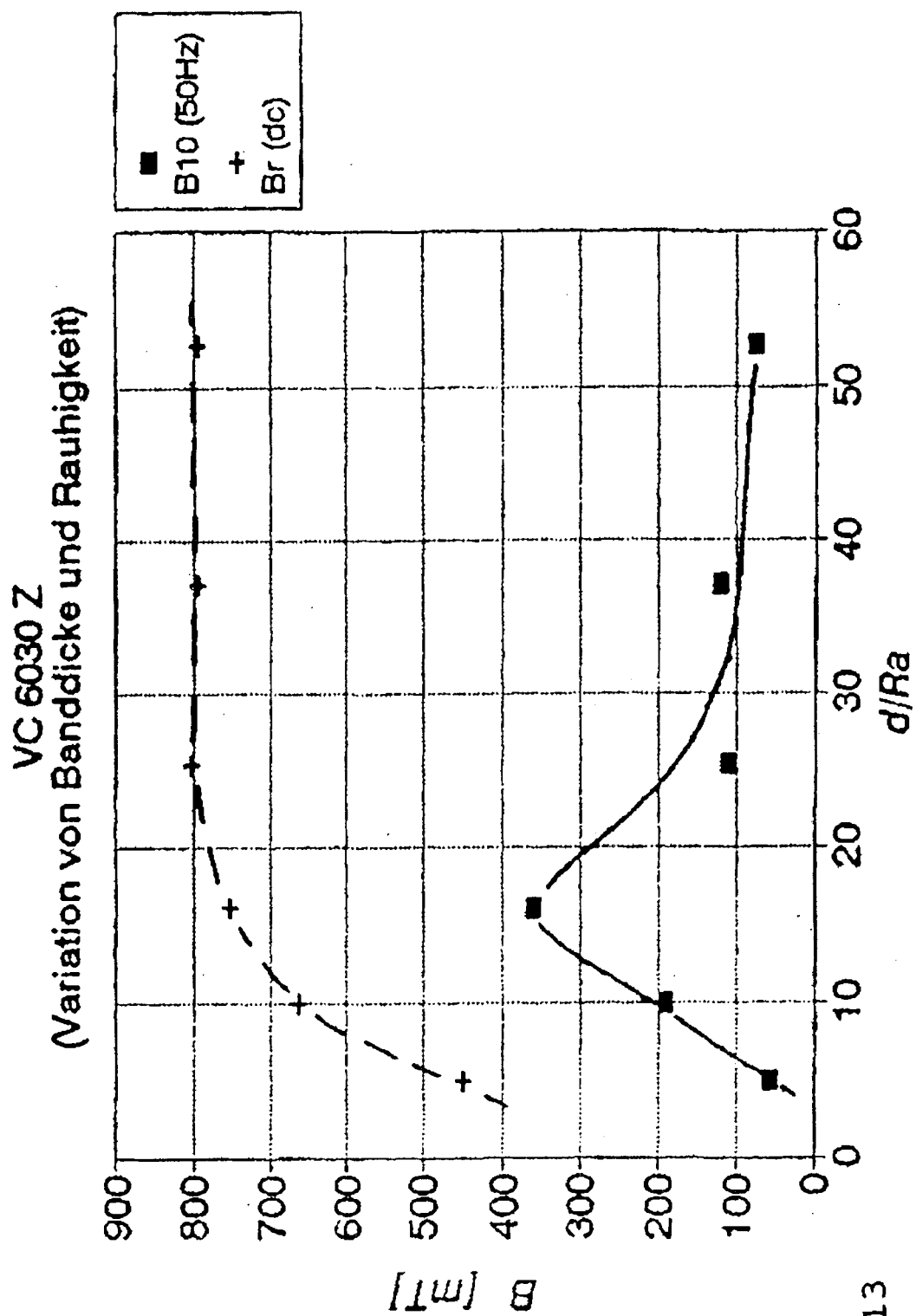


FIG. 13

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- EP 2015321 A1 [0002]
- US 5922143 A [0003]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- BERTOTTI ; BERTOLLI. *J. Magn. Mat.*, 1986, vol. 1556, 54-57 [0057]