(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 1 407 462 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
06.09.2017 Patentblatt 2017/36

(21) Anmeldenummer: **02745429.7**

(22) Anmeldetag: **11.07.2002**

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

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2002/007755

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2003/007316 (23.01.2003 Gazette 2003/04)

(54) **VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON NANOKRISTALLINEN MAGNETKERNEN SOWIE VORRICHTUNG ZUR DURCHFÜHRUNG DES VERFAHRENS**

METHOD FOR PRODUCING NANOCRYSTALLINE MAGNET CORES, AND DEVICE FOR CARRYING OUT SAID METHOD

PROCEDE DE PRODUCTION DE NOYAUX MAGNETIQUES NACROCRISTALLINS ET DISPOSITIF CORRESPONDANT

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE FR IT

(30) Priorität: **13.07.2001 DE 10134056**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
14.04.2004 Patentblatt 2004/16

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

(72) Erfinder:
- **PETZOLD, Jörg**
  63486 Bruchköbel (DE)
- **KLEESPIES, Volker**
  63637 Jossgrund (DE)
- **HILZINGER, Hans-Rainier**
  63505 Langenselbold (DE)

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

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A- 0 299 498

- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 2000, no. 13, 5. Februar 2001 (2001-02-05) & JP 2000 277357 A (HITACHI METALS LTD), 6. Oktober 2000 (2000-10-06)**
- **TAUB A I: "Effect of the heating rate used during stress relief annealing on the magnetic properties of amorphous alloys" JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, Bd. 55, Nr. 6, PART 2A, 15. März 1984 (1984-03-15), Seiten 1775-1777, XP002080688 ISSN: 0021-8979**
- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 008, no. 155 (E-256), 19. Juli 1984 (1984-07-19) & JP 59 058813 A (TOSHIBA KK), 4. April 1984 (1984-04-04)**

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).

EP 1 407 462 B1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von nanokristallinen Magnetkernen sowie Vorrichtungen zur Durchführung eines solchen Verfahrens.

[0002] Nanokristalline weichmagnetische Eisen-Basis-Legierungen sind seit langer Zeit bekannt und wurden beispielsweise in der EP 0 271 657 B1 beschrieben. Die dort beschriebenen weichmagnetischen Eisen-Basis-Legierungen weisen generell eine Zusammensetzung mit der Formel:

$$(Fe_1\text{-}a\ M_a)_{100\text{-}x\text{-}y\text{-}z\text{-}\alpha}\ Cu_xSi_yB_zM'_\alpha$$

auf, wobei M Kobalt und/oder Nickel ist, M' mindestens eines der Elemente Niob, Wolfram, Tantal, Zirkonium, Hafnium, Titan und Molybdän ist, die Indizes a, x, y, z und α jeweils die Bedingung $0 \leq a \leq 0{,}5$; $0{,}1 \leq x \leq 3{,}0$; $0 \leq y \leq 30{,}0$; $0 \leq z \leq 25{,}0$; $5 \leq y+z \leq 30{,}0$ und $0{,}1 \leq \alpha \leq 30$ erfüllen.

[0003] Des Weiteren können die weichmagnetischen Eisen-Basis-Legierung auch eine Zusammensetzung mit der generellen Formel

$$(Fe_1\text{-}a\ M_a)_{100\text{-}x\text{-}y\text{-}z\text{-}\alpha\text{-}\beta\text{-}\gamma}\ Cu_xSi_yB_zM'_\alpha M''_\beta X_\gamma$$

aufweisen, wobei M Kobalt und/oder Nickel ist, M' mindestens eines der Elemente Niob, Wolfram, Tantal, Zirkonium, Hafnium, Titan und Molybdän ist, M" mindestens eines der Elemente Vanadium, Chrom, Mangan, Aluminium, ein Element der Platingruppe, Skandium, Yttrium, eine Selten Erde, Gold, Zink, Zinn und/oder Rhenium und X mindestens eines der Elemente Kohlenstoff, Germanium, Phosphor, Gallium, Antimon, Indium, Beryllium und Arsen ist und wobei a, x, y, z, α, β und γ jeweils die Bedingung $0 \leq a \leq 0{,}5$, $0{,}1 \leq x \leq 3{,}0$, $0 \leq y \leq 30{,}0$, $0 \leq z \leq 25{,}0$, $5 \leq y + z \leq 30{,}0$, $0{,}1 \leq \alpha \leq 30{,}0$, $\beta \leq 10{,}0$ und $\gamma \leq 10{,}0$ erfüllen.

[0004] In beiden Legierungssystemen sind mindestens 50% der Legierungsstruktur von feinkristallinen Teilchen mit einer mittleren Teilchengröße von 100 nm oder weniger eingenommen. Diese weichmagnetischen nanokristallinen Legierungen werden in zunehmendem Umfang als Magnetkerne in Induktivitäten für verschiedenste elektrotechnische Anwendungen eingesetzt. Beispielsweise sind Summenstromwandler für wechselstromsensitive und auch pulsstromsensitive Fehlerstromschutzschalter, Drosseln und Transformatoren für geschaltete Netzteile, stromkompensierte Drosseln, Glättungsdrosseln oder Transduktoren aus Bandkernen, die aus Bändern aus den oben beschriebenen nanokristallinen Bändern hergestellt worden sind, bekannt. Dies -geht beispielsweise aus der EP 0 299 498 B1 hervor. Des Weiteren ist der Einsatz solcher Ringbandkerne auch für Filtersätze.in der Telekommunikation bekannt, beispielsweise als Schnittstellenübertrager bei ISDN- oder auch DSL-Anwendungen.

[0005] Die in Rede stehenden nanokristallinen Legierungen können beispielsweise kostengünstig mittels der sogenannten Rascherstarrungstechnologie (beispielsweise mittels melt-spinning oder planar-flow-casting) hergestellt werden. Dabei wird zuerst eine Legierungsschmelze bereitgestellt, bei der anschließend durch rasches Abschrecken aus dem Schmelzzustand eine zunächst amorphe Legierung hergestellt wird. Die für die oben in Rede stehenden Legierungssysteme erforderlichen Abkühlgeschwindigkeiten betragen dabei etwa 10^6 K/sec. Dies wird mit Hilfe des Schmelzspin-Verfahrens erreicht, bei welchem die Schmelze durch eine enge Düse auf eine schnell rotierende Kühlwalze gespritzt wird und dabei zu einem dünnen Band erstarrt. Dieses Verfahren ermöglicht die kontinuierliche Herstellung von dünnen Bändern und Folien in einem einzigen Arbeitsgang direkt aus der Schmelze mit einer Geschwindigkeit von 10 bis 50 m/sec., wobei Banddicken von 20 bis 50 μm und Bandbreiten bis ca. einigen cm möglich sind.

[0006] Das mittels dieser Rascherstarrungstechnologie hergestellte zunächst amorphe Band wird dann zu geometrisch weiträumig variierbaren Magnetkernen gewickelt, wobei diese oval, rechteckig oder rund sein können. Der zentrale Schritt zum erreichen guter weichmagnetischer Eigenschaften ist die "Nanokristallisation" der bis dahin noch amorphen Legierungsbänder. Diese Legierungsbänder weisen aus weichmagnetischer Sicht noch schlechte Eigenschaften auf, da sie eine relativ hohe Magnetostriktion $|\lambda_S|$ von ca. 25×10^{-6} aufweisen. Bei der Durchführung einer auf die Legierung abgestimmten Kristallisationswärmebehandlung entsteht dann ein ultrafeines Gefüge, d. h. es entsteht eine Legierungsstruktur, bei der mindestens 50% der Legierungsstruktur von kubisch raumzentrierten FeSi-Kristalliten eingenommen wird. Diese Kristallite sind in einer amorphen Restphase aus Metallen und Metalloiden eingebettet. Die festkörperphysikalischen Hintergründe für die Entstehung der feinkristallinen Struktur und die daher eingehende drastische Verbesserung der weichmagnetischen Eigenschaften ist beispielsweise in G. Herzer, IEEE Transactions on Magnetics, 25 (1989), Seiten 3327 ff. beschrieben. Danach entstehen gute weichmagnetische Eigenschaften wie eine hohe Permeabilität oder kleine Hystereseverluste durch Ausmittelung der Kristallanisotropie K_u des zufallsorientierten nanokristallinen "Gefüges".

[0007] Nachdem aus der EP 0 271 657 B1 bzw. der 0 299 498 B1 bekannten Stand der Technik werden die amorphen Bänder zunächst auf speziellen Wickelmaschinen möglichst spannungsfrei zu Ringbandkernen gewickelt. Dazu wird das amorphe Band zunächst zu einem runden Ringbandkern gewickelt und - falls erforderlich - mittels geeigneter

Formgebungswerkzeuge in eine von der runden Form abweichenden Form gebracht. Durch die Verwendung geeigneter Wickelkörper lassen sich jedoch auch direkt beim Wickeln der amorphen Bänder zu Ringbandkernen Formen erreichen, die von der runden Form abweichen.

[0008] Danach werden nach dem Stand der Technik die spannungsfrei gewickelten Ringbandkerne in sogenannten Retortenöfen einer Kristallisationswärmebehandlung unterworfen, die zur Erzielung des nanokristallinen Gefüges dient. Hierbei werden die Ringbandkerne übereinander gestapelt und in einem solchen Ofen eingefahren. Es hat sich gezeigt, daß ein entscheidender Nachteil dieses Verfahrens darin liegt, daß durch schwache magnetische Streufelder, wie z. B. dem magnetischen Erdfeld eine Positionsabhängigkeit der Magnetwerte im Magnetkernstapel induziert wird. Während an den Stapelrändern beispielsweise hohe Permeabilitätswerte mit einem intrinsisch bedingten hohen Remanenzverhältnis von mehr als 60% vorliegen, sind die Magnetwerte im Bereich der Stapelmitte durch mehr oder weniger ausgeprägte flache Hystereseschleifen mit niedrigen Werten bezüglich der Permeabilität und Remanenz gekennzeichnet.

[0009] Dies ist beispielsweise in der Figur 1 dargestellt. Figur 1a zeigt dabei die Streuung der Permeabilität bei einer Frequenz von 50 Herz in Abhängigkeit der laufenden Kernnummer innerhalb eines Glühstapels. Die Figur 1b zeigt die Abhängigkeit des Remanenzverhältnisses B_r/B_m in Abhängigkeit der laufenden Kernnummer innerhalb eines Glühstapels. Wie den Figuren 1a und 1b zu entnehmen ist, verläuft die Verteilungskurve für die Magnetwerte eines Glühfertigungsloses breit und stetig. Die Verteilungskurve fällt zu hohen Werten hin monoton ab. Der genaue spezifische Verlauf hängt dabei von der Legierung, der Magnetkerngeometrie und natürlich der Stapelhöhe ab.

[0010] Bei den in Rede stehenden nanokristallinen Legierungssystemen erfolgt die Einstellung des nanokristallinen Gefüges typischerweise bei Temperaturen von T_a = 450°C bis 620°C, wobei die notwendigen Haltezeiten zwischen wenigen Minuten und ca. 12 Stunden liegen können. Insbesondere geht aus der US 5,911,840 hervor, daß bei nanokristallinen Magnetkernen mit einer runden B-H-Schleife eine Maximalpermeabilität von μ_{max} = 760.000 dann erreicht wird, wenn ein stationäres Temperaturplateau mit einer Dauer von 0,1 bis 10 Stunden unterhalb der für die Kristallisation erforderlichen Temperatur von 250°C bis 480°C zur Relaxation des Magnetkernes verwendet wird. Dies erhöht die Dauer der Wärmebehandlung und reduziert damit die Wirtschaftlichkeit.

[0011] Der vorliegenden Erfindung liegt die Entdeckung zugrunde, daß die in den Figuren 1a und 1b gezeigten magnetostatisch bedingten Parabelbildungen bei der Stapelglühung von Ringbandkernen in Retortenöfen magnetostatischer Natur sind und auf die Ortsabhängigkeit des Entmagnetisierungsfaktors eines Zylinders zurückzuführen sind. Weiterhin wurde -festgestellt, daß die mit dem Kerngewicht zunehmende exotherme Wärme des Kristallisationsprozesses nur unvollständig an die Umgebung des Glühstapels abgegeben werden kann und deshalb zu einer deutlichen Verschlechterung der Permeabilitätswerte führen kann. Es wird angemerkt, daß die Nanokristallisation selbstverständlich ein exothermer physikalischer Vorgang ist. Dieses Phänomen wurde bereits in der JP 03 146 615 A2 beschrieben. Die Folge dieser unzureichenden Abfuhr der Kristallisationswärme ist eine lokale Überhitzung der Ringbandkerne innerhalb des Stapels, die zu niedrigeren Permeabilitäten und zu höheren Remanenzen führen kann. Demnach sind die Permeabilitäten und die Remanenzen von Kernen im Zentrum des Glühstapels niedriger als die Permeabilitäten und Remanenzen von Ringbandkernen an den äußeren Enden des Glühstapels. Bisher hat man dieses Problem, soweit man es überhaupt erkannt hat, damit umschifft, daß man beispielsweise eben wie in der US 5,911,840, im Bereich der einsetzenden Nanokristallisation, d. h. also ab ca. 450°C, in unwirtschaftlicher Weise sehr langsam aufgeheizt hat. Typische Aufheizraten lagen dabei zwischen 0,1 und 0,2 K/min., wodurch alleine das Durchfahren des Bereiches bis zur Temperatur von 490°C bis zu 7 Stunden betragen konnte. Diese Verfahrensweise war sehr unwirtschaftlich.

[0012] Die US 5,914,088 offenbart eine Vorrichtung zur Wärmebehandlung amorpher metallischer Kerne im Durchlauf.

[0013] Die DE 35 42 257 A1 offenbart einen Durchlaufofen zum Tempern ferromagnetischer Schichten, der einen Magnet zur Erzeugung eines Magnetfelds und eine Heizspule zur Erzeugung eines Temperaturgradienten aufweist. Dieser Durchlaufofen wird zur Magnetisierung ferromagnetischer Schichten und zur Reduzierung der Anisoptropiefeldstärke benutzt.

[0014] Die US 2,960,744 offenbart einen Tunnelofen zur Herstellung von Ferriten keramischen Materialien, wobei der Tunnelofen in verschiedenen Zonen mit unterschiedlichen Temperaturen und unterschiedlichen Atmosphären geteilt werden kann.

[0015] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher ein neues Verfahren zur Herstellung von Ringbandkernen bereitzustellen, bei denen das eingangs erwähnte Problem der parabelartigen Streuung und sonstiger insbesondere exothermiebedingter Verschlechterungen von Magnetkennwerten vermieden werden kann, und das besonders wirtschaftlich arbeitet.

[0016] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch ein Verfahren zur Herstellung von Ringbandkernen der eingangs genannten Art gelöst, bei dem die fertig gewickelten amorphen Ringbandkerne ungestapelt im Durchlauf zu nanokristallinen Ringbandkernen wärmebehandelt werden.

[0017] Durch die Vereinzelung der Ringbandkerne wird eine identische magnetostatische Bedingung für jeden einzelnen Ringbandkern herbeigeführt. Die Folge dieser für jeden einzelnen Ringbandkern identischen magnetostatischen Kristallisationsbedingung ergibt die Beseitigung des in den Figuren 1a und 1b gezeigten "Parabeleffektes" und damit eine Beschränkung der Streuungen auf legierungsspezifische, geometrische und/oder thermische Ursachen. Die Wär-

mebehandlung der ungestapelten amorphen Ringbandkerne wird auf Wärmesenken durchgeführt, die eine hohe Wärmekapazität und eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, was ebenfalls schon aus der JP 03 146 615 A2 bekannt ist. Dabei kommen als Material für die Wärmesenken insbesondere ein Metall oder eine metallische Legierung in Betracht. Insbesondere die Metalle Kupfer, Silber sowie wärmeleitfähiger Stahl haben sich als besonders geeignet erwiesen.

[0018] Es ist jedoch auch möglich die Wärmebehandlung auf einer Wärmesenke aus Keramik durchzuführen. Des Weiteren ist auch eine Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung denkbar, bei dem die Wärme zu behandelnden amorphen Ringbandkerne in ein Formbett aus Keramikpulver oder Metallpulver, vorzugsweise Kupferpulver eingebracht sind.

[0019] Als Keramikmaterialien, sowohl für eine massive Keramikplatte bzw. für ein Keramikpulverbett, haben sich insbesondere Magnesiumoxid, Aluminiumoxid und Aluminiumnitrid als besonders geeignet erwiesen.

[0020] Die Wärmebehandlung zur Kristallisation wird in einem Temperaturintervall von ca. 450°C bis ca. 620°C vorgenommen, wobei die Wärmebehandlung ein Temperaturfenster von 450°C bis 500°C durchläuft und dabei mit einer Aufheizrate von 0,1 K/min bis ca. 20 K/min durchlaufen wird.

[0021] Die Erfindung wird vorzugsweise mit einem Ofen durchgeführt, wobei der Ofen ein Ofengehäuse, das zumindest eine Glühzone und eine Heizquelle aufweist, Mittel zur Beschickung der Glühzone mit ungestapelten amorphen Magnetkernen aufweist, Mittel zur Beförderung der ungestapelten amorphen Magnetkerne durch die Glühzone aufweist und Mittel zur Entnahme der ungestapelten wärmebehandelten nanokristallinen Magnetkerne aus der Glühzone aufweist.

[0022] Vorzugsweise wird die Glühzone eines solchen Ofens mit einem Schutzgas beaufschlagt.

[0023] In einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung weist dabei das Ofengehäuse die Gestalt eines Turmofens auf, bei dem die Glühzone vertikal verläuft. Die Mittel zur Beförderung der ungestapelten amorphen Magnetkerne durch die vertikal verlaufende Glühzone sind dabei vorzugsweise ein vertikal verlaufendes Förderband.

[0024] Das vertikal verlaufende Förderband weist dabei senkrecht zur Förderbandfläche stehende Auflagen aus einem Material mit hoher Wärmekapazität, d. h. also entweder aus den eingangs beschriebenen Metallen oder den eingangs beschriebenen Keramiken auf, die eine hohe Wärmekapazität und hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Die Ringbandkerne liegen dabei auf den Auflagen auf.

[0025] Die vertikal verlaufende Glühzone ist dabei vorzugsweise in mehrere separate Heizzonen unterteilt, die mit separaten Heizregelungen versehen sind.

[0026] In einer alternativen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Ofens weist dieser die Gestalt eines Turmofens auf, bei dem die Glühzone horizontal verläuft. Dabei ist die horizontal verlaufende Glühzone wiederum in mehrere separate Heizzonen unterteilt, die mit separaten Heizregelungen versehen sind. Als Mittel zur Beförderung der ungestapelten amorphen Ringbandkerne durch die horizontal verlaufende Glühzone ist dann zumindest eine, vorzugsweise aber mehrere, sich um die Turmofenachse drehende Auflageplatten vorgesehen.

[0027] Die Auflageplatten wiederum bestehen ganz oder teilweise aus einem Material mit hoher Wärmekapazität und hoher Wärmeleitfähigkeit, auf den die Magnetkerne aufliegen. Hierbei kommen insbesondere metallische Platten in Betracht, die aus den eingangs erwähnten Metallen, d. h. also Kupfer, Silber oder wärmeleitfähiger Stahl, bestehen.

[0028] In einer dritten alternativen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Ofens weist dieser ein Ofengehäuse auf, das die Gestalt eines horizontalen Durchlaufofens aufweist, bei dem die Glühzone wiederum horizontal verläuft. Diese Ausführungsform ist besonders bevorzugt, weil ein solcher Ofen relativ einfach herzustellen ist.

[0029] Dabei sind als Mittel zur Beförderung der ungestapelten amorphen Ringbandkerne durch die horizontal verlaufende Glühzone ein Förderband vorgesehen, wobei das Förderband wiederum mit Auflagen versehen ist, die aus einem Material mit hoher Wärmekapazität und hoher Wärmeleitfähigkeit bestehen, auf denen die Ringbandkerne aufliegen. Hierbei kommen wiederum die eingangs diskutierten metallischen und/oder keramischen Materialien in Betracht.

[0030] Typischerweise ist auch hier wiederum die horizontal verlaufende Glühzone in mehrere separate Heizzonen unterteilt, die mit separaten Heizregelungen versehen sind.

[0031] In einer Weiterentwicklung der vorliegenden Erfindung läßt sich die zur Erzeugung von flachen Hystereseschleifen erforderlicher magnetische Querfeldbehandlung ebenfalls direkt und gleichzeitig im Durchlauf erzeugen. Dazu wird zumindest ein Teil des vom Ofengehäuse umschlossenen Durchlaufkanals zwischen den beiden Polschuhen eines magnetischen Jochs geführt, so daß die durchlaufenden Magnetkerne in axialer Richtung mit einem homogenen Magnetfeld beaufschlagt werden, wodurch sich in ihnen eine uniaxiale Anisotropie quer zur Richtung des gewickelten Bandes ausbildet. Die Feldstärke des Joches muß dabei so hoch sein, daß die Magnetkerne während der Wärmebehandlung in axialer Richtung zumindest teilweise aufgesättigt sind.

[0032] Die Hystereseschleifen werden dabei umso flacher und linearer, je größer der Anteil der Länge des Ofenkanals ist, über den das Joch gelegt ist.

[0033] Bei allen drei alternativen Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Ofens weisen die separaten Heizzonen eine erste Aufheizzone, eine Kristallisationszone, eine zweite Aufheizzone und eine Reifungszone auf.

[0034] Die Erfindung ist im folgenden anhand der Zeichnung beispielsweise veranschaulicht. Dabei zeigen:

Figur 2 den Einfluß des Ringbandkerngewichts auf die Permeabilität (50 Hz) von ohne Wärmesenke durchlaufgeglühten Ringbandkernen,

Figur 3 den Einfluß von verschieden dicken Wärmesenken auf das exothermische Kristallisationsverhalten von durchlaufgeglühten Ringbandkernen,

Figur 4 den Einfluß von verschiedenen Dicken von Wärmesenken auf die Maximalpermeabilität von durchlaufgeglühten Ringbandkernen unterschiedlicher Geometrie und unterschiedlicher Ringbandkernmasse,

Figur 5 den Einfluß des Ringbandkerngewichts auf die Permeabilität (50 Hz) nach einer Durchlaufglühung auf einer 10 mm dicken Kupfer-Wärmesenke,

Figur 6 die Stirnflächen von zwei Vergleichsringbandkernen nach einer Durchlaufglühung ohne Wärmesenke und mit Wärmesenke,

Figur.7 schematisch im Querschnitt einen erfindungsgemäßen Turmofen mit vertikal laufendem Förderband,

Figur 8 einen erfindungsgemäßen mehrstöckigen Karusellofen,

Figur 9 einen erfindungsgemäßen Durchlaufofen mit horizontal verlaufendem Förderband und

Figur 10 eine Querfelderzeugung mittels eines Jochs über dem Ofenkanal.

[0035] Insbesondere zur Herstellung von sogenannten runden Hystereseschleifen werden Glühverfahren benötigt, die die Entstehung und Reifung von einem ultrafeinen nanokristallinen Gefüge unter möglichst feldfreien und thermisch exakten Bedingungen erlaubt. Wie eingangs erwähnt, wird nach dem Stand der Technik normalerweise die Glühung in sogenannten Retortenöfen ausgeführt, in denen die Magnetkerne übereinander gestapelt eingefahren werden.

[0036] Der entscheidende Nachteil dieses Verfahrens ist, daß durch schwache Streufelder wie z. B. dem magnetischen Feld der Erde oder ähnlichen Streufeldern eine Positionsabhängigkeit der magnetischen Kennwerte im Magnetkernstapel induziert wird. Dies kann man als Antenneneffekt bezeichnen. Während an den Stapelrändern tatsächlich runde Hystereseschleifen mit einer hohen Permeabilität und einem intrinsisch bedingten hohen Remanenzverhältnis von mehr als 60% vorliegen, liegen in der Stapelmitte jedoch mehr oder weniger ausgeprägte flache Hystereseschleifen mit niedrigeren Permeabilitäten und Remanenzverhältnissen vor. Dies wurde eingangs in den Figuren 1a und 1b gezeigt.

[0037] Entsprechend verläuft die Verteilungskurve für die magnetischen Kennwerte eines Fertigungsloses breit, stetig und fällt zu hohen Werten hin monoton ab. Wie eingangs erwähnt hängt der genaue Verlauf von der jeweils verwendeten weichmagnetischen.Legierung, der Magnetkerngeometrie und der Stapelhöhe ab.

[0038] Neben der magnetostatisch bedingten Parabelbildung besitzt die Stapelglühung in Retortenöfen den weiteren Nachteil, daß mit zunehmendem Magnetkerngewicht die exotherme Wärme des Kristallisationsprozesses nur unvollständig an die Umgebung abgegeben werden kann. Die Folge ist eine Überhitzung der gestapelten Magnetkerne, die zu niedrigeren Permeabilitäten und zu hohen Koerzitivfeldstärken führen kann. Zur Umgehung dieser Probleme muß im Bereich der einsetzenden Kristallisation, d. h. also ab ca. 450°C sehr langsam aufgeheizt werden, was unwirtschaftlich ist. Typische Aufheizraten liegen dort bei 0,1 bis 0,2 K/min, wodurch alleine das Durchfahren des Bereiches bis 490°C bis zu 7 Stunden betragen kann.

[0039] Die einzige wirtschaftlich realisierbare großtechnische Alternative zur Stapelglühung im Retortenofen liegt in einer Glühung gemäß der vorliegenden Erfindung im Durchlauf. Durch die Vereinzelung der Magnetkerne durch das Durchlaufverfahren werden identische magnetostatische Bedingungen für jeden einzelnen Magnetkern geschaffen. Die Folge ist die Beseitigung der oben beschriebenen Parabeleffekte, die die Streuungen auf legierungspezifische, kerntechnologische und thermische Ursachen.

[0040] Während die beiden ersten Faktoren gut kontrollierbar sind, kann die für Durchlaufglühungen typische schnelle Aufheizrate selbst bei vereinzelten Magnetkernen zu einer exothermen Wärmeentwicklung führen, die gemäß der Figur 2 eine mit dem Kerngewicht zunehmende Schädigung der Magneteigenschaften verursacht. Die Figur 2 zeigt den Einfluß des Magnetkerngewichts auf die Magnetwerte ($\mu_{10} \approx \mu_{max}$) wenn die Magnetkerne ohne eine Wärmesenke direkt im Durchlauf wärmebehandelt werden.

[0041] Da eine verzögerte Aufheizung zu einer unwirtschaftlichen Vervielfachung der Länge der Durchlaufstrecke führen würde, kann dieses Problem durch die Einführung wärmeabsorbierender Unterlagen (Wärmesenken) aus gut wärmeleitenden Metallen oder durch metallische oder keramische Pulverbetten gelöst werden. Als besonders geeignet haben sich Kupferplatten bewiesen, da diese eine hohe spezifische Wärmekapazität und eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit besitzen. Dadurch kann den Magnetkernen die exotherm erzeugte Kristallisationswärme stirnseitig entzogen werden. Darüber hinaus reduzieren derartige Wärmesenken die Aufheizrate, wodurch die exotherme Übertemperatur weiter eingeschränkt werden kann. Dies wird durch die Figur 3 veranschaulicht. Die Figur 3 zeigt den Einfluß unterschiedlich dicker Kupfer-Wärmesenken auf das Exothermieverhalten in Ringbandkernen, die Abmessung von ungefähr

21 x 11,5 x 25 mm aufwiesen.

[0042] Da die Rate des Temperaturausgleichs von der Temperaturdifferenz zwischen Magnetkern und Wärmesenke abhängt, ist deren Wärmekapazität über die Dicke an die Masse und Höhe des Magnetkerns anzupassen.

[0043] Die Figur 4 zeigt den Einfluß der Dicke der Wärmesenken auf die Maximalpermeabilität von Ringbandkernen unterschiedlicher Geometrien bzw. Magnetkernmassen. Während nach der Figur 4 bei Magnetkernen mit kleinem Kerngewicht und/oder kleiner Magnetkernhöhe bereits eine 4 mm dicke Kupfer-Wärmesenke zu guten magnetischen Kennwerten führt, benötigen schwerere bzw. höhere Magnetkerne dickere Wärmesenken mit einer höheren Wärmekapazität. Es hat sich dabei als empirische Faustregel ergeben, daß die Plattendicke $d \geq 0{,}4$ x der Kernhöhe h sein sollte.

[0044] Wie aus der Figur 5 hervorgeht, lassen sich unter Berücksichtigung dieser Regel über einen weiten Gewichtsbereich hinweg hervorragende magnetische Kennwerte (μ_{max} (50 Hz) > 500.000; μ_1 > 100.000) erzielen.

[0045] Das Absenken der magnetischen Eigenschaften bei Durchlaufglühungen ohne Wärmesenken ist meist mit lamellenförmigen Verwerfungen und Knicken der Bandlagen verbunden, was aus der Figur 6 hervorgeht. Die Figur 6 zeigt die Stirnflächen von zwei Ringbandkernen der Abmessungen 50 x 40 x 25 mm^3 nach einer Durchlaufglühung ohne Wärmesenke (linker Kern) und auf einer 10 mm starken Kupfer-Wärmesenke (rechter Kern). Bei rechten Kern traten an der Stirnseite praktisch keine Verwerfungen mehr auf. Beim linken Magnetkern hingegen liegt die Maximalpermeabilität bei μ_{max} = 127.000, wo hingegen sie beim rechten Magnetkern ungefähr 620.000 betrug.

[0046] Es hat sich gezeigt, daß nur dann, wenn mehr als ca. 85% der Stirnflächen eines Kerns verwerfungsfrei sind, auch gute magnetische Kennwerte erreicht werden können.

[0047] Die Figur 7 zeigt schematisch eine erste Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, einen sogenannten Turmofen. Der Turmofen weist dabei ein Ofengehäuse auf, bei dem die Glühzone vertikal verläuft. Die ungestapelten amorphen Magnetkerne werden dabei durch eine vertikal verlaufende Glühzone durch ein vertikal verlaufendes Förderband gefördert.

[0048] Das vertikal verlaufende Förderband weist dabei senkrecht zur Förderbandfläche stehende Wärmesenken aus einem Material mit hoher Wärmekapazität, vorzugsweise Kupfer, auf. Die Ringbandkerne liegen dabei mit ihren Stirnflächen auf den Auflagen auf. Die vertikal verlaufende Glühzone ist dabei in mehrere separate Heizungen unterteilt, die mit separaten Heizregelungen versehen sind.

[0049] In der Figur 8 ist eine weitere Ausführungsform der vorliegenden Erfindung veranschaulicht. Auch hier ist wiederum die Gestalt des Ofens die eines Turmofens, bei dem die Glühzone jedoch horizontal verläuft. Dabei ist die horizontal verlaufende Glühzone wiederum in mehrere separate Heizzonen unterteilt, die mit separaten Heizregelungen versehen sind. Als Mittel zur Beförderung der ungestapelten amorphen Ringbandkerne durch die horizontal verlaufende Glühzone ist wiederum eine, vorzugsweise aber mehrere sich um die Turmofenachse drehende Auflagenplatten vorgesehen, die als Wärmesenken dienen.

[0050] Die Auflageplatten wiederum bestehen ganz oder teilweise aus einem Material mit hoher Wärmekapazität und hoher Wärmeleitfähigkeit, auf dem die Magnetkerne mit ihren Stirnflächen aufliegen.

[0051] Die Figur 9 schließlich zeigt eine dritte besonders bevorzugte alternative Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, bei der das Ofengehäuse die Gestalt eines horizontalen Durchlaufofens aufweist. Dabei verläuft die Glühzone wiederum horizontal. Diese Ausführungsform ist besonders bevorzugt, weil ein solcher Ofen im Gegensatz zu den beiden oben genannten Öfen mit weniger Aufwand herzustellen ist.

[0052] Dabei werden die Ringbandkerne durch die horizontal verlaufende Glühzone über ein Förderband gefördert, wobei das Förderband vorzugsweise wiederum mit Auflagen versehen ist, die als Wärmesenken dienen. Besonders bevorzugt sind hier wiederum Kupferplatten. In einer alternativen Ausgestaltung des Transportes werden Platten als Wärmesenken genommen, die auf Rollen durch das Ofengehäuse gleiten.

[0053] Wie aus der Figur 9 hervorgeht, ist die horizontal verlaufende Glühzone wiederum in mehrere separate Heizzonen unterteilt, die mit separaten Heizregelungen versehen sind.

[0054] Bei einer speziellen Ausführungsform des in Figur 9 gezeigten Durchlaufofens läßt sich die zur Erzeugung einer flachen Hystereseschleife erforderliche magnetische Querfeldbehandlung direkt im Durchlauf durchführen. Die dazu erforderliche Vorrichtung ist in der Figur 10 gezeigt. Hierzu wird zumindest ein Teil des Durchlaufkanals des Ofens zwischen den Polschuhen eines Jochs geführt, so daß die durchlaufenden Magnetkerne in axialer Richtung mit einem homogenen Magnetfeld beaufschlagt werden, wodurch sich in ihnen eine uniaxiale Anisotropie quer zur Richtung des gewickelten Bandes ausbildet. Die Feldstärke des Joches muß dabei so hoch sein, daß die Magnetkerne während der Wärmebehandlung in axialer Richtung zumindest teilweise aufgesättigt sind.

[0055] Die Hystereseschleifen werden dabei umso flacher und linearer, je größer der Anteil der Länge des Ofenkanals ist, über den das Joch gelegt ist.

[0056] Mit dieser Maßnahme wurden folgende Ergebnisse erzeilt:

> Bei einer Feldstärke von 0,3 T, die zwischen den Polschuhen des Joches, das entlang der gesamten Heizstrecke wirksam war, wurden Magnetkerne mit den Abmessungen 21mm x 11,5mm x 25 mm mit der Zusammensetzung $Fe_{bal}Cu_{1,0}Si_{15,62}B_{6,85}Nb_{2,98}$ erzeugt, die Permeabilitätswerte von ca.μ = 23.000 (f= 50 Hz) aufwiesen. Das Rema-

nenzverhältnis wurde infolge der axialen Feldeinwirkung auf 5,6% reduziert.

[0057] Bei Belegung von nur der halben Heizstrecke blieb die uniaxiale Anisotropie schwächer und die Hystereseschleife wurde weniger flach.

[0058] Bei der Temperung ohne magnetisches Joch lag das Remanenzverhältnis im Vergleich dazu um oder oberhalb von 50% und der Permeabilitätsverlauf in Abhängigkeit von der Feldstärke entsprach dem von runden Hystereseschleifen.

[0059] Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren und den Vorrichtungen lassen sich ein großtechnischer Fertigungsweg beschreiten, indem zunächst alle anfallenden Magnetkerne im Durchlauf kristallisiert werden. Je nach dem ob die geforderten Hystereschleifen nun rund, flach oder rechteckig sein sollen, werden diese Magnetkerne anschließend entweder sofort endverarbeitet, d. h. in Gehäuse gefaßt, in einem magnetischen Längsfeld auf eine rechteckige Hystereschleife oder in einem magnetischen Querfeld auf eine flache Hystereseschleife umgetempert und erst dann Endverarbeitet.

[0060] Im Gegensatz zu den herkömmlichen Verfahren lassen sich die Kerne wesentlich schneller und in einer wesentlich wirtschaftlicheren Art und Weise herstellen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung von Magnetkernen bestehend aus einer weichmagnetischen Eisen-Basis-Legierung, wobei mindestens 50% der Legierungsstruktur von feinkristallinen Teilchen mit einer mittleren Teilchengröße von 100 nm oder weniger eingenommen wird, mit folgenden Schritten : a) Bereitstellen einer Legierungsschmelze ; b) Herstellung eines amorphen Legierungsbandes aus der Legierungsschmelze mittels Rascherstarrungstechnologie ; c) Wickeln des amorphen Bandes zu amorphen Magnetkernen ; d) Wärmebehandlung der ungestapelten amorphen Magnetkerne im Durchlauf zu nanokristallinen Magnetkernen, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Wärmebehandlung der ungestapelten amorphen Magnetkerne auf Wärmesenken, die eine hohe Wärmekapazität und eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, erfolgt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Material für die Wärmesenken ein Metall oder eine metallische Legierung oder ein Metallpulver vorgesehen ist.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Metall oder als Metallpulver Kupfer, Silber oder ein wärmeleitfähiger Stahl vorgesehen ist.

4. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Material für die Wärmesenken eine Keramik vorgesehen ist.

5. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Material für die Wärmesenken einen keramisches Pulver vorgesehen ist.

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Keramik oder keramisches Pulver Magnesiumoxid, Aluminiumoxid oder Aluminiumnitrid vorgesehen ist.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Wärmebehandlung in einem Temperaturintervall von ca. 450 C bis ca. 620 C vorgenommen wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Wärmebehandlung ein Temperaturfenster von 450 C bis 500 C durchlaufen wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Temperaturfenster mit einer Aufheizrate von 0,1 K/Min bis ca. 20 K/Min durchlaufen wird.

10. Ofen zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 9 mit A) einem Ofengehäuse, das zumindest eine Glühzone und eine Heizquelle aufweist ; B) Mitteln zur Beschickung der Glühzone mit ungestapelten amorphen Magnetkernen ; C) Mitteln zur Beförderung der ungestapelten amorphen Magnetkerne durch die Glühzone und D) Mitteln zur Entnahme der ungestapelten wärmebehandelten nanokristallinen Magnetkerne aus der Glühzone, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mittel zur Beförderung der Magnetkerne Wärmesenken, die eine hohe Wärmekapazität und eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, zur Wärmebehandlung der ungestapelten amorphen Mag-

netkerne aufweisen.

11. Ofen nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** ferner vorgesehen sind E) Mittel zur Beaufschlagung der Glühzone mit einem Schutz gas.

12. Ofen nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Ofengehäuse die Gestalt eines Turmofens aufweist, bei dem die Glühzone vertikal verläuft.

13. Ofen nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Mittel zur Beförderung der ungestapelten amorphen Magnetkerne durch die vertikal verlaufende Glühzone ein vertikal verlaufendes Förderband vorgesehen ist.

14. Ofen nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** das vertikal verlaufende Förderband mit senkrecht zur Förderbandfläche stehenden Auflagen aus einem Material mit hoher Wärmekapazität und hoher Wärmeleitfähigkeit versehen ist, auf denen die Magnetkerne aufliegen.

15. Ofen nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Mittel zur Beförderung der ungestapelten amorphen Magnetkerne durch die vertikal verlaufende Glühzone auf Rollen gelagerte Auflagen sind.

16. Ofen nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Auflagen aus einem Material mit hoher Wärmekapazität und hoher Wärmeleitfähigkeit bestehen, auf denen die Magnetkerne aufliegen.

17. Ofen nach einem der Ansprüche 12 bis 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** die vertikal verlaufende Glühzone in mehrere separate Heizzonen unterteilt ist, die mit separaten Heizregelungen versehen sind.

18. Ofen nach einem der Ansprüche 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Ofengehäuse die Gestalt eines horizontalen Durchlaufofens aufweist, bei dem die Glühzone horizontal verläuft.

19. Ofen nach Anspruch 23, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Mittel zur Beförderung der ungestapelten amorphen Magnetkerne durch die horizontal verlaufende Glühzone ein Förderband vorgesehen ist.

20. Ofen nach Anspruch 24, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Förderband mit Auflagen versehen ist, die aus einem Material mit hoher Wärmekapazität und hoher Wärmeleitfähigkeit bestehen, auf denen die Magnetkerne aufliegen.

21. Ofen nach Anspruch 13 oder 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** die separaten Heizzonen eine erste Aufheizzone, eine Kristallisationszone, eine zweite Aufheizzone und eine Reifungszone umfassen.

22. Ofen nach einem der Ansprüche 10 bis 21, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Einstellung der uniaxialen Anisotropie die Polschuhe eines magnetischen Joches zumindest teilweise über den vom Ofengehäuse umfassten Durchlaufkanal gelegt sind.

Claims

1. Method for producing magnet cores consisting of a magnetically soft iron-based alloy, wherein at least 50% of the alloy structure are represented by finely crystalline particles with an average particle size of 100 nm or less, the method comprising the following steps: a) the provision of an alloy melt; b) the production of an amorphous alloy strip from the alloy melt using rapid solidification technology; c) the winding of the amorphous strip to produce amorphous magnet cores; d) the continuous heat treatment of the unstacked amorphous magnet cores to produce nanocrystalline magnet cores, **characterised in that** the heat treatment of the unstacked amorphous magnet cores is performed on heat sinks having a high thermal capacity and a high thermal conductivity.

2. Method according to claim 1, **characterised in that** a metal, a metallic alloy or a metal powder is provided as a material for the heat sinks.

3. Method according to claim 2, **characterised in that** copper, silver or a thermally conductive steel is provided as a metal or metal powder.

4. Method according to claim 1, **characterised in that** a ceramic material is provided as a material for the heat sinks.

5. Method according to claim 1, **characterised in that** a ceramic powder is provided as a material for the heat sinks.

6. Method according to claim 4 or 5, **characterised in that** magnesium oxide, aluminium oxide or aluminium nitride is provided as a ceramic material or ceramic powder.

7. Method according to any of claims 1 to 6, **characterised in that** the heat treatment is performed in a temperature range of approximately 450°C to 620°C.

8. Method according to claim 7, **characterised in that** a temperature window of 450°C to 500°C is passed through in the heat treatment.

9. Method according to claim 8, **characterised in that** the temperature window is passed through at a heating rate of 0.1 K/min to approximately 20 K/min.

10. Furnace for carrying out the method according to any of claims 1 to 9, comprising: A) a furnace housing having at least one annealing zone and a heat source; B) means for feeding the annealing zone with unstacked amorphous magnet cores; C) means for conveying the unstacked amorphous magnet cores through the annealing zone; and D) means for removing the unstacked heat-treated nanocrystalline magnet cores from the annealing zone, **characterised in that** the means for conveying the magnet cores comprise heat sinks having a high thermal capacity and a high thermal conductivity for the heat treatment of the unstacked amorphous magnet cores.

11. Furnace according to claim 10, **characterised in that** there are further provided: E) means for admitting an inert gas to the annealing zone.

12. Furnace according to claim 10 or 11, **characterised in that** the furnace housing has the form of a tower furnace in which the annealing zone extends vertically.

13. Furnace according to claim 12, **characterised in that** a vertically running conveyor belt is provided as means for conveying the unstacked amorphous magnet cores through the vertically oriented annealing zone.

14. Furnace according to claim 13, **characterised in that** the vertically running conveyor belt is provided with supports, which extend perpendicularly to the conveyor belt surface and are made of a material having a high thermal capacity and a high thermal conductivity, and on which the magnet cores lie.

15. Furnace according to claim 14, **characterised in that** supports mounted on rollers are provided as means for conveying the unstacked amorphous magnet cores through the vertically oriented annealing zone.

16. Furnace according to claim 15, **characterised in that** the supports on which the magnet cores lie are made of a material having a high thermal capacity and a high thermal conductivity.

17. Furnace according to any of claims 12 to 16, **characterised in that** the vertically oriented annealing zone is divided into several separate heating zones provided with separate heating controls.

18. Furnace according to claim 10 or 11, **characterised in that** the furnace housing has the shape of a horizontal continuous furnace in which the annealing zone extends horizontally.

19. Furnace according to claim 23, **characterised in that** a conveyor belt is provided as means for conveying the unstacked amorphous magnet cores through the horizontally oriented annealing zone.

20. Furnace according to claim 24, **characterised in that** the conveyor belt is provided with supports on which the magnet cores lie, which are made of a material having a high thermal capacity and a high thermal conductivity.

21. Furnace according to claim 13 or 17, **characterised in that** the separate heating zones comprise a first heating-up zone, a crystallisation zone, a second heating-up zone and an ageing zone.

22. Furnace according to any of claims 10 to 21, **characterised in that**, for adjusting the uniaxial anisotropy, the pole shoes of a magnetic yoke are at least partially placed above the continuous passage encompassed by the furnace housing.

Revendications

1. Procédé de fabrication de noyaux magnétiques comprenant un alliage à base de fer magnétique doux, au moins 50 % de la structure d'alliage étant pris à partir de petites parties cristallines fines ayant une taille inférieure ou égale à 100 nm, ledit procédé de fabrication comprenant les étapes suivantes consistant à : a) préparer un bain d'alliage ; b) fabriquer une bande d'alliage amorphe à partir du bain d'alliage au moyen de la technologie de solidification rapide ; c) enrouler la bande amorphe en noyaux magnétiques ; d) réaliser un traitement thermique sur les noyaux magnétiques non empilés en une passe en noyaux nanocristallins, **caractérisé en ce que** le traitement thermique des noyaux magnétiques amorphes non empilés s'effectue sur des sources de froid qui présentent une haute capacité thermique et une haute conductibilité thermique.

2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'**en tant que matériau pour les sources de froid il est prévu un métal ou un alliage de métal ou encore une poudre de métal.

3. Procédé selon la revendication 2, **caractérisé en ce qu'**en tant que métal ou en tant que poudre de métal il est prévu du cuivre, de l'argent ou un acier thermoconducteur.

4. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'**en tant que matériau pour les sources de froid il est prévu une céramique.

5. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'**en tant que matériau pour les sources de froid il est prévu une poudre céramique.

6. Procédé selon la revendication 4 ou la revendication 5, **caractérisé en ce qu'**en tant que céramique ou poudre céramique il est prévu un oxyde de magnésium, un oxyde d'aluminium ou encore un nitrure d'aluminium.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, **caractérisé en ce que** le traitement thermique est effectué dans une plage de température comprise environ entre 450 C et environ 620 C.

8. Procédé selon la revendication 7, **caractérisé en ce que** lors du traitement thermique une fenêtre de température comprise entre 450 C et 500 C est réalisée.

9. Procédé selon la revendication 8, **caractérisé en ce que** la fenêtre de température est réalisée à une vitesse de chauffe comprise entre 0,1 K/min et 20 K/min.

10. Four destiné à l'exécution du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, A) comprenant un logement de four qui présente au moins une zone de recuit et un foyer ; B) des moyens destinés à revêtir la zone de recuit à l'aide des noyaux magnétiques amorphes non empilés ; C) des moyens destinés à transporter les noyaux magnétiques amorphes non empilés à travers la zone de recuit et D) des moyens de prélèvement des noyaux magnétiques nanocristallins non empilés soumis au traitement thermique dans la zone de recuit, **caractérisé en ce que** les moyens de transport des noyaux magnétiques présentent des sources de froid qui présentent une haute capacité thermique et une haute conductibilité thermique pour effectuer le traitement thermique des noyaux magnétiques amorphes non empilés.

11. Four selon la revendication 10, **caractérisé en ce qu'**en outre il est prévu E) un moyen destiné à alimenter la zone de recuit en gaz de protection.

12. Four selon la revendication 10 ou la revendication 11, **caractérisé en ce que** le logement de four présente la forme d'un four vertical.

13. Four selon la revendication 12, **caractérisé en ce qu'**en tant que moyen de transport des noyaux magnétiques non empilés il est prévu une bande transporteuse s'étendant verticalement à travers la zone de recuit s'étendant verticalement.

14. Four selon la revendication 13, **caractérisé en ce que** la bande transporteuse s'étendant verticalement est pourvue de supports en matériau à haute capacité thermique et à haute conductibilité thermique disposés perpendiculairement à la surface de la bande transporteuse, sur lesquels reposent les noyaux magnétiques.

15. Four selon la revendication 14, **caractérisé en ce qu'**en tant que moyen de transport des noyaux magnétiques amorphes non empilés les supports disposés à travers la zone de recuit s'étendant verticalement sur des rouleaux.

16. Four selon la revendication 15, **caractérisé en ce que** les supports sont constitués d'un matériau à haute capacité thermique et à haute conductibilité thermique sur lesquels reposent les noyaux magnétiques.

17. Four selon l'une quelconque des revendications 12 à 16, **caractérisé en ce que** la zone de recuit s'étendant verticalement est divisée en plusieurs zones de chauffage séparées qui sont pourvues de réglages de chauffage séparés.

18. Four selon l'une quelconque des revendications 10 ou 11, **caractérisé en ce que** le logement de four présente la forme d'un four continu horizontal dans lequel la zone de recuit s'étend horizontalement.

19. Four selon la revendication 23, **caractérisé en ce qu'**en tant que moyen de transport des noyaux magnétiques amorphes non empilés est prévu une bande transporteuse à travers la zone de recuit s'étendant horizontalement.

20. Four selon la revendication 24, **caractérisé en ce que** la bande transporteuse est pourvue de supports qui sont constitués d'un matériau à haute capacité thermique et à haute conductibilité thermique sur lesquels reposent les noyaux magnétiques.

21. Four selon la revendication 13 ou 17, **caractérisé en ce que** la zones de chauffage séparées comprennent une première zone d'échauffement, une zone de cristallisation, une seconde zone d'échauffement et une zone de maturation.

22. Four selon l'une quelconque des revendications 10 à 21, **caractérisé en ce que** pour le réglage de l'anisotropie uniaxe, les masses polaires d'une culasse magnétique sont disposées au moins en partie sur le canal de passage entouré par le logement de four.

FIG 1a

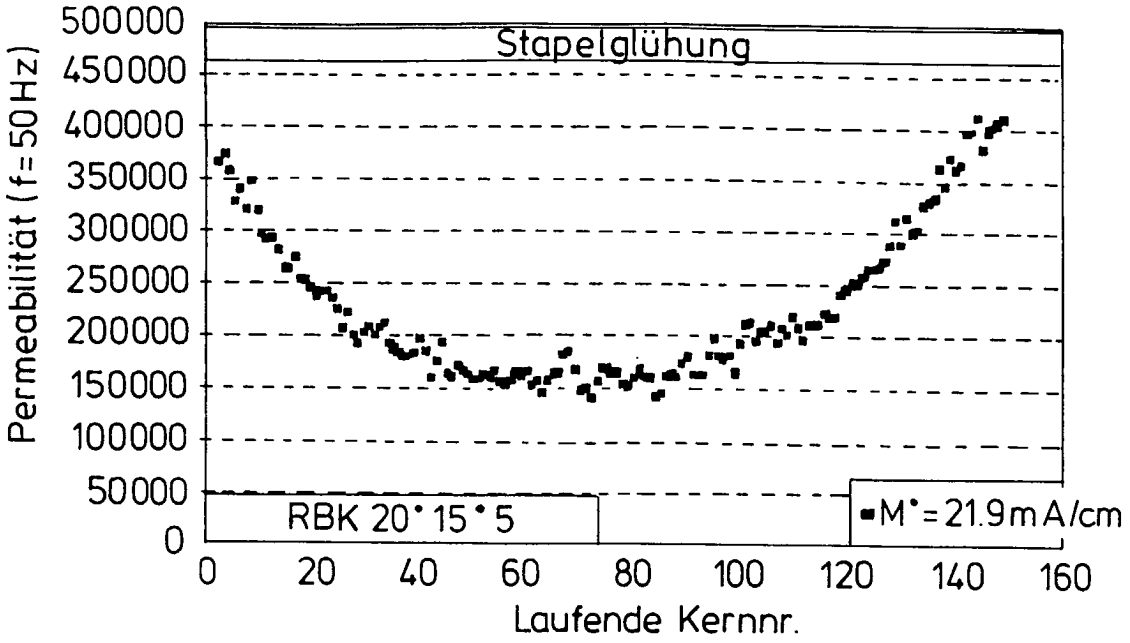

Stapelglühung
Permeabilität (f=50Hz)
500000
450000
400000
350000
300000
250000
200000
150000
100000
50000
0
RBK 20°15°5
M°=21.9mA/cm
0
20
40
60
80
100
120
140
160
Laufende Kernnr.

FIG 1b

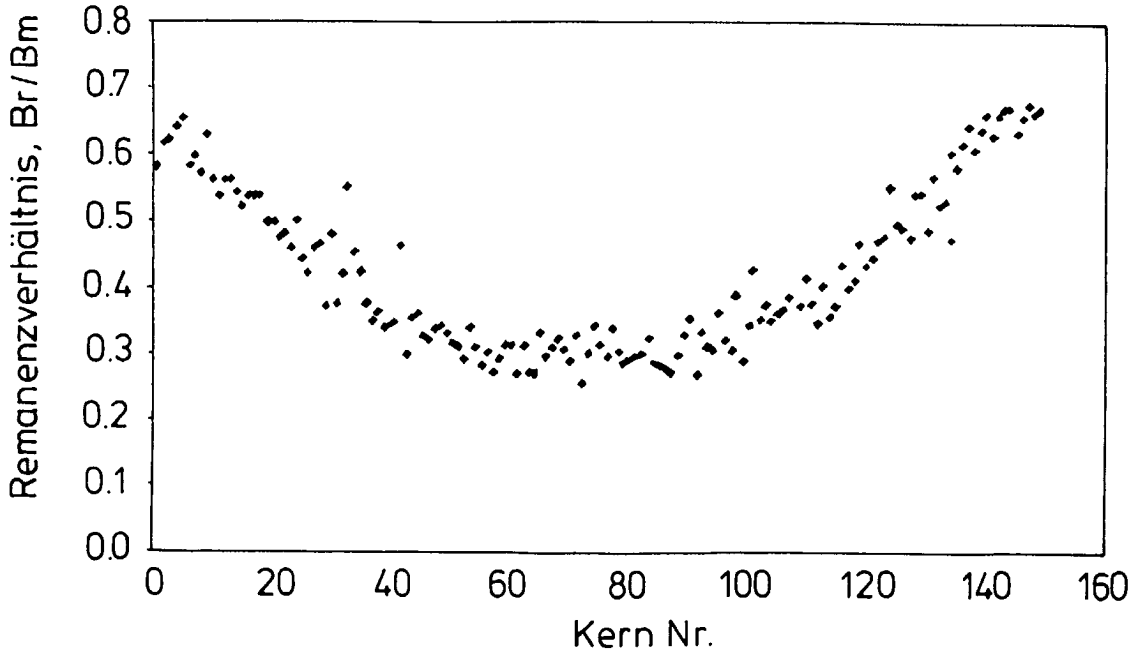

Remanenzverhältnis, Br/Bm
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
0
20
40
60
80
100
120
140
160
Kern Nr.

FIG 2

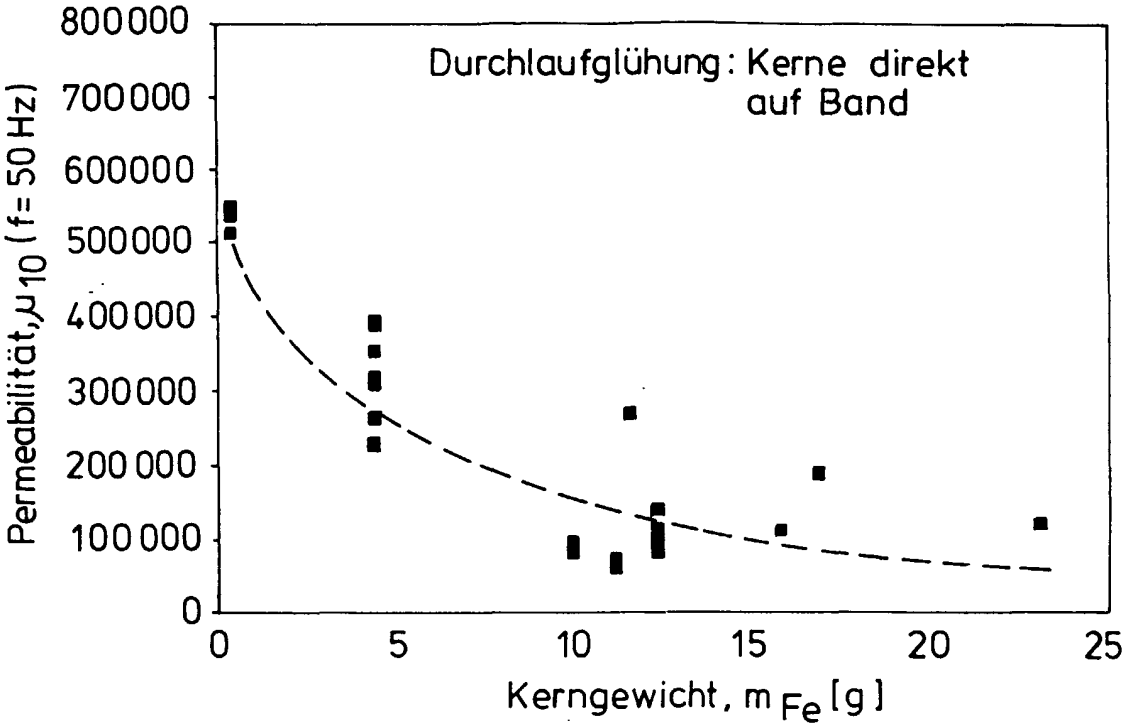

Durchlaufglühung: Kerne direkt auf Band
Permeabilität, μ_{10} (f = 50 Hz)
800000
700000
600000
500000
400000
300000
200000
100000
0
0
5
10
15
20
25
Kerngewicht, m_{Fe} [g]

FIG 3

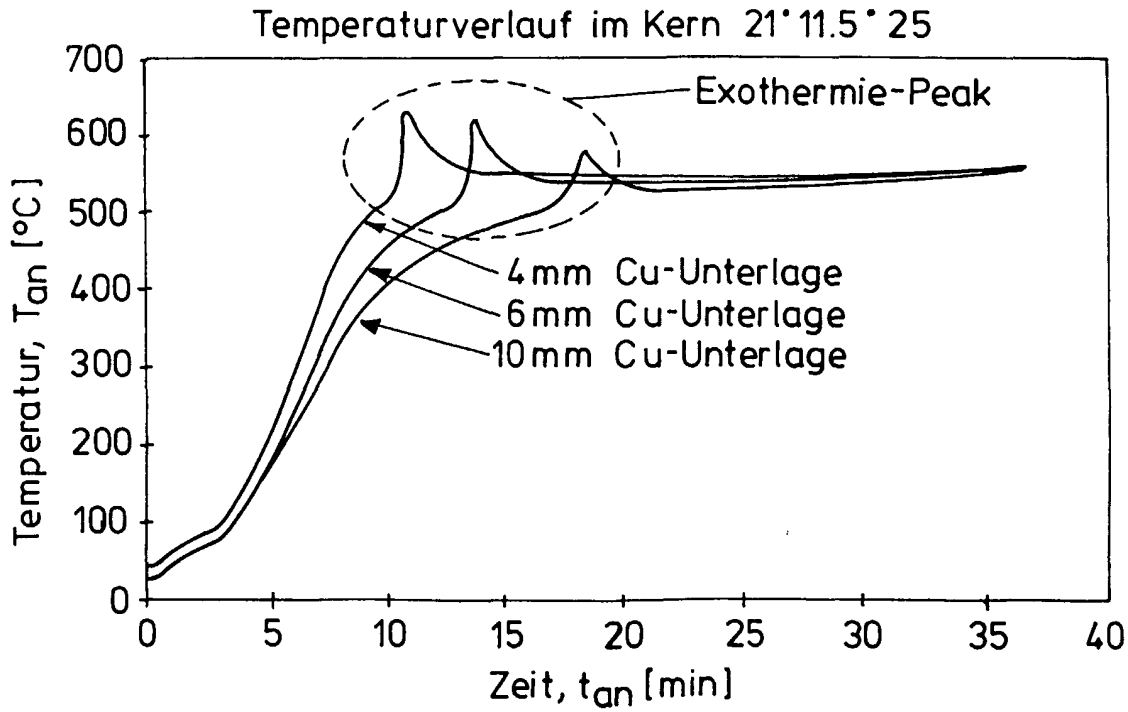

Temperaturverlauf im Kern 21°11.5°25
Exothermie-Peak
4mm Cu-Unterlage
6mm Cu-Unterlage
10mm Cu-Unterlage
Temperatur, T_{an} [°C]
700
600
500
400
300
200
100
0
0
5
10
15
20
25
30
35
40
Zeit, t_{an} [min]

FIG 4

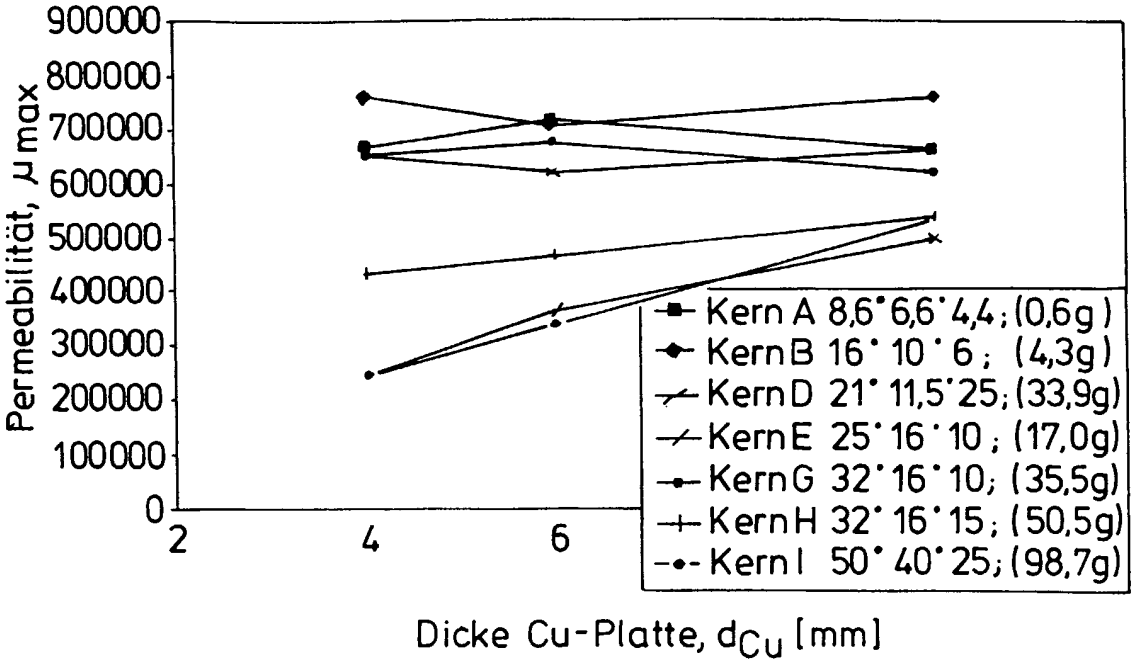

Permeabilität, μmax
900000
800000
700000
600000
500000
400000
300000
200000
100000
0
2
4
6
Kern A 8,6*6,6*4,4; (0,6g)
Kern B 16*10*6; (4,3g)
Kern D 21*11,5*25; (33,9g)
Kern E 25*16*10; (17,0g)
Kern G 32*16*10; (35,5g)
Kern H 32*16*15; (50,5g)
Kern I 50*40*25; (98,7g)
Dicke Cu-Platte, dCu [mm]

FIG 5

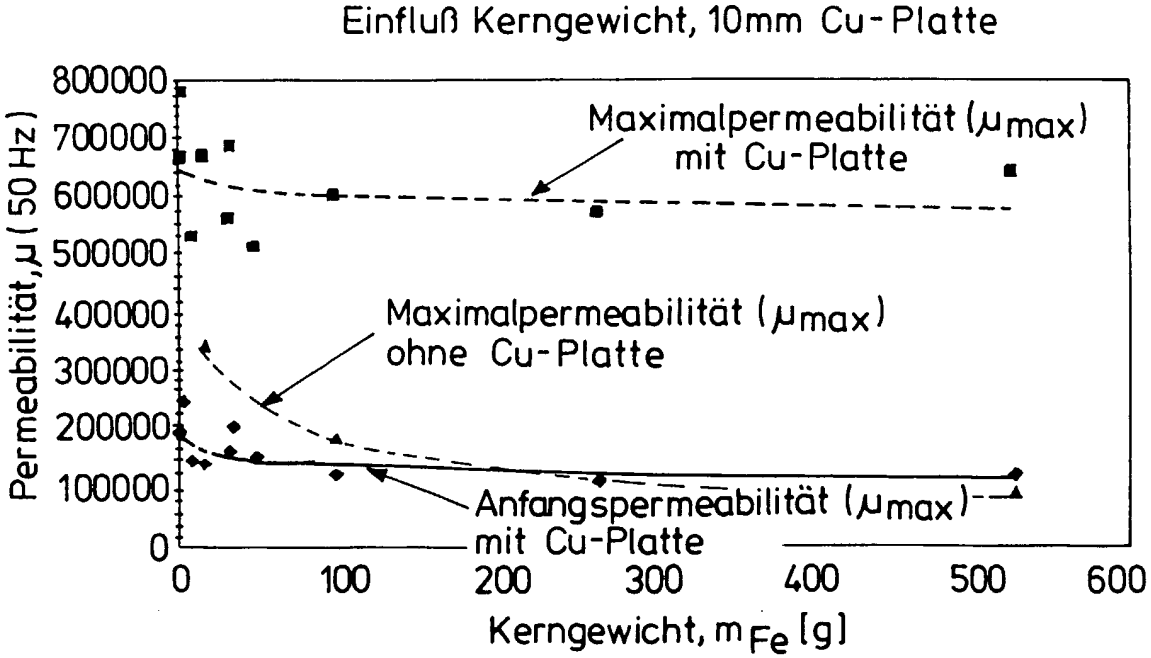
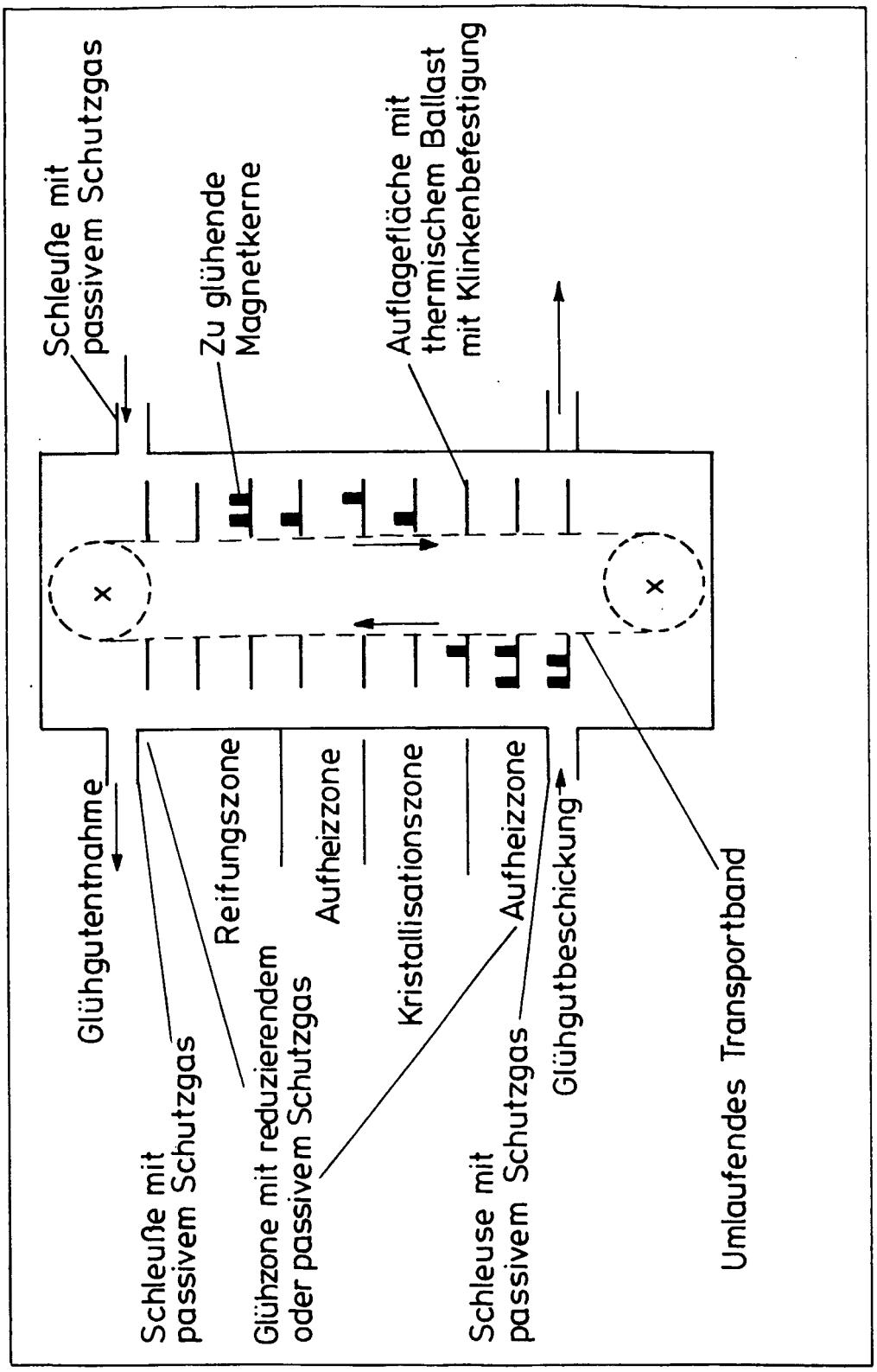

Einfluß Kerngewicht, 10mm Cu-Platte
Permeabilität, μ (50 Hz)
800000
700000
600000
500000
400000
300000
200000
100000
0
Maximalpermeabilität (μmax) mit Cu-Platte
Maximalpermeabilität (μmax) ohne Cu-Platte
Anfangspermeabilität (μmax) mit Cu-Platte
0
100
200
300
400
500
600
Kerngewicht, mFe [g]

FIG 7


Schleuße mit passivem Schutzgas
Zu glühende Magnetkerne
Auflagefläche mit thermischem Ballast mit Klinkenbefestigung
Glühgutentnahme
Schleuße mit passivem Schutzgas
Reifungszone
Glühzone mit reduzierendem oder passivem Schutzgas
Aufheizzone
Kristallisationszone
Schleuse mit passivem Schutzgas
Aufheizzone
Glühgutbeschickung
Umlaufendes Transportband

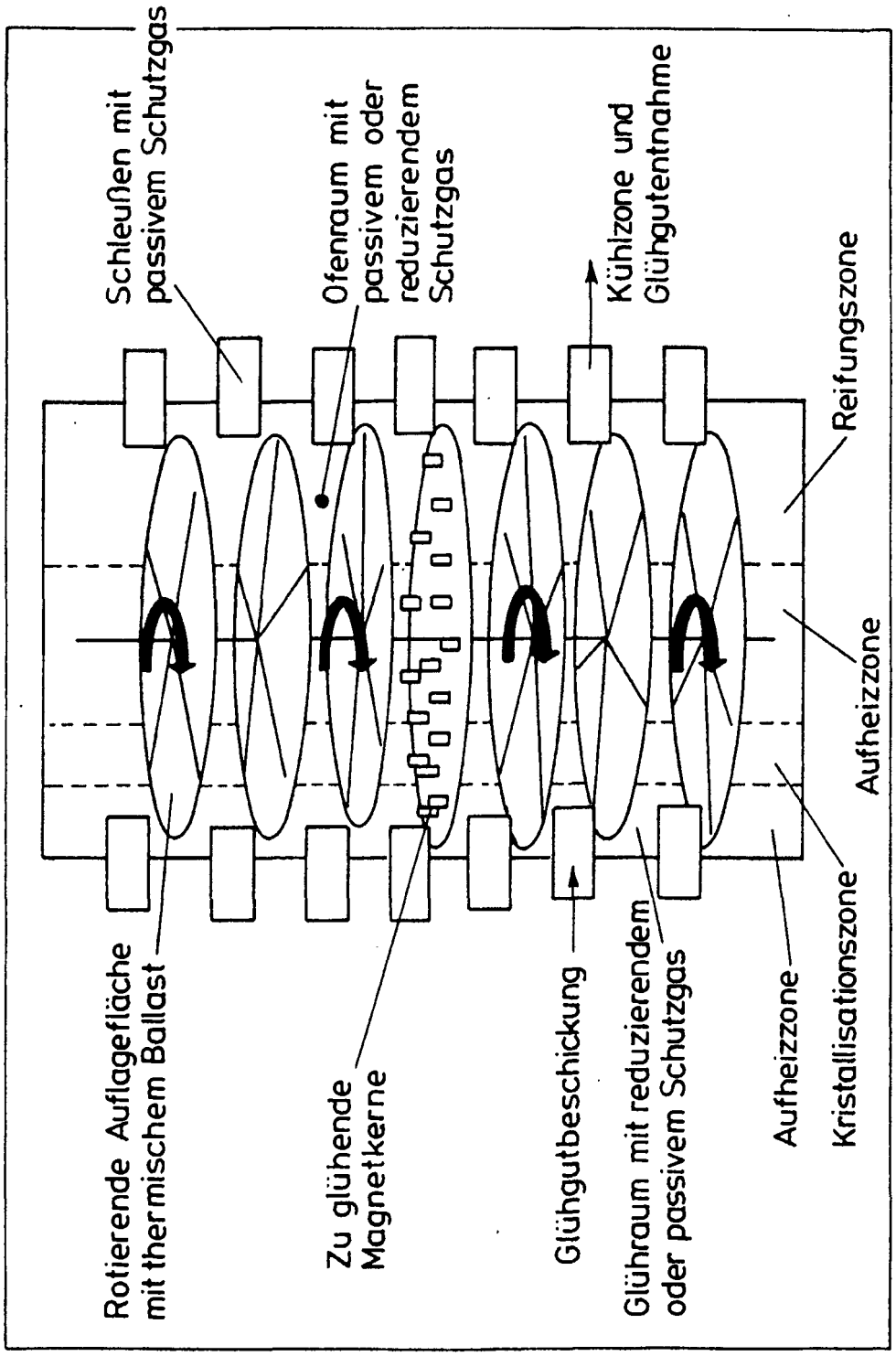

Schleußen mit passivem Schutzgas
Ofenraum mit passivem oder reduzierendem Schutzgas
Kühlzone und Glühgutentnahme
Reifungszone
Aufheizzone
Kristallisationszone
Aufheizzone
Glühraum mit reduzierendem oder passivem Schutzgas
Glühgutbeschickung
Zu glühende Magnetkerne
Rotierende Auflagefläche mit thermischem Ballast

FIG 8

FIG 9

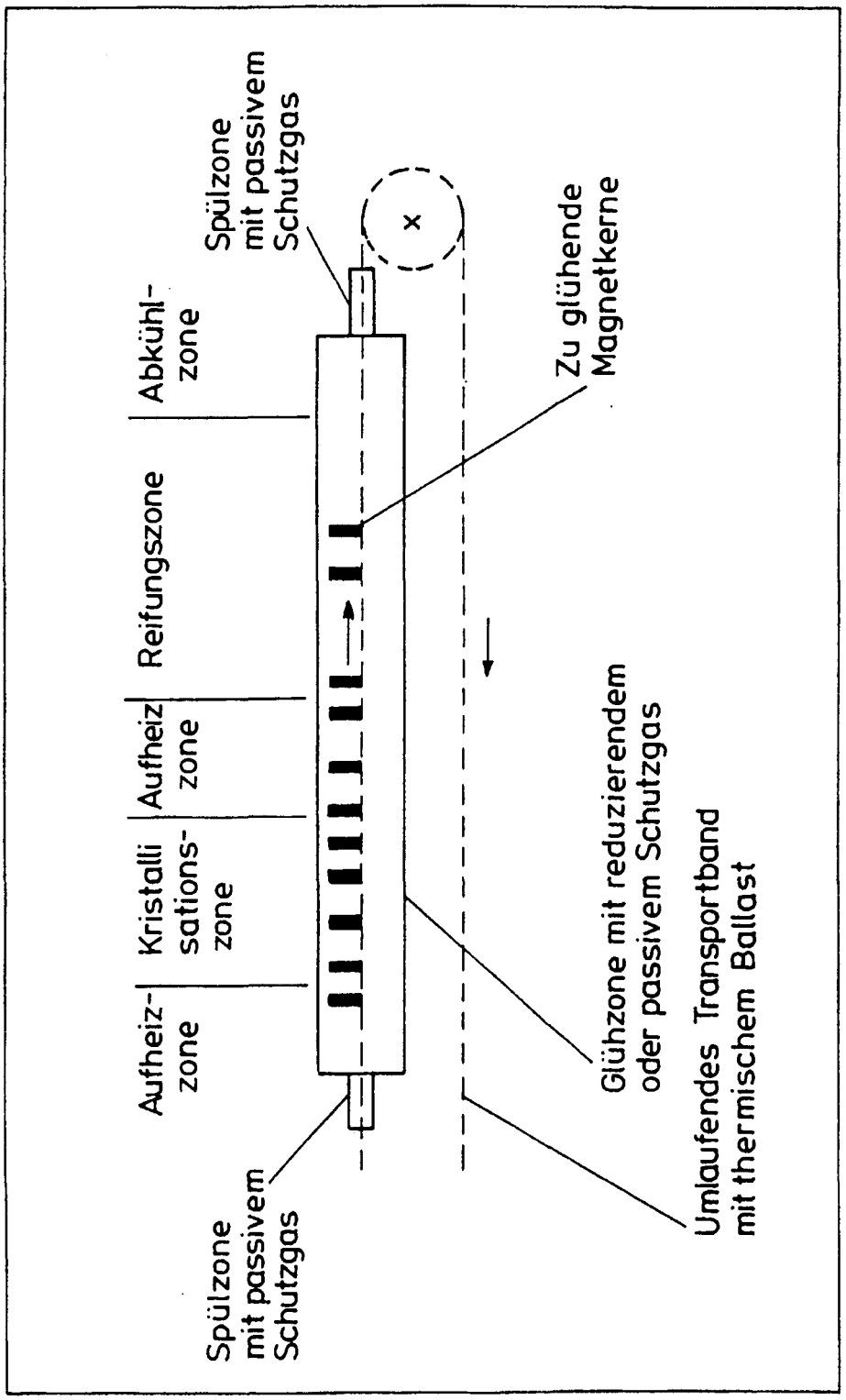

Spülzone mit passivem Schutzgas
Abkühl-zone
Reifungszone
Aufheiz zone
Kristalli sations-zone
Aufheiz-zone
Spülzone mit passivem Schutzgas
Zu glühende Magnetkerne
Glühzone mit reduzierendem oder passivem Schutzgas
Umlaufendes Transportband mit thermischem Ballast

FIG 6

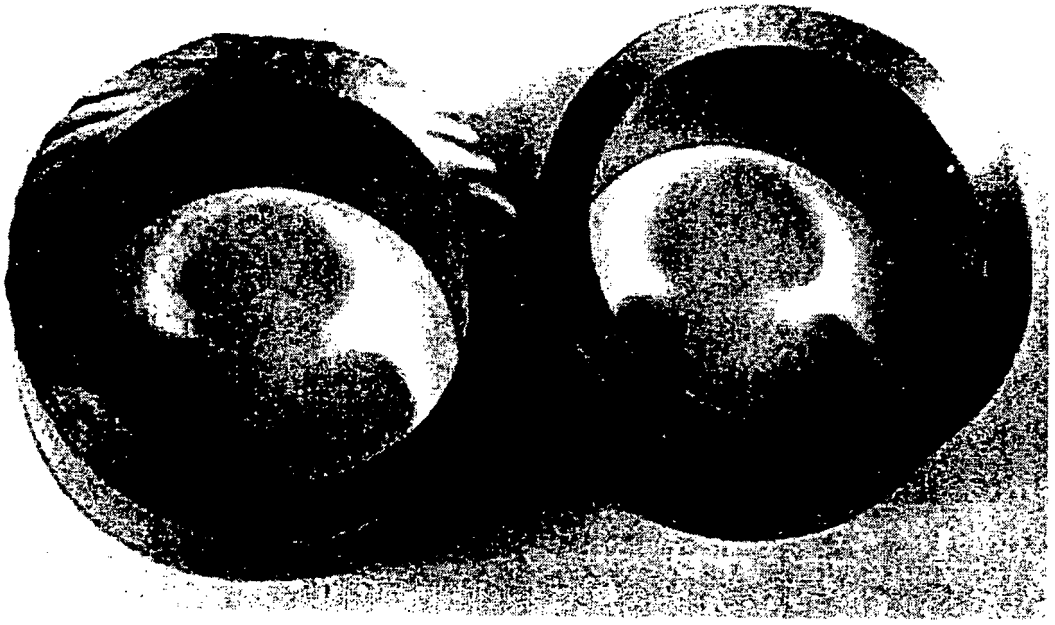
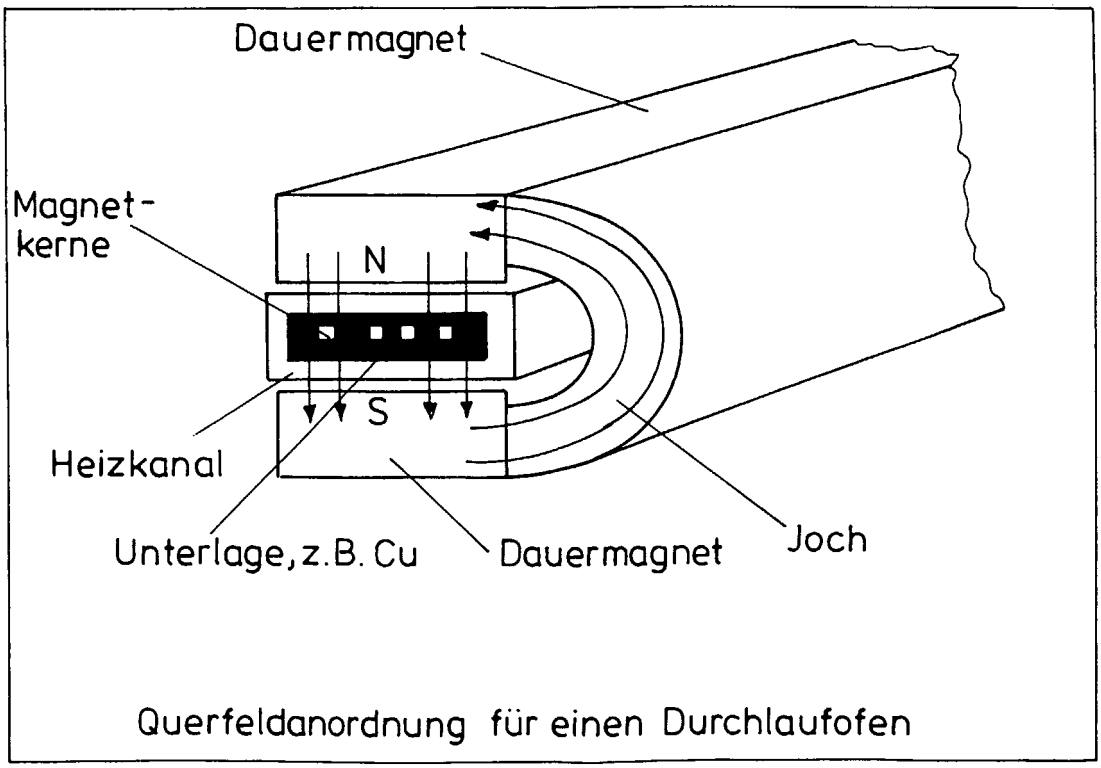


FIG 10



Querfeldanordnung für einen Durchlaufofen

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 0271657 B1 **[0002] [0007]**
- EP 0299498 B1 **[0004]**
- US 5911840 A **[0010] [0011]**
- JP 03146615 A **[0011] [0017]**
- US 5914088 A **[0012]**
- DE 3542257 A1 **[0013]**
- US 2960744 A **[0014]**

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **G. HERZER.** *IEEE Transactions on Magnetics,* 1989, vol. 25, 3327 ff **[0006]**