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

(11) EP 1 114 429 B1

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
12.11.2003 Patentblatt 2003/46

(21) Anmeldenummer: **99969529.9**

(22) Anmeldetag: **16.09.1999**

(51) Int Cl.[7]: **H01F 38/28**, H01F 1/153

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/DE99/02955

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 00/017897 (30.03.2000 Gazette 2000/13)

(54) **STROMWANDLER MIT GLEICHSTROMTOLERANZ**

CURRENT TRANSFORMER WITH A DIRECT CURRENT TOLERANCE

TRANSFORMATEUR DE COURANT A TOLERANCE VIS-A-VIS DU COURANT CONTINU

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE FR GB IT

(30) Priorität: **17.09.1998 DE 19842710**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
11.07.2001 Patentblatt 2001/28

(73) Patentinhaber:
- **Vacuumschmelze GmbH**
  63450 Hanau (DE)
- **Otte, Detlef**
  63584 Gründau (DE)

(72) Erfinder:
- **OTTE, Detlef**
  D-63584 Gründau (DE)
- **PETZOLD, Jörg**
  D-63486 Bruchköbel (DE)

(74) Vertreter: **Patentanwälte**
Westphal, Mussgnug & Partner
Am Riettor 5
78048 Villingen-Schwenningen (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A- 0 240 600 **DE-C- 19 653 428**

- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 011, no. 343 (E-555), 10. November 1987 (1987-11-10) & JP 62 124703 A (MITSUI PETROCHEM IND LTD), 6. Juni 1987 (1987-06-06)**
- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 011, no. 161 (E-509), 23. Mai 1987 (1987-05-23) & JP 61 295601 A (HITACHI METALS LTD), 26. Dezember 1986 (1986-12-26)**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

EP 1 114 429 B1

Printed by Jouve, 75001 PARIS (FR)

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Stromwandler für Wechselstrom, insbesondere Netz-Wechselstrom, mit Gleichstromanteilen, bestehend aus zumindest einem Wandlerkern mit einer Primärwicklung und zumindest einer Sekundärwicklung, zu der ein Bürdenwiderstand parallel geschaltet ist und einen Sekundärstromkreis niederohmig abschließt.

[0002] Zur Erfassung des Energieverbrauchs elektrischer Geräte und Anlagen in Industrie und Haushalt werden Energiezähler eingesetzt. Das älteste dabei gebräuchliche Prinzip ist das des Ferraris-Zählers. Der Ferraris-Zähler basiert auf der Energiezählung über die Rotation einer mit einem mechanischen Zählwerk verbunden Scheibe, die durch die strom- bzw. spannungsproportionalen Felder entsprechender Feldspulen angetrieben wird. Für die Erweiterung der Funktionsmöglichkeiten von Energiezählern wie z. B. für Mehrtarifbetrieb oder Fernablesung werden elektronische Energiezähler eingesetzt, bei denen die Strom- und Spannungserfassung über induktive Stromund Spannungswandler erfolgt. Die Ausgangssignale dieser Wandler werden digitalisiert, phasenrichtig multipliziert, integriert und gespeichert. Das Ergebnis ist eine elektrische Größe, die unter anderem für eine Fernablesung zur Verfügung steht.

[0003] Die zur Energiezählung in industriellen Anwendungen eingesetzten elektronischen Energiezähler arbeiten wegen der oft sehr hohen Ströme, d. h. Ströme die mehr als 100 A betragen, indirekt. Es sind den Stromeingängen spezielle Stromwandler vorgeschaltet, so daß nur rein bipolare, nullsymmetrische Wechselströme im Zähler selbst gemessen werden müssen. Dazu dienen Stromwandler, die mit Wandlerkernen aus hochpermeablen Werkstoffen aufgebaut sind und zur Erreichung geringer Meßfehler über einen kleinen Phasenfehler mit sehr vielen Sekundärwindungen, d. h. typischerweise mehr als 2500 Sekundärwindungen bei einer Primärwindung von 1, ausgestattet sein müssen. Für den Einsatz in Haushaltszählern, die auch in industriellen Kleinanlagen einsetzbar sind, sind diese nicht geeignet, da die durch moderne Halbleiterschaltungen, z. B. Gleichrichterschaltungen oder Phasenanschnittschaltungen, erzeugten nicht nullsymmetrischen Stromverläufe einen Gleichstromanteil enthalten, der diese Stromwandler magnetisch sättigt und damit die Energiezählung verfälscht.

[0004] Für die Abbildung solcher Ströme sind Stromwandler bekannt, die auf Basis offener bzw. mit mechanisch eingebrachten Luftspalten gescherter und dadurch niederpermeabler Magnetkreise arbeiten. Da die Anforderungen an die Störsicherheit solcher Stromwandler jedoch sehr hoch sein müssen, um eine eichfähige Energiezählung zu ermöglichen, sind diese Konstruktionen mit aufwendigen Abschirmungen gegen äußere Felder ausgestattet, die material- und montageintensiv und daher für eine breite Anwendungen im Haushaltsbereich ökonomisch ungünstig sind.

[0005] Eine weitere bekannte Möglichkeit zur Realisierung ist die Verwendung von Stromwandlern mit verhältnismäßig niederpermeablen Wandlerkernen, d. h. Wandlerkerne, die eine Permeabilität $\mu \approx 2000$ aufweisen. Durch eine solche Permeabilität wird eine Sättigung mit kleinen Gleichstromanteilen vermieden. Schwierig ist bei diesen Typen von Stromwandlern die Balance zwischen dem höchsten unverfälscht übertragbaren Effektivwert des zu messenden bipolaren nullsymmetrischen Sinusstroms und der höchsten unverfälscht übertragbaren Amplitude eines unipolaren halbwellengleichgerichteten Sinusstroms. Aus der hierfür maßgeblichen internationalen Norm IEC1036 ist ein Verhältnis dieser beiden Größen von 1:1 ableitbar.

[0006] Um dieses Verhältnis zu erreichen, ist eine möglichst niedrige Permeabilität erforderlich, die bei der Verwendung handhabbarer Windungszahlen aber das Auftreten eines hohen Phasenfehlers zwischen Primär- und Sekundärstrom zur Folge hat. Da dieser im Energiezähler kompensiert werden muß, ist eine entsprechende elektronische Schaltung erforderlich.

[0007] In bisher bekannten Ausführungen von Stromwandlern ist der Kompensationsbereich auf einen Phasenfehler von 5° beschränkt. Bei der Konstruktion führt dieses dazu, daß der höchste übertragbare Effektivwert weit überdimensioniert werden muß. Es treten Verhältnisse 3 - 4:1 auf. Dies führt zu einer sehr schlechten Materialausnutzung und somit zu sehr hohen Herstellkosten.

[0008] Des Weiteren ist es erforderlich, daß eine sehr hohe Linearität dieses Phasenfehlers über den gesamten zu übertragenden Stormbereich eingehalten wird, um die Aufwendungen für die Kompensation möglichst gering zu halten.

[0009] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, einen Stromwandler für Wechselstrom mit Gleichstromanteilen der eingangs genannten Art dahingehend auszubilden, daß er eine hohe Aussteuerbarkeit gleichermaßen mit Wechselstrom und Gleichstromkomponenten aufweist.

[0010] Des Weiteren soll er zur genauen Stromerfassung über einen weiten Strombereich eine hohe Linearität des Übersetzungsverhältnisses aufweisen.

[0011] Ferner soll er eine hohe Immunität gegenüber externen Fremdmagnetfeldern ohne zusätzliche Abschirmmaßnahmen zeigen, so daß er mit einfachen Mitteln, insbesondere mit geringen Wandlerkernmassen und Windungszahlen, preiswert herstellbar und insbesondere zur Erfassung des Energieverbrauchs elektrischer Geräte und Anlagen im Haushalt einsetzbar sein soll.

[0012] Erfindungsgemäß wird die Aufgabe durch einen Stromwandler für Wechselstrom mit Gleichstromanteilen, bestehend aus zumindest einem Wandlerkern mit einer Primärwicklung und zumindest einer Sekundärwicklung, zu

der ein Bürdenwiderstand parallel geschaltet ist und den Sekundärstrom niederohmig abschließt, gelöst, welcher dadurch gekennzeichnet ist,

- daß als Wandlerkern ein geschlossener, luftspaltloser Ringkern aus einem Band (Ringbandkern) aus einer amorphen, ferromagnetischen Legierung vorgesehen ist,
- daß die amorphe ferromagnetische Legierung einen Magnetostriktionswert $|\lambda_S| < 0{,}5$ ppm sowie eine Permeabilität $\mu < 1400$ aufweist, und
- daß die Legierung eine Zusammensetzung aufweist, die im wesentlichen aus der Formel

$$Co_a(Fe_{1-x}Mn_x)_bNi_cX_dSi_eB_fC_g$$

besteht, worin X zumindest eines der Elemente V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Ge und P ist, a-g in Atom% angegeben sind und wobei a, b, c, d, e, f, g und x die folgenden Bedingungen erfüllen:
$40 \le a \le 82$; $2 \le b \le 10$; $0 \le c \le 30$; $0 \le d \le 5$; $0 \le e \le 15$; $7 \le f \le 26$; $0 \le g \le 3$; mit $15 \le d + e + f + g \le 30$ und $0 \le x < 1$.

[0013] Durch diese Maßnahmen wird ein Stromwandler bereitgestellt, der eine exzellente Aussteuerbarkeit gleichermaßen mit Wechselstrom- und Gleichstromkomponenten aufweist.

[0014] Er zeichnet sich ferner durch eine hohe Linearität des Übersetzungsverhältnisses aus, so daß eine genaue Stromerfassung über einen sehr weiten Strombereich gewährleistet ist. Durch seine luftspaltlose Konstruktion weist er des Weiteren eine hohe Immunität gegenüber externen Fremdmagnetfeldern auf, so daß keine zusätzlichen Abschirmmaßnahmen nötig sind. Durch die erfindungsgemäßen Legierungssysteme können sehr geringe Wandlerkernmassen erzielt werden.

[0015] Bei einer Primärwindungszahl von $n_1 = 1$ können Stromwandler bereitgestellt werden, die mit einer Sekundärwindungszahl von ungefähr 1500 auskommen. Insgesamt läßt sich nach der Erfindung ein gleichstromtoleranter Stromwandler herstellen, der äußerst preiswert herstellbar ist und für die eingangs genannten Anwendungen in Industrie und Haushalt hervorragend geeignet ist.

[0016] Besonders gute Stromwandler lassen sich durch die Verwendung von amorphen, ferromagnetischen Legierungen verwirklichen, die einen Magnetostriktionswert $|\lambda_S| < 0{,}1$ ppm sowie eine Permeabiltität $\mu < 1200$ aufweisen, wobei die Legierung eine Zusammensetzung aufweist, die im wesentlichen aus der Formel

$$Co_a(Fe_{1-x}Mn_x)_bNi_cX_dSi_eB_fC_g$$

besteht, worin X zumindest eines der Elemente, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Ge und P ist, a-g in Atom% angegeben sind und wobei a, b, c, d, e, f, g und x die folgenden Bedingungen erfüllen:
$50 \le a \le 75$; $3 \le b \le 5$; $20 \le c \le 25$; $0 \le d \le 3$; $2 \le e \le 12$; $8 \le f \le 20$; $0 \le g \le 3$ mit $17 \le d + e + f + g \le 25$ und $x \le 0{,}5$.

[0017] Die obengenannten Legierungssysteme zeichnen sich durch lineare, flache B-H-Schleifen auf bis zu einem Wert von H = 1 A/cm oder höher. Das erfindungsgemäße Legierungssystem ist nahezu magnetostriktionsfrei. Die Magnetostriktion wird vorzugsweise durch eine Wärmebehandlung eingestellt, wobei die eigentliche Sättigungsmagnetostriktion durch eine Feineinstellung des Eisen und/oder Mangan-Gehalts erreicht wird. Die Sättigungsmagnetisierung B_s von 0,7 Tesla bis 1,2 Tesla wird durch eine Feinabstimmung des Nickel- und des Glasbildner-Gehalts ermöglicht. Unter Glasbildner versteht man hier X, Silizium, Bor und Kohlenstoff.

[0018] Als besonders geeignet haben sich in dem erfindungsgemäßen amorphen, ferromagnetischen Kobaltbasislegierungssystem solche Legierungen erwiesen, bei denen die Parameter $a + b + c \ge 77$ mit $c \le 20$ eingestellt sind. Dadurch können leicht Sättigungsmagnetisierungen B_S von 0,85 Tesla oder höher erreicht werden.

[0019] Die Permeabilität von weniger als 1400 baut auf dem physikalischen Zusammenhang auf, daß die Permeabilität μ umgekehrt proportional zur uniaxialen Anisotropie K_u ist. Die uniaxiale Anisotropie K_u kann über eine Wärmebehandlung in einem transversalen Magnetfeld eingestellt werden. Je höher der Gehalt an Kobalt, Mangan, Eisen und Nickel ist, desto höher läßt sich die uniaxiale Anisotropie K_u einstellen. Der Nickelgehalt übt dabei einen besonders starken Einfluß auf die uniaxiale Anisotropie K_u aus.

[0020] Für das Erreichen einer niedrigen Permeabilität hat sich als günstiger Bereich der Banddicke des Ringbandkernes eine Dicke $d \le 30$ µm, vorzugsweise $d \le 26$ µm erwiesen.

[0021] Um eine möglichst lineare flache B-H-Schleife zu erreichen, hat sich eine Banddicke des Ringbandkernes $d \ge 17$ µm erwiesen. Bei den erfindungsgemäßen Legierungen läßt sich hierdurch der oberflächenbedingte Anteil der Störanisotrpien überraschend stark absenken.

[0022] Typischerweise weist das Band des Ringbandkernes zumindest an einer Oberfläche eine elektrisch isolierende Schicht auf. In einer anderen Ausführungsform weist der gesamte Ringkern eine elektrisch isolierende Schicht auf. Dadurch werden besonders niedrige Permeabilitäten erzielt und auch die Linearität der B-H-Schleifen wird noch-

mals verbessert. Bei der Auswahl des elektrisch isolierenden Mediums ist darauf zu achten, daß dieses einerseits auf der Bandoberfläche gut haftet, andererseits jedoch keine Oberflächenreaktionen verursacht, die zu einer Schädigung der magnetischen Eigenschaften führen würde.

[0023] Bei den erfindungsgemäßen Legierungen haben sich Oxide, Acrylate, Phosphate, Silikate und Chromate der Elemente Kalzium, Magnesium, Aluminium, Titan, Zirkonium, Hafnium und Silizium als besonders wirkungsvolle und verträgliche elektrisch isolierende Medien herausgestellt.

[0024] Besonders effektiv und wirtschaftliche ist dabei Magnesiumoxid, welches als flüssiges magnesiumhaltiges Vorprodukt auf die Bandoberfläche aufgebracht werden kann und sich während einer speziellen gesonderten, die Legierung nicht beeinflussenden Wärmebehandlung in eine dichte magnesiumhaltige Schicht umwandelt, deren Dicke D zwischen 25 nm und 400 nm liegt. Bei der eigentlichen Wärmebehandlung im transversalen Magnetfeld entsteht dann eine gut haftende, chemisch inerte, elektrisch isolierende Magnesiumoxidschicht.

[0025] Die Erfindung ist in der Zeichnung beispielsweise veranschaulicht und im nachstehenden im Einzelnen anhand der Zeichnung beschrieben. Es zeigen:

Figur 1 ein Ersatzschaltbild eines Stromwandlers und die Bereiche der technischen Daten, wie sie in verschiedenen Anwendungen auftreten können,

Figur 2 Magnetfelder im Stromwandler ohne Berücksichtigung von Kernverlusten,

Figur 3 ein Oszillogramm des Sekundärstroms eines Stromwandlers bei halbwellengleichgerichteten Primärstrom,

Figur 4 die Permeabilität in Abhängigkeit der Induktionsamplitude,

Figur 5 die Permeabilitätsänderung in Abhängigkeit der Temperatur,

Figur 6 die Permeabilitätsänderung in Abhängigkeit einer Auslagerungsdauer von erfindungsgemäßen Legierungen,

Figur 7 ein Diagramm mit einer möglichen Temperaturführung während der Wärmebehandlung, und

Figur 8 einen Schnitt durch die Oberfläche eines Körpers dessen Rauhtiefe bestimmt werden soll.

[0026] Figur 1 zeigt die prinzipielle Schaltung eines Stromwandlers 1. Auf einem Wandlerkern 4, der aus einem Ringbandkern aufgebaut ist, befindet sich die Primärwicklung 2, die den zu messenden Strom i_{prim} führt, und eine Sekundärwicklung 3, die den Meßstrom i_{sek} führt. Der Sekundärstrom i_{sek} stellt sich automatisch so ein, daß die Amperwindungen primär und sekundär im Idealfall gleich groß und entgegengesetzt gerichtet sind.

[0027] Der Strom in der Sekundärwicklung 3 stellt sich dann nach dem Induktionsgesetz so ein, daß er die Ursache seiner Entstehung, nämlich die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses im Wandlerkern 4, zu hindern versucht.

[0028] Im idealen Stromwandler ist daher der Sekundärstrom, multipliziert mit dem Verhältnis der Windungszahlen, negativ gleich dem Primärstrom, was durch Gleichung (1) veranschaulicht wird:

$$I_{sec}^{ideal} = -I_{prim} * (N_{prim} / N_{sec}) \tag{1}$$

[0029] Dieser Idealfall wird wegen der Verluste im Bürdenwiderstand 5, im Kupferwiderstand 6 der Sekundärwicklung und im Wandlerkern 4 nie erreicht.

[0030] Im realen Stromwandler weist daher der Sekundärstrom gegenüber der obigen Idealisierung einen Amplitudenfehler und einen Phasenfehler auf, was durch Gleichung (2) beschrieben wird:

$$F(I) = \frac{I_{sec}^{real} - I_{sec}^{ideal}}{I_{sec}^{ideal}} \quad \text{Phasenfehler: } \varphi = \phi(I_{sec}^{real}) - \phi(-I_{prim}) \tag{2}$$

[0031] Ein wichtiger Anwendungsbereich von Stromwandlern sind elektronische Energiezähler in Niederspannungswechselstromnetzen mit einer Netzfrequenz von 50 bzw. 60 Hertz. Die Auswerteelektronik in solchen Zählern bildet das Produkt aus Strom und Spannung zu jedem Zeitpunkt und errechnet daraus die elektrische Leistung bzw. den Energieverbrauch.

[0032] Sehr häufig treten in Wechselstromnetzen induktive Lasten auf, z. B. durch Transformatoren oder Motoren. Sind solche induktiven Lasten im Leerlauf, so ist die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung nahezu 90°. Die elektrische Wirkleistung ist demnach nahezu 0. In dieser Situation geht der Phasenfehler des Stromwandlers besonders kritisch in die Energiezählung ein. Aus diesem Grund ist es wichtig, entweder einen möglichst geringen Phasenfehler, typischerweise einen Phasenfehler $\varphi < 0{,}2°$, zu erreichen, oder einen über den Strommeßbereich möglichst konstanten und damit leicht kompensierbaren höheren Phasenfehler zu erreichen.

[0033] Im idealen Stromwandler heben sich gemäß der Gleichung (1) die Magnetfelder H von Primärstrom und Sekundärstrom gerade auf. Demnach würde der Wandlerkern 4 keine magnetische Aussteuerung erfahren. Auch im realen Stromwandler kompensieren sich die beiden Felder noch nahezu, so daß die magnetische Aussteuerung des Wandlerkerns 4 im Verhältnis zum Magnetfeld des Primärstroms sehr klein ist. Diese Zusammenhänge sind in der Figur 2 veranschaulicht. Je geringer die Übertragungsfehler des Stromwandlers sind, um so geringer ist die magnetische Aussteuerung des Wandlerkerns 4 im Verhältnis zum Magnetfeld des Primärstroms. Damit geht einher, daß ein guter Stromwandler auch extrem hohe Ströme im Verhältnis zur Sättigungsfeldstärke des sekundärseitig nicht abgeschlossenen Wandlerkerns 4 übertragen kann.

[0034] Die wichtigste Kenngröße eines Stromwandlers 1 ist das Verhältnis aus ohmschen Widerstand im Sekundärkreis zum induktiven Widerstand der Sekundärwicklung, was aus der Gleichung (3) hervorgeht:

$$Q = \frac{R}{\omega \cdot L} \approx \tan\varphi \qquad \text{(typisch Q = 1/100...1/500)} \tag{3}$$

[0035] Dieser Gütefaktor Q des Stromwandlers 1, der in erster Näherung den Phasenfehler bestimmt, soll möglichst klein sein. Er bestimmt ebenfalls das Verhältnis von magnetischer Aussteuerung B des Wandlerkerns 4 zum Magnetfeld H_{prim} des Primärstroms, was durch die Gleichung (4) veranschaulicht ist:

$$Q = \frac{R}{\omega \cdot L} \approx \frac{\hat{B}}{\mu\mu_0 H_{prim}} \text{ mit jeweils } R=R_{Cu}+R_R,\ \omega=2\bullet\pi\bullet f,\ H=N\bullet L/L_{fe} \tag{4}$$

[0036] Für eine detailliertere Betrachtung müssen die Verluste im Wandlerkern 4 mitberücksichtigt werden. Die Kernverluste sind abhängig von Materialeigenschaften des Wandlerkerns 4, d. h. bei Ringbandkernen aus dem Werkstoff, der Banddicke und anderen Parametern. Sie lassen sich beschreiben durch einen zweiten Phasenwinkel δ. Der zweite Phasenwinkel δ entspricht der Phasenverschiebung zwischen B und H im Wandlerkern 4 aufgrund der Kernverluste. Die vollständigen Beziehungen für die Kenngrößen des Stromwandlers 1 gehen aus den Gleichungen (5), die den Phasenfehler beschreibt, und (6), die den Amplitudenfehler beschreibt, hervor:

$$\text{Phasenfehler:} \qquad \tan\varphi = \frac{R}{\omega \cdot L}\cdot\cos\delta \qquad \text{mit } L = \mu\mu_0 \frac{A_{Fe}}{l_{Fe}} \cdot N_{sec}^2 \tag{5}$$

$$\text{Amplitudenfehler } F(I) = -\frac{R}{\omega \cdot L}\cdot\sin\delta \tag{6}$$

L_{Fe}=Eisen-Weglänge (mittl. Umfang)

A_{Fe}= Eisen-Querschnitt des Ringkerns

[0037] Die Eigenschaften des Kernwerkstoffs sind darin über die relative Permeabilität μ und den Verlustwinkel δ bzw. den Verlustfaktor tan δ enthalten. Diese Werkstoffeigenschaften sind stark abhängig von der magnetischen Aussteuerung B des Wandlerkerns und damit vom Primärstrom. Dies ist die Ursache für die Nichtlinearität der Wandlerkennlinien.

[0038] Sehr oft wird für elektrische Energiezähler, die zu Abrechnungszwecken im Haushaltsbereich eingesetzt werden, eine sogenannte Gleichstromtoleranz gefordert. Damit ist kein echter Gleichstrom gemeint, sondern ein asymmetrischer Wechselstrom, wie er z. B. durch eine Diode im Verbraucherstromkreis entstehen kann.

[0039] Die internationale Norm IEC1036 fordert die Funktionsfähigkeit des Stromzählers, allerdings mit eingeschränkter Genauigkeit, auch noch bei vollständig halbwellengleichgerichteten Wechselstrom. Das entspricht einer Situation, in der der komplette Primärstrom über eine Diode geleitet wird.

[0040] Die Figur 3 zeigt ein Oszillogramm des Primärstroms, des Sekundärstroms eines Stromwandlers und der Flußdichte B in einem Wandlerkern für einen halbwellengleichgerichteten Primärstrom. Wie man sieht, steigt die Flußdichte B im Wandlern mit jeder Halbwelle stufenförmig an bis der Wandlerkern in die Sättigung geht.

[0041] Die Auswirkung einer solchen Stromform auf dem Wandler läßt sich anhand von Figur 3 beschreiben:

Während einer halben Periode wird die Flußdichte im Wandlerkern um den Wert:

$$\Delta B_1 = 2\hat{B} = 2\frac{R}{\omega \cdot L} \cdot \mu\mu_0 \hat{H}_{prim} \tag{7}$$

erhöht. Bei Ansteuerung mit einem symmetrischen Wechselstrom wird exakt die gleiche Flußdichte während der nächsten halben Periode wieder abgebaut. Fehlt nun während dieser zweiten halben Periode die treibende Kraft des Primärstroms, so kann sich der Fluß im Kern nur sehr langsam abbauen. Dieser Abbau geschieht nach einem Exponentialgesetz:

$$B = B_0(1\text{-}\exp(-1/\tau)) \tag{8}$$

mit der Zeitkonstante τ=L/R der Sekundärwicklung

[0042] Diese Zeitkonstante ist genau dann groß, wenn der Wandler gemäß der Gleichung (3) eine hohe Güte aufweist. Sie liegt bei guten Stromwandlern im Sekundenbereich. Beim Startwert B_0 wird während der Dauer einer Periode $T = 1/f = 2\,\pi/\omega$ durch dieses entladen näherungsweise die Flußdichte

$$\Delta B_2 = B_0 \cdot 2\pi \cdot \frac{R}{\omega \cdot L} \tag{9}$$

abgebaut, die zunächst klein gegenüber ΔB_1 ist.

[0043] D. h., die nächste Periode startet bereits mit einer erhöhten Flußdichte im Kern, so daß der Kern von Periode zu Periode eine höhere magnetische Flußdichte B_0 annimmt. Die sich im Gleichgewichtszustand einstellende mittlere Flußdichte errechnet sich durch Gleichsetzen der Gleichung (7) und (9) zu:

$$\bar{B} = \frac{1}{\pi}\mu\mu_0 \hat{H}_{prim} = \frac{1}{\pi}\mu\mu_0 \frac{\hat{I}_{prim}}{l_{Fe}} \tag{10}$$

[0044] Wenn der Gleichgewichtswert B noch im linearen Bereich der Magnetisierungskurve des Wandlerkerns liegt, wird auch der halbwellengleichgerichtete Strom noch ohne erhöhten Fehler übertragen. Dies ist jedoch bei sehr kleiner Stromamplitude der Fall. Bei höherem Strom gerät der Wandlerkern in den Übergangsbereich zur Sättigung. Dort nimmt die Permeabilität μ rasch ab, so daß sich ein Gleichgewichtszustand im Knick der Magnetisierungskurve mit stark erhöhtem Fehler bis hin zur vollständigen Übersteuerung einstellt.

[0045] Mit Wandlerkernen aus kristallinen Legierungen und aus Ferriten gibt es keine sinnvolle Lösung für dieses Problem.

[0046] Hervorragende Ergebnisse werden nach der vorliegenden Erfindung indessen mit Wandlerkernen aus zumindest 70% amorphen, ferromagnetischen, nahezu magnetostriktionsfreien Kobalt-Basislegierungen erreicht. Diese Kobalt-Basislegierungen weisen eine flache, nahezu lineare B-H-Schleife auf mit einer Permeabilität $\mu < 1400$. Die Wandlerkerne werden vorzugsweise als geschlossene, luftspaltlose Ringbandkerne in ovaler oder rechteckiger Gestalt ausgeführt.

[0047] In der nachfolgenden Tabelle sind zwei geeignete Legierungszusammensetzungen angegeben

Legierung	Sättigungsinduktion	Permeabilität	Sättigungsmagnetostriktion λ		Kristallisationstemperatur
[at%]	[T]	μ	as quenched	wärmebehandelt	[°C]
$Co_{72.8}Fe_{4,7}Si_{5.5}\ B_{17}$	0.99	1220	$-32*10^{-8}$	$-1,6*10^{-8}$	500
$Co_{55.6}Fe_{6.1}Mn_{1.1}\ Si_{4.3}B_{16.2}Ni_{16.5}$	0.93	710	$-110*10^{-8}$	$+4.2*10^{-8}$	432

[0048] Die in der Tabelle 1 wiedergegebenen amorphen, ferromagnetischen Legierungen auf Kobaltbasis wurden zunächst als amorphes Band aus einer Schmelze mittels der an sich bekannten Rascherstarrungstechnologie hergestellt. Die Rascherstarrungstechnologie ist beispielsweise in der DE 37 31 781 C1 eingehend beschrieben. Das Band, das eine Dicke von ungefähr 20 µm aufwies, wurde anschließend spannungsfrei zu einem Ringbandkern gewickelt.

[0049] Die Einstellung der erfindungswesentlichen linearen, flachen B-H-Schleife erfolgte dann durch eine spezielle Wärmebehandlung des gewickelten Ringbandkerns in einem Magnetfeld, das senkrecht zur Bandrichtung stand. Die Wärmebehandlung wurde so vorgenommen, daß sich der Wert der Sättigungsmagnetostriktion des rasch erstarrten (as quenched) Bandes während der Wärmebehandlung um einen von der Legierungszusammensetzung abhängigen Betrag in positive Richtung veränderte, bis er in dem in der Tabelle aufgeführten Bereichen lag.

[0050] Beispielsweise wurde die in Figur 5 dargestellte Wärmebehandlung gefunden, mit der bei einer Legierung mit der Zusammensetzung $Co_{72,7}Fe_{4,6}Si_{5,5}B_{17,2}$ der stark negative Wert der Magnetostiktion von $\lambda_S \approx -45 \times 10^{-8}$ des rascherstarrten (as quenched) Bandes in positive Richtung bis nahe zum Nulldurchgang ($\lambda_S \approx -2 \times 10^{-8}$) verschoben wurde. Gleichzeitig stellt sich eine hochlineare F-Schleife mit einem annähernd idealen Permeabilitätswert von 1200 und einer Sättigungsinduktion $B_s = 0{,}998$ T ein. Unter einer F-Schleife wird dabei eine Hystereseschleife verstanden, die ein Verhältnis von Remanenz B_r zu Sättigungsinduktion $B_s < 50$ aufweist.

[0051] Falls jedoch die Querfeldtemperatur von 330 °C auf beispielsweise 310 °C abgesenkt wurde, sank die Permeabilität auf den zu niedrigen Wert von 1100 ab, wobei die Magnetostriktion um etwa -10×10^{-8} vom Nulldurchgang entfernt lag. Demzufolge leidet die Linearität der $\mu(B)$-Kennlinie und der Phasenfehler stieg um 10% an.

[0052] Wenn dagegen die Querfeldtemperatur auf 370 °C erhöht wurde, stieg die Sättigungsmagnetostriktion auf $\lambda_S \approx +8 \times 10^{-8}$ an. Gleichzeitig wuchs die Permeablität auf einen die Gleichstromtoleranz reduzierenden vergleichsweise hohen Wert von $\mu \approx 1300$. Darüber hinaus setzten bei dieser Temperatur erste Reifungsprozesse von bereits im rascherstarrten Band (as quenched) vorhandenen Kristallisationskeimen ein, die zu einer wesentlichen Störung der Linearität der Kennlinie führten.

[0053] Während der Wärmebehandlung wurde der Ringbandkern mit einem Schutzgas umspült, so daß an der Bandoberfläche keine Oxidationen oder anderweitige chemische Reaktionen auftraten, die die physikalischen Eigenschaften des Ringbandkerns negativ beeinflußen würden.

[0054] Der gewickelte Ringbandkern wurde unter einem Magnetfeld mit einer Rate von 1 bis 10 Kelvin/min auf die weit unterhalb der angegebenen Curietemperaturen liegenden Temperaturen von ungefähr 300°C aufgeheizt und mehrere Stunden im angelegten transversalen Magnetfeld in diesem Temperaturintervall gehalten und anschließend mit einer Kühlrate von 0,1 bis 5 Kelvin/min wieder abgekühlt.

[0055] Zur Erreichung der erfindungsgemäßen linearen und sehr flachen B-H-Schleife wurde ein so starkes Magnetfeld angelegt, daß die temperaturabhängige Sättigungsinduktion der jeweiligen Legierung an jeder Stelle innerhalb des Ringbandkerns sicher überschritten wurde. Die so behandelten Ringbandkerne wurden schließlich durch Umhüllen mit einem Kunststoff verfestigt.

[0056] Die Herstellbarkeit von sehr kleinen und dennoch sehr hochpräzisen Stromwandlern setzt voraus, daß sich die Amplitudenpermeabilität μ des Stromwandlerkerns im Aussteuerungsbereich von $1\ mT \leq B \leq 0{,}9\ B_s$ um weniger als 6 %, vorzugsweise 4 % ändert. Diese Anforderung an die Linearität kann über den beschriebenen Herstellungsvorgang eingehalten werden unter der Voraussetzung, daß das eingesetzte Bandmaterial relative Oberflächenrauheiten $R_{a\ rel}$ aufweist.

[0057] Die Definition des Rauhtiefe Ra_{rel} sei nachfolgend anhand Figur 8 erläutert. Dabei liegt die x-Achse parallel zur Oberfläche eines Körpers dessen Oberflächenrauhigkeit zu bestimmen ist. Die y-Achse ist dagegen parallel zur Flächennormale der zu vermessenden Oberfläche. Die Oberflächenrauhigkeit R_A entspricht dann der Höhe eines Rechtecks 7, dessen Länge gleich einer Gesamtmeßstrecke l_m und das flächengleich mit der Summe der zwischen einem Rauheitsprofil 8 und einer mittleren Linie 9 eingeschlossenen Flächen 10 ist. Die auf die Dicke des Bandmaterials bezogene beidseitige Oberflächenrauhigkeit $R_{a\ rel}$ ergibt sich dann gemäß der Formel $R_{a\ rel} = (R_{a\ Oberseite} + R_{a\ Unterseite})/d$, wobei d die Dicke des Bandmaterials ist.

[0058] Es konnte ein nur 4,7 g schwerer Ringbandkern aus der Legierung $Co_{72,8}Fe_{4,7}Si_{5,5}B_{17}$ hergestellt werden, der mit einer Sekundärwicklung mit einer Windungszahl n_{sec} von 1000 versehen war. Der so hergestellte Stromwandler wies eine Linearität des Phasenwinkels über einen Strombereich von < 120 mA bis 120 A von ≈ 0,2° auf. Die Permeabilität dieses Ringbandkerns lag bei $\mu = 1150$. Der Ringbandkern hatte die Abmessungen 24,5 x 20,5 x 5,5 mm mit einem Eisenquerschnitt von $A_{Fe} = 0{,}088\ cm^2$.

[0059] Der mit diesem Ringbandkern hergstellte Stromwandler verfügte über einen Phasenfehler von 8,9° +/- 0,1° im gesamten Strombereich. Das Verhältnis zwischen dem höchsten übertragbaren Effektivwert des zu messenden bipolaren nullsymmetrischen Sinusstroms und der höchsten übertragbaren Amplitude eines unipolaren halbwellengleichgerichteten Sinusstroms betrug 1,4:1. Ferner wies der Ringbandkern ein sehr gutes Alterungsverhalten bei 120°C auf, was in der Figur 6 dargestellt ist, was mit der sehr hohen Kristallisationstemperatur und der hohen Anisotropieenergie dieser Legierung zu erklären ist.

[0060] Bei der Herstellung des Ringbandkernes wurde besonderer Wert auf eine sorgfältige Abstimmung der Wik-

keltechnik und der Wärmebehandlung auf die magnetischen und metallurgischen Eigenschaften der Legierungen gelegt. Insbesondere wurde darauf geachtet, daß die gewickelten Ringbandkerne in transversaler Richtung in jedem Punkt sicher gesättigt waren, was durch stirnseitiges Stapeln mehrerer Ringbandkerne übereinander erreicht wurde. Die richtungsmäßige Abweichung der Feldlinien von der Rotationssymmetrieachse des Ringbandkernsstapels betrug ungefähr 0,5°. Es hat sich erwiesen, daß eine Abweichung von höchstens 3° zulässig ist.

[0061] Wie der Figur 4 zu entnehmen ist, lassen sich mit dem erfindungsgemäß eingesetzten Legierungsbereich Permeabilitätswerte zwischen 500 und 1400 einstellen. Wie die Figur 5 zeigt, läßt sich gerade durch den Einsatz des beanspruchten Legierungssystems eine extrem hohe Temperaturstabilität der Permeabilität realisieren. So liegt beispielsweise die typische Änderung zwischen Raumtemperatur und +100°C bei weniger als 5%.

[0062] Aus den Figuren 4 und 5 kann zusätzlich gesehen werden, daß die Abhängigkeit der Permeabilität von der Austeuerung bzw. der Temperatur gegenüber Ferriten (N67 bzw. N27) wesentlich günstiger ist. Besonders auffällig ist dabei die starke Abhängigkeit der Permeabilität von der Aussteuerung und von der Temperatur, so daß bei Stromwandlern mit Wandlerkernen aus Ferrit die Linearisierung der Kennlinie durch Scherung und somit ein Luftspalt unumgänglich ist. Durch einen Luftspalt im Wandlerkern besteht aber die Gefahr der Induktion von Störspannungen durch extern eingestreute Magnetfelder. Ferner kann ein Temperatureinfluß bei gescherten Wandlerkernen aus Ferrit zu einer undefinierten Änderung des Luftspalts und damit zu einer überproportionalen Induktivitätsveränderung führen.

[0063] Mit der vorliegenden Erfindung lassen sich kostengünstig Stromwandler für Industrie und Haushalt in kompakter Bauform herstellen, die Sekundärwicklungen mit Windungszahlen $n_{sec} \leq 1500$ aufweisen bei einer Primärwicklung $n_{prim} = 1$ und für einen Primärstrom $i_{prim} < 120$ A ausgelegt sind.

Patentansprüche

1. Stromwandler für Wechselstrom mit Gleichstromanteilen, bestehend aus zumindest einem Wandlerkern mit einer Primärwicklung und zumindest einer Sekundärwicklung, zu der ein Bürdenwiderstand parallel geschaltet ist, der den Sekundärstrom niederohmig abschließt,
   dadurch gekennzeichnet,

   - **daß** als Wandlerkern ein geschlossener, luftspaltloser Ringkern aus einem Band aus einer amorphen ferromagnetischen Legierung vorgesehen ist,
   - **daß** die amorphe, ferromagnetische Legierung einen Magnetostriktionswert $|\lambda_S| < 0{,}5$ ppm sowie eine Permeabilität $\mu < 1400$ aufweist, und
   - **daß** die Legierung eine Zusammensetzung aufweist, die im wesentlichen aus der Formel

   $$Co_a(Fe_{1-x}Mn_x)_bNi_cX_dSi_eB_fC_g$$

   besteht, worin X zumindest eines der Elemente V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Ge und P ist, a-g in Atom% angegeben sind und wobei a, b, c, d, e, f, g und x die folgenden Bedingungen erfüllen:
   $40 \leq a \leq 82$; $2 \leq b \leq 10$; $0 \leq c \leq 30$; $0 \leq d \leq 5$; $0 \leq e \leq 15$; $7 \leq f \leq 26$; $0 \leq g \leq 3$; mit $15 \leq d + e + f + g \leq 30$ und $0 \leq x < 1$.

2. Stromwandler nach Anspruch 1,
   dadurch gekennzeichnet,
   daß a, b, c, d, e, f, g und x die folgenden Bedingungen erfüllen:
   $50 \leq a \leq 75$; $3 \leq b \leq 10$; $5 \leq c \leq 25$; $0 \leq d \leq 3$; $2 \leq e \leq 12$; $8 \leq f \leq 20$; $0 \leq g \leq 3$ mit $17 \leq d + e + f + g \leq 25$ und $x \leq 0{,}5$.

3. Stromwandler nach Anspruch 2,
   dadurch gekennzeichnet,
   daß a, b und c die folgenden Bedingungen erfüllen:
   $a + b + c \geq 77$ und $c \leq 20$.

4. Stromwandler nach Anspruch 3,
   dadurch gekennzeichnet,
   daß die amorphe, ferromagnetische Legierung einen Magnetostriktionswert $|\lambda_S| < 0{,}1$ ppm sowie eine Permeabilität $\mu < 1300$ aufweist.

5. Stromwandler nach einem der Ansprüche 1 bis 4,
   dadurch gekennzeichnet,

daß die amorphe, ferromagnetische Legierung eine Sättigungsmagnetisierung B_s von 0,7 bis 1,2 Tesla hat.

6. Stromwandler nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet,
daß das Band eine Dicke d von 17 µm ≤ d ≤ 30 µm aufweist.

7. Stromwandler nach einem der Ansprüche 1 bis 6,
dadurch gekennzeichnet,
daß das Band zumindest an einer Oberfläche mit einer elektrisch isolierenden Schicht versehen ist.

8. Stromwandler nach einem der Ansprüche 1 bis 6,
dadurch gekennzeichnet,
daß der Ringkern mit einer elektrisch isolierenden Schicht versehen ist.

9. Stromwandler nach Anspruch 7 oder 8,
dadurch gekennzeichnet,
daß als elektrisch isolierende Schicht eine Schicht aus Magnesiumoxid vorgesehen ist.

10. Stromwandler nach Anspruch 9,
dadurch gekennzeichnet,
daß die Magnesiumoxidschicht eine Dicke D von 25 nm ≤ D ≤ 400 nm aufweist.

11. Stromwandler nach einem der Ansprüche 1 bis 10,
dadurch gekennzeichnet,
daß die Sekundärwicklung eine Windungszahl $n_{sec} \leq 1500$ aufweist, wobei die Primärwicklung eine Windungszahl $n_{prim} = 1$ aufweist und der Stromwandler für einen Primärstrom $i_{prim} < 120$ A ausgelegt ist.

Claims

1. Current transformer for alternating current with direct-current components, consisting of at least one transformer core with a primary winding and at least one secondary winding to which a load resistor which closes the secondary current with low resistance is connected in parallel, **characterised in that**

- a closed toroidal core without an air gap made from a strip of an amorphous ferromagnetic alloy is provided as the transformer core,
- the amorphous, ferromagnetic alloy displays magnetostriction $|\lambda_S| < 0.05$ ppm and permeability $\mu < 1400$, and
- the alloy has a composition consisting essentially of the formula

$$Co_a(Fe_{1-x}Mn_x)_bNi_cX_dSi_eB_fC_g,$$

where X is at least one of the elements V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Ge and P, a-g are specified in atomic % and a, b, c, d, e, f, g and x satisfy the following conditions:
$40 \leq a \leq 82$; $2 \leq b \leq 10$; $0 \leq c \leq 30$; $0 \leq d \leq 5$; $0 \leq e \leq 15$; $7 \leq f \leq 26$; $0 \leq g \leq 3$, with $15 \leq d + e + f + g \leq 30$ and $0 \leq x < 1$.

2. Current transformer according to claim 1, **characterised in that** a, b, c, d, e, f, g and x satisfy the following conditions:
$50 \leq a \leq 75$; $3 \leq b \leq 10$; $5 \leq c \leq 25$; $0 \leq d \leq 3$; $2 \leq e \leq 12$; $8 \leq f \leq 20$; $0 \leq g \leq 3$, with $17 \leq d + e + f + g \leq 25$ and $x \leq 0.5$.

3. Current transformer according to claim 2, **characterised in that** a, b and c satisfy the following conditions:
$a + b + c \geq 77$ and $c \leq 20$.

4. Current transformer according to claim 3, **characterised in that** the amorphous, ferromagnetic alloy displays magnetostriction $|\lambda_S| < 0.1$ ppm and permeability $\mu < 1300$.

5. Current transformer according to one of claims 1 to 4, **characterised in that** the amorphous, ferromagnetic ally displays saturation magnetisation B_s of 0.7 to 1.2 tesla.

6. Current transformer according to one of claims 1 to 5, **characterised in that** the strip has a thickness d of 17 μm ≤ d ≤ 30 μm.

7. Current transformer according to one of claims 1 to 6, **characterised in that** the strip is provided at least on one surface with an electrically insulating layer.

8. Current transformer according to one of claims 1 to 6, **characterised in that** the toroidal core is provided with an electrically insulating layer.

9. Current transformer according to claim 7 or claim 8, **characterised in that** a layer of magnesium oxide is provided as the electrically insulating layer.

10. Current transformer according to claim 9, **characterised in that** the magnesium oxide layer has a thickness D of 25 nm ≤ D ≤ 400 nm.

11. Current transformer according to one of claims 1 to 10, **characterised in that** the secondary winding has $n_{sec} \leq$ 1500 turns, the primary winding having $n_{prim} = 1$ turn and the current transformer being designed for a primary current $i_{prim} < 120$ A.

Revendications

1. Transformateur d'intensité pour un courant alternatif contenant des composantes de courant continu, constitué d'au moins un noyau de transformateur avec un enroulement primaire et au moins un enroulement secondaire, sur lequel est connectée en parallèle une résistance ohmique apparente qui ferme avec une faible impédance un circuit de courant secondaire,
caractérisé en ce que

   - en guise de noyau de transformateur est prévu un noyau torique fermé sans entrefer constitué d'une bande en alliage ferromagnétique amorphe,
   - l'alliage ferromagnétique amorphe possède une valeur de magnétostriction $|\lambda_S| < 0{,}5$ ppm et une perméabilité $\mu < 1400$, et
   - l'alliage possède une composition qui est donnée approximativement par la formule

$$Co_a(Fe_{1-x}Mn_x)_bNi_cX_dSi_eB_fC_g$$

   où X est au moins un des éléments V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Ge et P, a à g sont indiqués en pourcentage atomique et a, b, c, d, e, f, g et x remplissent les conditions suivantes :
   $40 \leq a \leq 82$; $2 \leq b \leq 10$; $0 \leq c \leq 30$; $0 \leq d \leq 5$; $0 \leq e \leq 15$; $7 \leq f \leq 26$; $0 \leq g \leq 3$; avec $15 \leq d + e + f + g \leq 30$ et $0 \leq x < 1$.

2. Transformateur d'intensité selon la revendication 1,
caractérisé en ce que
a, b, c, d, e, f, g et x remplissent les conditions suivantes :
$50 \leq a \leq 75$; $3 \leq b \leq 10$; $5 \leq c \leq 25$; $0 \leq d \leq 3$; $2 \leq e \leq 12$; $8 \leq f \leq 20$; $0 \leq g \leq 3$; avec $17 \leq d + e + f + g \leq 25$ et $x \leq 0{,}5$.

3. Transformateur d'intensité selon la revendication 2,
caractérisé en ce que
a, b et c remplissent les conditions suivantes :
$a + b + c \geq 77$ et $c \leq 20$.

4. Transformateur d'intensité selon la revendication 3,
caractérisé en ce que
l'alliage ferromagnétique amorphe possède une valeur de magnétostriction $|\lambda_S| < 0{,}1$ ppm et une perméabilité $\mu <$ 1300.

5. Transformateur d'intensité selon l'une des revendications 1 à 4,
caractérisé en ce que

l'alliage ferromagnétique amorphe possède une saturation magnétique B_s de 0,7 à 1,2 Tesla.

6. Transformateur d'intensité selon l'une des revendications 1 à 5,
caractérisé en ce que
la bande possède une épaisseur d de 17 µm ≤ d ≤ 30 µm.

7. Transformateur d'intensité selon l'une des revendications 1 à 6,
caractérisé en ce que
la bande est dotée au moins sur une face d'une couche isolante électriquement.

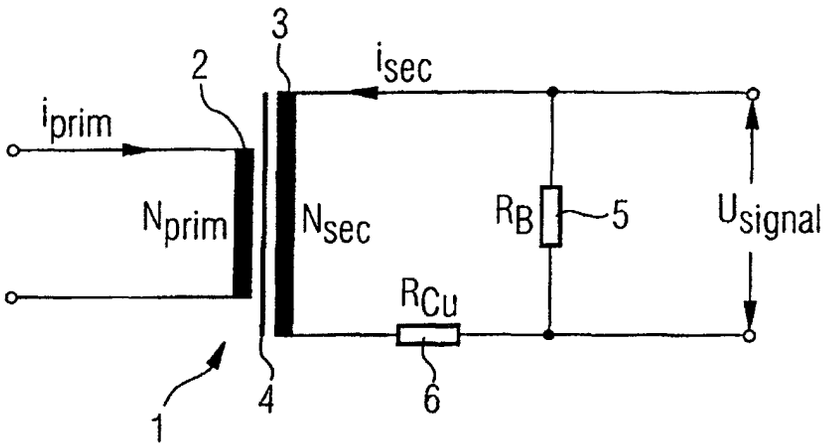
8. Transformateur d'intensité selon l'une des revendications 1 à 6,
caractérisé en ce que
le noyau torique est doté d'une couche isolante électriquement.

9. Transformateur d'intensité selon la revendication 7 ou 8,
caractérisé en ce que
en guise de couche isolante électriquement, il est prévu une couche d'oxyde de magnésium.

10. Transformateur d'intensité selon la revendication 9,
caractérisé en ce que
la couche d'oxyde de magnésium possède une épaisseur D de 25 nm ≤ D ≤. 400 nm.

11. Transformateur d'intensité selon une des revendications 1 à 10,
caractérisé en ce que
l'enroulement secondaire possède un nombre de spires $n_{sec} \leq 1500$, l'enroulement primaire possédant un nombre de spires $n_{prim} = 1$ et le transformateur d'intensité étant conçu pour un courant primaire $i_{prim} < 120$ A.

FIG 1



Typische Daten:

N_{prim} 1...6

I_{prim} : 5 A_{eff}...120 A_{eff} (max.)

N_{sec} : 500...4000

$i_{sec} \approx -i_{prim} * N_{prim} / N_{sec}$

R_B: 1Ω ...200 Ω (Bürde)

R_{cu}: 1Ω...200 Ω (Wicklung)

U_{signal}: 300 m V_{eff} (max.)

Frequenz: 50/60 Hz

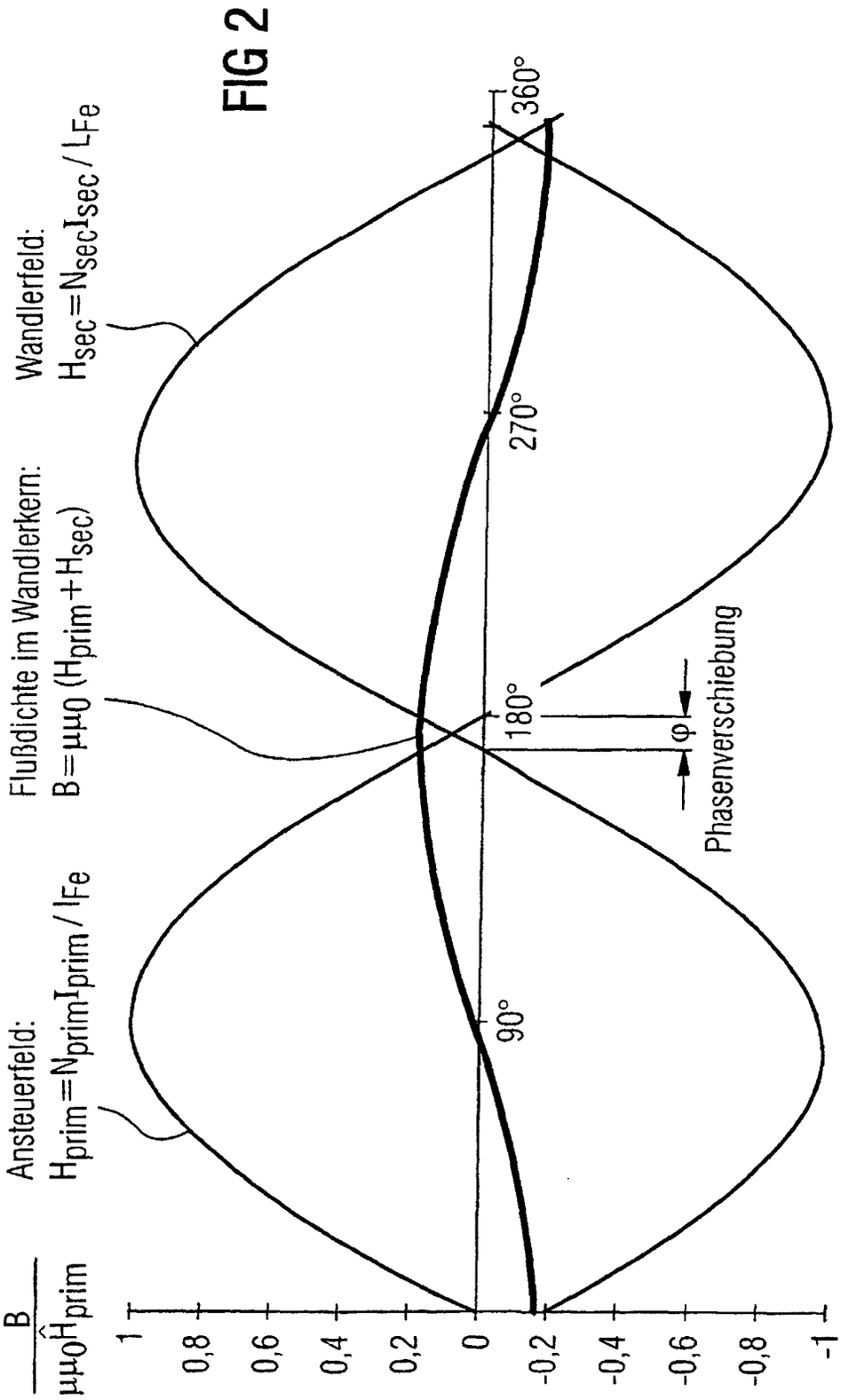

B / μμ0Ĥprim
Ansteuerfeld: Hprim=NprimIprim / lFe
Flußdichte im Wandlerkern: B=μμ0 (Hprim+Hsec)
Wandlerfeld: Hsec=NsecIsec / LFe
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
-0,2
-0,4
-0,6
-0,8
-1
90°
180°
270°
360°
φ
Phasenverschiebung

FIG 2

FIG 3

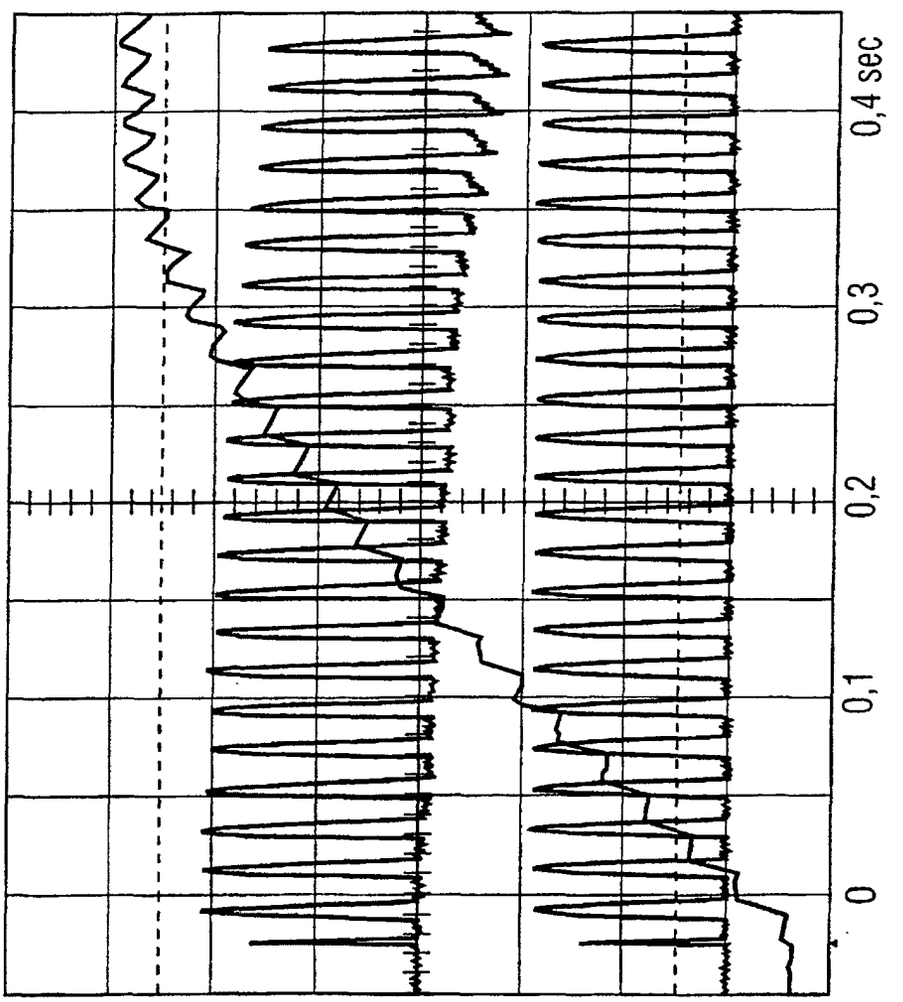

Flußdichte B im Wandlerkern
Sekundärstrom i_{sec} des Wandlers
Primärstrom i_{prim}
0
0,1
0,2
0,3
0,4 sec

FIG 4

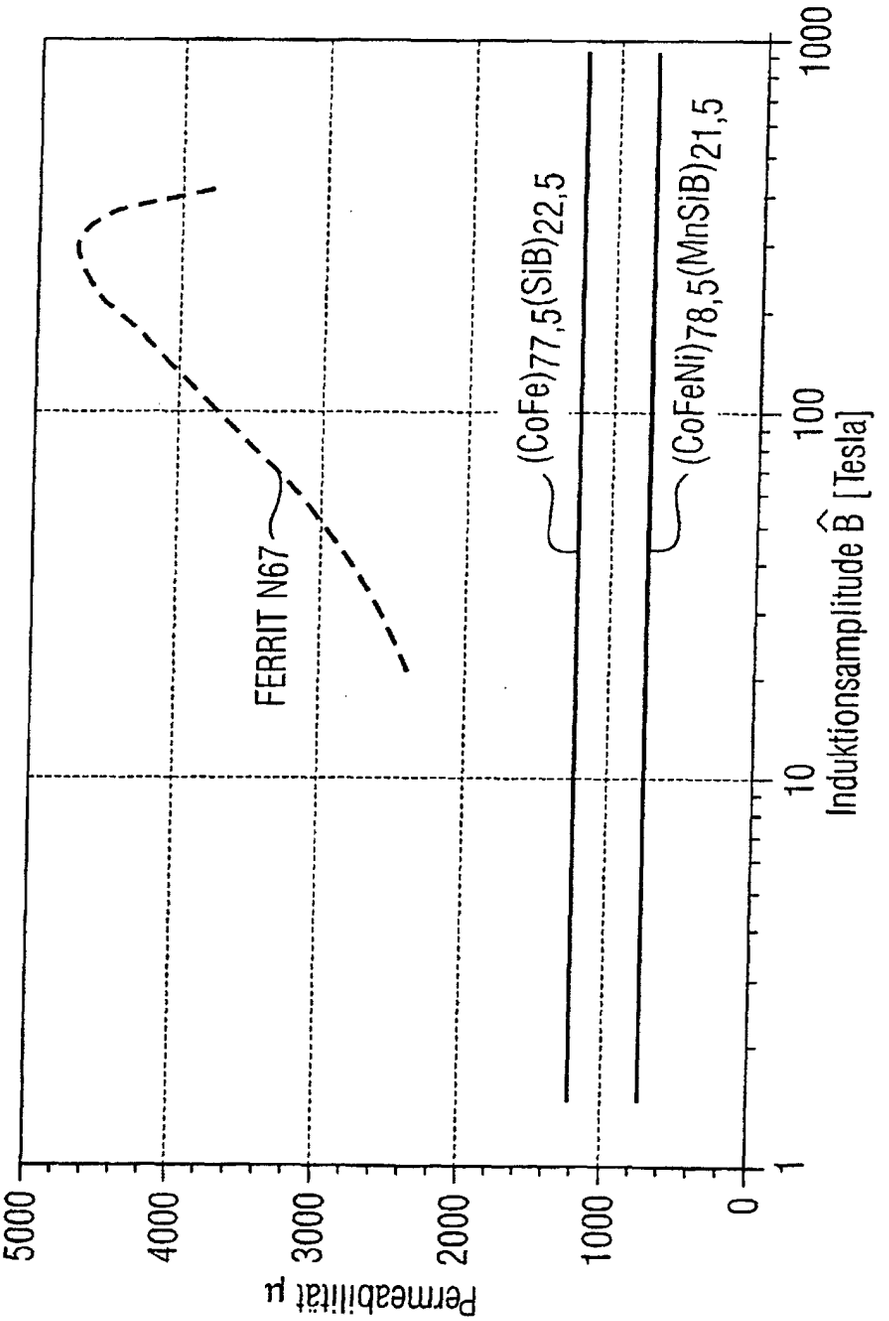

Permeabilität μ
5000
4000
3000
2000
1000
0
1
10
100
1000
Induktionsamplitude B̂ [Tesla]
FERRIT N67
(CoFe)77,5(SiB)22,5
(CoFeNi)78,5(MnSiB)21,5

FIG 5

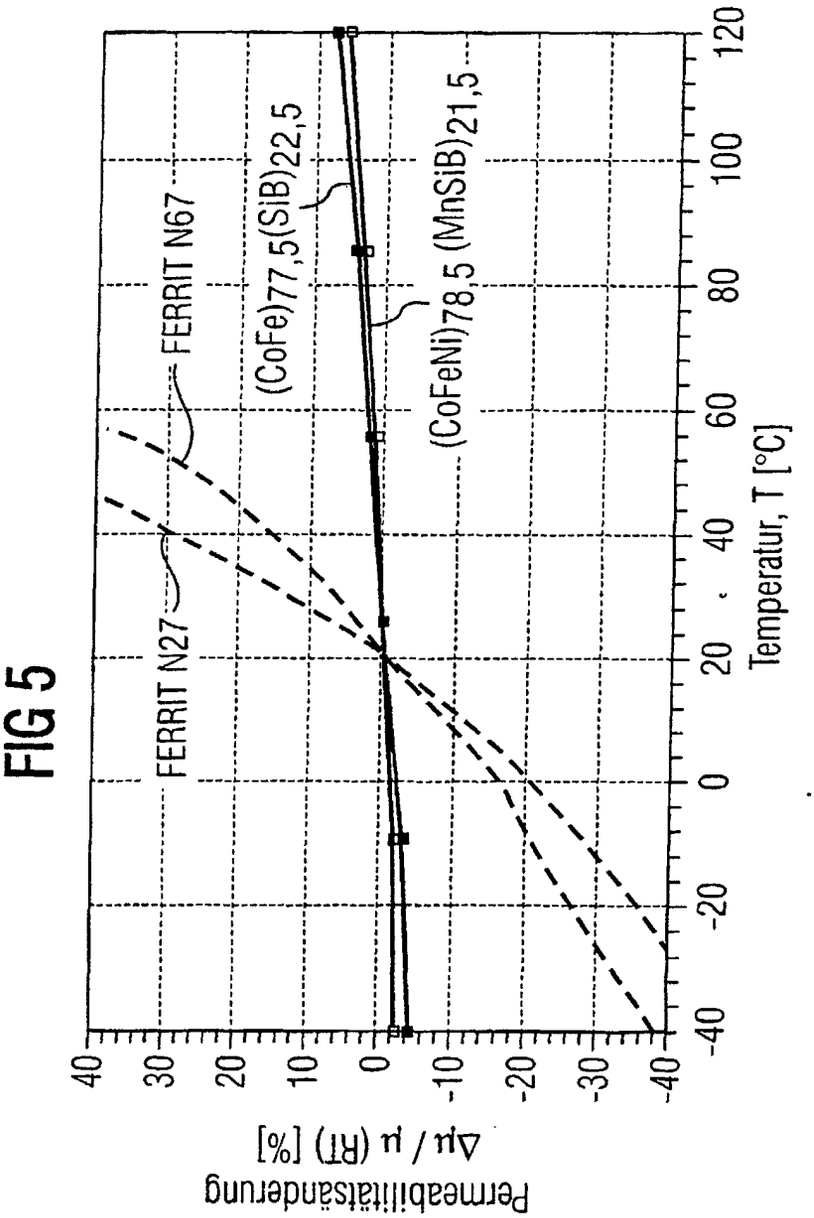

Permeabilitätsänderung
Δμ / μ (RT) [%]
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-40
-20
0
20
40
60
80
100
120
Temperatur, T [°C]
FERRIT N27
FERRIT N67
(CoFe)77,5(SiB)22,5
(CoFeNi)78,5 (MnSiB)21,5

FIG 6

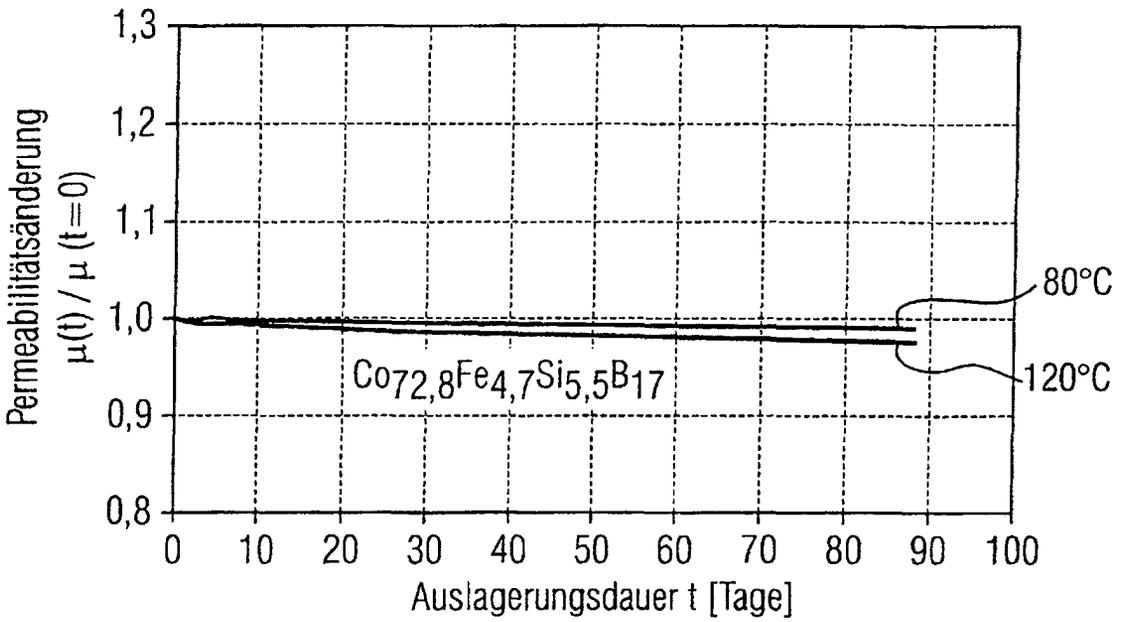
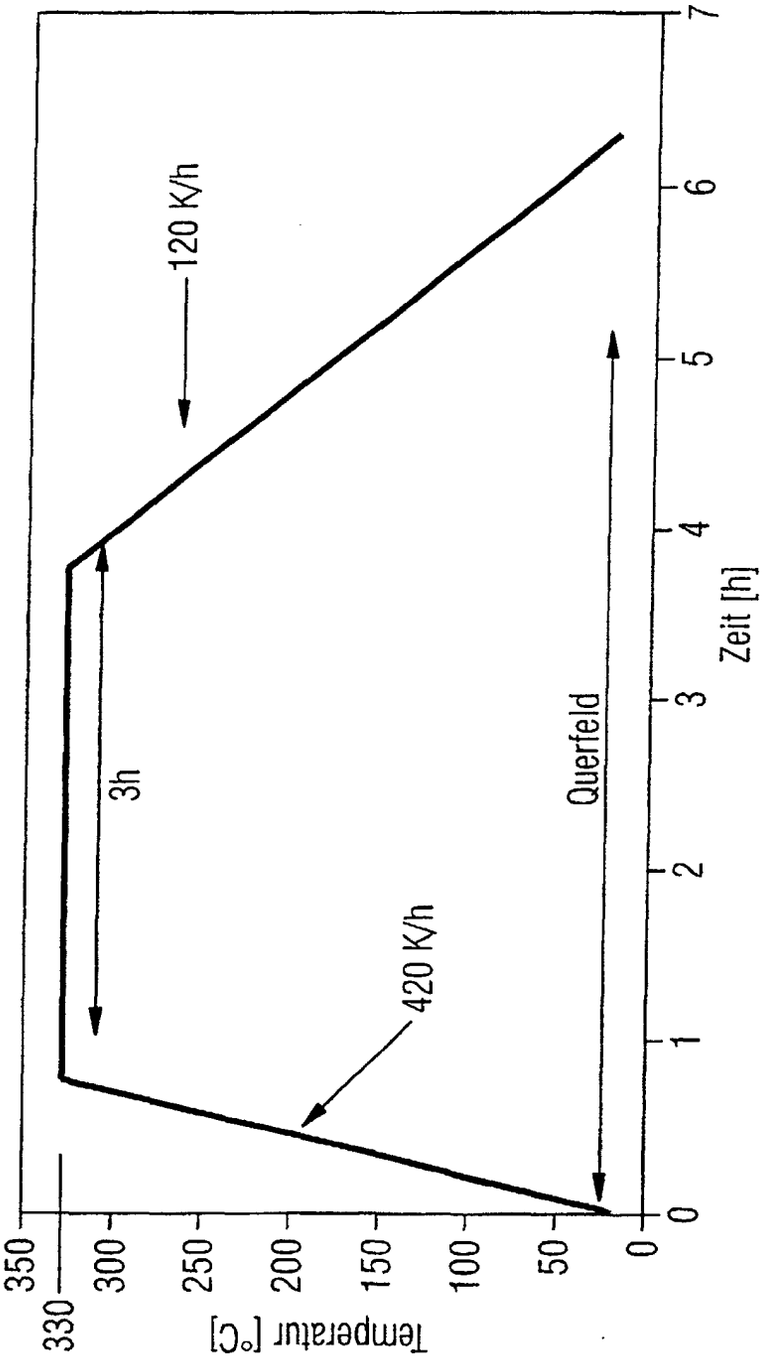

Permeabilitätsänderung
μ(t) / μ (t=0)
1,3
1,2
1,1
1,0
0,9
0,8
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Auslagerungsdauer t [Tage]
80°C
120°C
Co72,8Fe4,7Si5,5B17

FIG 7


Temperatur [°C]
350
330
300
250
200
150
100
50
0
0
1
2
3
4
5
6
7
Zeit [h]
120 K/h
420 K/h
3h
Querfeld

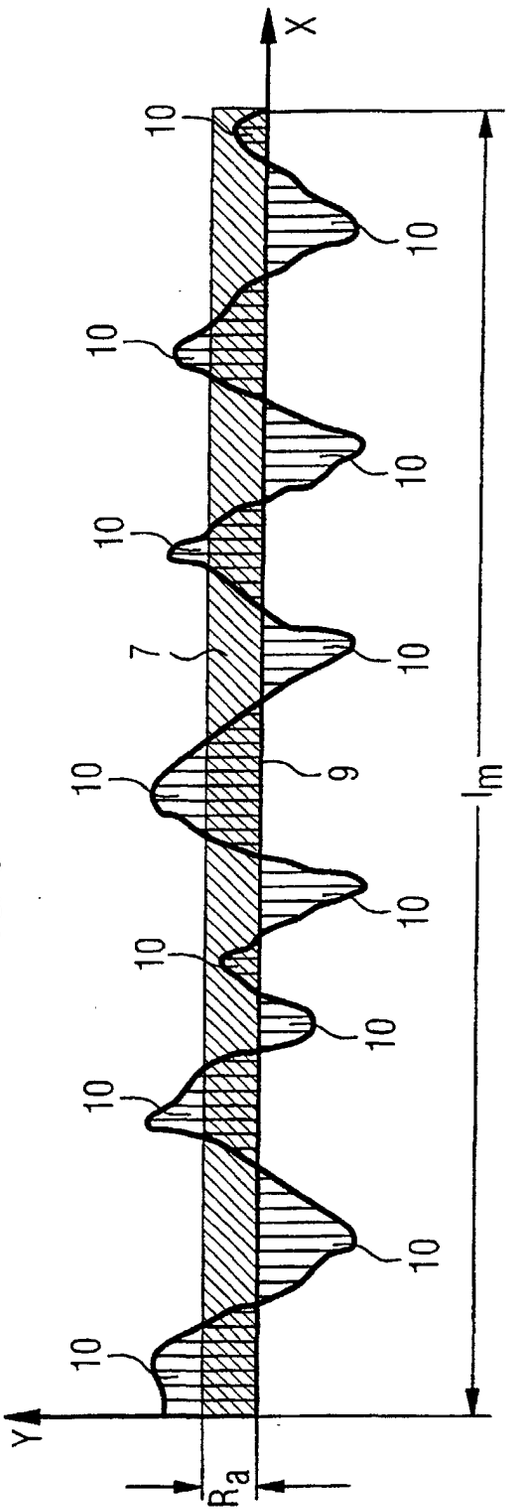


FIG 8