



(19)  
**Bundesrepublik Deutschland**  
**Deutsches Patent- und Markenamt**

(10) **DE 100 03 725 C5 2004.12.30**

(12)

## Geänderte Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **100 03 725.9**

(22) Anmeldetag: **28.01.2000**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag  
 der Patenterteilung: **31.01.2002**

(45) Veröffentlichungstag  
 des geänderten Patents: **30.12.2004**

(51) Int Cl.7: **H01L 39/16**  
**H02H 9/02**

Patent nach Einspruchsverfahren beschränkt aufrechterhalten

(71) Patentinhaber:

**Siemens AG, 80333 München, DE**

(74) Vertreter:

**Zimmermann & Partner, 80331 München**

(72) Erfinder:

**Heismann, Björn, Dipl.-Phys., 91052 Erlangen, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
 gezogene Druckschriften:

**DE 198 32 274 A1**

**DE 198 27 227 A1**

**US 49 94 932 A**

**EP 05 23 374 A2**

**EP 05 03 448 A2**

**EP 08 29 101 B1**

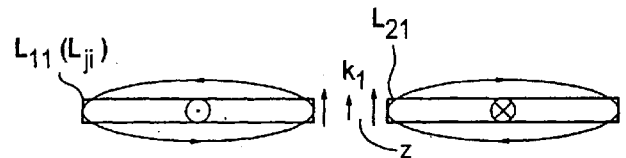
**EP 07 31 986 B1**

**EP 05 23 374 B1**

**EP 03 45 767 B1**

(54) Bezeichnung: **Resistive Strombegrenzungseinrichtung mit Hoch-Tc-Supraleitermaterial sowie Verfahren zur Herstellung und Verwendung der Einrichtung**

(57) Hauptanspruch: Einrichtung (10, 11, 12) zur resistiven Strombegrenzung für Gleich- oder Wechselstromanwendungen, welche einen Trägerkörper (3) vorgegebener Dicke (D) enthält mit zwei gegenüberliegenden Flachseiten (3a, 3b), auf denen jeweils mindestens eine für einen vorgegebenen Nennstrom ( $I_1$ ,  $I_2$ ) ausgelegte streifenförmige Leiterbahn (M1, M2; M3, M4) vorgegebener Dicke angeordnet ist, die Hoch-T<sub>c</sub>-Supraleitermaterial enthält und an Endstücken kontaktiert ist, wobei die Leiterbahnen (M1, M2; M3, M4) auf den beiden Flachseiten (3a, 3b) spiegelbildlich exakt gegenüberliegen und so geschaltet sind, dass ihre gegenüberliegenden, parallel zueinander verlaufenden Leiterbahnteile ( $L_{ji}$ ) parallele Stromführungsrichtungen aufweisen und eine Verstärkung der senkrechten Magnetfeldkomponenten ( $k_2$ ,  $k_3$ ) durch den in den Leiterbahnen (M1, M2; M3, M4) geführten Strom ( $I_1$ ,  $I_2$ ) erfolgt.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung bezieht sich auf eine Einrichtung zur resistiven Strombegrenzung für Gleich- oder Wechselstromanwendungen, welche einen Trägerkörper vorgegebener Dicke enthält mit zwei gegenüberliegenden Flachseiten, auf denen jeweils mindestens eine für einen vorgegebenen Nennstrom ausgelegte streifenförmige Leiterbahn vorgegebener Dicke angeordnet ist, die Hoch- $T_c$ -Supraleitermaterial enthält und an Endstücken kontaktiert ist, wobei die auf den beiden Flachseiten angeordneten Leiterbahnen gegenüberliegende, parallel zueinander verlaufende Leiterbahnteile aufweisen. Eine entsprechende Strombegrenzungseinrichtung geht aus der EP 0 829 101 B1 hervor. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren und die Verwendung einer solchen Einrichtung.

**[0002]** In bestehenden Wechselstrom-Versorgungsnetzen können Kurzschlüsse und elektrische Überschlüsse nicht mit Sicherheit vermieden werden. Bei solchen Störungsfällen steigt der Strom im betroffenen Stromkreis sehr schnell, d. h. in der ersten Halbwelle, auf ein Vielfaches seines Nennwertes an, bis er durch geeignete Sicherheits- und/oder Schaltmittel unterbrochen wird. Als Folge davon treten in allen betroffenen Netzkomponenten wie Leitungen, Sammelschienen, Schaltern und Transformatoren erhebliche thermische sowie mechanische Belastungen durch Stromkräfte auf. Da diese kurzzeitigen Belastungen mit dem Quadrat des Stromes zunehmen, kann eine sichere Begrenzung des Kurzschlussstromes auf einen niedrigeren Spitzenwert die Anforderungen an die Belastungsfähigkeit dieser Netzkomponenten erheblich reduzieren. Dadurch lassen sich Kostenvorteile erreichen, etwa beim Aufbau neuer als auch beim Ausbau bestehender Netze, indem durch einen Einbau von geeigneten Strombegrenzungseinrichtungen ein Austausch von Netzkomponenten gegen höher belastbare Ausführungsformen zu umgehen ist.

**[0003]** Mit supraleitenden Strombegrenzungseinrichtungen vom resistiven Typ kann in an sich bekannter Weise der Anstieg eines Wechsel- oder Gleichstroms nach einem Kurzschluss auf einen Wert von wenigen Vielfachen des Nennstromes begrenzt werden. Darüber hinaus ist eine solche Begrenzungseinrichtung kurze Zeit nach ihrem Abschaltvorgang wieder betriebsbereit. Sie wirkt somit wie eine schnelle, selbstheilende Sicherung. Dabei gewährleistet sie eine hohe Betriebssicherheit, da sie passiv wirkt, d. h. autonom ohne vorherige Detektion des Kurzschlusses und ohne aktive Auslösung durch ein Schaltsignal arbeitet.

**[0004]** Resistive supraleitende Strombegrenzungseinrichtungen der eingangs genannten Art bilden eine seriell in den zu überwachenden Stromkreis ein-

zufügende supraleitende Schaltstrecke. Dabei wird der Übergang wenigstens einer supraleitenden Leiterbahn vom praktisch widerstandslosen, kalten Betriebszustand unterhalb der Sprungtemperatur  $T_c$  des supraleitenden Materials in den normalleitenden Zustand über  $T_c$  hinaus (sogenannter "Quench") ausgenutzt, wobei der dann vorhandene elektrische Widerstand  $R_n$  der normalleitend gewordenen Leiterbahn den Strom auf eine akzeptable Höhe  $I = U/R_n$  begrenzt. Für den Schaltvorgang bei einem Kurzschluss, bei dem die Stromdichte  $j$  über den kritischen Wert  $j_c$  des Supraleitermaterials ansteigt, wird die Leiterbahn durch die Joule'sche Wärmeentwicklung über  $T_c$  hinaus erwärmt, wobei die Leiterbahn einen endlichen elektrischen Widerstand annimmt. In diesem begrenzenden Fall fließt dann in dem Stromkreis vorteilhaft ein verminderter Reststrom solange weiter, bis der Stromkreis z. B. mittels eines zusätzlichen mechanischen Trennschalters völlig unterbrochen wird. Ein entsprechender Strombegrenzungsvorgang ist sowohl für Wechselstrom- als auch für Gleichstromanwendungen möglich.

**[0005]** Supraleitende Strombegrenzungseinrichtungen mit bekannten metalloxidischen Hoch- $T_c$ -Supraleitermaterialien (nachfolgend verwendete Abkürzung: HTS-Materialien), deren  $T_c$  so hoch liegt, dass sie bei normalen Druckverhältnissen mit flüssigem Stickstoff ( $LN_2$ ) von 77 K im supraleitenden Betriebszustand zu halten sind, zeigen vorteilhaft die gewünschte schnelle Zunahme des elektrischen Widerstandes beim Überschreiten ihrer kritischen Stromdichte  $j_c$ . Die damit verbundene Erwärmung über  $T_c$  und somit die Strombegrenzung geschehen dabei in hinreichend kurzer Zeit, so dass der Spitzenwert des Kurzschlussstromes auf einen Bruchteil des unbegrenzten Stromes, z. B. auf den 3- bis 10fachen Wert des Nennstromes begrenzt werden kann. Da im allgemeinen der supraleitende Strompfad in gut wärmeleitendem Kontakt mit einem geeigneten Kühlmittel steht, ist in verhältnismäßig kurzer Zeit nach einem solchen Quench eine Rückführung in den supraleitenden Betriebszustand möglich.

**[0006]** Mit der aus der eingangs genannten EP 0 829 101 B1 zu entnehmenden Strombegrenzungseinrichtung sind entsprechende Anforderungen zu erfüllen. Die bekannte Einrichtung weist einen Trägerkörper aus einem elektrisch isolierenden Material wie z. B. aus Y-stabilisiertem  $ZrO_2$  (sogenanntes YSZ) oder aus Glas auf. Gemäß einer speziellen Ausführungsform können auf jeder der beiden gegenüberliegenden Flachseiten dieses Trägerkörpers unmittelbar oder über eine dünne Zwischenschicht ein metalloxidisches HTS-Material in Form einer wenigstens einer streifenförmigen Leiterbahn strukturierten Schicht aufgebracht sein. Die Leiterbahn kann dabei als Mäander (vgl. EP 0 523 374 B1) oder als Spirale oder Spule (vgl. EP 0 503 448 A2) gestaltet sein. An ihren Enden ist jede Leiterbahn mit wei-

teren, normalleitenden Anschlussleitern zur Einspeisung bzw. Abnahme des zu begrenzenden Stromes oder zur Verschaltung einzelner Leiterbahnen untereinander großflächig mittels Löt-, Press- oder Federkontakten kontaktierbar.

**[0007]** Gegebenenfalls kann bei der bekannten Strombegrenzungseinrichtung zum Schutz ihres HTS-Materials gegen Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit zumindest das supraleitende Material mit einer isolierenden Schicht abgedeckt sein. Es sind aber auch Ausführungsformen von Strombegrenzungseinrichtungen unter Verwendung von HTS-Material bekannt, bei denen die Leiterbahnen mit normalleitendem Material abgedeckt oder anderwärts parallelgeschaltet sind, die als sogenannter Shunt-Widerstand wirken (vgl. EP 0 345 767 B1).

**[0008]** Bei Ausführungsformen von Strombegrenzungseinrichtungen der eingangs genannten Art mit einer Anordnung von Leiterbahnen zu beiden Seiten eines Trägerkörpers ist davon auszugehen, dass diese auf den beiden Flachseiten angeordneten Leiterbahnen direkt gegenüberliegende bzw. übereinander angeordnete, parallel verlaufende Leiterbahnteile aufweisen. Zur Reduzierung der von diesen gegenüberliegenden Leiterbahnteilen verursachten Wechselstromverluste soll gemäß der EP 0 731 986 B1 eine antiparallele Stromführung in den gegenüberliegenden Leiterbahnteilen vorgesehen werden.

**[0009]** Aus der US 4 994 932 A ist eine Einrichtung zur resistiven Strombegrenzung zu entnehmen, die mehrere modulartig aneinanderzufügende Trägerkörper mit jeweils gegenüberliegenden Flachseiten enthält, auf denen Leiterbahnen aus HTS-Material mäanderförmig angeordnet sind. Die auf den gegenüberliegenden Flachseiten jedes Trägerkörpers verlaufenden Leiterbahnen können so angeordnet und hintereinander geschaltet sein, dass diese nur mit ihren länger ausgedehnten Teilen der Mäanderform parallel gegenüberliegen und dort die gleiche Stromführungsrichtung aufweisen. Das von den beiden Leiterbahnen gemeinsam hervorgerufene Magnetfeld ist jedoch insbesondere in den seitlichen, schmälere Umkehrbereichen der Mäanderform verhältnismäßig inhomogen.

**[0010]** Im Kurzschlussfall, d. h. während der Belastung mit einem Überstrom  $I > I_n$  ( $I_n$  = Nominalstrom), ist ein räumlich und zeitlich möglichst homogener Übergang der Fläche der HTS-Leiterbahnen vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand ausschlaggebend für eine Maximierung der zu schaltenden Nennleistung  $P_n = U_n \times I_n/2^{0,5}$ . Je mehr Fläche praktisch gleichzeitig mit ihrem normalleitenden Widerstand zur Strombegrenzung beiträgt, desto geringer sind Temperaturgradienten und damit die limitierenden strukturellen Belastungen im HTS-Material.

**[0011]** Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es nun, die Strombegrenzungseinrichtung mit den eingangs genannten Merkmalen dahingehend auszugestalten, dass die räumliche und zeitliche Homogenisierung des Übergangs der HTS-Fläche (Quenchs) im Kurzschlussfall weiter verbessert wird. Ferner soll ein Verfahren zur Herstellung einer solchen Strombegrenzungseinrichtung sowie eine besondere Verwendung derselben angegeben werden.

**[0012]** Die sich auf die Einrichtung beziehende Aufgabe wird erfindungsgemäß mit den in Anspruch 1 angegebenen Merkmalen gelöst.

**[0013]** Die mit dieser Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Strombegrenzungseinrichtung verbundenen Vorteile sind darin zu sehen, dass mit der parallelen Stromführung in den gegenüberliegenden Leiterbahnteilen eine Verstärkung der von dem in ihnen geführten Strom verursachten senkrechten Magnetfeldkomponente zu erreichen ist; diese Verstärkung trägt vorteilhaft zu einem frühzeitigen Aufbau eines Widerstandes in einer gegenüber antiparalleler Stromführungsrichtung vergleichsweise größeren Fläche bei. Das Schaltverhalten der gegenüberliegenden Leiterbahnteile wird dabei quasi synchronisiert. Man erhält so eine serielle Homogenisierung des Schaltverhaltens, d. h., durch die magnetische Kopplung seriell geschalteter Bahnen schalten beide früher mit größerer Fläche. Die Verbesserung der Homogenität des Schaltprozesses geschieht dabei allein durch die Anordnung der Leiterbahnen bzw. Schaltelemente und ihre vorbestimmten Stromführungsrichtung. Damit wird die Schalthomogenität sowie -leistung erhöht und/oder eine Senkung der Anforderungen an das HTS-Material erreicht.

**[0014]** Vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Strombegrenzungseinrichtung gehen aus den abhängigen Ansprüchen hervor.

**[0015]** Hat jede Leiterbahn auf einer Seite des Trägerkörpers mehrere benachbarte, parallel verlaufende Leiterbahnteile, so wird in diesen Leiterbahnteile vorteilhaft eine antiparallel verlaufende Stromführungsrichtung vorgesehen. Dies gilt beispielsweise für bifilare Spiralformen oder Mäanderanordnungen, insbesondere auch für parallel geschaltete Mäanderleiterbahnen. Wesentlich ist auch hier, dass auf der gegenüberliegenden Flachseite befindliche, parallel verlaufende Leiterbahnteile Stromführungsrichtungen in dieselbe Richtung aufweisen. Auf diese Weise ist der gewünschte Magnetfeldverstärkungseffekt, der zu einer Homogenisierung des Schaltverhaltens führt, zu gewährleisten. Besonders einfach lässt sich die erfindungsgemäße Strombegrenzungseinrichtung dadurch herstellen, dass jede Leiterbahn aus einer auf die jeweilige Flachseite des Trägerkörpers aufgetragenen Schicht aus dem Supraleitermaterial herausgearbeitet wird. Entsprechende Strukturie-

rungsmaßnahmen, gehen beispielsweise aus der eingangs genannten EP 0 829 101 B1 hervor.

**[0016]** Mehrere erfindungsgemäße Strombegrenzungseinrichtungen lassen sich besonders vorteilhaft als Bausteine in einer Strombegrenzeranordnung verwenden. Entsprechende, prinzipiell aus der EP 0 829 101 B1 ebenfalls zu entnehmende Strombegrenzeranordnungen können so leicht an die jeweils zugrunde zu legenden Spannungs- oder Stromverhältnisse angepasst werden.

**[0017]** Für solche Strombegrenzeranordnungen werden insbesondere Leiterbahnteile vorgesehen, die parallel zu Leiterbahnteilen eines benachbarten Bausteins verlaufen und dieselbe Stromführungsrichtung aufweisen.

**[0018]** Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen noch weiter erläutert. Hierzu wird auf die schematische Zeichnung Bezug genommen. Dabei zeigen

**[0019]** Fig. 1 bis 4 die Superposition der Eigenfelder zweier supraleitender Leiterbahnen,

**[0020]** Fig. 5 die Superposition der Eigenfelder von in mehreren Ebenen angeordneter Leiterbahnen,

**[0021]** Fig. 6 die Wechselwirkung zweier Leiterbahnen nach Fig. 3 während eines Strombegrenzungsvorgangs,

**[0022]** Fig. 7 und 8 jeweils in einem Diagramm die Widerstandsentwicklung von Leiterbahnen nach den Fig. 3 und 4 sowie

**[0023]** Fig. 9 und 10 jeweils eine Leiterbahnanordnung einer erfindungsgemäßen Strombegrenzungseinrichtung.

**[0024]** In den Figuren sind sich entsprechende Teile mit denselben Bezugszeichen versehen.

**[0025]** Die Fig. 1 bis 4 zeigen in schematischer Darstellung die Superposition der Eigenmagnetfelder zweier streifenförmiger Leiterbahnen oder Leiterbahnteile  $I_j$  mit jeweils Nebeneinanderanordnung (Fig. 1 und 2) und Untereinanderanordnung (Fig. 3 und 4), wobei parallele oder antiparallele Stromführungsrichtungen vorgesehen sind. Die Stromführungsrichtung wird dabei jeweils in bekannter Weise durch die Zeichen "⊙" bzw. "⊗" veranschaulicht. Im Fall der Fig. 1 und 3 wird jeweils die von beiden Leitern verursachte senkrechte Komponente  $k_1$  bzw.  $k_2$  und  $k_3$  des Magnetfeldes im jeweiligen seitlichen Zwischenraum  $z$ , im Fall der Fig. 2 und 4 die parallele Komponente  $k_4$  bzw.  $k_5$  an den zugewandten Oberflächen verstärkt, während die jeweils orthogonale Komponente abgeschwächt wird. Erfindungsgemäß

werden Stromführungsrichtungen gewählt, die zu einer Feldverstärkung der senkrechten Komponente führen.

**[0026]** Fig. 5 zeigt eine Strombegrenzungseinrichtung mit erfindungsgemäßen Stromführungsrichtungen. Die allgemein mit **10** bezeichnete Einrichtung hat in mehreren Schichtebenen  $e_i$ , beispielsweise drei Schichtebenen  $e_1$ ,  $e_2$  und  $e_3$  jeweils mehrere, beispielsweise drei nebeneinander liegende, parallel verlaufende Leiterbahnteile  $L_{1i}$ ,  $L_{2i}$  und  $L_{3i}$  (mit  $i = 1, 2$  oder  $3$ ). Dabei sind in jeder Schichtebene die Stromführungsrichtungen in den Leiterbahnteilen so gewählt, dass in jeweils benachbarten Leiterbahnteilen eine antiparallele Stromführung (gemäß Fig. 1) vorgesehen ist. Dementsprechend sind die Stromführungsrichtungen in den Leiterbahnteilen  $L_{1i}$  und  $L_{3i}$  parallel untereinander und antiparallel zu der in dem jeweils dazwischen liegenden Leiterbahnteil  $L_{2i}$ . In allen Schichtebenen liegen die einzelnen Leiterbahnteile direkt übereinander und haben jeweils die gleichen Stromführungsrichtungen wie in der Schichtebene  $e_i$ . Es ergibt sich so die erwünschte Verstärkung der senkrechten Magnetfeldkomponente. D. h., eine erfindungsgemäße Strombegrenzungseinrichtung kann auch in  $n > 2$  Ebenen angeordnete Leiterbahnen aufweisen, wobei gegenüberliegende Leiterbahnteile elektrisch voneinander isoliert sein müssen. Auf eine Darstellung des oder der Trägerkörper wie z. B. Folien, Schichten oder Platten wurde in der Figur verzichtet.

**[0027]** Fig. 6 zeigt als Modell die Wechselwirkung zweier Leiterbahnteile  $L_{11}$  und  $L_{21}$  in einer Anordnung gemäß Fig. 3 während einer Strombegrenzung. Der obere Leiterbahnteil  $L_{11}$  sei bereits im Flux-Flow-Bereich [mit  $(j(t) \gg j_{c1})$ ] und dissipiert demzufolge Energie durch eine kollektive Bewegung der Flussfäden der überlagerten Eigenmagnetfelder in Richtung der Probenmitte. Daraus resultiert ein erhöhter magnetischer Druck der Feldlinien auf das noch weiter (teilweise) gepinnte Flussfadengitter im unteren Leiterbahnteil  $L_{21}$ , der deshalb (und aufgrund der nahezu verdoppelten Magnetfeldstärke) früher in den Flux-Flow-Bereich gelangt. Die Stromdichten in den beiden Leiterbahnteilen  $L_{11}$  und  $L_{21}$  sind mit  $j_{c1}$  bzw.  $j_{c2}$  bezeichnet.

**[0028]** Aus den Diagrammen der Fig. 7 und 8 sind die zeitabhängigen Widerstandsverläufe  $R(t)$  für ein konkretes Kurzschlussexperiment ( $I_n = 215$  A,  $U_n = 32,5$  V) mit zwei streifenförmigen HTS-Leiterbahnen (YBCO-Streifen mit Breite 1 cm, Dicke 1,4  $\mu$ m, Länge 8 cm) für verschiedene Leiterbahnanordnungen wiedergegeben. Folgende vier Anordnungen/Fälle wurde gewählt:

- Nebeneinander-Anordnung mit antiparalleler Stromführung gemäß Fig. 1,
- Nebeneinander-Anordnung mit paralleler Stromführung gemäß Fig. 2,

- c) Übereinander-Anordnung mit paralleler Stromführung gemäß **Fig. 3** und  
 d) Übereinander-Anordnung mit antiparalleler Stromführung gemäß **Fig. 4**.

**[0029]** Dabei wurden die Materialeigenschaften, insbesondere die  $j_c$ -Verteilung (oder besser: Pinning-Kraft-Verteilung) und die Parameter des äußeren Strombegrenzerkreises wie Widerstände und Induktivitäten jeweils identisch gewählt. Dennoch ergibt sich entsprechend den Anordnungen gemäß den **Fig. 1** bis **4** ein deutlich unterschiedlicher Verlauf der  $R(t)$ -Kurven. Dabei sind in diesen Diagrammen die Kurven durch ihre Anordnung und ihre Stromführungsrichtung gekennzeichnet: **Fig. 7** zeigt die zeitabhängige Widerstandsentwicklung  $R(t)$  an zwei parallel nebeneinander angeordneten Leiterbahnen oder Leiterbahnteilen  $L_{11}(a)$ ,  $L_{21}(a)$  bzw.  $L_{11}(b)$ ,  $L_{31}(b)$  für die vorstehend unterschiedenen Fälle a) und b). In dem Diagramm sind die der Leiterbahn  $L_{11}$  zuzuordnenden Kurven mit durchgezogenen Linien und die der danebenliegenden Leiterbahn  $L_{21}$  bzw.  $L_{31}$  zuzuordnenden Kurven mit punktierten Linien dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass die antiparallele Stromführung einen höheren Gesamtwiderstand (Summe der Kurven  $L_{11}(a)$  und  $L_{21}(a)$ ) nach sich zieht. Es ist nämlich zu beobachten, dass ein höherer Widerstand einer Leiterbahn (hier der Bahn  $L_{31}$ ) bei paralleler Stromführung durch eine stärkere Aufheizung erzielt wird; d. h., die geschaltete Fläche ist bei antiparalleler Stromführung größer. Die antiparallele Stromführung sorgt somit für geringere transversale Temperaturgradienten und wird deshalb vorteilhaft für eine Nebeneinanderanordnung gewählt.

**[0030]** **Fig. 8** zeigt in **Fig. 7** entsprechender Darstellung die Widerstandsentwicklung  $R(t)$  für eine Übereinander-Anordnung (Rücken-an-Rücken-Anordnung) von zwei Leiterbahnen oder Leiterbahnteilen  $L_{11}(c)$ ,  $L_{21}(c)$  bzw.  $L_{11}(d)$ ,  $L_{22}(d)$  für die Fälle e) und d). Dabei sind die durchgezogenen Kurven der jeweils oberen Leiterbahn  $L_{11}(c)$  bzw.  $L_{11}(d)$  und die punktierten Kurven der jeweils unteren Leiterbahn  $L_{21}(c)$  bzw.  $L_{22}(d)$  zugeordnet. Bei paralleler Stromführung (Kurven  $L_{11}(c)$  und  $L_{21}(c)$ ) schalten die Leiterbahnen deutlich früher, und der größere Flächenbeitrag spiegelt sich in einem mehr als verdoppelten Widerstandsverlauf wieder. Vergleicht man die geschalteten Flächenanteile, so muss die um etwa einen Faktor 5 geringere Fläche bei antiparalleler Stromführung entsprechend stärker thermisch belastet worden sein.

**[0031]** **Fig. 9** zeigt eine Schrägansicht auf eine erfindungsgemäße, allgemein mit **11** bezeichnete Strombegrenzungseinrichtung. Zum Aufbau einer solchen Strombegrenzungseinrichtung für Gleich- oder Wechselstrom wird von an sich bekannten Ausführungsformen solcher Einrichtungen ausgegangen (vgl. z. B. die eingangs genannte EP 0 829 101 B1). Die Einrichtung umfasst dabei nicht dargestellte

Hilfsmittel, wie elektrische Anschlüsse, Kältemittelversorgung, Gehäuse usw., und ist für einen Nenn- oder Betriebsstrom ausgelegt. Sie weist einen Trägerkörper **3** mit einer Dicke  $D$  und gegenüber liegenden Flachseiten **3a** und **3b** auf. Auf den Flachseiten kann gegebenenfalls jeweils eine Zwischenschicht, beispielsweise eine gegenüber dem HTS-Material diffusionshindernde Pufferschicht, aufgebracht sein. Auf jeder der beiden Flachseiten ist eine Leiterbahn  $M1$  bzw.  $M2$  in Mäanderform z. B. gemäß der DE 198 32 274 A1 aufgebracht. Die auf der vorderen Flachseite **3a** liegende Leiterbahn  $M1$  ist dabei in der Figur mit durchgezogenen Linien dargestellt, während die auf der rückwärtigen Flachseite **3b** angeordnete Leiterbahn  $M2$  durch gestrichelte Linien angedeutet ist. Die Leiterteile der beiden Mäander liegen dabei quasi spiegelbildlich exakt übereinander. Sie enthalten jeweils in einer Ebene liegende, parallele Leiterbahnteile  $L_j$  bzw.  $L_{j2}$  (mit  $j = 1$  bis  $4$ ), wobei der Strom gemäß den **Fig. 1** und **5** in benachbarten Leiterbahnteilen eines Mäanders antiparallel verläuft. Demgegenüber wird in die beiden parallel übereinander liegenden Leiterbahnen  $M1$  und  $M2$  jeweils ein Strom  $I_1$  bzw.  $I_2$  von vorzugsweise gleicher Stromstärke und Richtung, beispielsweise durch eine entsprechende Parallelschaltung, eingespeist, so dass gemäß den **Fig. 3** und **5** in parallel übereinander liegenden Leiterbahnteilen  $L_{j1}$ ,  $L_{j2}$  aus beiden Leiterbahnen jeweils die gleiche Stromführungsrichtung gegeben ist. So fließen z. B. in den Leiterbahnteilen  $L_{41}$  und  $L_{42}$  die Ströme  $I_1$  und  $I_2$  in dieselbe Richtung.

**[0032]** Der Trägerkörper **3** kann nicht nur wie dargestellt durch einen planaren, sondern gegebenenfalls auch durch einen gekrümmten, wie z. B. rohrförmigen Substratkörper gebildet sein. Er besteht zumindest teilweise, d. h. wenigstens an seinen den HTS-Leiterbahnen zugewandten Flachseiten aus einem elektrisch nicht-leitenden (isolierenden) Material. Hierfür geeignete Materialien sind z. B. Keramiken wie  $MgO$ ,  $SrTiO_3$ ,  $Al_2O_3$  oder  $Y$  stabilisiertes  $ZrO_2$  (YSZ). Als Trägerkörpermaterialien kommen auch spezielle Gläser in Frage. Eine entsprechende Platte aus einem besonderen Flachglas kann beispielsweise eine Dicke  $D$  von einigen Millimetern haben, wobei im allgemeinen  $0,1 \text{ mm} \leq D \leq 10 \text{ mm}$  ist. Daneben sind aber auch aus metallischem und darauf elektrisch isolierendem Material zusammengesetzte Trägerkörper geeignet. Insbesondere im Falle einer Verwendung von metallischen Teilen für den Trägerkörper ist eine Zwischenschicht aus einem elektrisch isolierenden Material erforderlich. Eine solche Zwischenschicht kann auch als Pufferschicht oder Diffusionsbarriere benötigt werden, um einerseits eine Wechselwirkung zwischen dem auf sie aufzubringenden HTS-Material und dem Trägerkörpermaterial zu unterbinden und andererseits eine Textur des aufzubringenden HTS-Materials zu fördern. Bekannte Pufferschichtmaterialien, die im allgemeinen mit einer Dicke zwischen  $0,1$  und  $2 \mu\text{m}$  aufgebracht werden,

sind YSZ, YSZ + CeO<sub>2</sub> (als Doppelschicht), CeO<sub>2</sub>, MgO oder SrTiO<sub>3</sub>.

**[0033]** Als HTS-Materialien für auf die Flachseiten aufzubringenden Schichten, aus denen die einzelnen Leiterbahnen strukturiert werden können, oder für die in Lithographietechnik zu erstellenden Leiterbahnen kommen alle metalloxidischen Hoch-T<sub>c</sub>-Supraleitermaterialien wie insbesondere YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> (sogenanntes "YBCO"), Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca-Cu<sub>2</sub>O<sub>8-x</sub> oder (Bi, Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>11-x</sub> in Frage. Selbstverständlich können von diesen Materialien einzelne oder mehrere Komponenten durch andere Elemente in an sich bekannter Weise teilweise oder vollständig substituiert sein. Die entsprechenden HTS-Schichten oder Leiterbahnteile werden mit an sich bekannten Verfahren auf dem Trägerkörper **3** bzw. einer ihn abdeckenden Zwischenschicht mit einer Dicke bis zu einigen Mikrometern aufgebracht und gegebenenfalls strukturiert.

**[0034]** Die Ausführungsform der in **Fig. 10** gezeigten, allgemein mit **12** bezeichneten Strombegrenzungseinrichtung nach der Erfindung unterscheidet sich von der Einrichtung **11** nach **Fig. 9** im wesentlichen nur dadurch, dass auf jeder Flachseite **3a** bzw. **3b** des Trägerkörpers **3** eine mäanderförmige Leiterbahnanordnung vorgesehen ist, die mehrere, zwischen ihren Kontaktierungsendstücken parallel geschaltete Teilleiter L<sub>ji</sub> zumindest annähernd gleicher Länge aufweist. Entsprechende Leiteranordnungen sind z. B. der DE 198 27 227 A1 zu entnehmen. Auch bei dieser speziellen Leiterbahnanordnung sind auf jeder Flachseite benachbarte, parallel verlaufende Teilleiter mit antiparalleler Stromführungsrichtung gemäß den **Fig. 1** und **5** vorhanden. In entsprechenden, auf der gegenüberliegenden Flachseite liegenden Teilleitern ist hingegen die Stromführungsrichtung erfindungsgemäß dieselbe.

**[0035]** Selbstverständlich kann man eine Strombegrenzungseinrichtung mit beidseitig belegten und erfindungsgemäß geschalteten Leiterbahnteilen als einen Baustein oder ein Modul ansehen, der zum Aufbau einer Strombegrenzeranordnung gemäß der eingangs genannten EP 0 829 101 B1 mit mehreren solcher Bausteine dient. Falls in einer derartigen Strombegrenzeranordnung benachbarte Bausteine hinreichend nah beieinander angeordnet sind und sich somit parallel verlaufende Leiterbahnteile aus den verschiedenen, benachbarten Bausteinen ergeben, wird vorteilhaft in diesen parallel verlaufenden Leiterbahnteilen ebenfalls eine parallele Stromführungsrichtung vorgesehen. Die vorstehenden Ausführungen zu **Fig. 5** gelten hier analog.

### Patentansprüche

1. Einrichtung (**10**, **11**, **12**) zur resistiven Strombegrenzung für Gleich- oder Wechselstromanwendungen, welche einen Trägerkörper (**3**) vorgegebener

ner Dicke (D) enthält mit zwei gegenüberliegenden Flachseiten (**3a**, **3b**), auf denen jeweils mindestens eine für einen vorgegebenen Nennstrom (I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>) ausgelegte streifenförmige Leiterbahn (M1, M2; M3, M4) vorgegebener Dicke angeordnet ist, die Noch-T<sub>c</sub>-Supraleitermaterial enthält und an Endstücken kontaktiert ist, wobei die Leiterbahnen (M1, M2; M3, M4) auf den beiden Flachseiten (**3a**, **3b**) spiegelbildlich exakt gegenüberliegen und so geschaltet sind, dass ihre gegenüberliegenden, parallel zueinander verlaufenden Leiterbahnteile (L<sub>ji</sub>) parallele Stromführungsrichtungen aufweisen und eine Verstärkung der senkrechten Magnetfeldkomponenten (k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub>) durch den in den Leiterbahnen (M1, M2; M3, M4) geführten Strom (I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>) erfolgt.

2. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass jede Leiterbahn mehrere benachbarte, parallel zueinander verlaufende Leiterbahnteile (L<sub>1i</sub>, L<sub>2i</sub>; L<sub>3i</sub>) mit antiparalleler Stromführungsrichtung aufweist.

3. Einrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass jede Leiterbahn als Mäander (M1, M2) oder bifilare Spirale gestaltet ist.

4. Einrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Trägerkörper (**3**) zumindest teilweise aus elektrisch nichtleitendem Material besteht.

5. Einrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch einen Trägerkörper (**3**) mit einer Dicke (D) zwischen 0,1 mm und 10 mm.

6. Einrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch in mehr als zwei parallelen Ebenen (e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>, e<sub>3</sub>) liegende Leiterbahnen, die in benachbarten Ebenen gegenüberliegende, parallel zueinander verlaufende Leiterbahnteile mit derselben Stromführungsrichtung aufweisen.

7. Verfahren zur Herstellung einer Einrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass jede Leiterbahn aus einer auf die jeweilige Flachseite (**3a**, **3b**) des Trägerkörpers (**3**) aufgebrachte Schicht aus dem Supraleitermaterial herausgearbeitet wird.

8. Verwendung mehrerer Einrichtungen nach einem der vorangehenden Ansprüche als Bausteine in einer Strombegrenzeranordnung.

9. Verwendung nach Anspruch 8, gekennzeichnet durch Leiterbahnteile, die parallel zu Leiterbahnteilen eines benachbarten Bausteins verlaufen und dieselbe Stromführungsrichtung aufweisen.

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

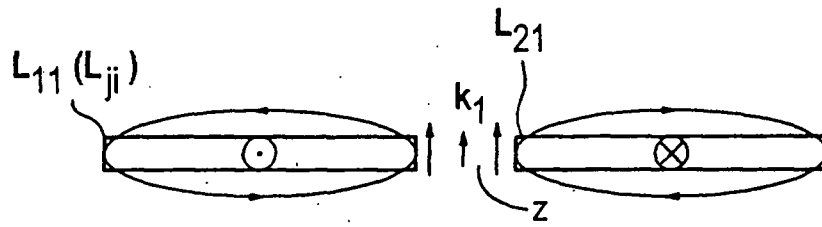


FIG 1

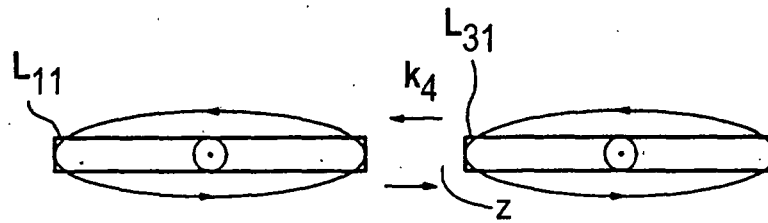


FIG 2

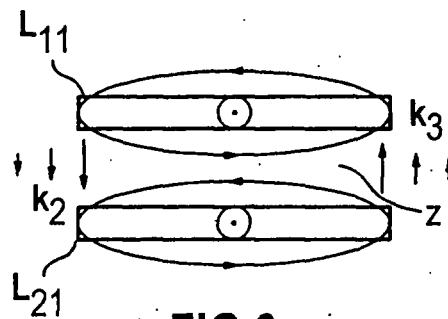


FIG 3

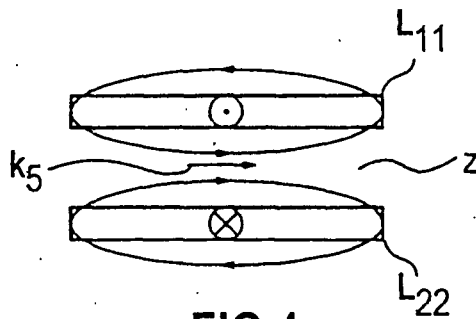


FIG 4

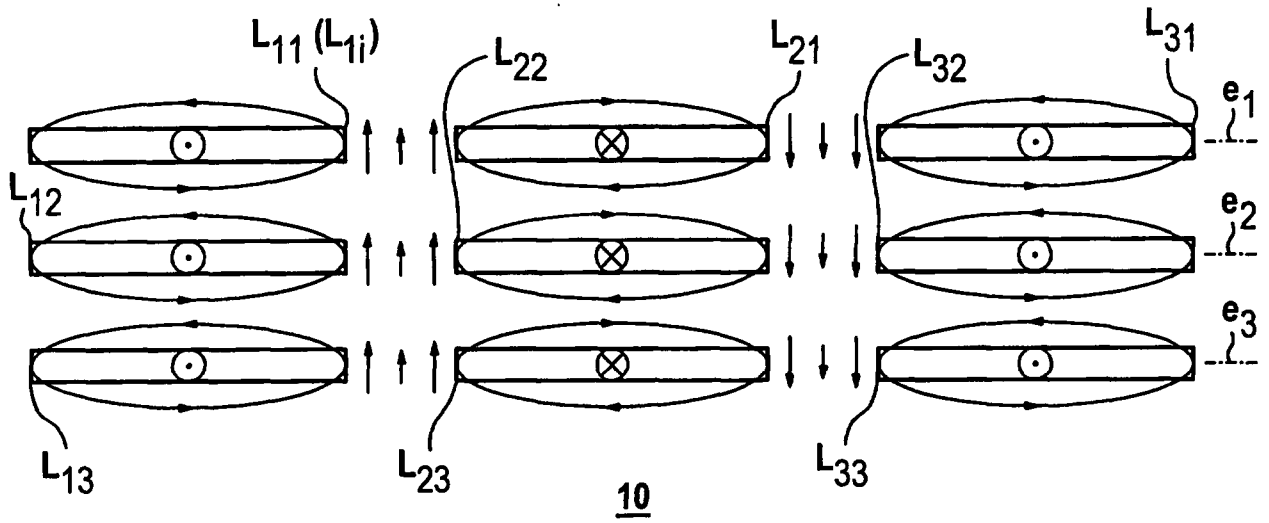


FIG 5

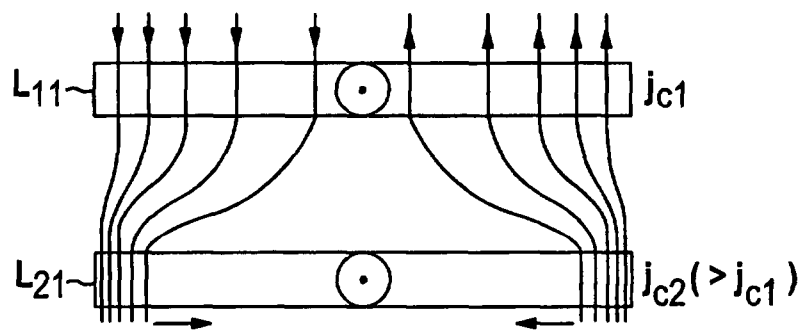


FIG 6



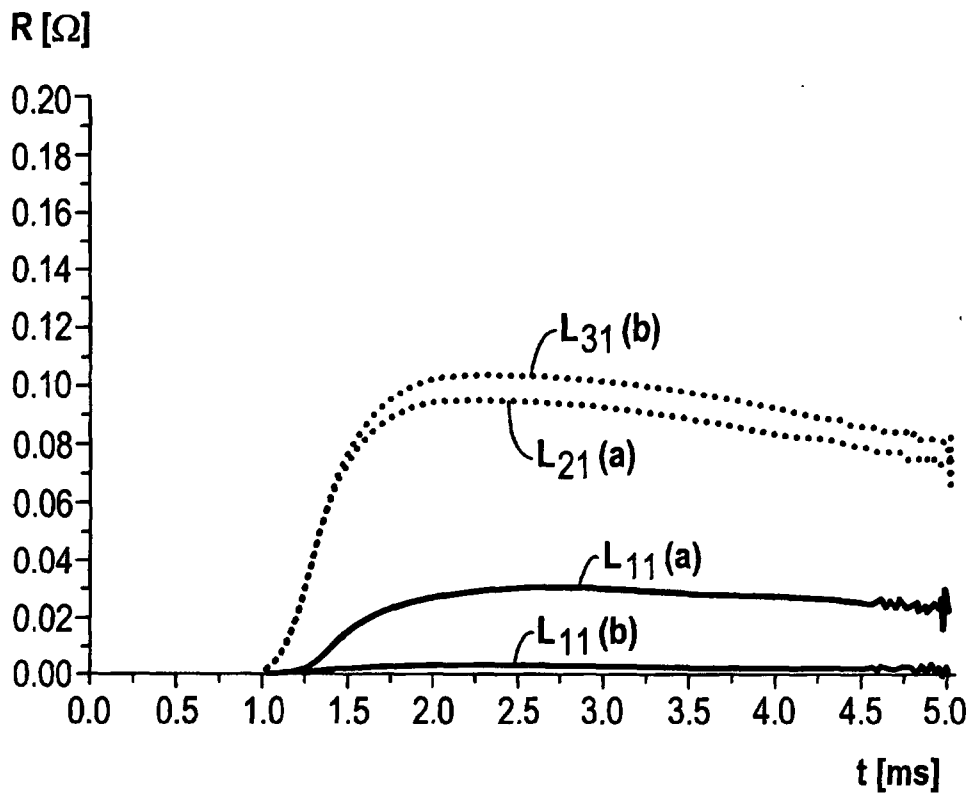


FIG 7

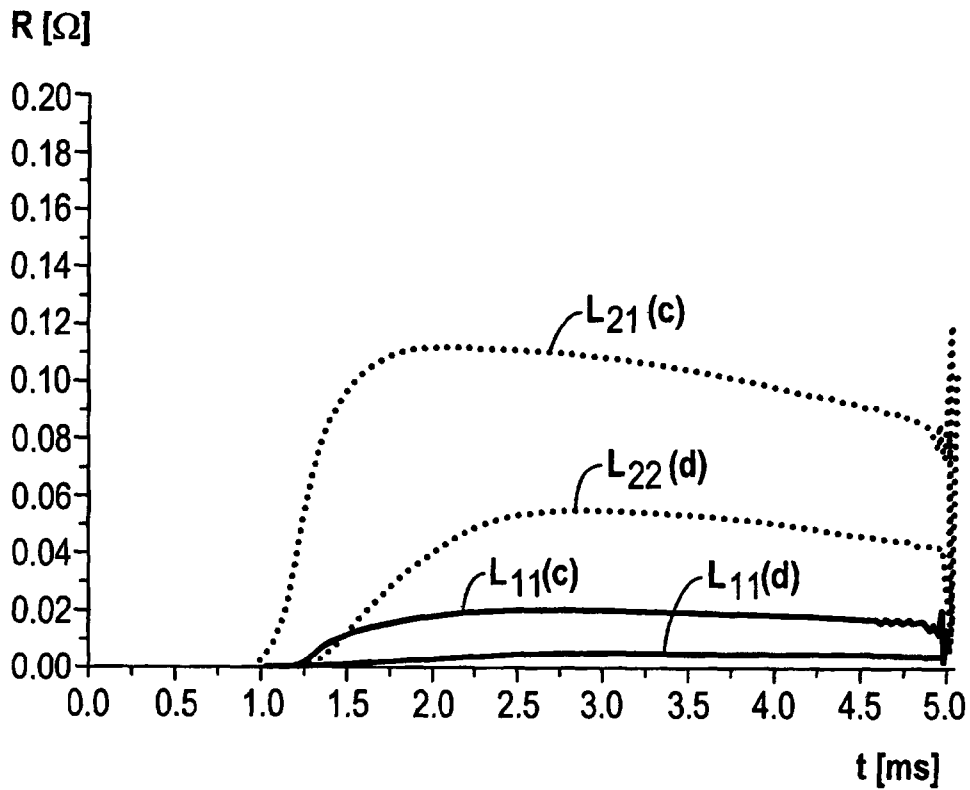


FIG 8

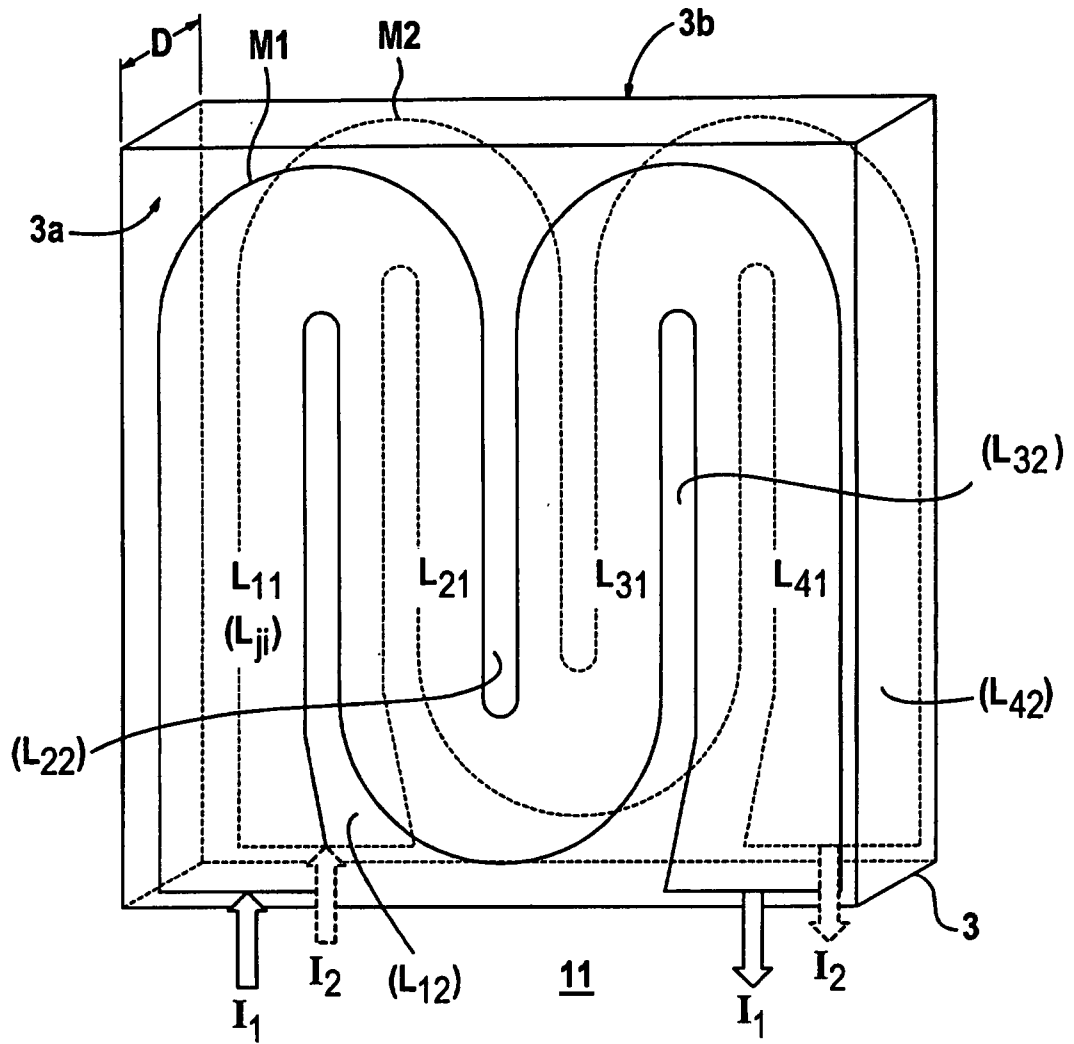


FIG 9

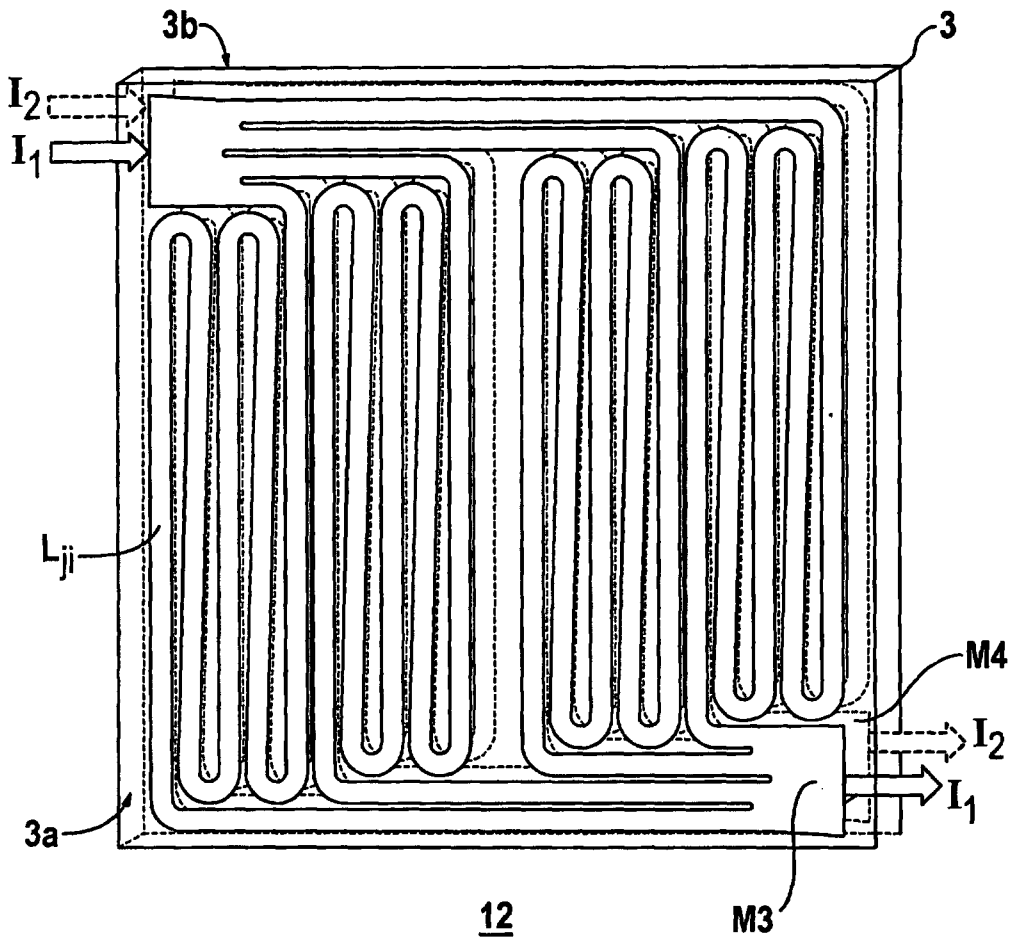


FIG 10