

12

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

21 Anmeldenummer: **82107077.8**

51 Int. Cl.³: **H 01 F 5/08, H 01 F 7/22,**
B 03 C 1/00

22 Anmeldetag: **05.08.82**

30 Priorität: **08.08.81 DE 3131480**

71 Anmelder: **BROWN, BOVERI & CIE Aktiengesellschaft,**
Kallstadter Strasse 1, D-6800 Mannheim 31 (DE)

43 Veröffentlichungstag der Anmeldung: **16.02.83**
Patentblatt 83/7

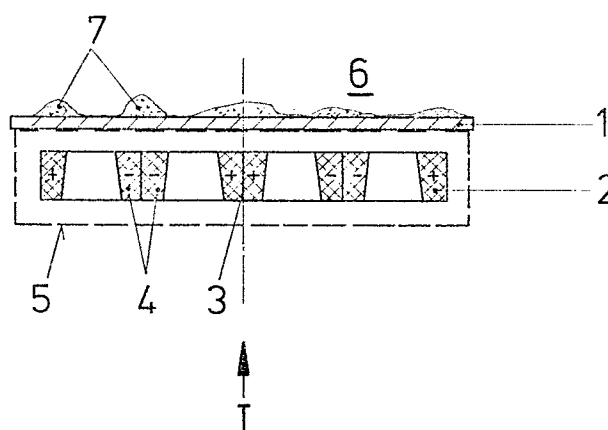
72 Erfinder: **Dustmann, Cord-Henrich, Dr. Dipl.-Phys.,**
Diemstrasse 10, D-6940 Weinheim (DE)

84 Benannte Vertragsstaaten: **CH FR GB IT LI NL**

74 Vertreter: **Kempe, Wolfgang, Dr. et al, c/o Brown, Boveri**
& Cie AG Postfach 351, D-6800 Mannheim 1 (DE)

54 Supraleitende Spule.

57 Eine supraleitende Magnetspule zur Erzeugung hoher Magnetfelder mit hohem Gradienten der Magnetfeldstärke in einem Nutzraum wird so ausgebildet, dass der Wickelquerschnitt der Spule sich mit zunehmendem Abstand vom Nutzraum verjüngt. Der Wickelquerschnitt der Spule kann wenigstens annähernd trapezförmig ausgebildet sein wobei die längere Trapezgrundseite zum Nutzraum hingerrichtet ist.



B R O W N , B O V E R I & C I E
Mannheim
Mp.-Nr. 605/81

AKTIENGESELLSCHAFT
21. Juli 1981
ZPT/P2-La/Br

Supraleitende Spule

Die Erfindung betrifft eine supraleitende Spule zur Erzeugung hoher Magnetfelder mit hohem Feldstärkegradienten in einem Nutzraum.

5

Es ist bekannt zur Erzeugung hoher Gradienten der Magnetfeldstärke zur Fokussierung geladener Teilchen in Beschleunigern Quadrupolmagnete zu verwenden. Es wurde eine supraleitende Ausführungsform einer solchen Anordnung mit einem Quadrupol-

10 magneten beschrieben (F. Arendt, Bau und Betrieb zweier supraleitender Quadrupolmagnete für ein Hyperonenexperiment im CERN, Kernforschungszentrum Karlsruhe KfK-2632 (1979)). Bei der beschriebenen Ausführungsform wird der magnetische Rückfluß durch ein Eisenjoch geführt.

15

Ein weiteres Anwendungsgebiet für hohe Magnetfelder mit hohen Gradienten der Magnetfeldstärke ist bei Magnetscheidern gegeben, bei denen magnetisierbare Materialien von nicht-magnetisierbaren Materialien getrennt werden z.B. Trennen von

20



schwachmagnetischem Erz wie Hämatit von Gestein, oder Trennen von Pyrit aus der Kohle. Dabei ergibt sich die Trennkraft aus dem Produkt der Magnetisierbarkeit des zu trennenden Materials mit dem Betrag der magnetischen Feldstärke und dem örtlichen Gradienten der Magnetfeldstärke. Zur Erzielung eines möglichst großen Trenneffektes ist es daher erwünscht, am Ort des zu trennenden Gutes gleichzeitig sowohl eine möglichst hohe Magnetfeldstärke als auch einen möglichst hohen Gradienten der Magnetfeldstärke zu erzeugen. Insbesondere eine hohe Magnetfeldstärke läßt sich durch supraleitende Wicklungen wegen ihrer hohen realisierbaren Stromdichten bei gleichzeitiger Vermeidung von ohmschen Verlusten erzeugen. Jedoch läßt sich wegen der notwendigen kryotechnischen Isolation zwischen der supraleitenden Wicklung (ca. 5K) und dem zu trennenden Material (ca. 300K) ein gewisser Mindestabstand zwischen der supraleitenden Wicklung und dem zu trennenden Material nicht unterschreiten, so daß der Ort der maximalen Magnetfeldstärke, der innerhalb des Wicklungsquerschnittes liegt, nicht beliebig nah an den Nutzraum herangeführt werden kann.

Es ist ein Magnetscheider mit supraleitenden Spulen bekannt geworden, (K. Schönert et al, Solenoid-pile Separator, a New High Intensity Magnetic Separator with Superconductive Coils, Proceedings of XIIth International Mineral Processing Congress, Sao Paulo, Brazil (1977)), bei dem ein hoher Gradient der Magnetfeldstärke durch Aufeinanderstapeln von wechselseitig entgegengesetzt gepolten Spulen realisiert ist.

Bei den Magnetsystemen gemäß den genannten Druckschriften werden rechteckige Wicklungsquerschnitte verwendet. Die maximal realisierbare Magnetfeldstärke, die bei Verwendung rechteckiger Wicklungsquerschnitte innerhalb dieses Wick-

lungsquerschnittes liegt, ist bei supraleitenden Wicklungen durch die materialbedingte kritische Magnetfeldstärke
5 begrenzt.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine supraleitende Spule oder Spulenordnung zu schaffen, deren Spulenkonfiguration und -querschnitt die Erzeugung hoher Magnetfelder mit hohem
10 Gradienten der Magnetfeldstärke in einem Nutzraum unter Berücksichtigung der geschilderten Probleme erlaubt.

Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, daß der Wickelquerschnitt der supraleitenden Spule sich mit zunehmendem Abstand vom
15 Nutzraum verjüngt. Hierdurch kann der Ort maximaler Magnetfeldstärke verglichen mit rechteckigen Wickelquerschnitten relativ weit zum Nutzraum hin verlagert werden, ohne daß der Gradient der Magnetfeldstärke im Nutzraum verringert wird.

20 In vorteilhafter Weise ist der Wickelquerschnitt der supraleitenden Spule wenigstens annähernd trapezförmig ausgebildet, wobei die längere Trapezgrundseite zum Nutzraum hin ausgerichtet ist.

25 Vorzugsweise ist der Wickelquerschnitt der supraleitenden Spule hinsichtlich Form- und Flächeninhalt derart optimiert, daß der Ort der maximalen Magnetfeldstärke möglichst nahe am Nutzraum liegt. Als Optimierungsparameter gehen hier u.a.

30 ein:

Querschnittsform (z.B. Höhe, Breite, Trapezwinkel) der Spule, Wickeldrahtabmessungen, Form der Spule und ggf. Anordnung mehrerer Spulen (z.B. D-förmig ausgebildete Spulen oder Spulen in race-track-Anordnung d.h. mit ovaler Wicklungs-
35 bahn).

605/81

4

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist ein theoretisch
5 günstiger Wickelquerschnitt der Spule durch einen geschlossenen Polygonzug angenähert.

Dieser Polygonzug ist vorzugsweise durch eine Stufenfunktion
dargestellt, wobei die Leiterdimensionen berücksichtigt
10 werden.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung bestehen die
supraleitenden Wicklungen der Spule, die im Bereich maximaler
Magnetfeldstärke liegen, aus supraleitendem Material mit
15 besonders hoher kritischer Magnetfeldstärke, z.B. Nb_3Sn .
Auf diese Weise läßt sich die supraleitende Spule im
wesentlichen aus relativ einfach zu verarbeitenden
supraleitenden Materialien wie NbTi (kritische
Magnetfeldstärke ungefähr 8 bis 9T) herstellen. Lediglich die
20 Querschnittsbereiche der supraleitenden Spule, bei denen das
Auftreten maximaler Magnetfeldstärke erwartet wird, werden
mit Wicklungen versehen, deren Material eine besonders hohe
kritische Magnetfeldstärke aufweist. Solch ein Material ist
z.B. Nb_3Sn mit einer kritischen Magnetfeldstärke von unge-
25 fähr 13 bis 14T. Nb_3Sn ist jedoch relativ teuer und in der
Verarbeitung problematisch, da es sehr spröde ist.

Von besonderem Vorteil ist die beanspruchte Ausgestaltung der
Erfindung für eine Anordnung von supraleitenden Spulen in
30 einem Magnetsystem, bei der jeweils die einander zugewandten
Querschnitte zweier benachbarter Spulen einen gemeinsamen
Wickelquerschnitt bilden, der sich mit zunehmendem Abstand
vom Nutzraum verjüngt. Bsw. können bei einer race-track-An-
ordnung die Querschnitte zweier benachbarter Spulen, die
35 gleichläufig von Strom durchflossen werden, aneinanderliegen

und eine Baueinheit mit gemeinsamen trapezförmigen Wickel-
querschnitt bilden, dessen längere Trapezgrundseite zum
5 Nutzraum hin gerichtet ist. Vorzugsweise werden bei einer
Anordnung von supraleitenden Spulen in einem Magnetsystem,
das mehrere aneinandergereihte Wicklungsquerschnitte
aufweist, die beiden äußeren Wicklungsquerschnitte des
Magnetsystems mit einer kleineren (z.B. halb so großen)
10 Querschnittsfläche versehen wie die inneren
Wicklungsquerschnitte des Magnetsystems. Durch diese
Ausgestaltung der Erfindung läßt sich das Auftreten einer
Feldüberhöhung über das mittlere maximale Feld hinaus an den
Rändern des Magnetsystems vermeiden.

15 Anhand der Zeichnung, in der mehrere Ausführungsbeispiele der
Erfindung gezeigt sind, sollen die Erfindung sowie weitere
vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen näher
erläutert werden.

20 Es zeigen:

Fig.1 eine schematische Darstellung eines Magnetscheiders
mit einer race-track-Anordnung
von supraleitenden Spulen über einem
25 Förderband, in Richtung des Pfeils I in Fig. 2
gesehen,

Fig.2 eine schematische Darstellung gemäß Fig. 1
im Schnitt II-II,

Fig.3 einen Spulenquerschnitt,

30 Fig.4 eine schematische Darstellung eines
Trommelmagnetscheiders mit einer
race-track-Anordnung von supraleitenden Spulen
in perspektivischer Darstellung,

605/81

6

- Fig.5 eine schematische Darstellung eines
Trommelmagnetscheiders mit nebeneinander
angeordneten, D-förmig ausgebildeten
supraleitenden Spulen in perspektivischer
Darstellung und
- Fig.6 eine Darstellung des örtlichen Verlaufs der
Magnetfeldstärke.

10

Die Figuren 1 und 2 zeigen einen Bandmagnetscheider, bei dem unter einem Förderband 1 vier supraleitende Magnetspulen angeordnet sind. Die Spulen 2 sind oval oder race-track-förmig ausgebildet und liegen mit ihrer jeweiligen Längsachse in Laufrichtung (Pfeil 14) des Förderbandes 1. Die Wicklungen zweier benachbarter Spulen 2 stoßen im Bereich ihrer geraden Abschnitte 3 aneinander und bilden auf diese Weise einen gemeinsamen Wickelquerschnitt 4. Jeweils zwei benachbarte Spulen sind gegensinnig von Strom durchflossen, sodaß in jedem der gemeinsamen Wickelquerschnitte 4 eine einheitliche Stromrichtung auftritt.

Wie aus Fig. 2 ersichtlich, sind die Wickelquerschnitte 4 der Spulen 2 trapezförmig. Die gesamte Spulenanordnung ist durch eine kryotechnische Isolation 5 gegen die Umgebungstemperatur abgeschirmt, was lediglich durch eine strichlierte Linie angedeutet ist. Insbesondere diese Isolation 5 bedingt einen Mindestabstand zwischen den supraleitenden Wicklungen und dem Nutzraum 6, der nicht beliebig verringert werden kann.

Außerhalb der Isolation 5 läuft das Förderband 1, auf dem das zu trennende Gut 7 an der Spulenanordnung vorbeigeführt wird. Das stärker magnetisierbare Material wandert während des Passierens der Spulenanordnung zu Orten wachsender Gradienten der Magnetfeldstärke (in die Nähe der Spulenquerschnitte 4) und reichert sich dort an, während das nur gering



605/81

7

magnetisierbare Material so gut wie unbeeinflusst bleibt.

5 Figur 3 zeigt den Querschnitt einer einzelnen Spule, der im wesentlichen trapezförmig ausgebildet ist. Der zur Spulenmitte weisende Trapezschenkel ist durch eine Stufenfunktion 8 angenähert.

10 In den Figuren 4 und 5 sind Trommelmagnetscheider mit erfindungsgemäßen supraleitenden Spulen dargestellt. Gemäß Figur 4 sind in einer Trommel 9 race-track-förmig ausgebildete supraleitende Magnetspulen 10 in Richtung der Trommellängsachse nebeneinander angeordnet. Die Spulenform
15 ist hier der Zylinderkrümmung angepaßt. Der Querschnitt der Spulenanordnung kann der in Figur 2 schematisch dargestellten Anordnung entsprechen.

Gemäß Figur 5 sind die supraleitenden Magnetspulen 11
20 D-förmig ausgebildet und zu einer Spulenanordnung aneinandergereiht. Der der Zylinderoberfläche zugewandete Abschnitt der Magnetspulen 11 kann einen trapezförmigen Querschnitt aufweisen, dessen längere Grundseite nach außen zur Zylinderoberfläche hin, an die sich der Nutzraum für Materialtrennung
25 anschließt, ausgerichtet ist.

Die Figur 6 stellt den Betrag der Magnetfeldstärke B als Ortsfunktion dar. Als Ortsparameter ist eine Achse x gewählt, die aus dem Wicklungsquerschnitt 12 herausweist und sich bis
30 in den Nutzraum 13 erstreckt. Die durchgezogene Linie zeigt den Magnetfeldstärkeverlauf für einen rechteckigen Wicklungsquerschnitt, während die strichlierte Kurve die Magnetfeldstärke für einen erfindungsgemäßen trapezförmigen Wicklungsquerschnitt zeigt. Es ist ersichtlich, daß bei dem
35 erfindungsgemäßen Wicklungsquerschnitt (strichlierte Kurve)

der Punkt maximaler Magnetfeldstärke in Richtung Nutzraum 13 verlagert ist. Dies führt zu einer erheblichen Erhöhung der
5 Magnetfeldstärke im Nutzraum von ca. 10 bis 20%. Der Gradient der Magnetfeldstärke im Nutzraum 13 hat bei einem erfindungsgemäßen Wicklungsquerschnitt etwa den gleichen Wert wie bei einem rechteckigen Wicklungsquerschnitt.

- 10 Die Erhöhung des Betrages der Magnetfeldstärke im Nutzraum erhöht bei Magnetscheidern die Trennkraft.

Die erfindungsgemäße Modifikation des Wickelquerschnittes der supraleitenden Magnetspulen bedingt je nach Gesamtaus-
15 führungsform bei der Fertigung keinen Zusatzaufwand gegenüber nach dem Stand der Technik gefertigten Magnetspulen.



5

A n s p r ü c h e

10 1. Supraleitende Magnetspule (2, 10, 11) zur Erzeugung
hoher Magnetfelder mit hohem Gradienten der Magnetfeldstärke
in einem Nutzraum (6, 13), dadurch gekennzeichnet, daß der
Wickelquerschnitt (4, 12) der Spule (2, 10, 11) sich mit
zunehmendem Abstand vom Nutzraum (6, 13) verjüngt.

15

2. Supraleitende Magnetspule nach Anspruch 1, dadurch
gekennzeichnet, daß der Wickelquerschnitt (4, 12) der Spule
(2, 10, 11) wenigstens annähernd trapezförmig ausgebildet ist
und die längere Trapezgrundseite zum Nutzraum (6, 13) hin
20 gerichtet ist.

3. Supraleitende Magnetspule nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet, daß der Wicklungsquerschnitt (4, 12)
der Spule (2, 10, 11) hinsichtlich Form und Flächeninhalt
25 derart optimiert ist, daß der Ort der maximalen
Magnetfeldstärke möglichst nahe am Nutzraum (6, 13) liegt.

4. Supraleitende Magnetspule nach einem der Ansprüche 1
bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß ein theoretisch günstiger
30 Wickelquerschnitt (4, 12) der Spule (2, 10, 11) durch einen
geschlossenen Polygonzug angenähert ist.

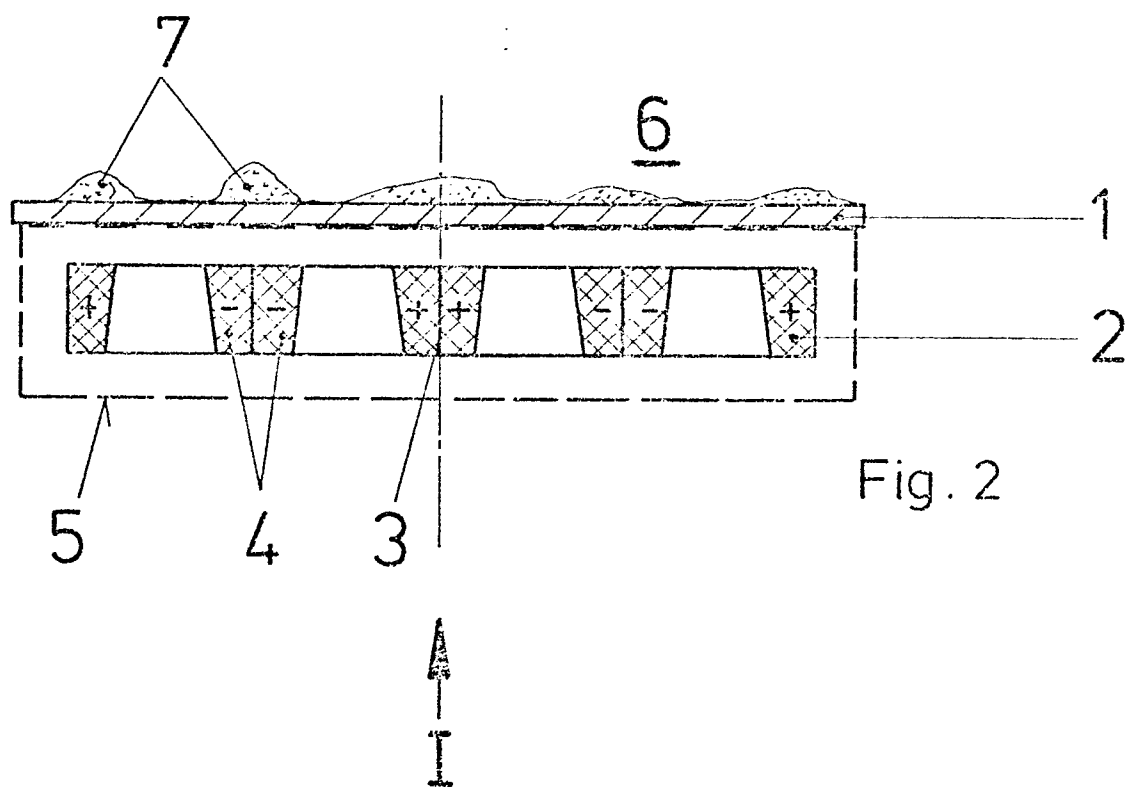
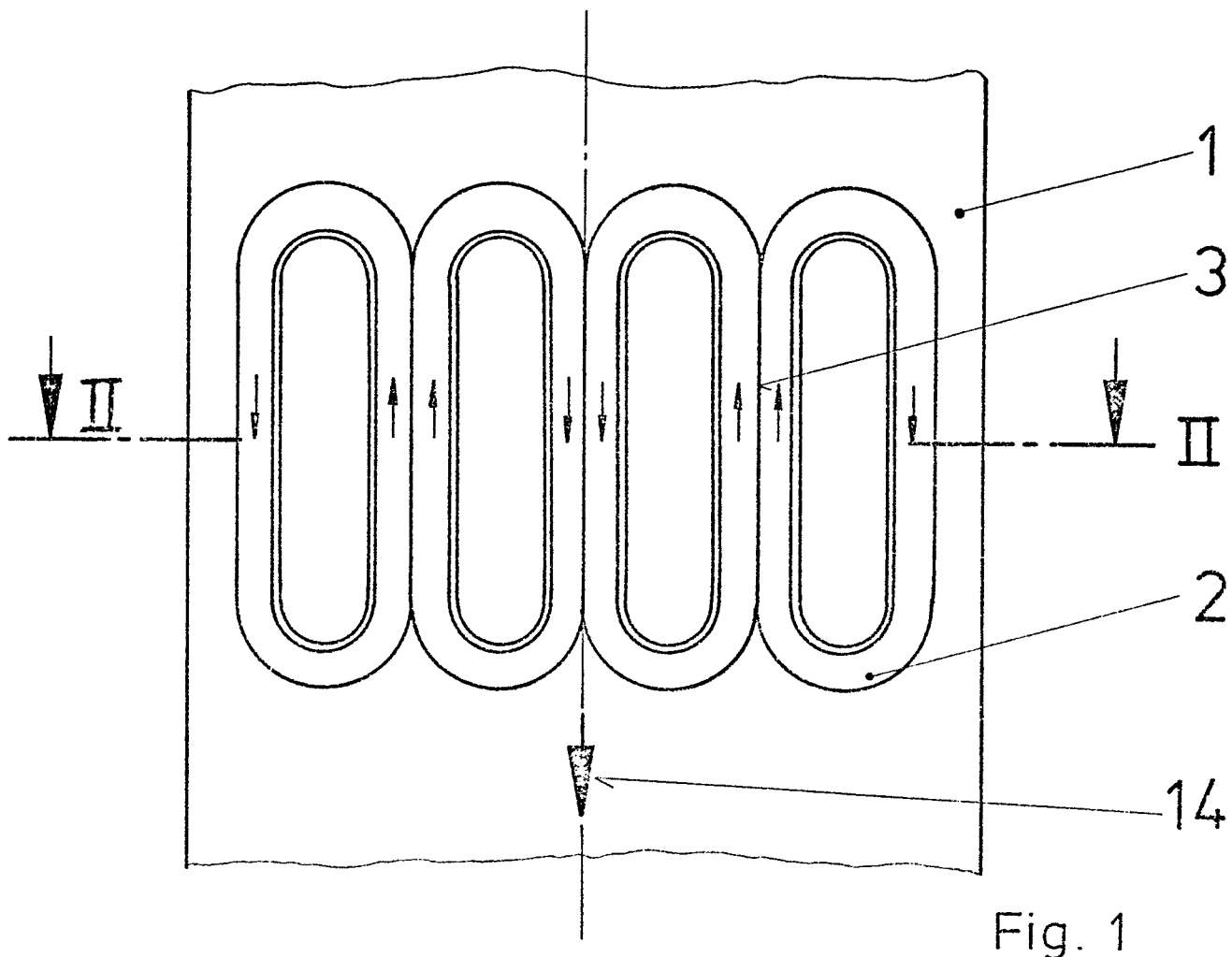
5. Supraleitende Magnetspule nach Anspruch 4, dadurch
gekennzeichnet, daß der Polygonzug wenigstens teilweise durch
35 eine Stufenfunktion (8) dargestellt ist.

6. Supraleitende Magnetspule nach einem der Ansprüche 1
5 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die supraleitenden Wick-
lungen der Spule (2, 10, 11), die im Bereich maximaler
Magnetfeldstärke liegen, aus supraleitenden Materialien mit
besonders hoher kritischer Magnetfeldstärke, z.B. Nb_3Sn
bestehen.

10

7. Anordnung von supraleitenden Magnetspulen nach einem
der Ansprüche 1 bis 6, in einem Magnetsystem, dadurch gekenn-
zeichnet, daß jeweils die einander zugewandten Spulenab-
schnitte zweier benachbarter Spulen (2, 10) zu einer
15 Baueinheit zusammengefaßt sind und einen gemeinsamen Wickel-
querschnitt (4) bilden, der sich mit zunehmenden Abstand vom
Nutzraum (6, 13) verjüngt.

8. Anordnung von supraleitenden Magnetspulen nach einem
20 der Ansprüche 1 bis 7, in einem Magnetsystem, das mehrere
aneinandergereihte Wickelquerschnitte aufweist, dadurch
gekennzeichnet, daß die beiden äußeren Wickelquerschnitte des
Magnetsystems eine kleinere, vorzugsweise halb so große Quer-
schnittsfläche aufweisen, wie die inneren Wicklungsquer-
25 schnitte (4) des Magnetsystems.



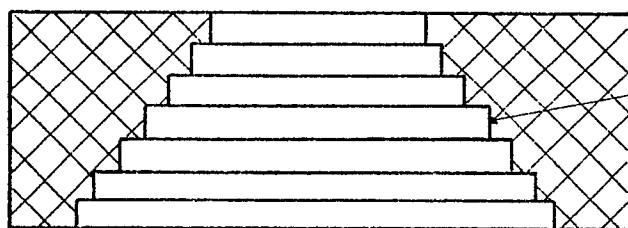


Fig. 3

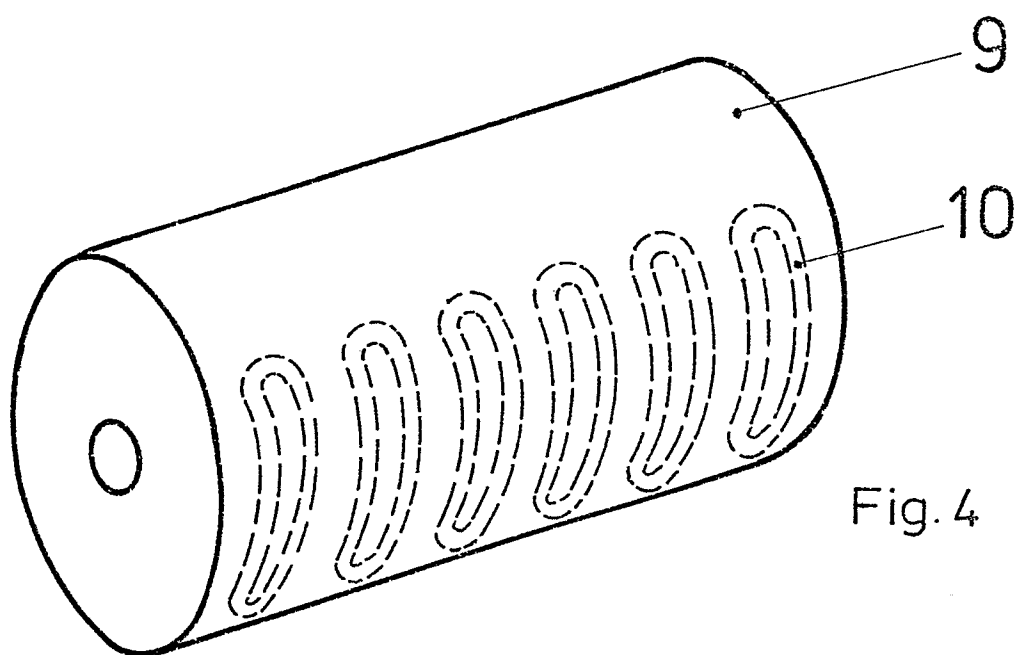


Fig. 4

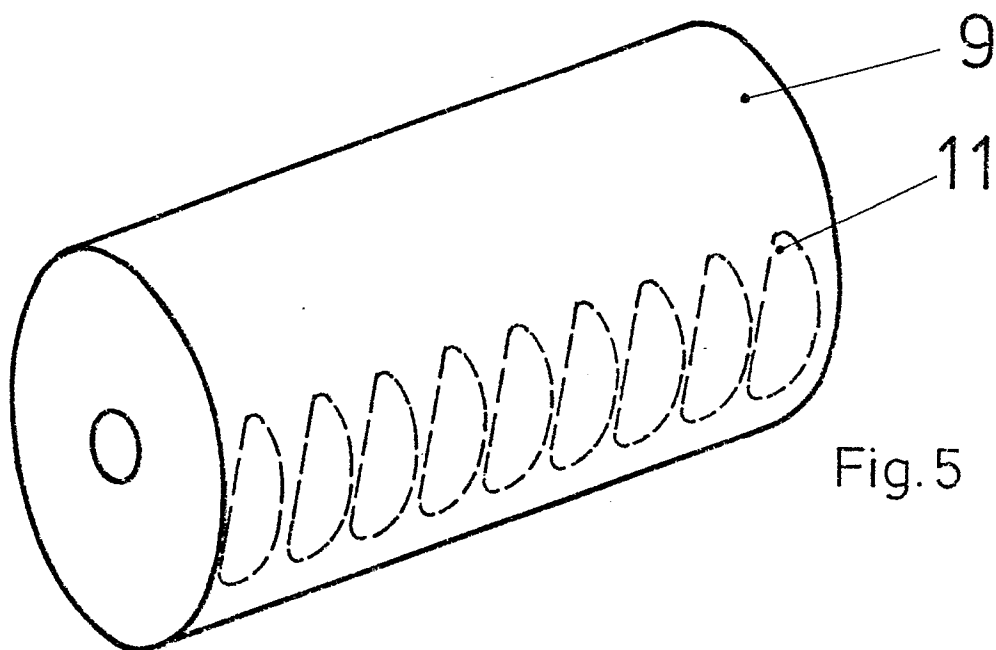


Fig. 5

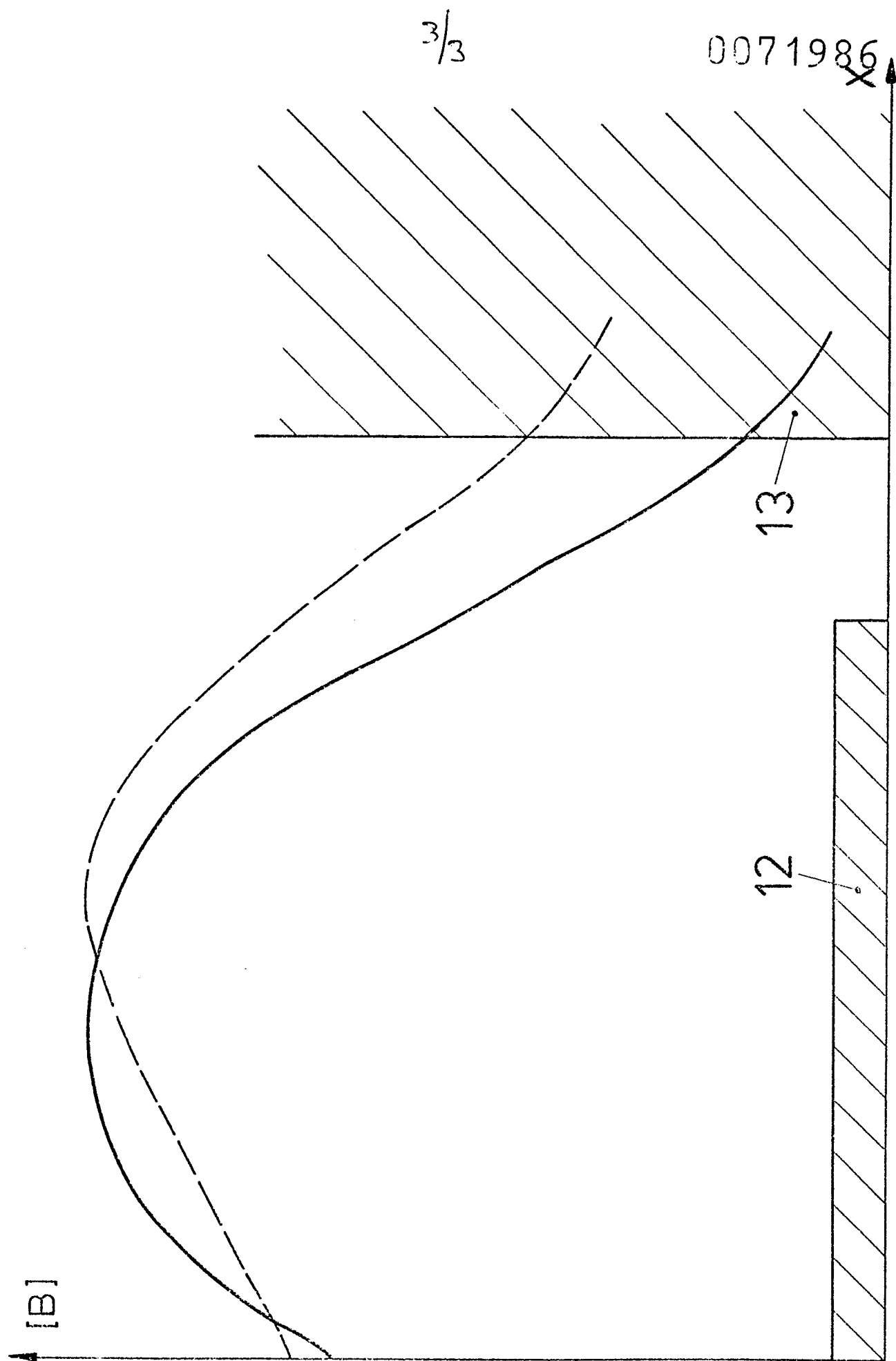


Fig. 6