(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
3. November 2005 (03.11.2005)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2005/104143 A1

(51) Internationale Patentklassifikation[7]: H01B 12/12, 12/10

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2005/004420

(22) Internationales Anmeldedatum:
22. April 2005 (22.04.2005)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
04009730.5 23. April 2004 (23.04.2004) EP

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US)*: **GESELLSCHAFT FUER SCHWERIONENFORSCHUNG MBH** [DE/DE]; Planckstrasse 1, 64291 Darmstadt (DE).

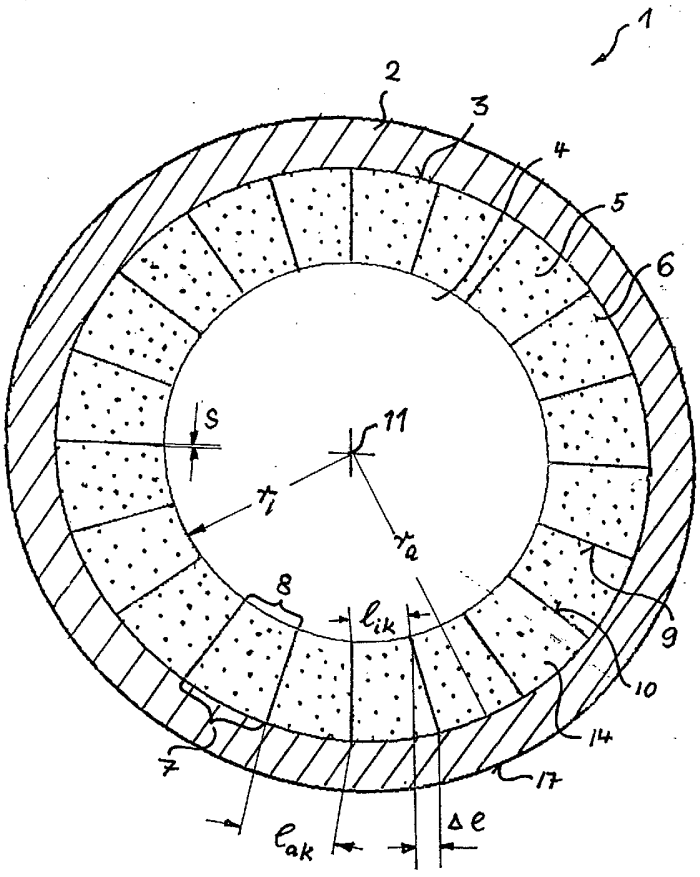
(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: **FISCHER, Egbert** [DE/DE]; Planckstrasse 1, 64291 Darmstadt (DE). **KHODGHIBAGIYAN, Hamlet** [RU/RU]; Bogolyubov Avenue 6, apart. 1407,, 141980 Dubna, Moscow Region (RU). **KOVALENKO, Alexander** [RU/RU]; Moskovskaja Strasse 12, apart. 60, 141980 Dubna, Moscow Region (RU). **MORITZ, Gebhard** [DE/DE]; Planckstrasse 1, 64291 Darmstadt (DE).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) **Title:** SUPRACONDUCTIVE CABLE AND METHOD FOR THE PRODUCTION THEREOF

(54) **Bezeichnung:** SUPRALEITENDES KABEL UND VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG DESSELBEN



(57) **Abstract:** The invention relates to a supraconductive hollow cable and to a method for the production thereof. Said supraconductive hollow cable (1) comprises an outer tube (2) having a circular inner cross-section and a cylindrical inner wall (3). The inventive supraconductive hollow cable (1) also comprises a central cooling channel (4) having a polygonal or circular cross-section that is, however, smaller than the inner cross-section of the outer tube (2). Profiled supraconductive wires (5) are arranged between the outer tube (2) and the cooling channel (4). Said profiled supraconductive wires (5) have a cross-sectional profile corresponding to that of a keystone such as those used to build roman stone bridges or groined vaults. Furthermore, said cross-sectional profile comprises at least one outer curved section (7) and one inner section (8), said outer curved section (7) being adapted to the inner radius of the outer tube (2), and the inner section (8) being adapted to the cooling channel (4). The lateral edges (12, 13) can either be profiled in a linear manner in the direction of the central point (11) of the cooling channel (4) or staggered in relation to said linearity.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2005/104143 A1

(74) **Anwälte: BOETERS, Hans, D.** usw.; Boeters & Lieck, Bereiteranger 15, 81541 München (DE).

(81) **Bestimmungsstaaten** *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **Bestimmungsstaaten** *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *mit internationalem Recherchenbericht*

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein supraleitendes Hohlkabel und ein Verfahren zur Herstellung desselben. Das supraleitende Hohlkabel (1) weist einen Außentubus (2) mit einem kreisförmigen Innenquerschnitt und zylindrischer Innenwand (3) auf. Ferner besitzt das supraleitende Hohlkabel (1) einen zentralen Kühlkanal (4), mit einem polygonalen oder kreisförmigem Querschnitt, der aber kleiner ist als der Innenquerschnitt des Außentubus (2). Zwischen dem Außentubus (2) und dem Kühlkanal (4) sind profilierte supraleitenden Drähte (5) angeordnet. Diese profilierten supraleitenden Drähte (5) haben ein Querschnittsprofil, das einem Schlussstein, bzw. Keystone, wie der für römische Steinbrücken oder für Kreuzgewölbe bekannt ist, entspricht. Dazu weist das Querschnittsprofil mindestens einen äußeren Krümmungsabschnitt (7) und einen inneren Abschnitt (8) auf, wobei der äußere Krümmungsabschnitt (7) dem Innenradius des Außentubus (2) angepasst ist und der innere Abschnitt (8) dem Kühlkanal (4) angepasst ist. Auch die Seitenkanten (12, 13) können entweder geradlinig in Richtung auf den Mittelpunkt (11) des Kühlkanals (4) oder durch einen Versatz gegenüber dieser Geradlinigkeit profiliert sein.

Beschreibung

Supraleitendes Kabel und Verfahren zur Herstellung desselben

Die Erfindung betrifft ein supraleitendes Hohlkabel mit einem Außentubus, der einen kreisförmigen Innenquerschnitt und damit eine zylindrische Innenwand aufweist. Darüber hinaus hat das supraleitende Hohlkabel einen zentralen Kühlkanal mit kreisförmigem Querschnitt, der kleiner ist als der Innenquerschnitt des Außentubus. Zwischen der Innenwand des Außentubus und dem Kühlkanal sind profilierte supraleitende Drähte angeordnet. Derartige profilierte supraleitende Drähte weisen mindestens einen Supraleiter (supraleitendes Filament) auf und haben ein Querschnittsprofil eines Schlusssteines, bzw. Keystones, wie er für römische Steinbrücken oder für Kreuzgewölbe bekannt ist.

Profilierte supraleitende Kabel mit einem Querschnittsprofil eines Schlusssteines sind aus der Druckschrift US 6,675,623 B2 bekannt. Stand der Technik ist ferner US 2003/0024 730. Die bekannten schlusssteinförmigen supraleitenden Kabel bestehen aus

BESTÄTIGUNGSKOPIE

supraleitenden, miteinander verseilten Drähten mit rundem Querschnitt, und haben nach dem Verseilen mithilfe von Profilwalzen eine trapezförmige Form erhalten.

Der Aufbau eines supraleitenden Hohlkabels vom Nuklotron-Typ mit runden (Standartvariante, Figur 16) oder profilierten supraleitenden Drähten (verbessertes Nuklotron-Kabel, Figur 17) ist aus der Druckschrift "Design and test of new hollow high current NbTi cable for fast ramped synchrotron magnets" Proc. EUCAS 2003, Sorrento, September 2003, H. Khodzhibagiyan et al. bekannt. Bei dem bekannten Hohlkabel wird zunächst ein Kühlkanal dadurch gebildet, dass ein kompakter metallischer Innentubus aus CuNi bereitgestellt wird. Auf dessen Außenmantel sind in Längsrichtung profilierte supraleitende Drähte mit einem schlusssteinförmigen Querschnitt aufgelegt bzw. gewickelt. Um die supraleitenden Drähte auf dem kompakten Innentubus zu fixieren, sind NiCr-Drähte außen um die supraleitende Drähte radial bzw. schraubenförmig gewickelt. Ein Kapton-Band, das über die NiCr-Drähte gewickelt ist, bildet einen schützenden Außenmantel. Ein auf den Außenmantel gewickeltes Glasfaserband sorgt für die elektrische Isolation des supraleitenden Hohlkabels.

Ein derart aufgebautes supraleitendes Hohlkabel hat u.a. den Vorteil hohe dynamische Belastungen kompensieren zu können, wie sie durch die Lorentzkräfte in schnellgepulsten Magneten und hohen Magnetfeldern entstehen. Die durch diese Wechselfelder über Wirbelströme, Hysteresezyklen, mechanische Spannungsfelder und weitere, äußere Einflüsse (z.B. Ionenstrahlen) verursachte Wärmequellen können im Dauerbetrieb über den inneren Kühlkanal wegen des kompakten Innentubus sehr effektiv gekühlt werden. Der relativ große Querschnitt des kompakten Innentubus mit glatter Oberfläche ermöglicht einen hohen Kühlmitteldurchsatz

bei geringem Reibungswiderstand und somit niedrigem Druckgefälle im zweiphasigen Heliumstrom. Zudem sind alle supraleitenden Drähte absolut symmetrisch angeordnet und somit unter identischen Betriebsbedingungen, wodurch eine Degradationdes kritischen Stroms des Kabels mit steigender elektromagnetischer Belastung weitestgehend verhindert wird.

Diese Anordnung der supraleitenden Drähte führt weiterhin zu einer geringen Induktivität des Kabels und damit (u.a.) auch zu einer Verringerung der gespeicherten Energie.

Ein anderer Kabeltyp wird in der Regel bevorzugt, wenn das zu erstellende Spulensystem nicht in extrem schnellgepulsten Regime betrieben werden soll, dafür aber eine hohe induktive Energie zu speichern hat, die in kurzzeitigen hohen und stochastistischen Wärmeimpulsen abgegeben werden muß. In diesem Fall ist eine kontinuierliche hohe Kühlleistung sekundär, während der schnellstmögliche Wärmeübertrag an die Wärmekapazität des die supraleitenden Drähte kühlende Heliums im Millisekundenbereich primär angestrebt wird. Für diese Aufgabe wurden die bekannten Hohlkabel vom CICC-Typ entwickelt wie sie Figur 14 zeigt.

Da in der praktischen Anwendung diese Kabel jedoch zunehmend auch höhere mechanische und thermische Belastungen beherrschen müssen führte deren Weiterentwicklung zu einem Hochstromkabel vom CICC-Typ das durch zusätzliche Konstruktionselemente und eine komplizierte Kühlung mit zwei prinzipiell unterschiedlichen Kühlkreisläufen mit superkritischem Helium im äußeren Kühlkreislauf und mit zweiphasigem Helium im zentralen Kühlkanal verfügt.

Dieser komplizierte Aufbau hat nicht nur technologische und damit kostenrelevante Nachteile sondern bedingt automatisch eine verringerte mittlere Stromdichte des Hohlkabels.
Ein derartiges Kabel nach dem aktuellen Stand der Technik ist in Figur 15 dargestellt und als POLO-Kabel bekannt(siehe z.B."CHATS", FzK, Karlsruhe, September 2002, L. Bottura et al.). Es stellt den Prototyp für die im weiteren erläuterte Erfindung dar.

Aufgabe der Erfindung ist es, die Nachteile im Stand der Technik zu überwinden und ein supraleitendes Hohlkabel anzugeben, das eine intensive Kühlung der supraleitenden Komponenten ermöglicht und darüber hinaus eine hohe Stromdichte für ein Hohlkabel des CICC-Typs bei kompaktem und mechanisch stabilem Aufbau des Hohlkabels zur Verfügung stellt. Es sollen Lösungen angegeben werden, wie die Nachteile des CICC-Kabels gegenüber dem Kabel vom Nuklotron-Typ weitestgehend überwunden und die Vorteile beider Hohlkabeltypen in einem neuen supraleitendem Hohlkabel möglichst werden können.

Diese Aufgabe wird mit dem Gegenstand der unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Erfindungsgemäß wird ein Hohlkabel geschaffen, das einen Außentubus mit einem kreisförmigen Innenquerschnitt und zylindrischer Innenwand aufweist. Im Zentrum des supraleitenden Hohlkabels ist ein zentraler Kühlkanal mit polygonalem oder kreisförmigem Querschnitt angeordnet, der kleiner ist als der Innenquerschnitt des Außentubus. Zwischen der Innenwand und dem Kühlkanal sind profilierte supraleitende Drähte angeordnet. Diese profilierten supraleitende Drähte weisen mindestens ein

supraleitendes Filament (gewöhnlich in einer Cu-Matrix)auf. Ferner haben die supraleitende Drähte ein Querschnittsprofil eines Schlusssteines, bzw. Keystones.

Das Querschnittsprofil der profilierten supraleitende Drähte weist einen äußeren Krümmungsabschnitt auf, der dem kreisförmigen Innenquerschnitt des Außentubus angepasst ist. Ferner weist der Querschnitt der profilierten supraleitende Drähte einen inneren Krümmungsabschnitt auf, der wiederum dem kreisförmigen Querschnitt des Kühlkanals angepasst ist. Schließlich besitzt das Querschnittsprofil Seitenkanten, die profiliert auf den Mittelpunkt des Kühlkanals ausgerichtet sind. Dabei sind die profilierten supraleitende Drähte auf der Innenwand des Außentubus angeordnet und bilden mit ihren inneren Abschnitten den Kühlkanal des supraleitenden Hohlkabels.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß das supraleitende Kabel drei Hauptelemente aufweist, die nachfolgende Vorteile aufweisen. Zum ersten sind die supraleitenden Filamente minimisiert, wodurch der Meißner-Effekt und die Wechselstromverluste vermindert werden. Zum zweiten werden eine möglichst große Anzahl von Filamenten in eine metallische Matrix eingebettet, welche die Filimante mechanisch stabilisiert und eine hohe Wärmeleitung gewährleistet. Zum dritten wird in dem supraleitenden Kabel eine Anzahl supraleitender Drähte kombiniert und mechanisch stabilisiert und der Kontakt zum Kühlmittel realisiert. Elektrisch voneinander isoliert bilden die erfindungsgemäßen supraleitenden Drähte mit Widerstandsbarriere das Rohmaterial zur Herstellung konkreter Spulenelemente. Da die Drähte nicht miteinander verschmolzen sind, sind die Spulen und/oder Kabel äußerst fexibel.

Ein derartiges erfindungsgemäßes supraleitendes Hohlkabel hat u.a. folgende Vorteile:

Die profilierten supraleitenden Drähte sind derart dicht aneinander angeordnet und an die Innenwand des Außentubus angepasst, dass sie sich ohne den aus dem Stand der Technik bekannten Innentubus formschlüssig und kraftschlüssig in Position halten können und einen zylindrischen Körper ergeben, dessen Innenraum den Kühlkanal bildet. D.h. es werden keine inneren Konstruktionselemente mehr zur mechanischen Fixierung der supraleitenden Drähte benötigt. Neben der Materialersparnis durch Wegfall einer Komponente, hat dieses supraleitende Hohlkabel darüber hinaus den Vorteil, dass durch den grösseren Querschnitt des Kühlkanals der Strömungswiderstand für das Kühlmedium vermindert ist. Somit kann eine höhere Wirkung erreicht werden. Alternativ kann dieses zusätzliche freie Volumen auch für größere supraleitende Drähte und damit für eine höhere mittlere Stromdichte genutzt werden.

Schließlich steht das Kühlmedium, bzw. der Kühlkanal, unmittelbar mit den profilierten supraleitenden Drähten in Kontakt. Dieser Kontakt ist zwar auch bei den oben beschriebenen CICC-Kabeln gegeben, jedoch ist der Strömungswiderstand in den dortigen Kühladern beträchtlich, die Wärmekapazität der geringen Menge superkritischen Heliums begrenzt, sodass die mit dem erfindungsgemäßen Hohlkabel erreichbaren Kühlwirkungen in allen Zeitintervallen (kurze Wärmeimpulse und Dauerbelastung) deutlich größer sind. Die symmetrische Anordnung aller supraleitenden Drähte gewährleistet eine zusätzliche Stabilität des Gesamtkabels gegen thermische Impulse, wie oben für das Nuklotronkabel beschrieben. Aus kryotechnischer Sicht stellt die nunmehr drastisch vereinfachte Kühlung im Vergleich zum Prototyp einen entscheidenden Vorteil dar, da hiermit nicht mehr zwei, zumal auch noch qualitativ unterschiedliche Kühlkreis-

lauefe benötigt werden und die Kühlleistungen in allen Zeitskalen (Impulsleistungen bis konstante Dauerleistung)um Größenordnungen verbessert ist.

Die profilierten supraleitenden Drähte sind derart dicht auf der Innenwand des Außentubus des supraleitenden Hohlkabels mit ihren äußeren Krümmungsabschnitten und ihren radial ausgerichteten Seitenkanten aneinander anstoßend angeordnet, dass sie bei allen Betriebstemperaturen des supraleitenden Hohlkabels einen zentralen Kühlkanal mit ihren inneren Krümmungsabschnitten aufrechterhalten. Da ein derartiges supraleitendes Hohlkabel extreme Temperaturdifferenzen von Raumtemperatur bis zu wenigen Grad Kelvin in seinem Betrieb durchläuft, wird durch den dichten Aufbau der schlusssteinförmigen profilierten supraleitenden Drähte erreicht, dass trotz der unterschiedlichen Betriebstemperaturen der zentrale Kühlkanal aufrechterhalten bleibt. Dazu ist die Summe von Spaltbreiten, die sich möglicherweise während des Betriebs zwischen den profilierten Supraleitungen bilden, bei allen Betriebstemperaturen des supraleitenden Hohlkabels kleiner als die Längendifferenz l zwischen dem äußeren und dem inneren Krümmungsabschnitt einer einzelnen profilierten Supraleitung. Dabei ist

$$l = 2\ (r_a - r_i)/n,$$

wobei n die Anzahl der auf der Innenwand des Außentubus verteilten profilierten Supraleitungen, r_a der Innenradius des Außentubus und r_i der Innenradius des Strömungskanals ist. Da die Länge l_{ak} eines äußeren Krümmungsradius

$$l_{ak} = 2\ r_a/n$$

beträgt und die Länge l_{ik} des inneren Krümmungsabschnittes einer profilierten Supraleitung

$$l_{ik} = 2\ r_i$$

ist, müssen bei allen Betriebstemperaturen des supraleitenden Hohlkabels die nachfolgenden Bedingungen erfüllt sein:

$$n \cdot s < 1 \text{ oder}$$
$$n \cdot s < l_{ak} - l_{ik},$$

und somit ist die Bedingung

$$s < 2\ (r_a - r_i)/n^2 .$$

zu gewährleisten, damit der zentrale Kühlkanal aufrechterhalten bleibt. Demnach ist die Anzahl der profilierten supraleitenden Drähte von der Fertigungstoleranz abhängig und muss ggf. so gering wie möglich gehalten halten werden, um bei großen Toleranzen die resultierende Spaltbreite s zulassen zu können. Generell sollten zur Verringerung des Einflusses der Wirbelströme die beiden Hauptmaße des Querschnitts der profilierten supraleitenden Drähte nicht zu stark voneinander abweichen. Die ebenso ungewünschte Wärmeproduktion aufgrund mechanischer Spannungs- und Deformationsfelder kann durch formschlüssige Fertigung, ggf. unter Vorspannung, minimiert werden.

In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung weisen die profilierten supraleitenden Drähte ineinander greifende profilierte Seitenkanten auf. Während die obigen Betrachtungen für das Bilden eines zentralen Kühlkanals aus profilierten Supraleitun-

gen mit geradlinigen auf die Mitte des Hohlkabels zulaufenden Seitenkanten des Querschnitts der profilierten Supraleitungen vorgesehen und abgeleitet sind, ist mit dieser weiteren Ausführungsform der Erfindung, bei der auch die Seitenkanten profiliert werden und nicht geradlinig zum Mittelpunkt verlaufen, eine weitere Möglichkeit gegeben, die Sicherheit zur Beibehaltung des zentralen Kühlkanals zu erhöhen. Zumal zusätzlich zu der oben erwähnten Längendifferenz l für die Summe s·n aller Spaltbreiten s nun noch der Versatz durch die profilierten Seitenkanten hinzu kommt. Durch diesen Versatz mit einer Größe v ergibt sich als Bedingung für die zulässige Spaltbreite s der Wert

$$s < (l+v)/n.$$

Mit den beigefügten Figuren 2 und 4 werden zwei Ausführungsformen für profilierte Supraleitungen mit profilierten Seitenkanten und dem jeweiligen Versatz der Größe v dargestellt.

In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist der Außentubus zweilagig. Eine erste Lage weist einen oder mehrere schraubenförmig um eine Bündel supraleitender profilierter Drähte gewickelte Spanndrähte auf. Eine zweite Lage weist eine elektrisch isolierende und hermetisch abdichtende Außenschicht auf. Diese Spanndrahtlösung hat den Vorteil, dass beliebig lange supraleitende Hohlkabel kontinuierlich hergestellt werden können.

In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung weisen die profilierten supraleitenden Drähte verseilte oder verdrillte supraleitende Filamente auf. Ausführungsbeispiele derartiger profilierter supraleitenden Drähte sind in den weiteren Figuren 6,

7 sowie 8 dargestellt und werden später erläutert. Die supraleitenden Filamente sind mit einem duktilen metallischen Kern und einem duktilen metallischen Mantel versehen so dass die supraleitenden Drähte einer profilierenden Formgebung zugänglich sind. Dazu weisen die profilierten supraleitenden Drähte eine metallische Matrix auf (mit einem metallischen Kern oder metallischen Seele, gewöhnlich aus Cu) und, zur Reduzierung von Wirbelströmen, ggf. zusätzliche hochresistive Zwischenschichten, z.B. aus CuNi-Legierungen. Die supraleitenden Filamente bestehen z.B. aus NbTi-Drähten, die miteinander verdrillt oder verseilt sind. Der Mantel weist ebenfalls vorzugsweise eine CuNi-Legierung auf.

In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung sind die profilierten supraleitenden Drähte keramische oder Hochtemperatur-Supraleiter. Derartige HTSL haben den Vorteil, dass ihre kritische Temperatur wesentlich höher ist als bei metallischen Supraleitern. Die kritische Temperatur bei metallischen Supraleitern liegt unterhalb von 20 Grad Kelvin. Bei den HTSL liegen die kritischen Temperaturen teilweise oberhalb von 80 Grad Kelvin , womit der Vorteil verbunden ist, dass wesentlich preiswertere Kühlmittel eingesetzt werden können oder höhere Magnetfelder bei tieferen Temperaturen realisiert werden können. Wenn auch die Verarbeitung von HTSL zu profilierten supraleitenden Drähten schwieriger ist, so ist dennoch abzusehen, dass die so genannten YBCO basierenden keramischen Supraleitern auf der Basis von Y_3O_3, $BaCO_3$ und CuO mit Beimischungen von Silberoxid, Platinoxid oder Ceriumoxid durchaus über entsprechende Schmelz- und Glühprozesse zu profilierten supraleitenden Drähten bearbeitet werden können. Auch die so genannten BSCCO-Supraleiter, die aus Wismut-, Strontium-, Kalzium- und Kupferoxiden bestehen und Zugaben von Bleioxiden enthalten können,

weisen bis zu 90% supraleitendes orthorhombisches Material auf, das zu profilierten supraleitenden Drähten verarbeitet werden kann.

Der Außentubus des supraleitenden Hohlkabels ist aus einem metallischen oder nichtmetallischen Material, wie einer CuNi-Legierung,Edelstahl, GFK oder organischem Material aufgebaut und kann eine kreisförmige, quadratische oder trapezförmige Außenkontur, oder eine beliebige andere benötigte Form aufweisen. Der jeweilige Außentubus kann mit entsprechenden Kapton-Bändern und/oder Glasfaserbändern zur elektrischen Isolation umwickelt werden. Die quadratische Außenkontur hat den Vorteil, dass innerhalb des Außentubus in Längsrichtung Kühlkanäle eingebaut werden können, sodass die profilierten schlusssteinförmigen supraleitenden Drähte nicht nur durch den zentralen Kühlkanal, der unmittelbar in Kontakt mit den Supraleitungen steht, gekühlt werden, sondern zusätzlich auch noch durch den Außentubus, bzw. durch den Außentubus in Längsrichtung führende Kühlkanäle zusätzlich gekühlt werden kann. Das Gleiche gilt auch für trapezförmige Außenkonturen, da auch hier beispielsweise vier zusätzliche Kühlkanäle direkt im Außentubusmaterial vorgesehen werden können.
Die äußeren Kühlkanäle können längs der Innenwand des Außentubus über eine endliche Breite ~ l_{ak} offen sein.
Die verdrillten profilierten supraleitenden Drähte kreuzen diese Kanäle unter einem nicht zu spitzen Winkel und werden somit nach jeder Vierteldrehung des Schraubenversatzes zusätzlich im direkten Kontakt mit dem Kühlmittel von außen gekühlt.
Somit befinden sich auch in dieser Variante alle Drähte in absolut identischen elektromagnetischen, mechanischen und thermischen Bedingungen.

Je nach Herstellungstechnologie (ohne oder mit mechanischer Vorspannung) und Einsatzbedingung ist es möglich, als Material für den Außentubus ein Material vorzusehen, das einen größeren oder kleineren thermischen Ausdehnungskoeffizienten aufweist, als das Material der profilierten supraleitenden Drähte. Ggf. werden die Eigenschaften des Materials des Außentubus auf die Eigenschaften des supraleitenden Materials abgestimmt, um sicherzustellen, dass die Form und die Beständigkeit des zentralen Kühlkanals erhalten bleibt. Ein weiteres entscheidendes Materialauswahlkriterium für den Außentubus ist ein hoher elektrischer Widerstand gegen Wirbelströme bei ausreichend hoher mechanischer Festigkeit.

Verfahren zur Herstellung eines supraleitenden Hohlkabels können mehrere Verfahrensschritte in unterschiedlicher Reihenfolge aufweisen. Ferner ist das Verfahren zur Herstellung eines erfindungsgemäßen supraleitenden Hohlkabels auch von den Möglichkeiten abhängig, profilierte supraleitende Drähte herzustellen.

Eines der erfindungsgemäßen Verfahren zur Herstellung eines supraleitenden Hohlkabels weist die nachfolgenden Verfahrensschritte auf. Zunächst wird ein kompakter Außentubus mit einem kreisförmigen Innenquerschnitt und mit einer zylindrischen, möglichst glatten, Innenwand hergestellt. Daneben werden profilierte supraleitende Drähte mit einem Querschnittsprofil eines Schlusssteines, bzw. Keystones, wie er für römische Steinbrükken oder für Kreuzgewölbe bekannt ist, hergestellt. Dazu weist das Querschnittsprofil der profilierten supraleitenden Drähte einen äußeren Krümmungsabschnitt auf, der dem kreisförmigen Innenquerschnitt des Außentubus angepasst ist. Ferner weist das Querschnittprofil einen inneren Krümmungsabschnitt auf, der dem kreisförmigen Querschnitt des Kühlkanals angepasst ist.

Schließlich weist das Querschnittprofil Seitenkanten auf, die profiliert auf den Mittelpunkt eines zu bildenden Kühlkanals ausgerichtet sind.

Nachdem diese beiden Hauptkomponenten des erfindungsgemäßen Hohlkabels hergestellt sind, werden zunächst die profilierten supraleitenden Drähte zu einem lang gestreckten kreisrunden Bündel um einen zentralen Kühlkanal herum zusammengefügt. Bei diesem Zusammenfügen können auch Hilfsmittel, wie adhesive Stoffe, eingesetzt werden, um eine stoffschlüssige Verbindung zwischen den profilierten supraleitenden Drähte zu gewährleisten. Dann wird dieses kreisrunde Bündel aus profilierten supraleitenden Drähten in den kompakten Außentubus des supraleitenden Hohlkabels eingezogen. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass das Hohlkabel aus zwei voneinander unabhängig herstellbaren Komponenten zusammengebaut werden kann.

In einer weiteren Verfahrensvariante wird der Außentubus nicht als kompakte Komponente hergestellt, sondern in zwei Halbschalen gefertigt. Beim Zusammenbau des supraleitenden Hohlkabels werden dann die hergestellten profilierten supraleitenden Drähte in die Halbschalen eingelegt. Anschließend werden die Halbschalen mit innen liegenden profilierten Supraleitungen zusammengefügt und miteinander verschweißt. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass nach dem Schweißprozess eine Kontraktion des Außentubus auftreten kann, die gleichzeitig ein verdichtendes Zusammenpressen der innen liegenden profilierten supraleitenden Drähte bewirkt.

Bei einer weiteren Verfahrensvariante werden um ein Bündel aus profilierten supraleitenden Drähten Spanndrähte schraubenförmig gewickelt, vorzugsweise entgegen der Verdrillungsrichtung der

supraleitenden Drähte. Anschließend wird eine elektrisch isolierende und hermetisch abdichtende Außenschicht auf die Spanndrähte aufgebracht. Diese Verfahrensvariante hat den Vorteil, dass unbegrenzt lange supraleitende Hohlkabel mit profilierten supraleitenden Drähten kontinuierlich herstellbar sind.

Eine weitere Verfahrensvariante sieht die Möglichkeit vor, den Außentubus als kompakte Komponente zu erhitzen und ein Bündel aus profilierten supraleitenden Drähten mit zentralem Kühlkanal zu kühlen. Anschließend werden die beiden Komponenten ineinander geschoben. Danach schrumpft der Außentubus auf das kreisrunde Bündel aus lang gestreckten profilierten supraleitenden Drähten auf und bewirkt ein Aufeinanderpressen der supraleitenden Drähte unter Bildung eines zentralen Kühlkanals. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass das Einziehen des kreisrunden Bündels aus supraleitenden Drähten mit zentralem Kühlkanal in den kompakten Außentubus erleichtert wird. Dabei ist es auch möglich, nur den massiven Außentubus zu erhitzen oder nur das Bündel aus profilierten supraleitenden Drähten zu kühlen.

Ein bevorzugtes Verfahren zum Herstellen von profilierten supraleitenden Drähten weist die nachfolgenden Verfahrensschritte auf. Zunächst werden im Standardverfahren supraleitende Multifilamentdrähte mit rundem Querschnitt hergestellt, die entsprechend der beabsichtigten Einsatzbedingungen eine optimale Mikrostruktur, ggf. mit zusätzlichen resistiven Barrieren beinhalten. Anschließend wird der runde supraleitende Draht zu profilierten supraleitenden Drähte profiliert. Dieses Profilieren kann auf unterschiedlichste Weise durchgeführt werden.

Einerseits ist es möglich, entsprechende Profilwalzen einzusetzen, die den inneren Krümmungsabschnitt und den äußeren Krüm-

mungsabschnitt, sowie die Schlusssteinform der Seitenflächen realisieren. Ferner ist es möglich, für die Seitenkanten auch Profilwalzen einzusetzen, um einen Versatz in den Seitenkanten vorzusehen, sodass die profilierten supraleitenden Drähte beim Zusammenbau zu einem Bündel mit zentralem Kühlkanal stärker ineinander greifen. Anstelle von Profilwalzen ist es auch möglich, dass ein Profilziehen durch einen entsprechenden Profilstein vorgesehen wird, durch den der vorbereitete Draht gezogen und dabei im Querschnittsprofil verformt wird. Eine weitere Möglichkeit besteht in einem sogenannten Umformschmieden, bei dem das gewünschte Profil durch entsprechende Schmiedevorgänge erzeugt wird.

Anstelle eines massiven Außentubus kann das Ummanteln der profilierten supraleitendes Drähte auch mit schraubenförmig gewikkeltem Spanndraht, z.B. aus NiCr, erfolgen, Figur 13: Die elektrisch isolierende, hermetisch dichte Außenschicht wird anschließend hergestellt z.B. durch Polymerisation.

Gemäß einer Ausführungsform betrifft die Erfindung also ein supraleitendes Hohlkabel, das folgende Merkmale aufweist:

- einen Außentubus (2) mit einem kreisförmigen Innenquerschnitt und zylindrischer Innenwand (3);
- einen zentralen Kühlkanal (4) mit einem polygonalen oder kreisförmigem Querschnitt, der kleiner ist als der Innenquerschnitt des Außentubus (2), wobei zwischen Innenwand (3) und Kühlkanal (4) profilierte supraleitende Drähte (5) angeordnet sind;
- profilierte supraleitende Drähte (5), die mindestens ein supraleitendes Filament (6) aufweisen und die ein Querschnittsprofil eines Schlusssteines bzw. Keysto-

nes wie er für römische Steinbrücken oder für Kreuzgewölbe bekannt ist, besitzen,

dadurch gekennzeichnet, dass

das Querschnittprofil der profilierten supraleitenden Drähte (5) einen äußeren Krümmungsabschnitt (7) aufweist, der dem polygonalen oder kreisförmigen Innenquerschnitt des Außentubus (2) angepasst ist und einen inneren Krümmungsabschnitt (8) aufweist, der dem kreisförmigen Querschnitt des Kühlkanals (4) angepasst ist, und das Querschnittprofil Seitenkanten (9, 10) aufweist, die profiliert auf den Mittelpunkt (11) des Kühlkanals (4) ausgerichtet sind, wobei die profilierten supraleitenden Drähte (5) auf der Innenwand (3) des Außentubus (2) angeordnet sind, und die profilierten supraleitende Drähte (5) mit ihren inneren Abschnitten (8) den Kühlkanal (4) des supraleitenden Hohlkabels (1) bilden.

Das supraleitende Hohlkabel kann dadurch gekennzeichnet sein, dass die profilierten supraleitenden Drähte (5) derart dicht auf der Innenwand (3) des Außentubus (2) des supraleitenden Hohlkabels (1) mit ihren äußeren Krümmungsabschnitten (7) und ihren radial ausgerichteten Seitenkanten (9, 10) aneinander stoßend angeordnet sind, dass sie bei allen Betriebstemperaturen des supraleitenden Hohlkabels (1) einen zentralen Kühlkanal (4) mit ihren inneren Krümmungsabschnitten (8) aufrecht erhalten.

Dieses supraleitende Hohlkabel kann dadurch gekennzeichnet sein, dass die Summe von Spaltbreiten (s) möglicher Radialspaltbildungen zwischen den profilierten supraleitenden Drähten (5) bei allen Betriebstemperaturen des supraleitenden Hohlkabels (1) kleiner ist als die Längendifferenz

(1) zwischen dem äußeren (7) und dem inneren Krümmungsabschnitt (8) eines einzelnen profilierten supraleitenden Drahts.

Ferner kann das supraleitende Hohlkabel dadurch gekennzeichnet sein, dass die profilierten supraleitende Drähte (5) ineinander greifende profilierte Seitenkanten (12, 13) aufweisen.

Ferner kann das supraleitende Hohlkabel dadurch gekennzeichnet, dass die profilierten supraleitenden Drähte(5) spezielle Oberflächenbeschichtungen oder partielle hochresistive Ummantelungen aufweisen, um Wirbelstromeffekte und thermische Verluste zu vermindern.

Ferner kann das supraleitende Hohlkabel dadurch gekennzeichnet sein, dass die profilierten supraleitenden Drähte (5) um den zentralen Kühlkanal verdrillt sind.

Ferner kann das supraleitende Hohlkabel, dadurch gekennzeichnet sein, dass die profilierten supraleitenden Drähte (5) keramische Supraleiter oder Hochtemperatursupraleiter aufweisen.

Ferner kann das supraleitendes Hohlkabel dadurch gekennzeichnet sein, dass der Außentubus (2) eine kreisförmige, quadratische oder trapezförmige Außenkontur (17) aufweist.

Ferner kann das supraleitende Hohlkabel dadurch gekennzeichnet sein, dass der Außentubus (2) in seiner Längsrichtung Kühlkanäle (18) aufweist.

Ferner kann das supraleitende Hohlkabel dadurch gekennzeichnet sein, dass der thermische Ausdehnungskoeffizient des Materials eines kompakten Außentubus (2) größer ist, als der thermische Ausdehnungskoeffizient der profilierten Supraleitungen (5).

Gemäß einer weiteren Ausführungsform betrifft die Erfindung auch ein Verfahren zur Herstellung eines supraleitenden Hohlkabels (1), das folgende Verfahrensschritte aufweist:

- Herstellen eines Außentubus (2) mit einem kreisförmigen Innenquerschnitt und zylindrischer Innenwand (3);
- Herstellen profilierter supraleitender Drähte (5) mit einem Querschnittsprofil eines Schlusssteines bzw. Keystones wie er für römische Steinbrücken oder für Kreuzgewölbe bekannt ist, wobei das Querschnittsprofil der profilierten supraleitenden Drähte (5) einen äußeren Krümmungsabschnitt (7) aufweist, der dem kreisförmigen Innenquerschnitt des Außentubus (2) angepasst ist und einen inneren Abschnitt (8) aufweist, der dem polygonale oder kreisförmigen Querschnitt eines zentralen Kühlkanals (4) angepasst ist und wobei das Querschnittprofil Seitenkanten (9, 10) aufweist, die profiliert auf den Mittelpunkt (11) eines zu bildenden Kühlkanals (4) ausgerichtet sind;
- Zusammenfügen der profilierten supraleitenden Drähte (5) zu einem lang gestreckten kreisrunden Bündel (28) um einen zentralen Kühlkanal (4) herum;
- Einziehen des kreisrunden Bündels (28) mit zentralem Kühlkanal (4) in den Außentubus (2).

Gemäß einer weiteren Ausführungsform betrifft die Erfindung auch ein Verfahren zur Herstellung eines supraleitenden Hohlkabels (1), das folgende Verfahrensschritte aufweist:

- Herstellen profilierter supraleitender Drähte (5) mit einem Querschnittsprofil eines Schlusssteines bzw. Keystones wie er für römische Steinbrücken oder für Kreuzgewölbe bekannt ist, wobei das Querschnittsprofil der profilierten supraleitenden Drähte (5) einen äußeren Krümmungsabschnitt (7) aufweist, der dem kreisförmigen Innenquerschnitt des Außentubus (2) angepasst ist und einen inneren Abschnitt (8) aufweist, der dem polygonale oder kreisförmigen Querschnitt eines zentralen Kühlkanals (4) angepasst ist und wobei das Querschnittprofil Seitenkanten (9, 10) aufweist, die profiliert auf den Mittelpunkt (11) eines zu bildenden Kühlkanals (4) ausgerichtet sind;
- Zusammenfügen der profilierten supraleitenden Drähte (5) zu einem lang gestreckten kreisrunden Bündel (28) um einen zentralen Kühlkanal (4) herum;
- schraubenförmiges Umwickeln des Bündels mit mindestens einem Spanndraht,
- Abdecken des umwickelten Spanndrahts mit einer elektrisch isolierenden und hermetisch abdichtenden Außenschicht des supraleitenden Hohlkabels.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform betrifft die Erfindung auch ein Verfahren zur Herstellung eines supraleitenden Hohlkabels (1), das folgende Verfahrensschritte aufweist:

- Herstellen von zwei Halbschalen eines kompakten Außentubus (2) mit einem kreisförmigen Innenquerschnitt und zylindrischer Innenwand (3);
- Herstellen profilierter supraleitender Drähte (5) mit einem Querschnittsprofil eines Schlusssteines bzw. Keystones wie er für römische Steinbrücken oder für Kreuzgewölbe bekannt ist, wobei das Querschnittsprofil der profilierten supraleitenden Drähte (5) einen äußeren Krümmungsabschnitt (7) aufweist, der dem kreisförmigen Innenquerschnitt des Außentubus (2) angepasst ist und einen inneren Abschnitt (8) aufweist, der dem polygonale oder kreisförmigen Querschnitt eines zentralen Kühlkanals (4) angepasst ist und wobei das Querschnittprofil Seitenkanten (9, 10) aufweist, die profiliert auf den Mittelpunkt (11) eines zu bildenden Kühlkanals (4) ausgerichtet sind;
- Zusammenfügen der profilierten supraleitenden Drähte (5) zu einem lang gestreckten kreisrunden Bündel (28) um einen zentralen Kühlkanal (4) herum;
- Zusammenfügen der Halbschalen mit innen liegendem Bündel zu einem kompakten Außentubus des supraleitenden Hohlkabels.

Diese Verfahren zur Herstellung profilierter supraleitender Drähte für ein supraleitendes Hohlkabel können den folgenden Verfahrensschritt aufweisen:

- Profilieren der runden Standardform supraleitender Drähte (5).

Das Profilieren des Drahts kann mittels Profilwalzen erfolgen.

Ferner kann das Profilieren des Drahts durch einen Profilstein erfolgen.

Ferner kann das Profilieren des Drahts mittels Umformschmieden erfolgen.

Ferner kann ein zusätzliches, partielles Ummanteln der profilierten supraleitenden Drähte durch Metallbeschichten vorgesehen werden.

Die Erfindung wird nun anhand der beigefügten Figuren näher erläutert.

Figur 1 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlkabel gemäß einer ersten Ausführungsform der Erfindung;

Figur 2 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlkabel gemäß einer zweiten Ausführungsform der Erfindung;

Figur 3 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein Detail des supraleitenden Hohlkabels gemäß Figur 2;

Figur 4 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlkabel gemäß einer dritten Ausführungsform der Erfindung;

Figur 5 zeigt einen schematischen Querschnitt durch die Ausgangsform eines supraleitenden Drahts vor einer Profilgebung;

Figur 6 zeigt einen schematischen Querschnitt durch einen profilierten supraleitenden Draht nach einer profilierenden Formgebung für ein supraleitendes Hohlkabel der ersten Ausführungsform der Erfindung gemäß Figur 1;

Figur 7 zeigt einen schematischen Querschnitt durch eine profilierten supraleitenden Draht nach einer profilierenden Formgebung für ein supraleitendes Kabel der zweiten Ausführungsform der Erfindung gemäß Figur 2;

Figur 8 zeigt einen schematischen Querschnitt durch eine profilierte Supraleitung nach einer profilierenden Formgebung für ein supraleitendes Hohlleiterkabel der dritten Ausführungsform der Erfindung;

Figur 9 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlkabel gemäß einer vierten Ausführungsform der Erfindung;

Figur 10 zeigt den schematischen Querschnitt durch zwei Varianten eines supraleitendes Hohlkabel gemäß einer fünften Ausführungsform der Erfindung;

Figur 11 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlkabel gemäß einer sechsten Ausführungsform der Erfindung;

Figur 12 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlkabel gemäß einer siebten Ausführungsform der Erfindung;

Figur 13 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlkabel gemäß einer achten Ausführungsform der Erfindung;

Figur 14 zeigt ein Foto als Figur 14a und eine schematischen Skizze als Figur 14 b eines supraleitendes Hohlkabel des CICC-Typs in Standardausführung

Figur 15 zeigt ein Foto als Figur 15 a und einen schematischen Querschnitt als Figur 15 b durch ein supraleitendes Hohlkabel des CICC-Typs gemäß dem Stand der Technik (POLO-Kabel).

Figur 16 zeigt ein Foto als Figur 16 a und eine schematische Skizze als Figur 16 b eines supraleitendes Kabels vom Nuklotron-Typ in Standardausfuehrung.

Figur 17 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlkabel vom Nuklotron-Typ mit verbesserter Konstruktion

Figur 1 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlkabel 1 gemäß einer ersten Ausführungsform der Erfindung. Dieses Hohlkabel 1 weist einen zentralen Kühlkanal 4 auf, der von profilierten supraleitenden Drähten 5 umgeben wird, die in der Regel verdrillte Multifilamentdrähte sind. Diese profilierten supraleitenden Drähte 5 bilden in dem hier gezeigten Querschnitt einen Ring, der den zentralen Kühlkanal 4 unmittelbar umgibt, sodass diese profilierten supraleitenden Drähte intensiv durch den Kühlmittelstrom gekühlt werden kön-

nen. Die profilierten supraleitenden Drähte 5 werden durch einen massiven Außentubus 2 zusammengehalten, der eine Innenwand 3 aufweist, an die sich die profilierten supraleitenden Drähte 5 eng anlehnen. Die profilierten supraleitenden Drähte 5 weisen einen Querschnitt auf, der einem Schlussstein einer römischen Brücke, bzw. eines gotischen Gewölbes, entspricht.

Dieses Profil weist einen äußeren Krümmungsabschnitt 7 auf, der an die Krümmung der Innenwand 3 des Außentubus 2 angepasst ist. Ferner weist der Querschnitt der profilierten supraleitenden Drähte 5 einen inneren Krümmungsabschnitt 8 auf, der an die Krümmung des zentralen Kühlkanals 4 angepasst ist. In dieser ersten Ausführungsform der Erfindung weisen die profilierten supraleitenden Drähte 5 glatte Seitenkanten 9 und 10 auf, die zum Mittelpunkt 11 des zentralen Kühlkanals 4 ausgerichtet sind. Die Spaltbreite s zwischen Seitenkanten benachbarter supraleitenden Drähte 5 darf nicht beliebig groß werden, da sonst die ringförmige Struktur der profilierten supraleitenden Drähte 5 und damit der Kühlkanal 4 beim Betrieb zerstört wird. Die Summe $n \cdot s$ aller Spaltbreiten s muss deshalb kleiner sein als die Längendifferenz l der Krümmungslänge l_{ak} des äußeren Krümmungsabschnitts 7 minus der Krümmungslänge l_{ik} des inneren Krümmungsabschnitts 8 des Profils der profilierten supraleitenden Drähte 5.

Da in dieser ersten Ausführungsform der Erfindung zwanzig profilierte supraleitenden Drähte 5 vorgesehen sind, ist die tolerierbare Spaltbreite s zwischen den Seitenkanten benachbarter supraleitenden Drähte 5 äußerst begrenzt. Diese Begrenzung hängt nicht zuletzt auch von der Differenz zwischen inneren Radius r_a des Außentubus 2 und dem Innenradius r_i des Kühlkanals 4 ab, wie es in den obigen Formeln erläutert wird. Ein derartiges

supraleitendes Hohlkabel 1 hat den Vorteil, dass der Strömungswiderstand innerhalb des Kühlkanals 4 äußerst gering ist und damit eine hohe Kühlrate sowie eine hohe mechanische Stabilität erzielt werden kann Ferner hat es den Vorteil, dass das Kühlmedium unmittelbar die profilierten supraleitenden Drähte 5 berührt und somit eine intensive Kühlung auch für kurze Wärmeimpulse gewährleistet ist. Schließlich hat dieses Hohlkabel den Vorteil, dass es im Wesentlichen nur aus zwei Lagen bzw. Komponenten aufgebaut ist: nämlich aus dem konzentrischen Bündel aus schlusssteinförmigen profilierten supraleitenden Drähten 5 und dem massiven Außentubus 2. Darüber hinaus kann zwecks (zusätzlicher) elektrischer Isolation dieses erfindungsgemäße supraleitende Hohlkabel 1 um die Außenkontur 17 des Außentubus 2 ein aufgewickeltes Kapton-Band aufweisen und, falls erforderlich, weitere elektroisolierende Schichten beispielsweise aus Glasfaserbändern haben. Dies gilt für alle Varianten entsprechend Fig. 1, 2, 4, 9, 10, 11 und 12.

Das Hohlkabel 1 der zweiten Ausführungsform unterscheidet sich von dem Hohlkabel 1 der ersten Ausführungsform durch die Profilierung der profilierten supraleitenden Drähte 5. Zusätzlich zu der Schlusssteinform weisen diese profilierten supraleitenden Drähte 5 einen Versatz der Größe v auf, der zusätzlich das Ineinandergreifen der profilierten supraleitenden Drähte 5 verbessert und größere Spaltbreiten s zwischen den benachbarten profilierten Seitenkanten 12 und 13 dieser profilierten supraleitenden Drähte 5 zulässt. Im Detail wurde der Zusammenhang zwischen der möglichen Spaltbreite s, sowie der Längendifferenz l zwischen äußeren und inneren Krümmungsabschnitten und der Größe v des Versatzes bereits oben erörtert.

Figur 3 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein Detail des supraleitenden Hohlkabels 1 gemäß Figur 2. Komponenten mit gleichen Funktionen wie in den vorgehenden Figuren werden mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet und nicht extra erörtert. Figur 3 zeigt in größerem Maßstab das Ineinandergreifen der profilierten supraleitenden Drähte 5 durch den Versatz 19,benachbarter profilierter Seitenkanten 12 und 13.

Figur 4 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlkabel 1 gemäß einer dritten Ausführungsform der Erfindung. Diese dritte Ausführungsform der Erfindung unterscheidet sich von den vorhergehenden Ausführungsformen dadurch, dass die Anzahl der profilierten supraleitenden Drähte 5 von zwanzig in den Figuren 1 und 2 auf zehn in der Figur 4 reduziert wurde. Das Ineinandergreifen der profilierten supraleitenden Drähte 5 wird dadurch verstärkt, dass die supraleitenden Drähte 5 auf ihren profilierten Seitenkanten 12 und 13 Spitzenprofile 20 aufweisen. Diese Spitzenprofile 20 bilden einen Versatz der Größe v, der im Zusammenwirken mit der Längendifferenz l zwischen den äußeren und inneren Krümmungsabschnitten 7 und 8 der Querschnitte der profilierten supraleitenden Drähte 5 die Toleranz für die Spaltbreite s vergrößert, sodass eine höhere Toleranz gegenüber sich bildenden Spaltbreiten s zugelassen werden kann, ohne dass die Struktur der im Inneren des Außentubus 2 angeordneten supraleitenden Drähte 5 zusammenbricht.

Figur 5 zeigt einen schematischen Querschnitt durch einen supraleitenden Multifilament-Draht in Standardausführung. Derartige Drähte weisen einen kreisrunden Querschnitt auf und beinhalten wie oben beschrieben verdrillte supraleitende Filamente in einer mehr oder weniger komplexen Cu-Matrix.

Figur 6 zeigt einen schematischen Querschnitt durch einen profilierten supraleitenden Drähten 5 nach einer profilierenden Formgebung für ein supraleitendes Hohlkabel 1 der ersten Ausführungsform der Erfindung gemäß Figur 1. Bei dieser Formgebung wird ein Draht gemäß Figur 5 mit unterschiedlichen Walzenprofilen gewalzt, sodass einerseits ein äußerer Krümmungsabschnitt 7 entsteht und andererseits ein innerer Krümmungsabschnitt 8. Ferner werden die Seitenkanten 9 und 10 durch entsprechend winklig zueinander eingestellte Walzen gewalzt. Anstelle eines Walzenwerks kann auch ein Strangziehen durch einen entsprechenden formgebenden Ziehschuh eingesetzt werden. Bei diesem Verfahren wird der in Figur 5 gezeigte runde Draht in einen profilierten supraleitenden Draht 5 mit einem durch den Ziehschuh vorgegebenen Querschnitt umgeformt.

Figur 7 zeigt einen schematischen Querschnitt durch einen profilierten supraleitenden Draht 5 nach einer profilierenden Formgebung für ein supraleitendes Hohlkabel 1 der zweiten Ausführungsform der Erfindung gemäß Figur 2. Anstelle von glatten Seitenkanten, wie sie noch in Figur 6 gezeigt werden, werden bei dieser Profilierung profilierte Seitenkanten 12 und 13 geformt, bzw. durch einen Ziehstein gezogen. Dabei entstehen Stufenabsätze 19, die ein Ineinandergreifen der profilierten supraleitenden Drähte 5 beim Zusammenbau des Hohlkabels ermöglichen.

Figur 8 zeigt einen schematischen Querschnitt durch einen profilierten supraleitenden Draht 5 nach einer profilierenden Formgebung für ein supraleitendes Hohlkabel 1 der dritten Ausführungsform der Erfindung gemäß Figur 4. Auch dieses Profil mit einem Profilspitze 20 auf der Seitenkante 12 kann durch entsprechende Formgebung eines zunächst kreisrunden Quer-

schnitts, wie es die Figur 5 zeigt, gewonnen werden. Dazu können entweder vier unterschiedlich formende Profilwalzen oder eine entsprechend geformte Ziehdüse eingesetzt werden, um die vier Profilkanten des Querschnitts der profilierten supraleitenden Drähte 5 herzustellen. Ein Vorteil dieser profilierten supraleitenden Drähte 5 der Figur 8 gegenüber Figur 7 ist es, dass eine derartiges Spitzenprofil Auswölbung 20 der profilierten Seitenkante 12 leichter durch Profilwalzen zu realisieren ist, als dass für das Profil mit einem Stufenabsatz 19 der Figur 7 möglich ist, und dass das Ineinandergreifen dieser Formen zur Selbstausrichtung der profilierten supraleitenden Drähte um den Kühlkanal beiträgt.

Figur 9 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlleiterkabel 1 gemäß einer vierten Ausführungsform der Erfindung. Komponenten mit gleichen Funktionen wie in den vorgehenden Figuren werden mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet und nicht extra erörtert. Der Unterschied zu den vorhergehenden Ausführungsformen besteht darin, dass als massiver Außentubus 2 ein Außentubus gewählt wird, der zwar eine zylindrische Innenwand 3 aufweist, jedoch eine quadratische Außenkontur 17 besitzt, wodurch einerseits die Festigkeit des Außentubus 2 erhöht und andererseits die Herstellung kompakter Spulen wesentlich vereinfacht werden kann.

Figur 10 zeigt schematische Querschnitte durch zwei Varianten eines supraleitendes Hohlleiterkabel 1 gemäß einer fünften Ausführungsform der Erfindung. Komponenten mit gleichen Funktionen wie in den vorgehenden Figuren werden mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet und nicht extra erörtert. Der Unterschied dieser fünften Ausführungsform der Erfindung unterscheidet sich von den vorhergehenden Ausführungsformen dadurch, dass der Au-

ßentubus 2 mit quadratischer Außenkontur 17 in den Ecken des quadratischen Außentubus 2 zusätzliche Kühlkanäle 18 in Längsrichtung des Hohlkabels 1 aufweist. Damit kann die Kühlwirkung, wie bereits oben beschrieben, für dieses Hohlkabel 1 weiter intensiviert werden.

Figur 11 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlleiterkabel 1 gemäß einer sechsten Ausführungsform der Erfindung. Wobei das Bezugszeichen 5 profilierte supraleitende Drähte, das Bezugszeichen 2 den Außentubus, und das Bezugszeichen 18 Kühlkanäle im Außentubus 2 in seiner Längserstreckung kennzeichnet. Durch diese äußere Kühlkanäle 18, die sich längs der Innenwand des Außentubus erstrecken und zu dem Bündel aus profilierten supraleitenden Drähten eine Öffnung aufweisen, die schmaler als ein äußerer Krümmungsabschnitt des Profils der Drähte ist, werden die verdrillten profilierten supraleitenden Drähte somit nach jeder Vierteldrehung des Schraubenversatzes zusätzlich im direkten Kontakt mit dem Kühlmittel von außen gekühlt. Auch in dieser Variante befinden sich alle Drähte in absolut identischen elektromagnetischen, mechanischen und thermischen Bedingungen.

Figur 12 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlleiterkabel 1 gemäß einer siebten Ausführungsform der Erfindung. Die sechste Ausführungsform der Erfindung unterscheidet sich von den vorhergehenden Ausführungsformen dadurch, dass der Außentubus 2 eine trapezförmige Außenkontur 17 aufweist. Diese trapezförmige Außenkontur 17 kann dann von Vorteil sein, wenn mehrere dieser supraleitenden Hohlkabel 1 zu einer kreisförmigen Spule zusammengebaut oder spezielle Spulengeometrien mechanisch kompakt und möglichst stabil gefertigt werden sollen.

Figur 13 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlkabel 1 gemäß einer achten Ausführungsform der Erfindung. Komponenten mit gleichen Funktionen wie in den vorhergehenden Figuren werden mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet, und nicht extra erörtert. Der Außentubus wird hier aus zwei Lagen gebildet, einer ersten Lage mit einem schraubenförmig gewickelter Spanndraht 33, z.B. aus NiCr und einer elektrisch isolierenden, hermetisch dichtenden Außenschicht 34, z.B. hergestellt durch Polymerisation. Wie bereits oben beschrieben, unterscheidet sich diese achte Ausführungsform der Erfindung von den vorhergehenden Ausführungsformen dadurch, dass anstelle eines massiven Außentubus das Ummanteln der profilierten supraleitende Drähte mit schraubenförmig gewickeltem Spanndraht erfolgt, worauf anschließend eine elektrisch isolierende, hermetisch dichte Außenschicht aufgebracht wird.

Figur 14 zeigt ein Foto als Figur 14a und eine schematischen Skizze als Figur 14 b eines supraleitendes Hohlkabel des CICC-Typs in Standardausführung. Komponenten mit gleichen Funktionen wie in den vorhergehenden Figuren werden mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet, und nicht extra erörtert. Figur 14 zeigt ein Bündel verdrillter supraleitender Drähte 30, dass innerhalb eines hermetisch dichten Tubus 32 verläuft.

Figur 15 zeigt ein Foto als Figur 15 a und einen schematischen Querschnitt als Figur 15 b durch ein supraleitendes Hohlkabel des CICC-Typs gemäß dem Stand der Technik (POLO-Kabel). Komponenten mit gleichen Funktionen wie in den vorhergehenden Figuren werden mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet, und nicht extra erörtert. In diesem Fall sind supraleitende Drähte 30 auf einem massiven Innentubus 21 als inneres Stützrohr angeordnet

wobei der innere Kühlkanal für einen zweiphasigen Heliumstrom vorgesehen ist und superkritisches Helium direkt zwischen den supraleitenden Drähten 30 bei hohem Strömungswiderstand geführt werden kann..

Figur 16.zeigt ein Foto als Figur 16 a und eine schematische Skizze als Figur 16 b eines supraleitendes Kabels vom Nuklotron-Typ in Standardausführung. Komponenten mit gleichen Funktionen wie in den vorhergehenden Figuren werden mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet, und nicht extra erörtert. Figur 16 zeigt in einem zentralen Kühlkanal, der von einem kompakten Innentubus 21 aus CuNi gebildet wird, ein darin geführtes zweiphasiges Helium 35. Auf dem Innentubus 21 sind supraleitende Drähte 30 gewickelt, die von einem NiCr-Spanndraht 33 zusammengehalten werden. Ein Kapton-Band 24 bildet eine elektrisch Isolierung und ein Glasfaserband 25 dient der Wärmeisolation des supraleitenden Hohlkabels.

Figur 17 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein supraleitendes Hohlkabel 1 vom Nuklotron-Typ mit verbesserter Konstruktion. Komponenten mit gleichen Funktionen wie in den vorhergehenden Figuren werden mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet, und nicht extra erörtert. Figur 16 zeigt einen zentralen Kühlkanal 4, der von einem kompakten Innentubus 21 aus CuNi gebildet wird. Auf dem Innentubus 21 sind profilierte supraleitende Drähte 5 gewickelt, die von einem NiCr-Spanndraht 33 zusammengehalten werden. Eine elektrisch isolierende, hermetisch dichte Außenschicht 34 ist auf dem Spanndraht 33 angeordnet.

Bezugszeichenliste

1	supraleitendes Hohlkabel
2	Außentubus
3	Innenwand des Außentubus
4	zentraler Kühlkanal
5	profilierter supraleitenden Draht
6	Supraleitendes Filament
7	äußerer Krümmungsabschnitt
8	innerer Krümmungsabschnitt
9	glatte Seitenkante
10	glatte Seitenkante
11	Mittelpunkt des Kühlkanals
12	profilierte Seitenkante
13	profilierte Seitenkante
14	supraleitendes Filament
15	metallischer Kern, bzw. Seele der stabilisierenden Matrix eines Supraleitenden Multifilamentleiters
16	Mantel der stabilisierenden Matrix eines Supraleitenden Multifilamentleiters einer profiliertes Drahts
17	Außenkontur des Außentubus
18	Kühlkanäle des Außentubus in Längsrichtung
19	Stufenabsatz (Stufenprofil)
20	Spitzenprofil einer Seitenkante
21	kompakter Innentubus
24	Kapton-Band
25	Glasfaserband
26	Außenmantel des Innentubus
27	Innenwand des Innentubus
28	Bündel mit supraleitenden Filamenten

29	Draht aus einem Bündel mit supraleitenden Filamenten und stabilisierender Matrix
30	supraleitende Drähte
31	Bündel verdrillter supraleitender Drähte
32	hermetisch dichter Tubus
33	schraubenförmig gewickelter Spanndraht
34	elektrisch isolierende hermetisch dichtende Außenschicht
35	zweiphasiges Helium

l_{ak}	Länge des äußeren Krümmungsabschnitts
l_{ik}	Länge des inneren Krümmungsabschnitts
l	Längendifferenz
s	Spaltbreite
v	Größe des Versatzes
n	Anzahl der profilierten supraleitenden Drähte pro supraleitendem Hohlkabel
r_a	Innenradius des Außentubus
r_i	Radius des zentralen Kühlkanals

Patentansprüche

1. Supraleitendes Hohlkabel, das folgende Merkmale aufweist:
   - einen Außentubus (2) mit einem kreisförmigen Innenquerschnitt und zylindrischer Innenwand (3);
   - einen zentralen Kühlkanal (4) mit einem polygonalen oder kreisförmigem Querschnitt, der kleiner ist als der Innenquerschnitt des Außentubus (2), wobei zwischen Innenwand (3) und Kühlkanal (4) profilierte supraleitende Drähte (5) angeordnet sind;
   - profilierte supraleitende Drähte (5), die mindestens ein supraleitendes Filament (6) aufweisen und die ein Querschnittsprofil eines Schlusssteines bzw. Keystones wie er für römische Steinbrücken oder für Kreuzgewölbe bekannt ist, besitzen,

   dadurch gekennzeichnet, dass
   das Querschnittprofil der profilierten supraleitenden Drähte (5) einen äußeren Krümmungsabschnitt (7) aufweist, der dem polygonalen oder kreisförmigen Innenquerschnitt des Außentubus (2) angepasst ist und einen inneren Krümmungsabschnitt (8) aufweist, der dem kreisförmigen Querschnitt des Kühlkanals (4) angepasst ist, und
   das Querschnittprofil Seitenkanten (9, 10) aufweist, die profiliert auf den Mittelpunkt (11) des Kühlkanals (4) ausgerichtet sind, wobei die profilierten supraleitenden Drähte (5) auf der Innenwand (3) des Außentubus (2) angeordnet sind, und die profilierten supraleitende Drähte (5) mit ihren inneren Abschnitten (8) den Kühlkanal (4) des supraleitenden Hohlkabels (1) bilden.

2. Supraleitendes Hohlkabel nach Anspruch 1
dadurch gekennzeichnet, dass
die profilierten supraleitenden Drähte (5) derart dicht auf der Innenwand (3) des Außentubus (2) des supraleitenden Hohlkabels (1) mit ihren äußeren Krümmungsabschnitten (7) und ihren radial ausgerichteten Seitenkanten (9, 10) aneinander stoßend angeordnet sind, dass sie bei allen Betriebstemperaturen des supraleitenden Hohlkabels (1) einen zentralen Kühlkanal (4) mit ihren inneren Krümmungsabschnitten (8) aufrecht erhalten.

3. Supraleitendes Hohlkabel nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Summe von Spaltbreiten (s) möglicher Radialspaltbildungen zwischen den profilierten supraleitenden Drähten (5) bei allen Betriebstemperaturen des supraleitenden Hohlkabels (1) kleiner ist als die Längendifferenz (Δl) zwischen dem äußeren (7) und dem inneren Krümmungsabschnitt (8) eines einzelnen profilierten supraleitenden Drahts.

4. Supraleitendes Hohlkabel nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die profilierten supraleitende Drähte (5) ineinander greifende profilierte Seitenkanten (12, 13) aufweisen.

5. Supraleitendes Hohlkabel nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die profilierten supraleitenden Drähte(5) spezielle Oberflächenbeschichtungen oder partielle hochresistive

Ummantelungen aufweisen, um Wirbelstromeffekte und thermische Verluste zu vermindern.

6. Supraleitendes Hohlkabel nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die profilierten supraleitenden Drähte (5) um den zentralen Kühlkanal verdrillt sind.

7. Supraleitendes Hohlkabel nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die profilierten supraleitenden Drähte (5) keramische Supraleiter oder Hochtemperatursupraleiter aufweisen.

8. Supraleitendes Hohlkabel nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Außentubus (2) eine kreisförmige, quadratische oder trapezförmige Außenkontur (17) aufweist.

9. Supraleitendes Hohlkabel nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Außentubus (2) in seiner Längsrichtung Kühlkanäle (18) aufweist.

10. Supraleitendes Hohlkabel nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
der thermische Ausdehnungskoeffizient des Materials eines kompakten Außentubus (2) größer ist, als der thermi-

sche Ausdehnungskoeffizient der profilierten Supraleitungen (5).

11. Verfahren zur Herstellung eines supraleitenden Hohlkabels (1), das folgende Verfahrensschritte aufweist:
- Herstellen eines Außentubus (2) mit einem kreisförmigen Innenquerschnitt und zylindrischer Innenwand (3);
- Herstellen profilierter supraleitender Drähte (5) mit einem Querschnittsprofil eines Schlusssteines bzw. Keystones wie er für römische Steinbrücken oder für Kreuzgewölbe bekannt ist, wobei das Querschnittsprofil der profilierten supraleitenden Drähte (5) einen äußeren Krümmungsabschnitt (7) aufweist, der dem kreisförmigen Innenquerschnitt des Außentubus (2) angepasst ist und einen inneren Abschnitt (8) aufweist, der dem polygonale oder kreisförmigen Querschnitt eines zentralen Kühlkanals (4) angepasst ist und wobei das Querschnittprofil Seitenkanten (9, 10) aufweist, die profiliert auf den Mittelpunkt (11) eines zu bildenden Kühlkanals (4) ausgerichtet sind;
- Zusammenfügen der profilierten supraleitenden Drähte (5) zu einem lang gestreckten kreisrunden Bündel (28) um einen zentralen Kühlkanal (4) herum;
- Einziehen des kreisrunden Bündels (28) mit zentralem Kühlkanal (4) in den Außentubus (2).

12. Verfahren zur Herstellung eines supraleitenden Hohlkabels (1), das folgende Verfahrensschritte aufweist:
- Herstellen profilierter supraleitender Drähte (5) mit einem Querschnittsprofil eines Schlusssteines bzw. Keystones wie er für römische Steinbrücken oder für

Kreuzgewölbe bekannt ist, wobei das Querschnittsprofil der profilierten supraleitenden Drähte (5) einen äußeren Krümmungsabschnitt (7) aufweist, der dem kreisförmigen Innenquerschnitt des Außentubus (2) angepasst ist und einen inneren Abschnitt (8) aufweist, der dem polygonale oder kreisförmigen Querschnitt eines zentralen Kühlkanals (4) angepasst ist und wobei das Querschnittprofil Seitenkanten (9, 10) aufweist, die profiliert auf den Mittelpunkt (11) eines zu bildenden Kühlkanals (4) ausgerichtet sind;

- Zusammenfügen der profilierten supraleitenden Drähte (5) zu einem lang gestreckten kreisrunden Bündel (28) um einen zentralen Kühlkanal (4) herum;
- schraubenförmiges Umwickeln des Bündels mit mindestens einem Spanndraht,
- Abdecken des umwickelten Spanndrahts mit einer elektrisch isolierenden und hermetisch abdichtenden Außenschicht des supraleitenden Hohlkabels.

13. Verfahren zur Herstellung eines supraleitenden Hohlkabels (1), das folgende Verfahrensschritte aufweist:
    - Herstellen von zwei Halbschalen eines kompakten Außentubus (2) mit einem kreisförmigen Innenquerschnitt und zylindrischer Innenwand (3);
    - Herstellen profilierter supraleitender Drähte (5) mit einem Querschnittsprofil eines Schlusssteines bzw. Keystones wie er für römische Steinbrücken oder für Kreuzgewölbe bekannt ist, wobei das Querschnittsprofil der profilierten supraleitenden Drähte (5) einen äußeren Krümmungsabschnitt (7) aufweist, der dem kreisförmigen Innenquerschnitt des Außentubus (2) angepasst ist und einen inneren Abschnitt (8) aufweist, der dem polygonale oder

kreisförmigen Querschnitt eines zentralen Kühlkanals (4) angepasst ist und wobei das Querschnittprofil Seitenkanten (9, 10) aufweist, die profiliert auf den Mittelpunkt (11) eines zu bildenden Kühlkanals (4) ausgerichtet sind;

- Zusammenfügen der profilierten supraleitenden Drähte (5) zu einem lang gestreckten kreisrunden Bündel (28) um einen zentralen Kühlkanal (4) herum;
- Zusammenfügen der Halbschalen mit innen liegendem Bündel zu einem kompakten Außentubus des supraleitenden Hohlkabels.

14. Verfahren zur Herstellung einer profilierter supraleitender Drähte für eine supraleitendes Hohlkabel gemäß einem der Ansprüche 11 bis 13, das folgende Verfahrensschritte aufweist:
    - Profilieren der runden Standardform supraleitender Drähte (5).

15. Verfahren nach Anspruch 14,
    dadurch gekennzeichnet, dass
    das Profilieren des Drahts mittels Profilwalzen erfolgt.

16. Verfahren nach Anspruch 14,
    dadurch gekennzeichnet, dass
    das Profilieren des Drahts durch einen Profilstein erfolgt.

17. Verfahren nach Anspruch 14,
    dadurch gekennzeichnet, dass
    das Profilieren des Drahts mittels Umformschmieden erfolgt.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass das ein zusätzliches, partielles Ummanteln der profilierten supraleitenden Drähte durch Metallbeschichten erfolgt.

FIG 1

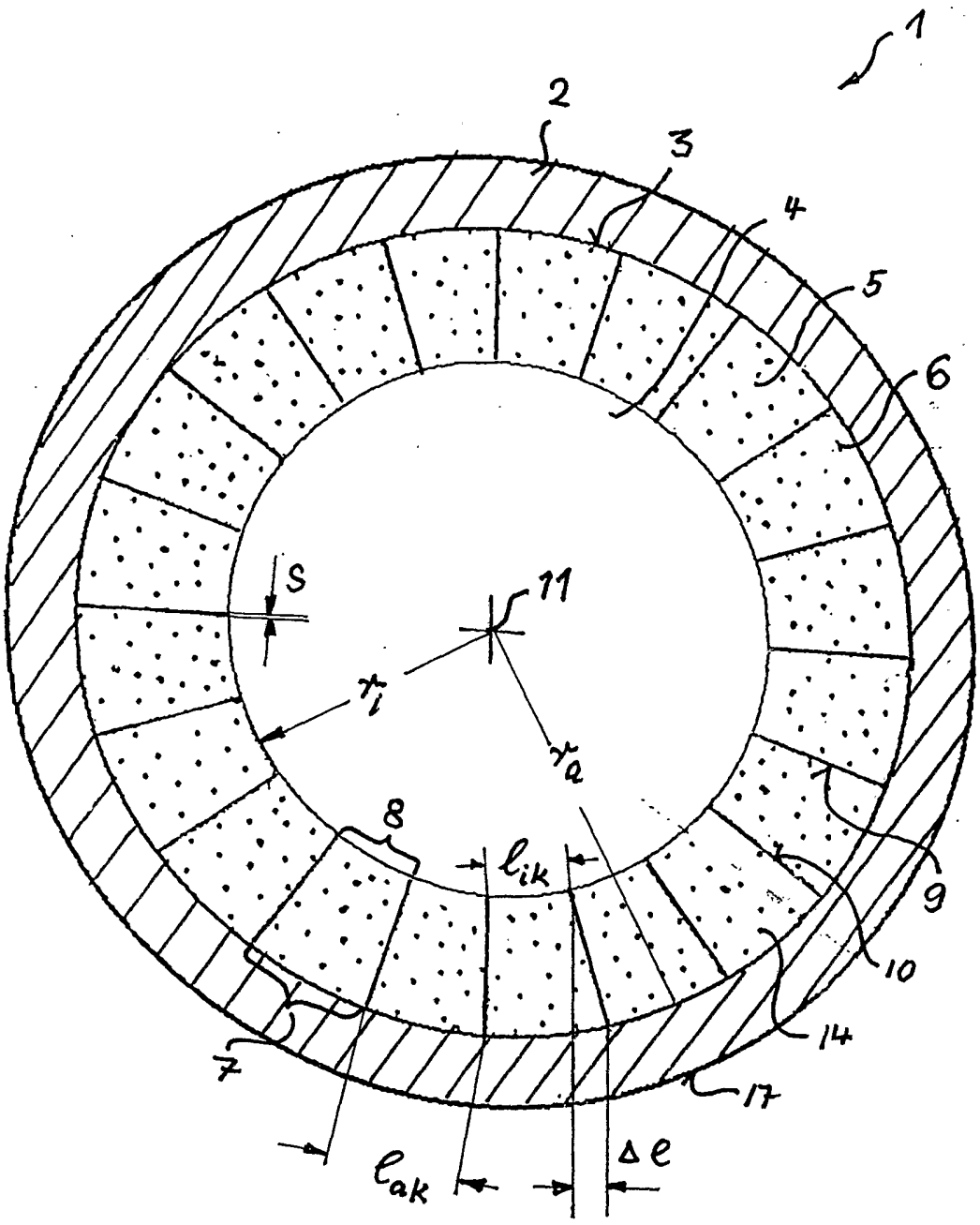


FIG 2

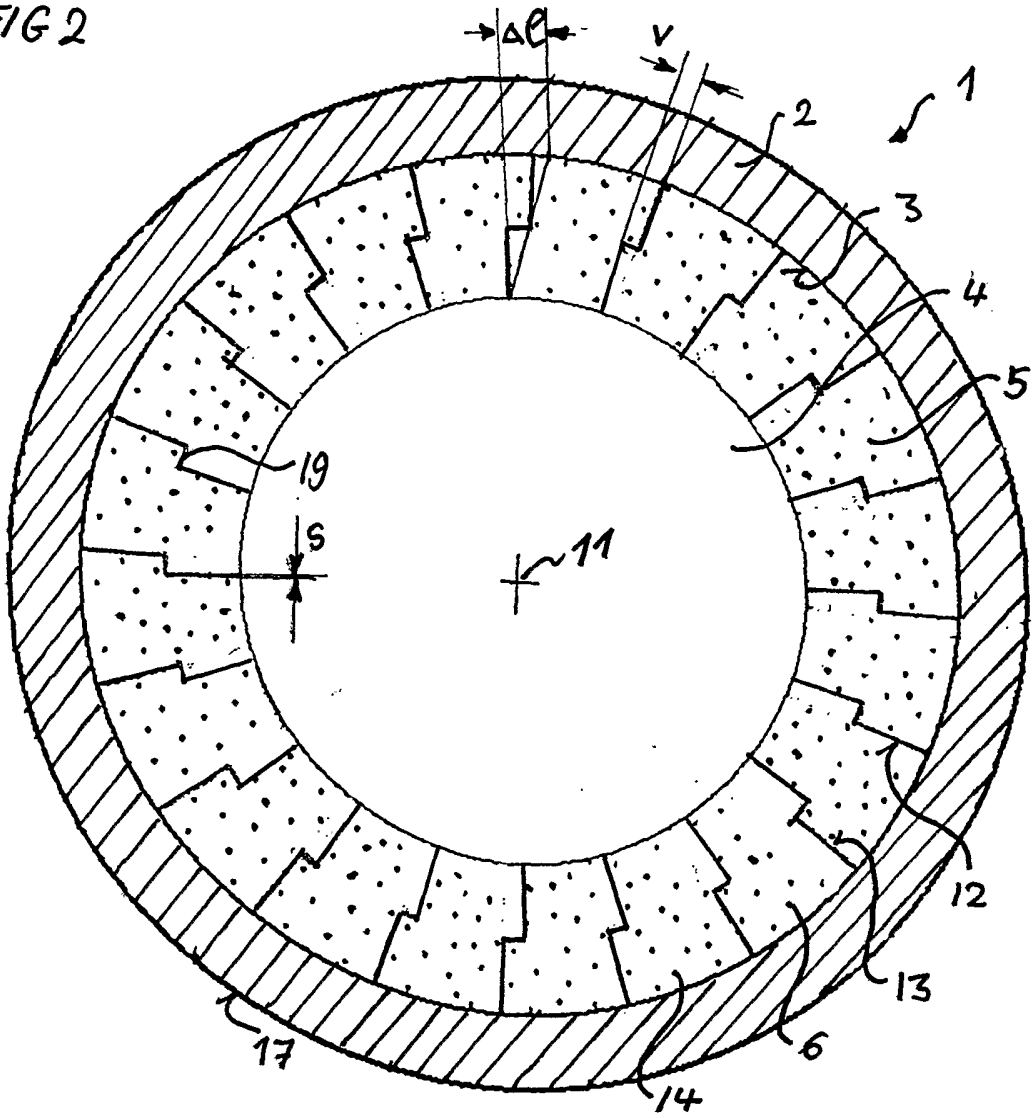


FIG 3

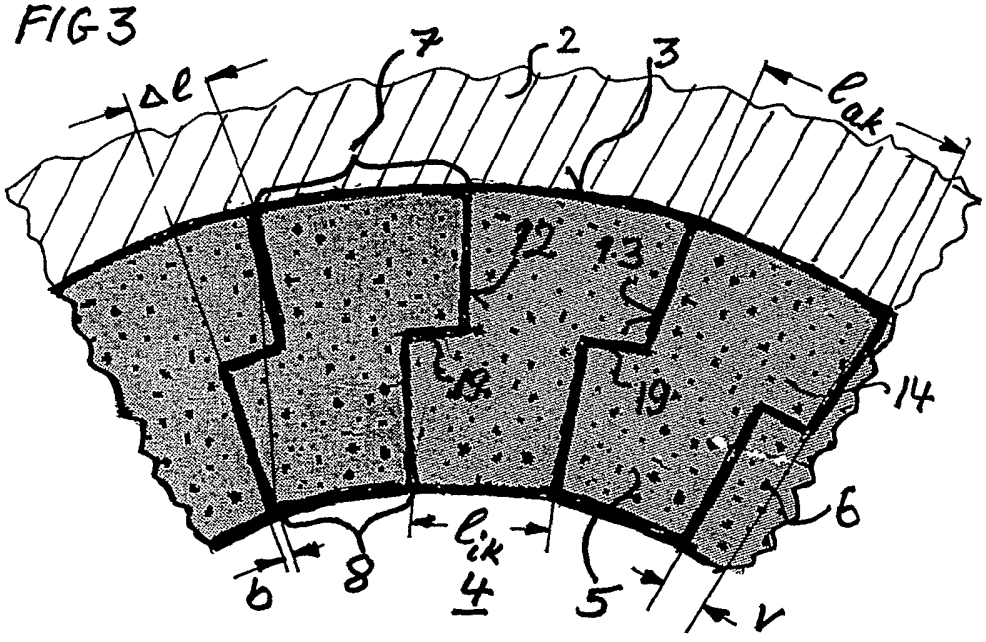


FIG 4

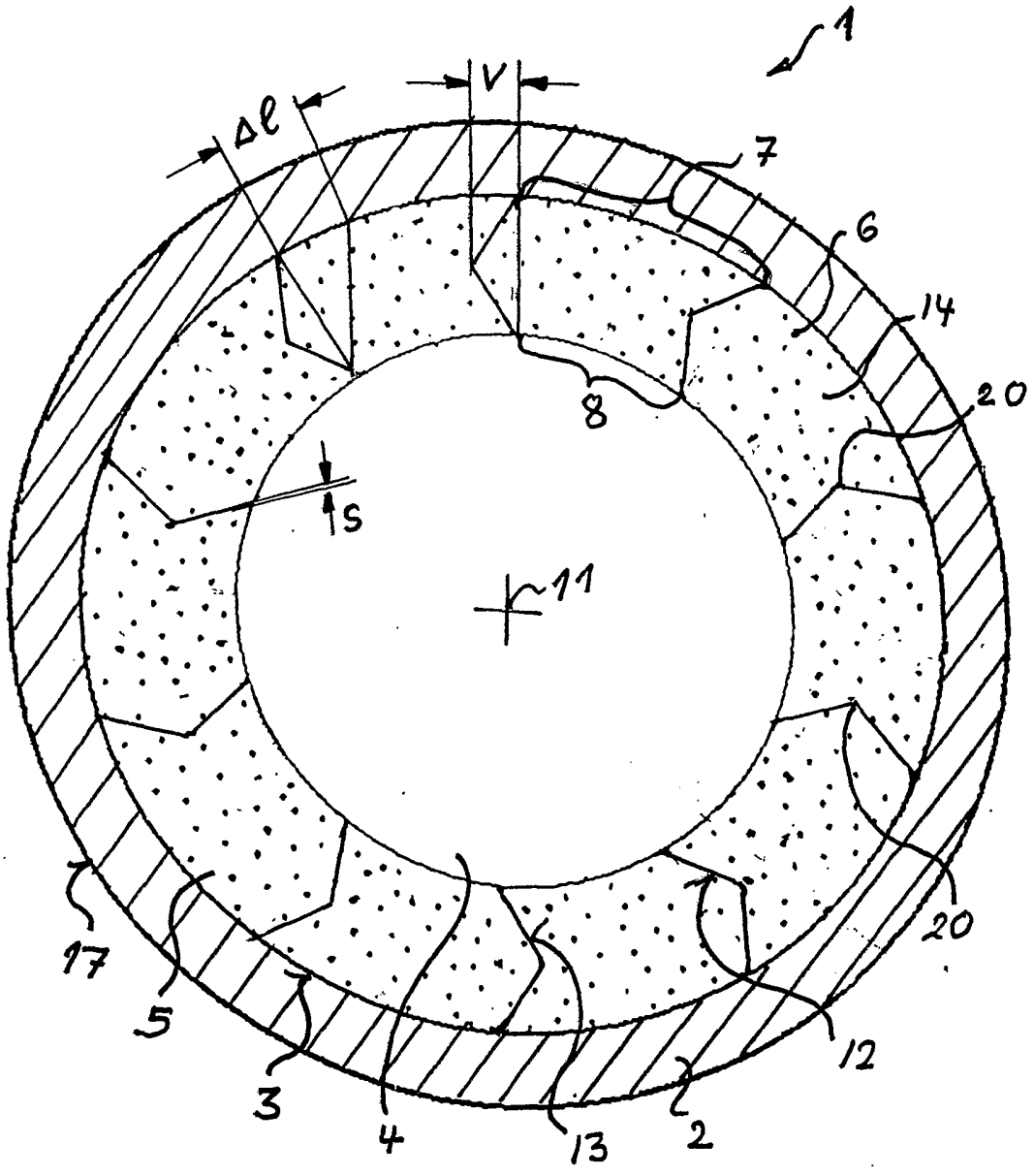


FIG 5

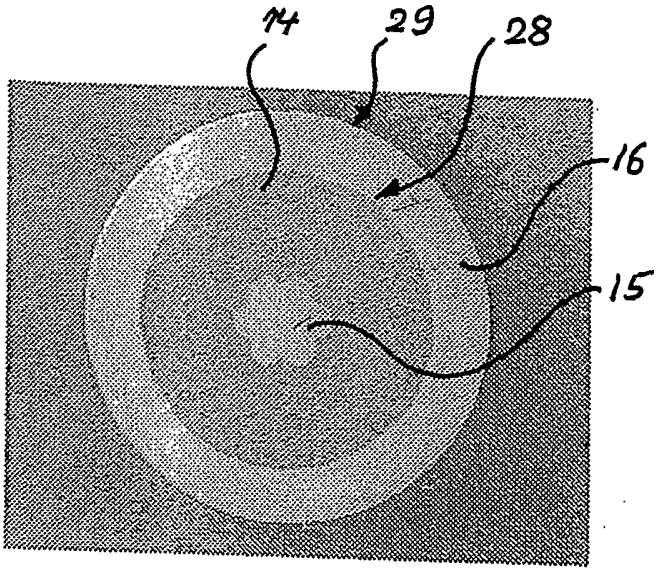


FIG 6

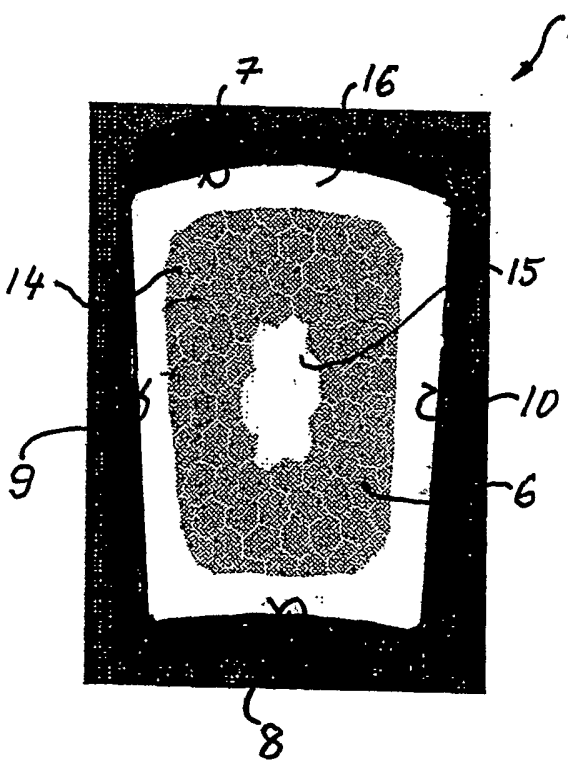


FIG 7

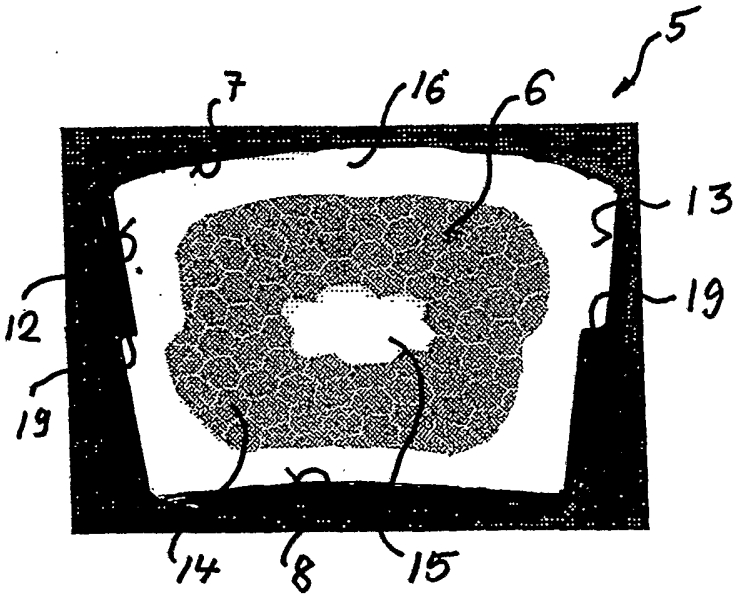


FIG 8

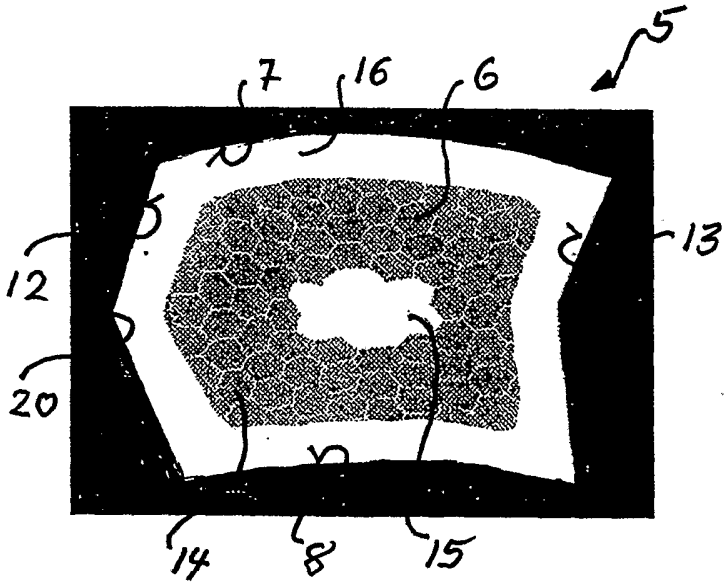


FIG 9

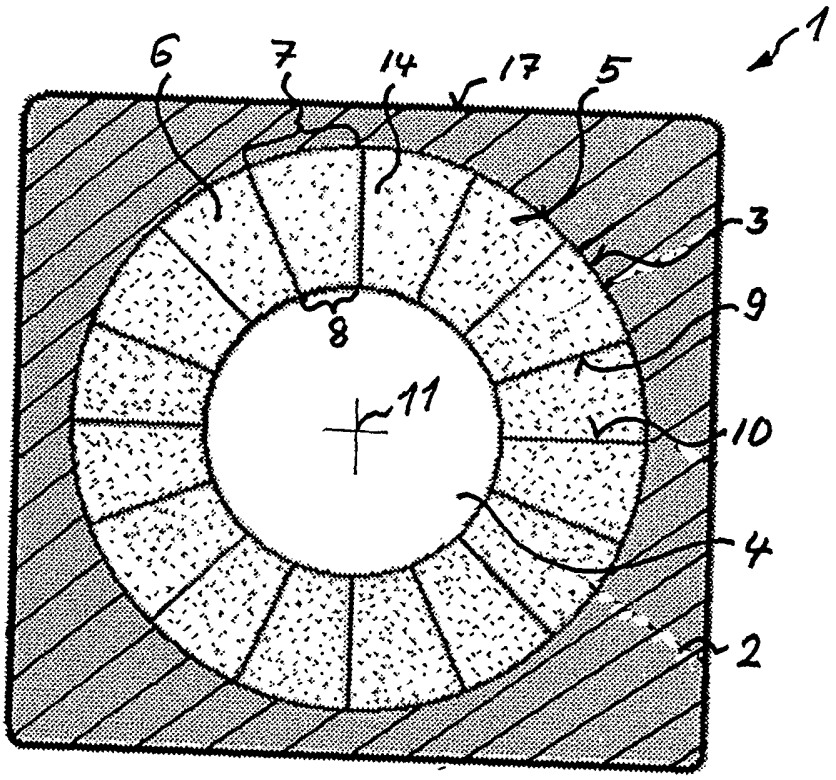


FIG 10

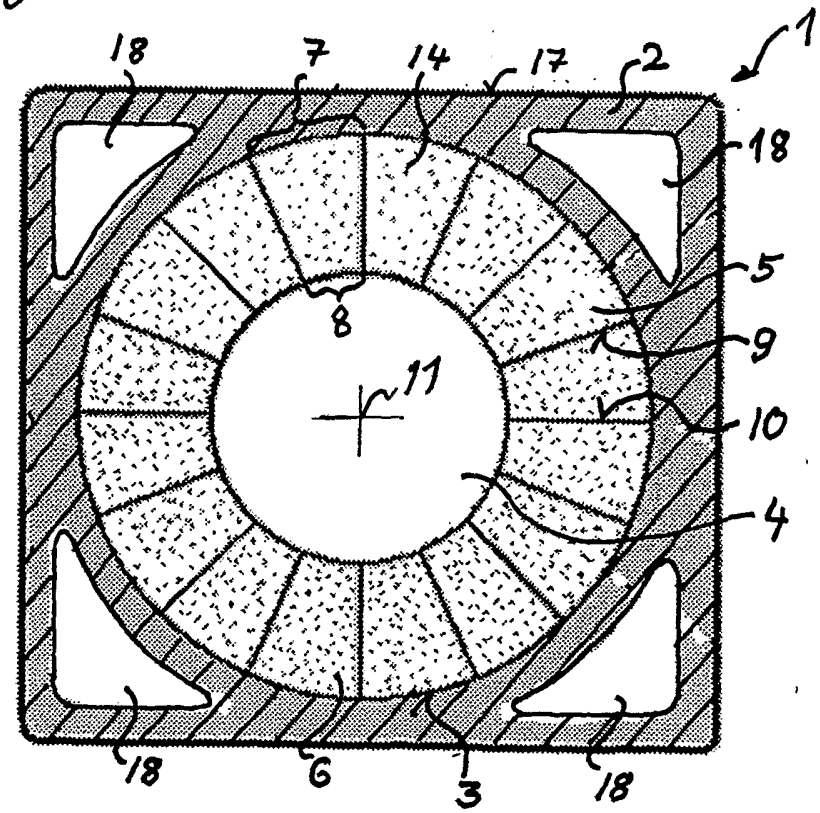


FIG 11

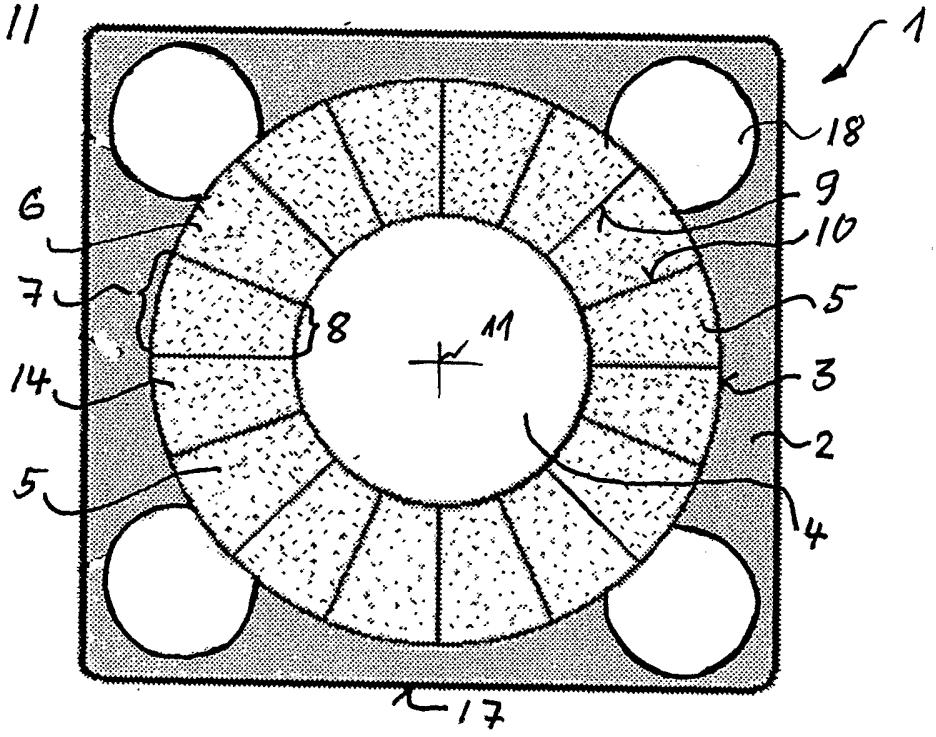


FIG 12

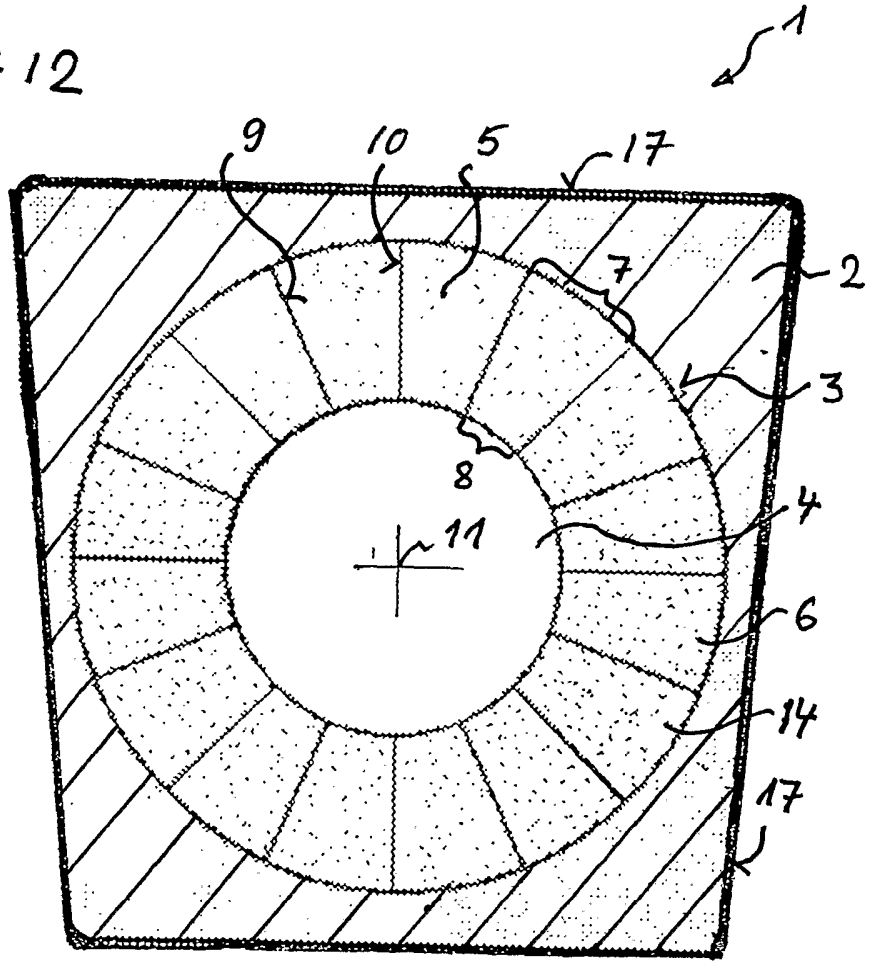


FIG 13

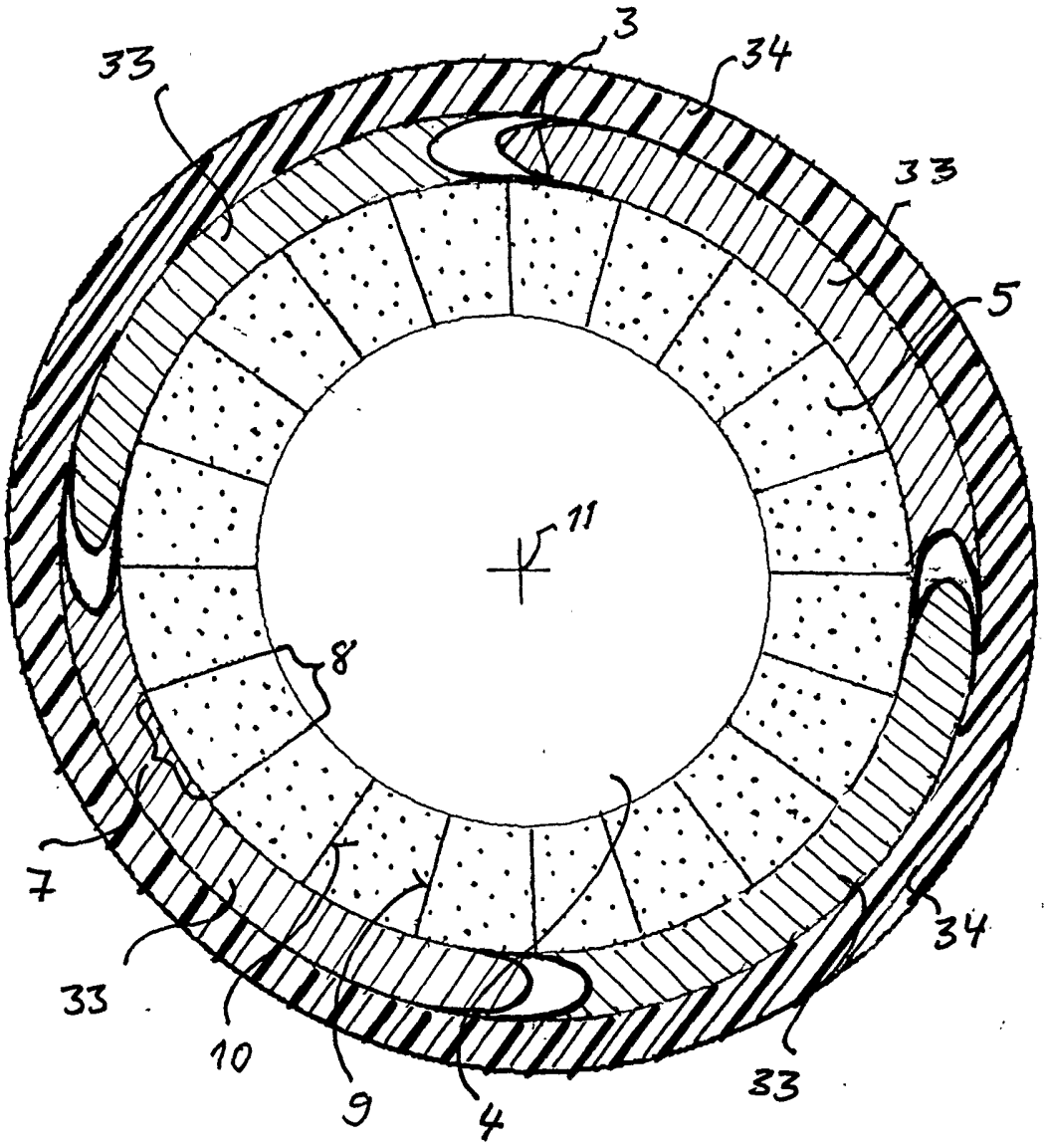


FIG 14a

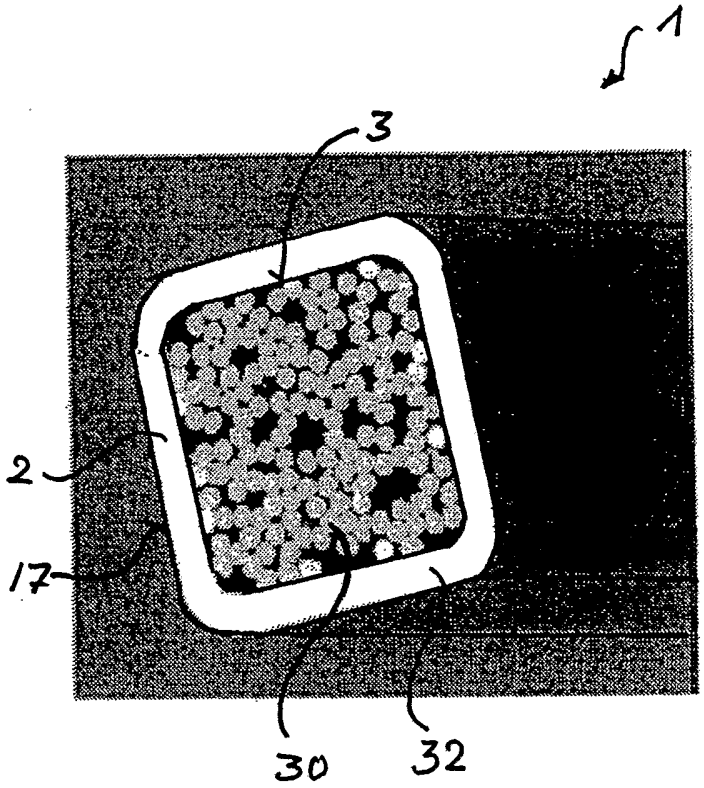


FIG 14b

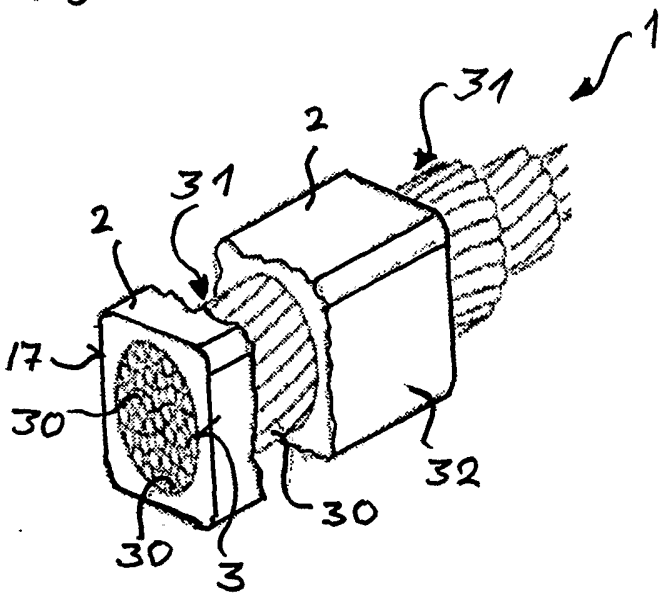


FIG 15a

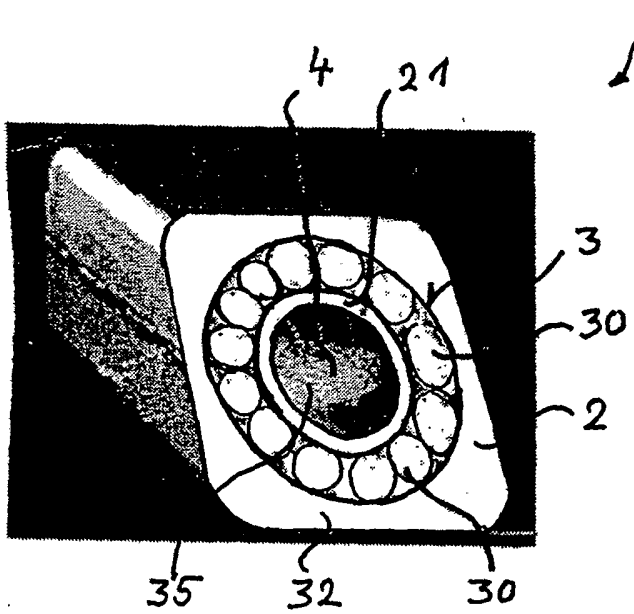


FIG 15b

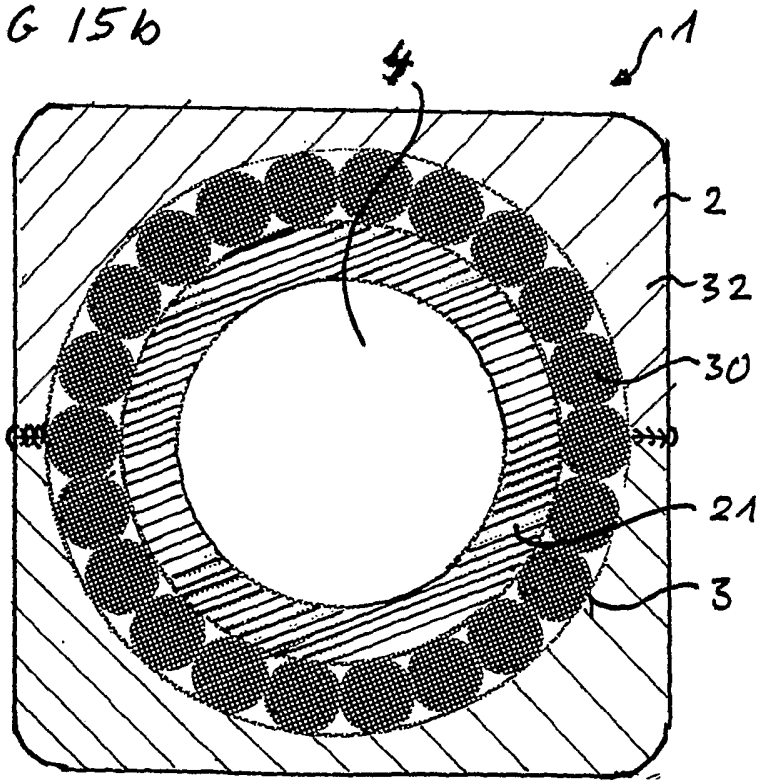


FIG 16a

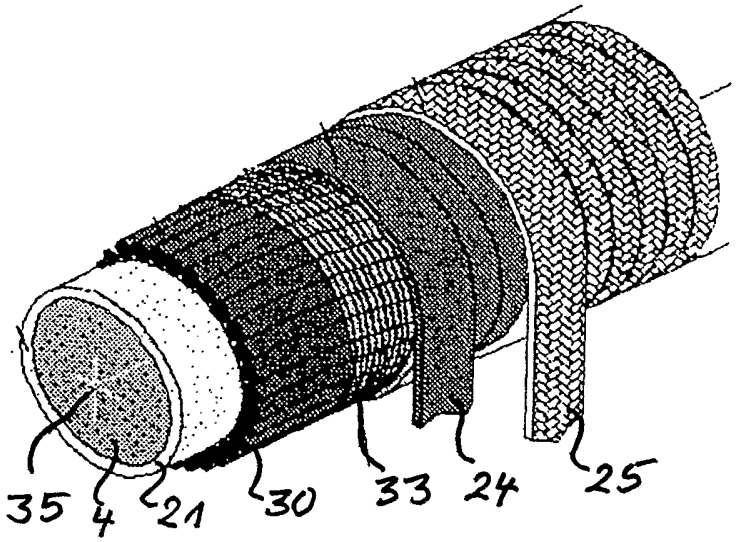


FIG 16b

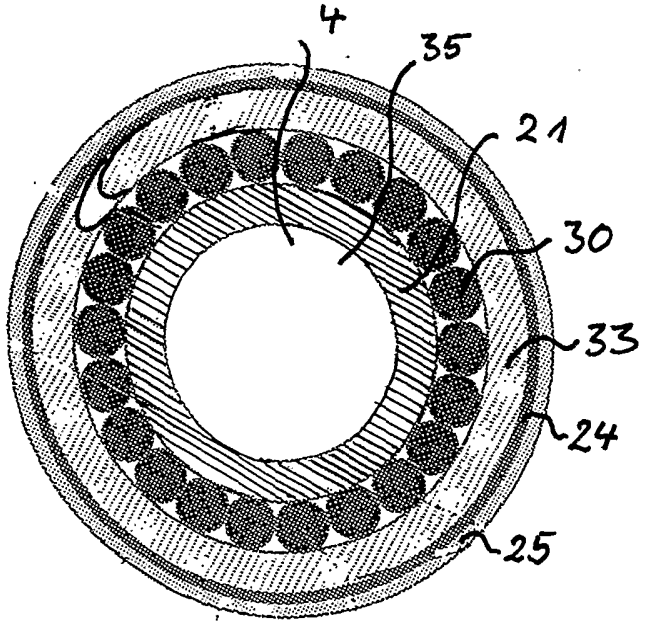
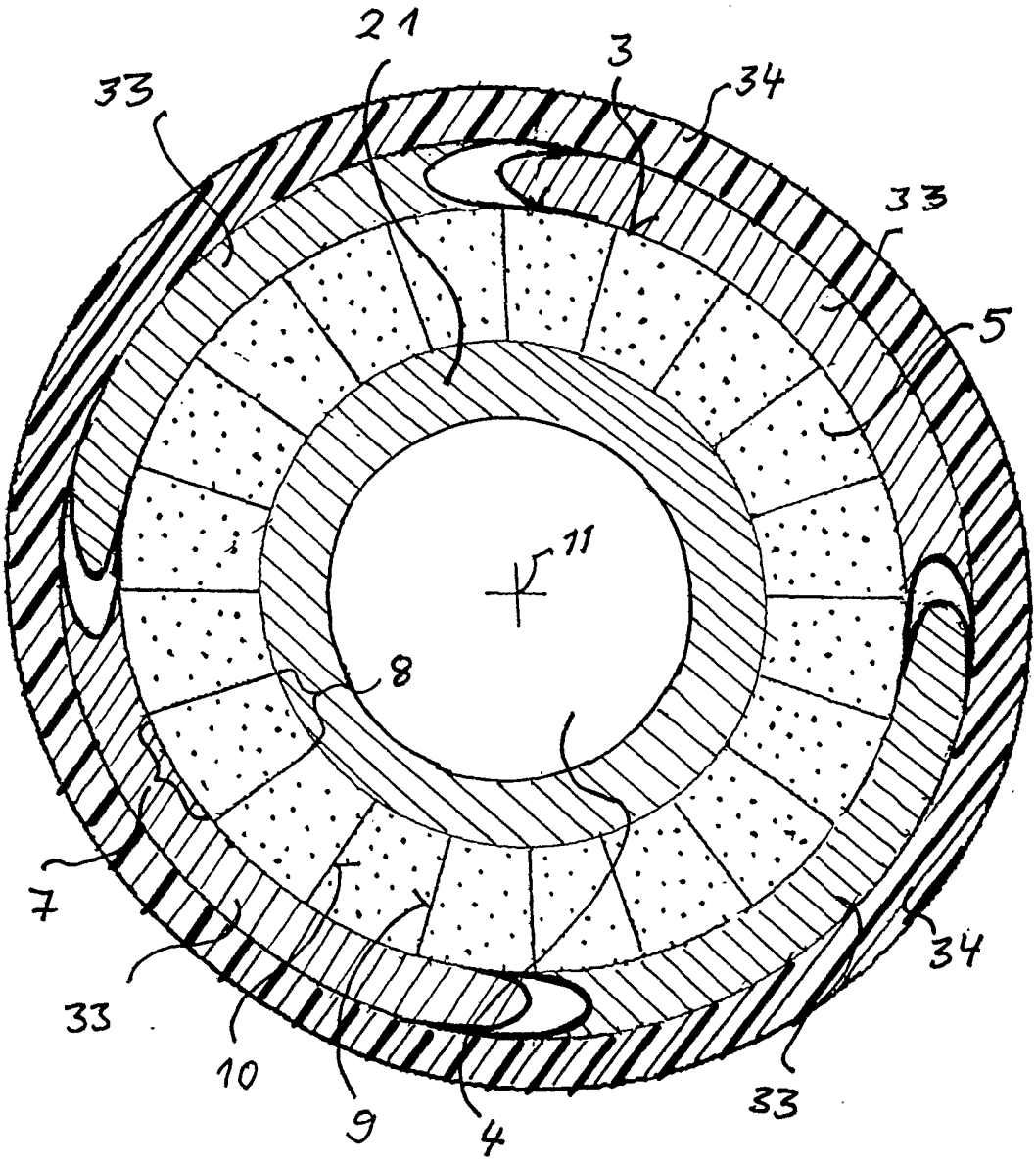


FIG 17



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2005/004420

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 H01B12/12 H01B12/10

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 H01B H01L H01F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	KHODZIBAJIYAN ET AL.: "Design of new hollow Superconducting NbTi cables" IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, vol. 13, no. 2, 30 June 2003 (2003-06-30), pages 3370-3373, XP008035534 cited in the application page 3371, column 2, line 9 - page 3372, column 1, line 12; figure 6	1-18
Y	US 2003/024730 A1 (SCHREIBER JEFFREY D ET AL) 6 February 2003 (2003-02-06) paragraph '0055!; figure 6	1-18
A	US 4 327 244 A (HORVATH IMRE ET AL) 27 April 1982 (1982-04-27) column 4, line 8 - line 12; figure 2	9

-/--

[X] Further documents are listed in the continuation of box C.

[X] Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
16 June 2005	04/08/2005

Name and mailing address of the ISA	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL – 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016	Colombo, A

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (January 2004)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2005/004420

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 3 623 221 A (BARBER ANTHONY CLIFFORD ET AL) 30 November 1971 (1971-11-30) column 3, line 20 - line 27; figure 3	2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No
PCT/EP2005/004420

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2003024730 A1	06-02-2003	AU 3512102 A	06-05-2002
		WO 0237581 A2	10-05-2002
		WO 0235614 A2	02-05-2002
		US 2003032560 A1	13-02-2003
US 4327244 A	27-04-1982	CH 648148 A5	28-02-1985
		DE 2908879 A1	14-08-1980
		FR 2448772 A1	05-09-1980
		GB 2044514 A ,B	15-10-1980
US 3623221 A	30-11-1971	GB 1126404 A	05-09-1968
		AT 272714 B	25-07-1969
		BE 698718 A	20-11-1967
		CH 460969 A	15-08-1968
		DE 1640527 B1	17-08-1972
		FR 1523688 A	03-05-1968
		NL 132696 C	
		NL 6706992 A	21-11-1967
		US 3472944 A	14-10-1969

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2005/004420

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 H01B12/12 H01B12/10

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 H01B H01L H01F

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie°	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	KHODZIBAJIYAN ET AL.: "Design of new hollow Superconducting NbTi cables" IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, Bd. 13, Nr. 2, 30. Juni 2003 (2003-06-30), Seiten 3370-3373, XP008035534 in der Anmeldung erwähnt Seite 3371, Spalte 2, Zeile 9 - Seite 3372, Spalte 1, Zeile 12; Abbildung 6	1-18
Y	US 2003/024730 A1 (SCHREIBER JEFFREY D ET AL) 6. Februar 2003 (2003-02-06) Absatz '0055!; Abbildung 6	1-18
A	US 4 327 244 A (HORVATH IMRE ET AL) 27. April 1982 (1982-04-27) Spalte 4, Zeile 8 - Zeile 12; Abbildung 2	9

-/--

[X] Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

[X] Siehe Anhang Patentfamilie

° Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
16. Juni 2005	04/08/2005

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde	Bevollmächtigter Bediensteter
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL – 2280 HV Rijswijk Tel. (+31–70) 340–2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31–70) 340–3016	Colombo, A

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie°	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 3 623 221 A (BARBER ANTHONY CLIFFORD ET AL) 30. November 1971 (1971-11-30) Spalte 3, Zeile 20 - Zeile 27; Abbildung 3	2

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2005/004420

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2003024730 A1	06-02-2003	AU 3512102 A	06-05-2002
		WO 0237581 A2	10-05-2002
		WO 0235614 A2	02-05-2002
		US 2003032560 A1	13-02-2003
US 4327244 A	27-04-1982	CH 648148 A5	28-02-1985
		DE 2908879 A1	14-08-1980
		FR 2448772 A1	05-09-1980
		GB 2044514 A ,B	15-10-1980
US 3623221 A	30-11-1971	GB 1126404 A	05-09-1968
		AT 272714 B	25-07-1969
		BE 698718 A	20-11-1967
		CH 460969 A	15-08-1968
		DE 1640527 B1	17-08-1972
		FR 1523688 A	03-05-1968
		NL 132696 C	
		NL 6706992 A	21-11-1967
		US 3472944 A	14-10-1969