



(11)

EP 3 179 485 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
14.06.2017 Patentblatt 2017/24

(51) Int Cl.:
H01B 9/00 (2006.01) **H01B 9/04 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: 16002409.7

(22) Anmeldetag: 14.11.2016

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
 Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
 Benannte Validierungsstaaten:
MA MD

(30) Priorität: 11.12.2015 DE 102015016088

(71) Anmelder: **Schmidt Hochstromtechnik GmbH**
47445 Moers (DE)
 (72) Erfinder: **Beermann, Sven**
45470 Mülheim (DE)
 (74) Vertreter: **Cohausz Hannig Borkowski Wißgott**
Patent- und Rechtsanwaltskanzlei
Schumannstrasse 97-99
40237 Düsseldorf (DE)

(54) HOCHLEISTUNGSKOAXIALKABEL

(57) Die Erfindung betrifft ein Koaxialkabel (1) zur Übertragung von Hochströmen im Bereich von mehreren hundert bis mehreren tausend Ampere bei Hochfrequenzen, insbesondere im Kilohertzbereich, mit einem ersten elektrischen Leiter (4) für eine erste Stromphase und einem koaxial zu diesem angeordneten zweiten elektrischen Leiter (7) für eine zweite Stromphase, die jeweils durch eine Anzahl ringförmig angeordneter Bündel (4a,

7a) aus einer Vielzahl gegeneinander isolierter Einzeldrähte gebildet sind, wobei zwischen dem ersten und zweiten Leiter (4, 7) eine elastische Isolationsschicht (5, 6) zur Verhinderung eines Spannungsüberschlags liegt. Dabei ist vorgesehen, dass die Bündel (4, 7a) des ersten und/ oder zweiten elektrischen Leiters (4, 7) ein Geflecht bilden. Hierdurch werden die induktiven Verluste reduziert und der effektiv nutzbare Leiterquerschnitt erhöht.

Stand der Technik

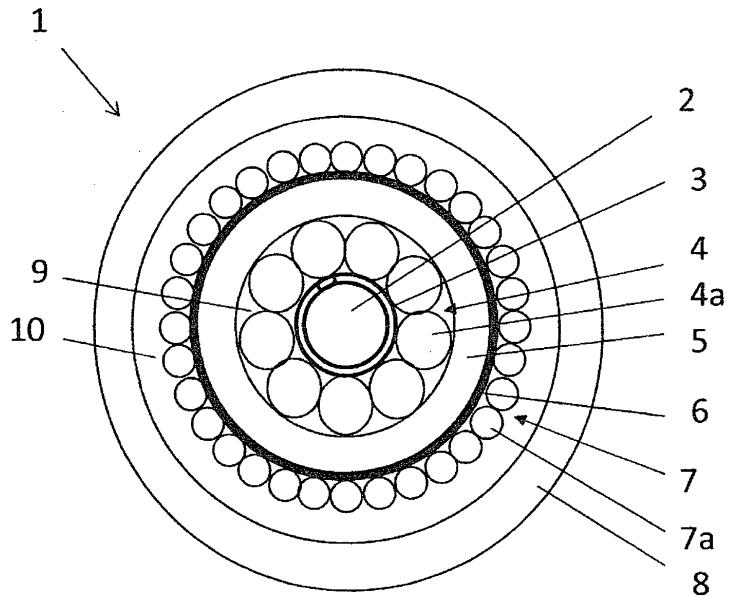


Fig. 1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Koaxialkabel zur Übertragung von Hochströmen im Bereich von mehreren hundert bis mehreren tausend Ampere bei Hochfrequenzen, insbesondere im Kilohertzbereich, mit einem ersten elektrischen Leiter für eine erste Stromphase und einem koaxial zu diesem angeordneten zweiten elektrischen Leiter für eine zweite Stromphase, die jeweils durch eine Anzahl ringförmig angeordneter Bündel aus einer Vielzahl gegeneinander isolierter Einzeldrähte gebildet sind, wobei zwischen dem ersten und zweiten Leiter eine elastische Isolationsschicht zur Verhinderung eines Spannungsüberschlags liegt. Insbesondere betrifft die Erfindung ein Kabel zur Übertragung hoher elektrischer Leistungen bis in den Megawattbereich.

[0002] Solche Hochleistungskoaxialkabel sind bekannt und werden vor allem zur industriellen induktiven Erwärmung, beispielsweise beim Schmelzen, Vergüten oder Anlassen von Stahl eingesetzt, bei der hohe Stromstärken zwischen 1.000-15.000 Ampere bei hoher Frequenz in der Regel von 4 kHz bis 150 kHz, in Extremfällen sogar bis zu 400 kHz über das Kabel geleitet werden. Dies muss unter minimalen Leistungsverlusten erfolgen. Heutige Kabel haben aber sowohl eine hohe Neigung zu induktiven als auch ohmschen Verlusten. Insbesondere der bei hohen Frequenzen auftretende Skin-Effekt führt zu hohen Spannungsabfällen im Kabel. Eine effektive Skin-Effekt-Reduzierung existiert bis heute nicht.

[0003] Es ist daher Aufgabe der vorliegenden Erfindung ein Hochleistungskoaxialkabel für Industrieanwendungen bereitzustellen, das geringere induktive Verluste besitzt und ferner einen gesteigerten nutzbaren Leiterquerschnitt im relevanten Frequenzband durch Reduzierung des Skineffekts aufweist.

[0004] Diese Aufgabe wird durch ein Hochleistungskabel mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen wiedergegeben und werden nachfolgend erläutert.

[0005] Erfindungsgemäß wird vorgeschlagen, das gatungsgemäße Koaxialkabel derart weiterzubilden, dass die Bündel des ersten und/oder zweiten elektrischen Leiters ein Geflecht bilden. Die Bündel sind folglich miteinander verflochten, d.h. regelmäßig ineinander geschlungen. Durch die Verwendung eines Geflechts werden die induktiven Verluste des Koaxialkabels sowie der Skin-Effekt reduziert, so dass eine bessere Leistungsausnutzung des Koaxialkabels besteht und letztendlich mehr Leistung zum Verbraucher transportiert werden kann.

[0006] Die Einzeldrähte sind vorzugsweise aus Kupfer, da Kupfer einen geringen spezifischen Widerstand aufweist. Hierdurch sind die ohmschen Verluste des Koaxialkabels gering.

[0007] Vorzugsweise kann jedes Bündel in dem Geflecht in seiner Erstreckungsrichtung abwechselnd jeweils zwei andere Bündel überkreuzen und unterkreuzen. Dies vereinfacht aufgrund der Vielzahl an Bündeln die Herstellung im Vergleich zu einem Geflecht, bei dem

jedes Bündel abwechselnd nur ein anderes Bündel überkreuzt und unterkreuzt. Sich kreuzende Bündel können in einem Flechtwinkel zwischen 30° und 60° liegen.

[0008] Die Isolation der Einzeldrähte kann beispielsweise durch einen Lack gebildet sein. Diese Isolation ist von entscheidender Bedeutung für die Reduzierung des Skin-Effekts. Da die Isolation der Einzeldrähte keine Isolation gegen Überschläge bei Potenzialunterschieden ist, kann als Lack ein üblicherweise bei dem Bau von Spulen und Transformatoren verwendeter Elektrolack verwendet werden. Ein Lack zur Isolation bildet eine sehr dünne Schicht, so dass der Durchmesser der Einzeldrähte nicht merklich erhöht ist.

[0009] Es ist des Weiteren von Vorteil, wenn die Einzeldrähte jedes Bündels um die Längsachse des jeweiligen Bündels gewunden sind, wie dies bei einem Seil der Fall ist. Dies führt dazu, dass die Bündel bei der Verarbeitung bzw. beim Flechten Bündel bleiben und sich die Einzeldrähte nicht vereinzeln.

[0010] Geeigneterweise können die Einzeldrähte einen Durchmesser von 0,1 mm bis 0,5mm aufweisen. Hierdurch können die Bündel eine Vielzahl, beispielsweise 20 bis 60 solcher Einzeldrähte aufweisen. Je kleiner der Durchmesser desto mehr Einzeldrähte können bei gleichem Leiterquerschnitt verwendet werden und je mehr Einzeldrähte verwendet werden, desto mehr kann der Strom aufgeteilt werden, und desto geringer ist der Skin-Effekt.

[0011] Um den Leiterquerschnitt zu verdoppeln, beispielsweise von 70mm² auf 140mm² können beispielsweise bei jedem der beiden Leiter zwei Geflechtlagen verwendet werden, so dass, wenn sowohl der erste als auch der zweite elektrische Leiter durch ein Geflecht aus Bündeln von Einzeldrähten gebildet ist, insgesamt vier solcher Geflechte in dem Koaxialkabel vorhanden sind. So kann folglich der erste und/oder der zweite elektrische Leiter von Bündeln aus einer Vielzahl gegeneinander isolierter Einzeldrähte gebildet sein, die in zwei konzentrischen Kreisen angeordnet sind, wobei die Bündel der beiden Kreise jeweils ein eigenes Geflecht bilden.

[0012] Vorzugsweise ist die elastische Isolationsschicht aus EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk) hergestellt. Dieses Material kennzeichnet sich durch hohe Isolationseigenschaften, so dass die Dicke der Isolationsschicht bei gleicher Isolationsleistung wie im Stand der Technik, geringer sein kann. Dies führt wiederum dazu, dass der erste und zweite elektrische Leiter näher beieinander liegen können, wodurch der induktive Verlust verringert wird.

[0013] Aufgrund der Hochleistung, die das erfindungsgemäße Koaxialkabel zu übertragen vermag, werden die elektrischen Leiter heiß. Zur Kühlung deshalb vorgesehen sein, das Koaxialkabel beispielsweise mit Wasser zu kühlen. Vorzugsweise liegen hierfür der erste und zweite elektrische Leiter in einer flüssigkeitsdurchströmmbaren Kammer ein. Dabei kann die Isolationsschicht eine erste flüssigkeitsdurchströmmbaren Kammer von einer zweiten flüssigkeitsdurchströmmbaren Kammer trennen.

[0014] Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung werden nachfolgend anhand eines Ausführungsbeispiels und der beigefügten Figuren erläutert. Es zeigen:

Figur 1: den prinzipiellen Aufbau eines wassergekühlten Koaxialkabels nach dem Stand der Technik

Figur 2: das Koaxialkabel nach Figur 1 mit Skin-Effekt

Figur 3: elektrisches Ersatzschaltbild eines Koaxialkabels

Figur 4: Darstellung des Geflechts aus Bündeln des zweiten Leiters

Figur 5: perspektivische Darstellung eines teilweise aufgeschnittenen Koaxialkabels gemäß der Erfindung

Figuren 5a, 5b: Darstellung beispielhafter Geflechtstrukturen

[0015] Figur 1 zeigt ein Koaxialkabel 1 zur Übertragung von Hochströmen im Kiloamperebereich, insbesondere im Bereich von mehreren hundert bis mehreren tausend Ampere, bei Hochfrequenzen im Kilohertzbereich, mit einem ersten elektrischen Leiter 4 für eine erste Stromphase und einem koaxial zu diesem angeordneten zweiten elektrischen Leiter 7 für eine zweite Stromphase, die jeweils durch eine Anzahl ringförmig angeordneter Bündel 4a, 7a aus einer Vielzahl Einzeldrähten gebildet sind, wobei zwischen dem ersten und zweiten Leiter 4, 7 eine elastische Isolationsschicht 5, 6 zur Verhinderung eines Spannungsüberschlags liegt. Ein solches Koaxialkabel ist Stand der Technik.

[0016] Wassergekühlte Koaxialkabel finden in der Hauptsache Anwendung in der industriellen induktiven Erwärmung, beispielsweise beim Schmelzen, Vergüten oder Anlassen von Stahl). Eine besondere Anforderung in diesem Bereich ist, dass hohe Stromstärken (1.000-15.000 Ampere) mit sehr hoher Frequenz (i.d.R. 4-150 kHz, in Extremfällen bis zu 400 kHz) zum Induktionswärmer geleitet werden müssen. Im Vergleich hierzu hat Haushaltsstrom lediglich eine Stromstärke von wenigen Ampere und eine Frequenz von 50 Hz.

[0017] Wichtigste Anforderung an stromleitende Kabel in diesem Bereich ist eine möglichst leistungsverlustfreie Durchleitung. Hierbei gilt es zwei Arten des Verlustes zu unterscheiden, da man kapazitive Verluste vernachlässigen kann. Erstens ist dies der ohmsche Verlust. Dies ist der Leistungsverlust, der durch den elektrischen Widerstand eines Leiters entsteht und zur Erwärmung des Leiters führt. Der ohmsche Widerstand wird in der Hauptsache durch das Material der Leiter bestimmt. Zweitens gibt es noch bei oben beschriebenen Anwendungen den induktiven Verlust. Dieser Verlust entsteht durch die Frequenz des Stroms, insbesondere dadurch, dass sich die zwei Phasen des Stroms bei steigender Frequenz gegenseitig negativ beeinflussen ("den Strom verdrängen").

[0018] Aufgrund der hohen Frequenzen, die im Bereich der induktiven Erwärmung benötigt werden, kommt

diesem Effekt im Bereich der industriellen induktiven Erwärmung eine besondere Bedeutung zu. Der Grund für diese Leistungsverluste ist der sogenannte Skin-Effekt, der dafür sorgt, dass bei steigender Frequenz der Strom den Leiter weniger stark durchdringt bzw. im Querschnitt betrachtet nur an der Oberfläche des Leiters fließt. Somit wird nur noch ein geringer Teil des Leiterquerschnitts zur Stromdurchleitung verwendet. Folge ist, dass eine große Strommenge durch einen sehr kleinen Querschnitt fließt.

5 Es kommt zu erhöhter Temperaturentwicklung bis hin zur Zerstörung des Leiters. Dies erhöht wiederum die Anforderungen an Leiter für hochfrequente Ströme.

[0019] Bei dem Koaxialkabel 1 nach Figur 1 besteht im Inneren ein Hohlraum 2, der durch ein mechanisches 10 Stützelement 2, beispielsweise durch eine Innenspirale 2 vorzugsweise aus Bronze begrenzt wird. Die Innenspirale 2 ist durch einen dicken Draht gebildet, der sich spiralförmig um die Kabelachse erstreckt, wie dies in Figur 15 zu sehen ist. Sie stützt den ersten elektrischen Leiter 4, nachfolgend auch Innenleiter 4 genannt, ab. Der Innenleiter 4 besteht aus einer Mehrzahl kreisförmig um die Innenspirale 3 angeordneten Bündeln 4a. Jedes Bündel 4a besteht wiederum aus einer Vielzahl Einzeldrähten aus Kupfer, nachfolgend auch Kupferdrähte genannt.

20 Kupfer wird hier verwendet, da es einen sehr geringen ohmschen Widerstand hat und somit ein sehr guter Leiter ist. Der Durchmesser der einzelnen Kupferdrähte beträgt 0,2mm. Die Kupferdrähte sind entlang der Längserstreckung des jeweiligen Bündels 4a, gewunden, so dass jedes Bündel 4a in der Art eines Seils ausgebildet ist. Nachfolgend werden die Bündel 4a deshalb auch als Kupferseilbündel bezeichnet.

[0020] Der Hohlraum 2 wird aus elektrotechnischen Gründen nicht benötigt, da er vom Strom nicht durchdrungen wird. Er dient jedoch als Kühlwasserleitung und sorgt somit für einen effizienteren Wärmeabtransport. Der innere Hohlraum 1 und der Ringraum, in dem die Seilbünde 4a des Innenleiters liegen, bilden gemeinsam eine innere Kühlwasserkammer 9.

35 **[0021]** In der Abfolge des Schichtaufbaus weiter radial außen liegend, folgt die elastische Isolationsschicht 5, die hier einen inneren Kühlenschlauch 5 und eine radial außen auf den Kühlenschlauch 5 aufgebrachte Schicht 6 umfasst. Der Kühlenschlauch 5 umgibt den Innenleiter 4

40 ringförmig und begrenzt die innere Kühlwasserkammer 9 nach außen hin. Als nächstes folgt der zweite Leiter 7, nachfolgend Außenleiter 7 genannt, der aus einer Vielzahl kreisförmig angeordneter Bündel 7a besteht, welche wiederum aus einer Vielzahl einzelner Drähte gebildet 45 sind. Die Bündel 7a des zweiten Leiters 7 können gleich zu denjenigen des ersten Leiters 4 gebildet sein, sodass auch hier von Kupferdrähten und Kupferseilbündeln 7a gesprochen werden kann.

50 **[0022]** Der Außenleiter 7 liegt in einer äußeren Kühlwasserkammer 10 in Form eines Ringraums ein. Ein äußerer Kühlenschlauch 8 begrenzt die äußere Kühlwasserkammer 10 radial nach außen. Dieser bildet die äußerste Schicht des Koaxialkabels 1. Er isoliert das Kabel folglich

elektrisch und schützt vor mechanischer und chemischer Einwirkung. Die Isolationsschicht, d.h. der innere Kühlenschlauch 5 samt seiner außen aufgebrachten Schicht, erfüllen die Aufgabe eines Dielektrikums und trennen die beiden Stromphasen im zweiten Leiter 7 und ersten Leiter 4 voneinander. Darüber hinaus trennen sie die beiden Kühlwasserkammern 9, 10 von einander.

[0023] Sowohl die innere Kühlwasserkammer 9, d.h. der innere Hohrraum 2 samt dem Raum um den Innenleiter 4, als auch die äußere Kühlwasserkammer 10, d.h. der Raum um den Außenleiter 7 sind kühlwasserdurchströmt, um die auf Grund der hohen Stromstärke, der hohen Frequenz und dem hierin begründeten Skin-Effekt entstehende Hitze ableiten zu können. Diese Kühlfähigkeit ist auch ein entscheidender Faktor für die Leistungseffizienz eines solchen Kabels 1. Denn je mehr Hitze abgeleitet werden kann, desto mehr Strom kann durch ein solches Kabel 1 geleitet werden.

[0024] Ein wichtiger, die Tragfähigkeit des Kabels 1 begrenzender Faktor, ist der Skin-Effekt. Er sorgt dafür, dass die beiden Leiter 4, 7 nur oberflächlich durchströmt werden und zwar wegen der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen den beiden Leitern 4, 7 der äußere Teil des Innenleiters 4 und der innere Teil des Außenleiters 7, was in Abbildung 2 dargestellt ist. Die Folge dessen ist, dass jeweils nur ein geringer Teil des tatsächlichen Querschnitts der Seilbündel 4a, 7a stromdurchflossen ist. Somit fließt bei einem hochfrequenten Strom viel Strom durch einen relativ kleinen Querschnitt des jeweiligen Leiters 4, 7, was zu einer deutlich erhöhten Hitzeentwicklung und somit Belastung des Kabels 1 führt.

[0025] Figur 3 zeigt das elektrische Standardschaltbild für ein Koaxialkabel 1, bei dem ein Verbraucher 11 beispielsweise in Gestalt eines Induktionsofens, der elektrisch im Wesentlichen eine Spule ist, zwischen den Innenleiter 4 und den Außenleiter 7 geschaltet ist. Der Innenleiter 4 und der Außenleiter 7 können jeweils Strom einer Phase eines Dreiphasennetzes führen, wobei die Phasen 120° gegeneinander verschoben sein können. Der dargestellte Stand der Technik geht mit verschiedenen Nachteilen einher:

[0026] Beispielsweise besitzen die Kabel 1 induktive Verluste, die heute durchschnittlich bei etwa 10 % Spannungsabfall liegen (bezogen auf die üblichen eingesetzten Längen). Dies liegt zum einen am Skin-Effekt, der stets vorhanden ist, d.h. es wird nur ein relativ kleiner Anteil der tatsächlichen Leiterquerschnitte für die Durchleitung von Strom verwendet. Es wird geschätzt, dass dieser Anteil heute im relevanten Frequenzband im Durchschnitt nur bei ca. 20% liegt. Umgekehrt bedeutet dies, dass fast 80% des Kabelquerschnitts tatsächlich gar nicht für den Stromfluss verwendet wird. Zum anderen ist eine zu geringe Isolierung Schuld. Denn aufgrund von wenig hochohmig isolierenden Gewebeeinlagen in den zur Isolation genutzten Kühlschläuchen 5, 8 müssen weite Abstände zwischen dem Innenleiter 4 und dem Außenleiter 7 gewählt werden, um Überschläge zu verhindern. Würden die beiden Leiter 4, 7 aber näher zusam-

men liegen, würden sich die vom jeweiligen Leiter 4, 7 erzeugten elektromagnetischen Felder mehr auslösen, so dass weniger Energie in diese Felder fließt. Für eine maximale Leistungseffizienz wäre folglich ein minimaler Abstand erforderlich.

[0027] Bei einem Beispielkabel mit einem Durchmesser von 80 mm, einer Länge von 15 m, einer Frequenz von 5 kHz, bei 40°C , einer Eingangsstromstärke von 4700 A und einer Eingangsspannung von 1.000 V beträgt der Spannungsabfall aufgrund des induktiven Verlustes ca. 79 V und der aufgrund des ohmschen Widerstandes ca. 13V.

[0028] Das erfindungsgemäße Koaxialkabel 1 bildet das Koaxialkabel gemäß Figur 1 nun dahingehend weiter, dass die Einzeldrähte gegeneinander lackisiert sind und die Bündel 4a, 7a des ersten und zweiten elektrischen Leiters 4, 7 ein Geflecht 12 bilden, was in verschiedenen Punkten zu Vorteilen führt. Figur 4 zeigt eine Draufsicht auf das Geflecht 12, aus dem der zweite Leiter 7 gebildet ist.

[0029] Zum einen ist eine hohe mechanische Flexibilität der elektrischen Leiter 4, 7 gegeben, da die sich regelmäßig kreuzenden Bündel 4a, 7a eines Leiters 4, 7 gegeneinander beweglich sind. Dabei ist besonders hervorzuheben, dass sie sich an jede Biegelage des Koaxialkabels 1 faltenfrei anpassen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Koaxialkabeln 1 nach Figur 1 kommt es nicht dazu, insbesondere aufgrund der Stauchung des Kabels innenseitig einer Biegung, dass ein Bündel des zweiten elektrischen Leiters von der Isolationsschicht abhebt, d.h. eine Schlaufe oder Falte wirkt. Dies hätte Inhomogenitäten in dem durch die einzelnen Einzeldrähte erzeugten elektromagnetischen Feld zur Folge und würde lokal zu einem größeren induktiven Verlust führen, weswegen das betroffene Bündel vom Strom gemieden werden würde. Durch die Verwendung eines Geflechts 12 wird jedoch im Mittel stets ein konstanter Abstand der beiden elektrischen Leiter 4, 7 zueinander beibehalten.

[0030] Elektrotechnisch ist das Geflecht 12 von besonderer Bedeutung. Denn von der Gesamtheit und Gesamtzahl der Bündel 4a, 7a verlaufen die eine Hälfte der Bündel 4a, 7a schraubenförmig im Uhrzeigersinn um die Längsachse des Koaxialkabels 1, die andere Hälfte der Bündel 4a, 7a schraubenförmig gegen den Uhrzeigersinn um die Längsachse, so dass zwischen den sich kreuzenden Bündeln 4a, 7a ein Flechtwinkel liegt, der im Fall der Ausführungsvariante in Figur 4 etwa 50° beträgt. Dies bewirkt, dass sich die elektromagnetischen Felder um die einzelnen Bündel abschwächen, was wiederum einen Beitrag zur Reduzierung der induktiven Verluste leistet.

[0031] Die einzelnen Bündel 4a, 7a sind nicht gesondert ummantelt. Dies hat zum Vorteil, dass sie in ihrer Querschnittsform nicht festgelegt sind. So sind die Einzeldrähte im Querschnitt der Bündel 4a, 7a betrachtet nicht kreisrund angeordnet sondern annähernd oval. D.h. dass die Bündel 4a, 7a sind eher flach ausgebildet, was eine Wirkung des axialen Zuges am Koaxialkabel

bzw. an dem jeweiligen Geflecht 12 ist. Hierdurch liegen die Bündel 4a, 7a dicht aneinander, so dass keine offenen Maschen bestehen. Das Geflecht 12 bewirkt insgesamt ein absolut dichtes elektromagnetisches Feld mit geringer Streuwirkung, was ebenfalls die induktiven Verluste des Koaxialkabels 1 reduziert.

[0032] Schließlich ist räumlich noch zu berücksichtigen, dass die Geflechte 12 zu einem lokal höheren Füllgrad in dem jeweiligen Ringraum des Koaxialkabels 1 führen, in dem der erste bzw. zweite Leiter 4, 7 liegt, weil der Querschnitt der Bündel 4a, 7a auf den Umfang des jeweiligen Leiters 4, 7 verteilt ist. Dies kann man sich leicht anhand Figur 1 klar machen, wenn man berücksichtigt, dass bei kreisrunden Bündeln 4a, 7a Freiräume bildende Zwickel zwischen zwei benachbarten Bündeln 4a, 7a und der Isolationsschicht 5, 6 liegen. Bei kreisrunden Bündeln 4a, 7a wie sie in Figur 1 vorhanden sind, entspricht die radiale Dicke der elektrischen Leiter 4, 7 jeweils dem Durchmesser der Bündel 4a, 7a, wobei zwischen zwei benachbarten Bündeln 4a, 7a jeweils von den elektrischen Leitern 4, 7 ungenutzte Zwickel liegen.

[0033] Gegenüber einer solchen Anordnung sind die einzelnen Einzeldrähte der Bündel 4a, 7a des ersten und zweitens Leiters 4, 7 jeweils homogen auf den entsprechenden elektrischen Leiter 4, 7 tragenden Ring im Querschnitt des Koaxialkabels 1 verteilt, so dass nahezu vollumfänglich die gesamte radiale Dicke des jeweiligen Ringraums mit den Einzeldrähten ausgefüllt ist. Dies bewirkt wiederum, dass die radiale Dicke des jeweiligen Ringraums mit geflochtenen Bündeln 4a, 7a gemäß Figur 4 bei gleichem Leiterquerschnitt kleiner ist, als im Falle der runden Bündel 4a, 7a in Figur 1. Dies hat zum Vorteil, dass der erste und der zweite elektrische Leiter 4, 7 näher aneinander liegen, d.h. einen geringeren radialen Abstand zueinander haben. Der radiale Abstand ist maßgeblich für die Höhe der induktiven Verluste, so dass aufgrund des geflechtbedingt geringeren Leiterabstands die induktiven Verluste auf ein Minimum reduziert werden.

[0034] Das Geflecht 12 aus Bündeln 4a, 7a des ersten und/ oder zweiten elektrischen Leiters 4, 7 führt zudem zu einer Reduzierung des Skin-Effekts und folglich zu einer Erhöhung der stromdurchflossenen Querschnittsfläche, so dass das Koaxialkabel 1 mehr Strom/ Leistung zum Verbraucher 11 führen kann, als vergleichbare Kabel nach dem Stand der Technik. Dies lässt sich damit erklären, dass bei dem Geflecht 12 der Abstand jedes Bündels 4a, 7a von der Achse des Koaxialkabels 1 in radialer Richtung betrachtet annähernd sinusförmig variiert. Wenn ein Bündel 4a, 7a ein anderes Bündel überkreuzt, liegt es radial weiter außen, wenn es ein anderes Bündel unterkreuzt, liegt es radial weiter innen. Damit verändert sich auch der Abstand jedes Bündels 4a, 7a des einen elektrischen Leiters 4, 5 in Erstreckungsrichtung relativ gesehen zum anderen elektrischen Leiter 7, 4.

[0035] Wie bezüglich Figur 4 erläutert, kommt es jedoch dazu, dass der Strom nur im radial außen liegenden

Oberflächenbereich des ersten elektrischen Leiters 4 und im radial innen liegenden Oberflächenbereich des zweiten elektrischen Leiters 7 fließt. Je höher die Frequenz ist, desto geringer ist die Eintauchtiefe des Stroms.

5 Dadurch, dass jeder Einzeldraht in seiner Erstreckungsrichtung mal mehr und mal weniger weit weg ist vom jeweils anderen Leiter 4, 7, sich zudem auch um die Längsachse des jeweiligen Bündels 4a, 7a windet, und zudem der Strom in jedem Einzeldraht "gefangen" ist, wird die Eintauchtiefe des Stroms im Vergleich zu nichtisolierten Einzeldrähten erhöht. Somit ist auch der effektive Leitungsquerschnitt, der den Strom führt, größer. Dadurch wird die Belastung des ersten und zweiten elektrischen Leiters 4, 7 reduziert bzw. kann bei gleicher Belastung ein höherer Strom durch das Koaxialkabel 1 geführt werden.

10 **[0036]** Wie man anhand von Figur 4 erkennen kann, überkreuzt und unterkreuzt jedes Bündel 4a, 7a in dem Geflecht 12 in seiner Erstreckungsrichtung abwechselnd jeweils zwei andere Bündel 4a, 7a.

15 **[0037]** Die Isolation der Einzeldrähte in den einzelnen Bündeln 4a, 7a gegeneinander erfolgt durch Elektrolack, beispielsweise Polyethylen, und hat besondere Bedeutung für die Reduzierung des Skin-Effekt. Denn durch die Isolation wirken die Einzeldrähte nicht wie ein einziger elektrischer Leiter, in dem der Strom "überall" hin kann. Jedes Bündel ist vielmehr die Summe einzelner Drähte, aus denen ein Strom -abgesehen vom Axialende- nicht herausfließen kann. Dies führt dazu, dass sich der Strom bei den hohen Frequenzen nicht an der Oberfläche eines Bündels "sammeln" kann, sondern allenfalls an der Oberfläche eines Drahtes. Insgesamt wird dadurch der effektive vom Strom genutzte Querschnitt der elektrischen Leiter 4, 7 erhöht.

20 **[0038]** Bei dem erfindungsgemäßen Koaxialkabel 1 ist die Isolationsschicht 5, 6 zwischen dem ersten elektrischen Leiter 4 und dem zweiten elektrischen Leiter 7 durch einen Schlauch aus EPDM (Ethylenglykolether-Kautschuk) hergestellt. Dieses Material ist diffusionsdicht und elektrisch gut isolierend, sodass der radiale Abstand der beiden elektrischen Leiter 4, 7 kleiner ist als beim Stand der Technik gemäß Figur 1.

25 **[0039]** Figur 5 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Koaxialkabels 1 in perspektivischer Ansicht, wobei eine teilweise schematische Darstellung gewählt und ein Teil des Kabels 1 aufgeschnitten ist, um den inneren Aufbau erkennen zu können, der im Wesentlichen dem Aufbau in den Figuren 1 und 2 entspricht. Das axiale Ende des Koaxialkabels 1 weist einen Anschlusskopf 13 auf, um das Kabel 1 mit einem Verbraucher 11 oder einer Spannungsquelle, beispielsweise einem Transformator, zu verbinden. Im Anschlusskopf erfolgt die Einspeisung des Stroms in die einzelnen Bündel 4a, 7a des ersten und zweiten elektrischen Leiters 4, 7.

30 **[0040]** Schematisch sind in Figur 5 die den ersten und zweiten elektrischen Leiter 4, 7 bildenden Schichten dargestellt, die jeweils durch eine Anzahl ringförmig angeordneter Bündel 4a, 7a aus einer Vielzahl gegeneinander

isolierter Einzeldrähte gebildet sind. Gegenüber dem Stand der Technik sind die Schichten jedoch erfindungsgemäß als Geflecht 12 ausgebildet. Eine vergrößerte und schematische Darstellung zweier beispielhafter Geflechtstrukturen ist in Figuren 5a und 5b dargestellt. Figur 5a zeigt eine einfache Geflechtstruktur, bei der jedes Bündel 4a, 7a ein einziges kreuzendes Bündel 4a, 7a abwechselnd überberückt und unterbrückt. Demgegenüber zeigt Figur 5b die Geflechtstruktur aus Figur 4, bei der jedes Bündel 4a, 7a zwei kreuzende Bündel 4a, 7a abwechselnd überberückt und unterbrückt. Es sei allerdings angemerkt, dass bei den Geflechten 12 in den Figuren 5a und 5b ein Geflechtwinkel von etwa 90° vorliegt, wohingegen ein geringerer Geflechtwinkel bevorzugt ist, um eine einfache Verbindung der Bündel mit dem Anschlusskopf zu erreichen. Rein schematisch ist hier jedes Bündel durch drei Einzeldrähte repräsentiert, obgleich jedes Bündel aus einer Vielzahl von Einzeldrähten besteht.

[0041] Ein weiterer Unterschied der Variante in Figur 5 gegenüber dem Kabel in Figuren 1 und 2 besteht darin, dass sowohl der Innenleiter 4 als auch der Außenleiter 7 jeweils aus zwei Geflechten 12 besteht. Der erste und der zweite elektrische Leiter 4, 7 sind jeweils aus Bündeln 4a, 7a gebildet, die in zwei zueinander konzentrischen Kreisen angeordnet sind. Dabei bilden die Bündel 4, 7a der beiden Kreise jeweils ein eigenes Geflecht 12. Es liegen folglich zwei Geflechte 12 übereinander. So hat der Außenleiter 7 ein inneres Geflecht 7.1 und ein äußeres Geflecht 7.2 und der Innenleiter 4 ein inneres Geflecht 4.1 und ein äußeres Geflecht 4.2. Während ein einziges Geflecht beispielsweise zu einem Leiterquerschnitt von 70mm² führt, kann dieser Leiterquerschnitt durch eine zweite Geflechtlage beispielsweise auf 140mm² verdoppelt werden.

[0042] Mit dem erfindungsgemäßen Hochleistungskoaxialkabel ist erstmals eine weiterführende Skin-Effekt-Reduzierung integriert zur Steigerung der Effizienz für industrielle Anwendungen. Dabei werden die induktiven Verluste um bis zu 50% reduziert und der nutzbare Leiterquerschnitt im relevanten Frequenzband von ca. 20% auf bis zu 35% gesteigert.

[0043] Von besonderem Vorteil ist der modulare Aufbau des Koaxialkabels 1, da es mehrere Möglichkeiten gibt, eine entsprechende Anpassung des Leiterquerschnitts an eine bestimmte Verwendung vorzunehmen. So ist der Querschnitt der elektrischen Leiter in erster Linie dadurch definiert,

- wie viele Bündel in Umfangsrichtung vorhanden sind, wodurch u.a. der Kabeldurchmesser beeinflusst wird,
- wie viele Drähte jedes Bündel hat, wodurch letztendlich der Durchmesser der einzelnen Bündel beeinflusst wird,
- welchen Durchmesser die Einzeldrähte haben, und
- wie viele Geflechtlagen übereinander liegen.

[0044] Durch entsprechende Wahl dieser Parameter kann das erfindungsgemäße Koaxialkabel an jede Anwendung angepasst werden, so dass weder eine teure Überdimensionierung noch eine risikobehaftete Unterdimensionierung erfolgen kann.

Bezugszeichenliste

[0045]

- | | |
|----|--|
| 5 | [0044] Durch entsprechende Wahl dieser Parameter kann das erfindungsgemäße Koaxialkabel an jede Anwendung angepasst werden, so dass weder eine teure Überdimensionierung noch eine risikobehaftete Unterdimensionierung erfolgen kann. |
| 10 | Bezugszeichenliste |
| 15 | [0045] |
| 20 | 1 Koaxialkabel
2 Innerer Hohlraum
3 Innenspirale
4 Innenleiter
4a Seilbündel des Innenleiters
4.1 inneres Geflecht des Innenleiters
4.2 äußeres Geflecht des Innenleiters
5 Innerer Kühlenschlauch
6 Isolationsschicht
7 Außenleiter
7a Seilbündel des Außenleiters
7.1 inneres Geflecht des Außenleiters
7.2 äußeres Geflecht des Außenleiters
8 Äußerer Kühlenschlauch
9 Innere Kühlwasserkammer
10 Äußere Kühlwasserkammer
11 Spule, Verbraucher, Induktionsofen
12 Geflecht
13 Anschlusskopf |
| 25 | |
| 30 | |

Patentansprüche

- | | |
|----|--|
| 35 | 1. Koaxialkabel (1) zur Übertragung von Hochströmen im Bereich von mehreren hundert bis mehreren tausend Ampere bei Hochfrequenzen, insbesondere im Kilohertzbereich, mit einem ersten elektrischen Leiter (4) für eine erste Stromphase und einem koaxial zu diesem angeordneten zweiten elektrischen Leiter (7) für eine zweite Stromphase, die jeweils durch eine Anzahl ringförmig angeordneter Bündel (4a, 7a) aus einer Vielzahl gegeneinander isolierter Einzeldrähte gebildet sind, wobei zwischen dem ersten und zweiten Leiter (4, 7) eine elastische Isolationsschicht (5, 6) zur Verhinderung eines Spannungsüberschlags liegt, dadurch gekennzeichnet, dass die Bündel (4, 7a) des ersten und/ oder zweiten elektrischen Leiters (4, 7) ein Geflecht (12) bilden. |
| 40 | |
| 45 | |
| 50 | 2. Koaxialkabel (1) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass jedes Bündel (4a, 7a) in dem Geflecht (12) in seiner Erstreckungsrichtung abwechselnd jeweils zwei andere Bündel (4a, 7a) überkreuzt und unterkreuzt. |
| 55 | |
| 60 | 3. Koaxialkabel (1) nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Isolation der Einzeldrähte durch einen Lack, insbesondere Elektrolack ge- |

bildet ist.

4. Koaxialkabel (1) nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einzeldrähte jedes Bündels (4a, 7a) um die Längsachse des jeweiligen Bündels (4a, 7a) gewunden sind. 5
5. Koaxialkabel (1) nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einzeldrähte einen Durchmesser von 0,1 mm bis 0,5mm aufweisen. 10
6. Koaxialkabel (1) nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zwei sich kreuzende Bündel (4a, 7s) in einen Flechtwinkel zwischen 30° und 60° zueinander liegen, 15
7. Koaxialkabel (1) nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die elastische Isolationsschicht aus EPDM hergestellt ist. 20
8. Koaxialkabel (1) nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der erste und/ oder der zweite elektrische Leiter (4, 7) von Bündeln (4a, 7a) aus einer Vielzahl gegeneinander isolierter Einzeldrähte gebildet sind, die in zwei konzentrischen Kreisen angeordnet sind, wobei die Bündel (4, 7a) der beiden Kreise jeweils ein eigenes Geflecht (12) bilden. 25
9. Koaxialkabel (1) nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der erste und zweite elektrische Leiter (4, 7) in einer flüssigkeitsdurchströmmbaren Kammer (9, 10) einliegen. 30

35

40

45

50

55

Stand der Technik

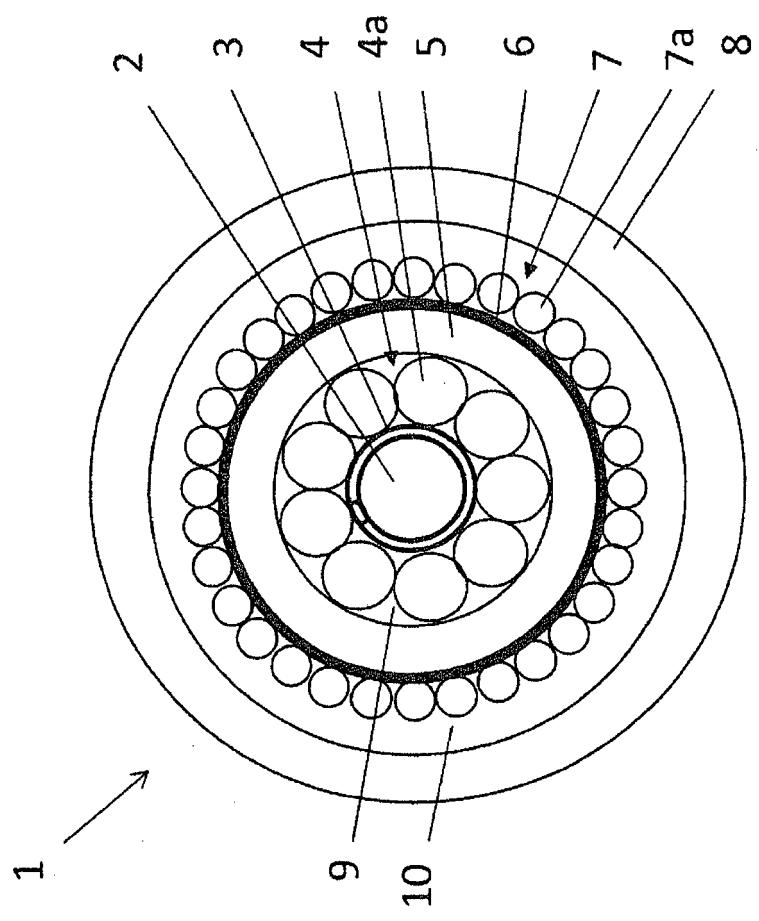


Fig. 1

Stand der Technik

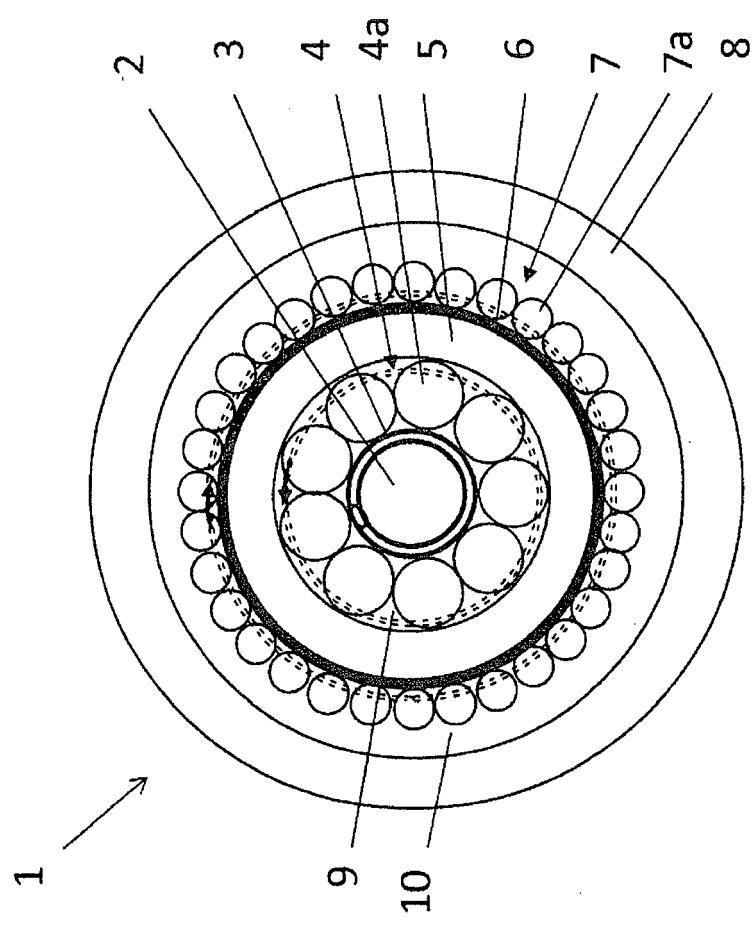


Fig. 2

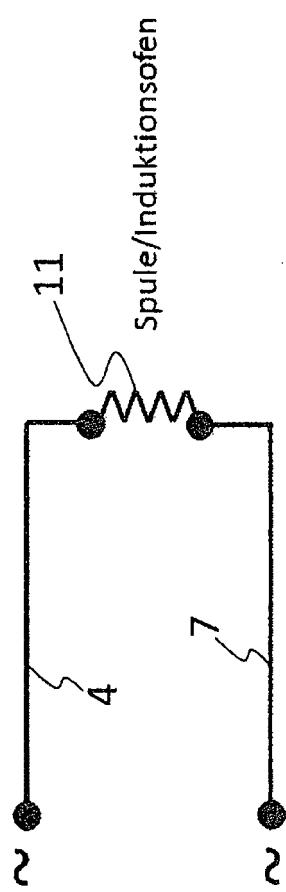


Fig. 3

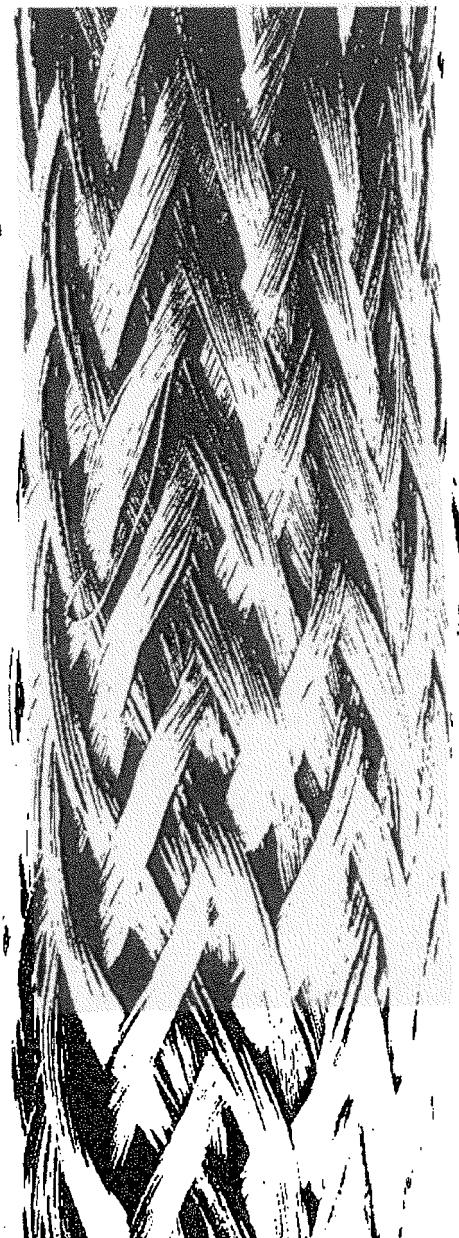
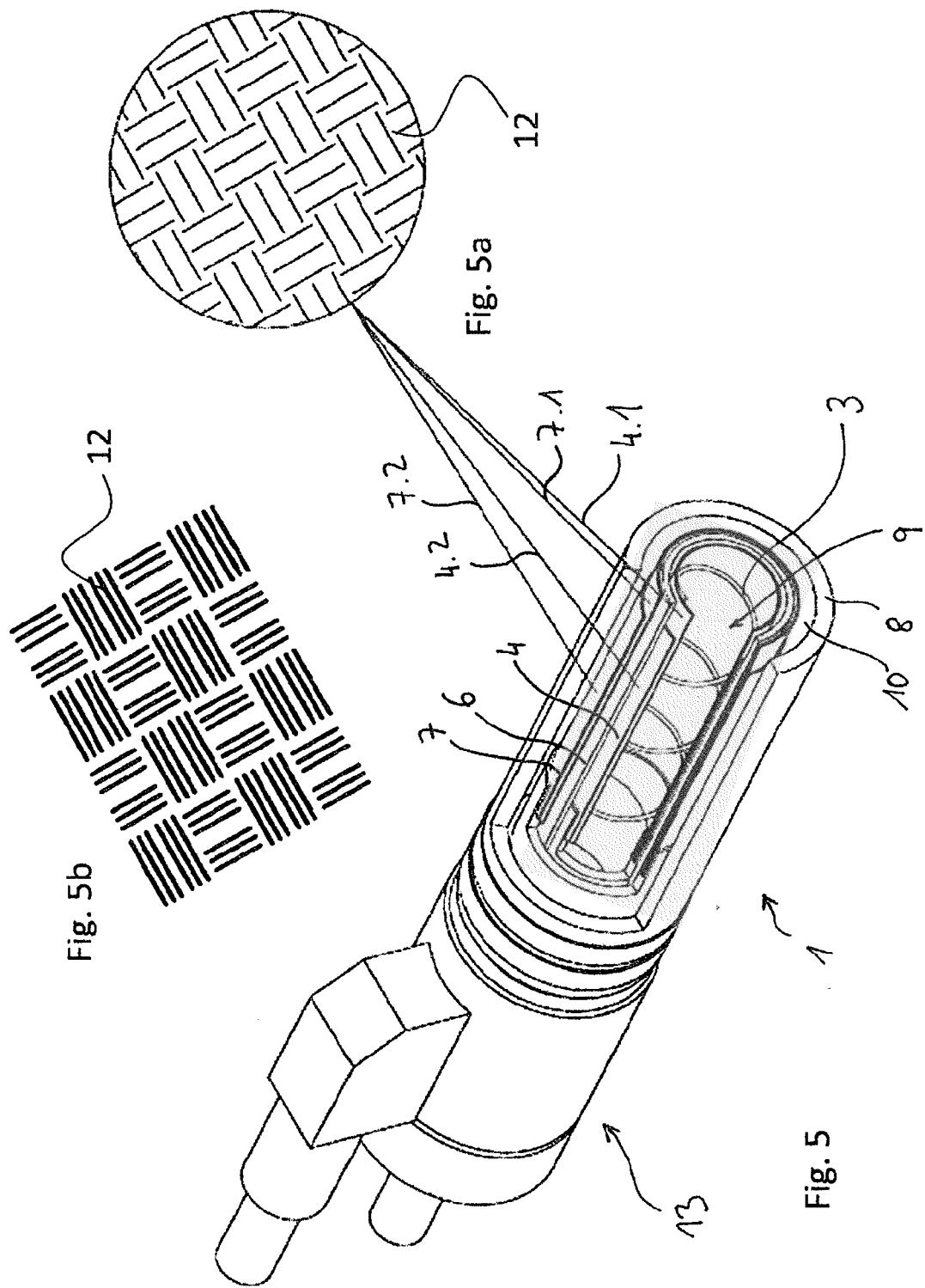


Fig. 4





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 16 00 2409

5

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrieff Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
10 Y	EP 0 823 766 A1 (SUMITOMO WIRING SYSTEMS [JP]; SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES [JP]) 11. Februar 1998 (1998-02-11) * Spalte 3, Zeile 45 * * Spalte 5, Zeile 2 - Zeile 21 * * Abbildungen 4, 8 * -----	1-9	INV. H01B9/00 ADD. H01B9/04
15 Y	DE 20 2010 006735 U1 (ERNST & ENGBRING GMBH & CO KG [DE]) 5. August 2010 (2010-08-05) * Absätze [0006] - [0008], [0011] - [0013] * * Abbildungen 1, 2 *	1-9	
20 A	JP H10 40745 A (SUMITOMO WIRING SYSTEMS; SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES) 13. Februar 1998 (1998-02-13) * Absatz [0012] * * Abbildungen 1, 2 *	1	
25 A	FR 943 162 A (FROMENTY LOUIS) 1. März 1949 (1949-03-01) * Seite 1, Zeile 41 - Seite 2, Zeile 3 * * Abbildung 1 *	1	RECHERCHIERTE SACHGEBiete (IPC)
30 A	US 5 298 682 A (SALZ DAVID B [US]) 29. März 1994 (1994-03-29) * Spalte 3, Zeile 6 - Zeile 12 * * Abbildungen 1, 2 *	1	H01B
35			
40			
45			
49			
50 14	Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt		
	Recherchenort Den Haag	Abschlußdatum der Recherche 10. April 2017	Prüfer Hillmayr, Heinrich
	KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE		
	X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur	T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	
55	EPO FORM 1503 03-82 (P04C03)		

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 16 00 2409

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten
Patentdokumente angegeben.
Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

10-04-2017

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
15	EP 0823766 A1 11-02-1998	CN 1175777 A 11-03-1998 EP 0823766 A1 11-02-1998 JP H10106362 A 24-04-1998		
20	DE 202010006735 U1 05-08-2010	DE 202010006735 U1 05-08-2010 EP 2569780 A1 20-03-2013 WO 2012062238 A1 18-05-2012		
25	JP H1040745 A 13-02-1998	KEINE		
30	FR 943162 A 01-03-1949	KEINE		
35	US 5298682 A 29-03-1994	KEINE		
40				
45				
50				
55				

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82