



(10) **DE 10 2018 213 598 A1** 2020.02.13

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2018 213 598.3**
(22) Anmeldetag: **13.08.2018**
(43) Offenlegungstag: **13.02.2020**

(51) Int Cl.: **H01F 6/06 (2006.01)**
H01B 12/02 (2006.01)
H01F 27/29 (2006.01)

(71) Anmelder:
Siemens Aktiengesellschaft, 80333 München, DE

(72) Erfinder:
Arndt, Tabea, 91056 Erlangen, DE

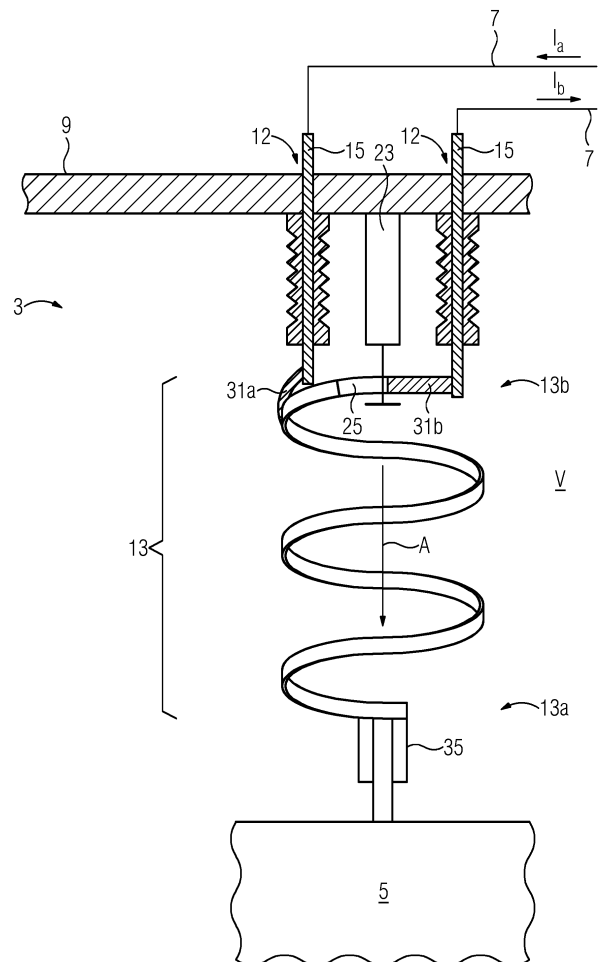
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2015 202 391	A1
US	2008 / 0 079 428	A1
US	4 895 831	A
US	5 991 647	A
EP	1 406 272	A1
CN	1 737 952	A

Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Supraleitende Stromzuführung**



(57) Zusammenfassung: Es wird eine Stromzuführung (3) für eine supraleitende Spuleneinrichtung (1) angegeben, umfassend

- wenigstens einen ersten Leitungsteil (13) mit wenigstens einem ersten Leiterelement (31a), welches wenigstens einen supraleitenden Draht (33) aufweist,
- wobei das erste Leiterelement (31) in einer helixförmigen Wicklung angeordnet ist.

Weiterhin wird eine supraleitende Spuleneinrichtung (1) mit wenigstens einer solchen Stromzuführung (3) und einer supraleitenden elektrischen Spulenumwicklung (5) angegeben.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Stromzuführung für eine supraleitende Spuleneinrichtung, wobei die Stromzuführung wenigstens einen ersten Leitungsteil mit wenigstens einem ersten Leiterelement aufweist, wobei das Leiterelement wenigstens einen supraleitenden Draht umfasst. Weiterhin betrifft die Erfindung eine supraleitende Spuleneinrichtung mit wenigstens einer derartigen Stromzuführung und einer supraleitenden elektrischen Spulenwicklung.

[0002] Viele supraleitende Spuleneinrichtungen benötigen Stromzuführungen, um die typischerweise relativ hohen Ströme aus einem äußeren Stromkreis in eine supraleitende Spule einzuspeisen. Solche Spuleneinrichtungen können prinzipiell sowohl für Gleichstromanwendungen als auch für Wechselstromanwendungen eingesetzt werden. Gleichstromanwendungen finden sich beispielsweise bei supraleitenden Magnetsystemen, Erregerwicklungen für elektrische Maschinen oder bei supraleitenden magnetischen Energiespeichern. Wechselstromanwendungen finden sich beispielsweise bei supraleitenden Transformatoren, Strombegrenzungseinrichtungen oder bei Statorwicklungen für elektrische Maschinen.

[0003] Da die supraleitenden Spulen zu ihrem Betrieb auf eine kryogene Temperatur unterhalb der Sprungtemperatur des Leitermaterials der Spule gekühlt werden müssen, liegen auch die spulenseitigen Enden der Stromzuführungen in diesem kryogenen Temperaturbereich vor. Die gegenüberliegenden Enden der Stromzuführung, die mit dem äußeren Stromkreis verbunden sind, befinden sich dabei typischerweise bei Temperaturen in der Nähe der Raumtemperatur. Um den Kühlaufwand für die supraleitende Spule möglichst gering zu halten, sollte der Wärmeeintrag über die Materialien der Stromzuführung möglichst minimiert werden. Bei klassischen metallischen Leitern steht allerdings die Wärmeleitung nach dem Wiedemann-Franz-Gesetz in einem etwa linearen Zusammenhang mit der elektrischen Leitfähigkeit, so dass vor allem bei hohen benötigten Stromdichten auch hohe Wärmeeinträge auftreten.

[0004] Aus dem Stand der Technik sind Stromzuführungen für supraleitende Spuleneinrichtungen bekannt, bei denen die jeweilige Stromzuführung einen supraleitenden Leitungsteil aus einem hochtemperatursupraleitenden (HTS) Material aufweist. Für solche supraleitenden Materialien gilt das Wiedemann-Franz-Gesetz nicht. Entsprechend kann die Stromtragfähigkeit im Verhältnis zur Wärmeleitfähigkeit viel höher sein als bei normalleitenden Materialien. Allerdings muss auch der HTS-Leiter auf eine Temperatur unterhalb seiner Sprungtemperatur gekühlt werden, um supraleitend zu werden. Das supraleitende Material der Stromzuführung und entsprechend auch

die Sprungtemperatur können dabei prinzipiell unterschiedlich zum supraleitenden Material der eigentlichen Spulenwicklung gewählt sein.

[0005] Es kann also mit einem HTS-Leiters ein Temperaturbereich zwischen der Betriebstemperatur der Spulenwicklung und der maximalen Betriebstemperatur des HTS-Leiters der Stromzuführung überbrückt werden. Für die Überbrückung der restlichen Temperaturdifferenz zwischen der HTS-Betriebstemperatur und der Außentemperatur kann der HTS-Leiter dann in Serie mit einem zweiten, normalleitenden Leiterteil geschaltet sein. Alternativ oder zusätzlich kann der HTS-Leiter aber auch mit einem normalleitenden Leiter parallelgeschaltet sein, insbesondere dann, wenn der HTS-Leiter nicht auf seiner ganzen Länge unterhalb seiner Sprungtemperatur vorliegt. So kann über die Länge des betreffenden Leiterteils gesehen (und in Richtung seiner vergleichsweise kalten Seite gesehen) ein mehr oder weniger allmählicher Übergang des transportierten Stroms von dem normalleitenden Material auf das supraleitende Material stattfinden.

[0006] Eine aus normalleitenden und supraleitenden Leiterelementen zusammengesetzte Stromzuführung ist beispielsweise in der DE102007013350B4 beschrieben. Hier sind mehrere Stapel von bevorzugt keramischen HTS-Bandleitern untereinander parallelgeschaltet und dann mit einem metallischen Leiter in Serie geschaltet.

[0007] Eine weitere supraleitende Stromzuführung ist in der DE102009028413A1 beschrieben. Hier sind mehrere HTS-Bandleiter auf einem normalleitenden Träger angeordnet. Sowohl der normalleitende Träger als auch die in den Bandleitern vorliegenden normalleitenden Schichten können dabei als parallele Strompfade wirken.

[0008] Die bekannten supraleitenden Stromzuführungen führen jedoch trotzdem noch zu einem unerwünscht hohen Wärmeeintrag in die kryogene Umgebung der betreffenden supraleitenden Spuleneinrichtung. Dies liegt zum großen Teil daran, dass bei Bandleitern mit keramischen HTS-Leitern die HTS-Schichten typischerweise auf metallischen Substraten abgeschieden sind und meist auch mit metallischen Deckschichten abgedeckt sind. Der hierdurch gegebene metallische Pfad mit der effektiven Querschnittsfläche A führt oft zu einem relativ hohen Wärmeeintrag in die kryogene Umgebung. Weiterhin steht bei den meisten Spuleneinrichtungen relativ wenig Platz für die Stromzuführungen zur Verfügung, so dass oft eine vergleichsweise kurze Länge L gewählt wird. Der Wärmeeintrag Q aus diesem metallischen Pfad eines solchen Leitungsteils ergibt sich dann allgemein als

$$Q = \frac{A}{L} \int_{T_{\text{kalt}}}^{T_{\text{warm}}} \lambda(T) dT,$$

wobei λ der Wärmeleitkoeffizient des betrachteten metallischen Materials ist und das Integral über die Temperatur T von der Temperatur am vergleichsweise kalten Ende des Leitungsteils (T_{kalt}) bis zur Temperatur am vergleichsweise warmen Ende (T_{warm}) gebildet wird.

[0009] Aufgabe der Erfindung ist es daher, eine Stromzuführung anzugeben, welche den genannten Nachteil überwindet. Insbesondere soll eine Stromzuführung zur Verfügung gestellt werden, welche bei hoher Stromtragfähigkeit einen vergleichsweise niedrigen Wärmeeintrag aufweist. Weiterhin soll dies mit einer möglichst kompakten Anordnung realisiert werden. Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist es, eine supraleitende Spuleneinrichtung mit einer solchen Stromzuführung anzugeben.

[0010] Diese Aufgaben werden durch die in Anspruch 1 beschriebene Stromzuführung und die in Anspruch 13 beschriebene supraleitende Spuleneinrichtung gelöst.

[0011] Die erfindungsgemäße Stromzuführung ist als Stromzuführung für eine supraleitende Spuleneinrichtung ausgebildet. Sie umfasst wenigstens einen ersten Leitungsteil mit wenigstens einem ersten Leiterelement. Dabei weist das erste Leiterelement wenigstens einen supraleitenden Draht auf. Das erste Leiterelement ist in einer helixförmigen Wicklung angeordnet.

[0012] Unter dem genannten Draht soll hierbei allgemein ein länglicher und biegsamer Leiter verstanden werden, welcher zu einer Wicklung gewickelt werden kann. Die Querschnittsform soll hierbei nicht weiter beschränkt sein, sodass es sich beispielsweise prinzipiell sowohl um einen Runddraht als auch um einen eckigen Draht und insbesondere um einen Bandleiter mit flacher Querschnittsgeometrie handeln kann. Dieser Draht muss nicht vollständig aus supraleitendem Material gebildet sein. Es reicht vielmehr aus, wenn er eine supraleitende Materialkomponente aufweist, welche sich über die Länge des Drahtes erstreckt.

[0013] Die beschriebene Stromzuführung weist dabei insbesondere ein erstes Ende und ein zweites Ende auf. Dabei ist das erste Ende dazu vorgesehen, innerhalb der Spuleneinrichtung im Bereich eines Stromeinspeisepunkts angeordnet zu werden. Das zweite Ende ist entsprechend dazu vorgesehen, innerhalb der Spuleneinrichtung nahe der supraleitenden Spulenwicklung angeordnet zu werden. Entsprechend handelt es sich beim Betrieb der Stromzuführung bei dem ersten Ende um ein vergleichsweise warmes Ende und bei dem zweiten Ende um ein vergleichsweise kaltes Ende der Stromzuführung.

Entsprechend weist auch der beschriebene innerhalb der Stromzuführung vorliegende erste Leitungsteil ein erstes, vergleichsweise warmes Ende und ein zweites, vergleichsweise kaltes Ende auf.

[0014] Die helixförmige (mit anderen Worten wendelförmige) Wicklung des Drahtes weist insbesondere eine allgemein längliche Form auf. Dabei ist eine Längsachse A dieses ersten Leitungsteils durch die Längsachse der zugrundeliegenden (insbesondere im Wesentlichen linearen) Helix gegeben. Eine leichte Krümmung der zugrundeliegenden Helix soll dabei aber prinzipiell nicht ausgeschlossen sein. In jedem Fall entspricht die lokale Längsachse A der zugrundeliegenden Helix einer übergeordneten Stromflussrichtung in diesem ersten Leitungsteil der Stromzuführung. Auch diese helixförmige Wicklung erstreckt sich entsprechend zwischen einem vergleichsweise warmen Ende und einem vergleichsweise kalten Ende des ersten Leitungsteils.

[0015] Die Stromzuführung kann dabei allgemein neben dem beschriebenen ersten Leitungsteil auch noch ein oder mehrere weitere Leitungsteile aufweisen, welche insbesondere elektrisch in Serie mit dem ersten Leitungsteil geschaltet sind. Ein solcher weiterer Leitungsteil kann insbesondere normalleitend sein und beispielsweise an das warme Ende des ersten Leitungsteils angeschlossen sein. Alternativ oder zusätzlich kann es sich aber auch bei dem weiteren Leitungsteil um einen zusätzlichen supraleitenden Leitungsteil handeln, welcher beispielsweise an das kalte Ende des ersten Leitungsteils angeschlossen sein kann.

[0016] Ein wesentlicher Vorteil der erfindungsgemäßen Stromzuführung besteht darin, dass durch die helixförmige Wicklung des supraleitenden Drahtes im Vergleich zur herkömmlichen linearen Anordnung des Supraleiters eine Verminderung des Wärmeeintrags Q erreicht werden kann. Dies wird insbesondere durch die Erhöhung der effektiv wirksamen Länge L des Drahtes entsprechend der oben angegebenen Gleichung bewirkt. So kann gegebenenfalls auch bei Vorliegen eines durchgehend metallischen Materials innerhalb des Drahtes der Wärmeeintrag auf ein tolerierbares Maß reduziert werden. Gleichzeitig ist durch die Verwendung eines supraleitenden Drahtbestandteils eine hohe Stromtragfähigkeit dieses ersten Leitungsteils gegeben. Bei geeigneter Auslegung von optional vorliegenden weiteren Leitungsteilen kann auch für die Stromzuführung als Ganzes somit eine hohe Stromtragfähigkeit bei gleichzeitig niedrigem Wärmeeintrag realisiert werden.

[0017] Die erfindungsgemäße supraleitende Spuleneinrichtung weist wenigstens eine erfindungsgemäße Stromzuführung und zusätzlich eine supraleitende elektrische Spulenwicklung auf. Die Vorteile der erfindungsgemäßen Spuleneinrichtung ergeben

sich analog zu den oben beschriebenen Vorteilen der erfindungsgemäßen Stromzuführung. Vorteilhaft ist die Spuleneinrichtung dazu ausgelegt, die supraleitende Spulenwicklung beim Betrieb auf eine kryogene Betriebstemperatur unterhalb der Sprungtemperatur des innerhalb der Spule verwendeten Supraleitermaterials zu kühlen. Bei dem Supraleitermaterial der Spule kann es sich prinzipiell um einen Hochtemperatursupraleiter oder aber auch um einen Tieftemperatursupraleiter handeln. Das Supraleitermaterial kann hierfür prinzipiell unterschiedlich oder auch gleich gewählt sein wie das Supraleitermaterial in der Stromzuführung.

[0018] Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung gehen aus den von den Ansprüchen 1 und 13 abhängigen Ansprüchen sowie der folgenden Beschreibung hervor. Dabei können die beschriebenen Ausgestaltungen der Stromzuführung und der Spuleneinrichtung allgemein vorteilhaft miteinander kombiniert werden.

[0019] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsvariante kann der supraleitende Draht ein Bandleiter sein, also ein Leiter mit flacher bandförmiger Querschnittsgeometrie. Die Querschnittsform kann dabei beispielsweise im Wesentlichen die Form eines flachen Rechtecks aufweisen, gegebenenfalls mit abgerundeten Ecken. Ein solcher supraleitender Bandleiter weist allgemein die Vorteile einer besonders guten Handhabbarkeit auf, sodass hiermit besonders einfach geometrisch wohldefinierte Wicklungen hergestellt werden können. Auch die beschriebene helixförmige Wicklung kann mit einem solchen Bandleiter besonders leicht präzise hergestellt werden.

[0020] Der supraleitende Bandleiter kann vorteilhaft eine supraleitende Schicht auf einem bandförmigen Trägersubstrat aufweisen. Bei dieser supraleitenden Schicht kann es sich bevorzugt um eine hochtemperatursupraleitende Schicht (HTS-Schicht) und besonders bevorzugt um eine 2G-HTS-Schicht (also um eine Schicht mit einem HTS-Material der zweiten Generation) handeln.

[0021] Hochtemperatursupraleiter sind supraleitende Materialien mit einer Sprungtemperatur oberhalb von 25 K und bei einigen Materialklassen, beispielsweise den Kuprat-Supraleitern, oberhalb von 77 K. Bei ihnen kann die Betriebstemperatur durch Kühlung mit anderen kryogenen Materialien als flüssigem Helium erreicht werden. HTS-Materialien sind auch deshalb besonders attraktiv, da diese Materialien abhängig von der Wahl der Betriebstemperatur hohe obere kritische Magnetfelder sowie hohe kritische Stromdichten aufweisen können.

[0022] Der Hochtemperatursupraleiter kann beispielsweise Magnesiumdiborid oder einen oxidkeramischen Supraleiter, beispielsweise eine Verbindung

des Typs $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (kurz REBCO) aufweisen, wobei RE für ein Element der seltenen Erden oder eine Mischung solcher Elemente steht.

[0023] Allgemein bevorzugt kann der erste Leitungsteil einen normalleitenden Leiter aufweisen, welcher dem supraleitenden Material in dem supraleitenden Draht elektrisch parallel geschaltet ist. Ein solcher paralleler Leiter bildet zum supraleitenden Material einen sogenannten Shunt, also einen Nebenschlusswiderstand, aus. Der parallele Leiter kann insbesondere an mehreren Stellen entlang der Längsrichtung des Leiters und besonders vorteilhaft kontinuierlich über die ganze Länge des Leiters mit dem supraleitenden Element elektrisch verbunden sein.

[0024] Bei diesem normalleitenden Leiter kann es sich entweder ebenfalls um einen Bestandteil des supraleitenden Drahtes oder aber um ein separates, parallel verlaufendes Element handeln. Bei der erstgenannten Variante weist also der supraleitende Draht neben dem supraleitenden Material ein in Drahrichtung durchgehendes normalleitendes Material auf. Beispielsweise kann es sich bei dem normalleitenden Leiter um ein Trägersubstrat des Bandleiters und/oder um eine Stabilisierungsschicht innerhalb des Bandleiters handeln. Generell können die genannten normalleitenden Elemente vorteilhaft aus metallischen Materialien gebildet sein.

[0025] So kann der wenigstens eine Bandleiter vorteilhaft wenigstens eine normalleitende Stabilisierungsschicht aufweisen, wobei die hochtemperatursupraleitende Schicht zwischen dem Trägersubstrat und der Stabilisierungsschicht angeordnet ist. Bei dieser Ausführungsform ist zumindest durch die normalleitende Stabilisierungsschicht ein paralleler normalleitender Strompfad gegeben. Zusätzlich kann auch das Trägersubstrat einen weiteren parallelen Strompfad ausbilden. Zusätzlich zu der beschriebenen Anordnung der Stabilisierungsschicht auf der dem Substrat abgewandten Seite kann auch eine weitere Stabilisierungsschicht auf der Substratseite angeordnet sein. Eine solche elektrische Stabilisierungsschicht kann auch als umhüllende Schicht ausgebildet sein, welche den Stapel aus Trägersubstrat und supraleitender Schicht - und gegebenenfalls zusätzlich vorliegenden weiteren Schichten wie Pufferschicht(en) und/oder Deckschicht(en) - umgibt.

[0026] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform weist der wenigstens eine Bandleiter eine elektrisch isolierende Schicht auf, welche außen auf wenigstens einer seiner beiden Hauptflächen angeordnet ist. Eine solche isolierende Schicht kann prinzipiell einseitig, beidseitig oder auch umhüllend ausgestaltet sein. In jedem Fall dient sie dazu, die supraleitende Schicht des Bandleiters sowie die optional vorliegenden normalleitenden Elemente elektrisch von benachbarten Leitern (und insbesondere von benach-

barten Bandleitern oder auch einem leitfähigen Tragelement) zu isolieren.

[0027] Allgemein vorteilhaft kann der wenigstens eine supraleitende Draht innerhalb der helixförmigen Wicklung einen Krümmungsradius r von 40 mm oder weniger aufweisen. Ein solcher geringer Krümmungsradius kann mit modernen supraleitenden Bandleitern leicht realisiert werden. Insbesondere sind die heutzutage verfügbaren Bandleiter vergleichsweise unempfindlich gegenüber einer Biegung, die außerhalb der Bandleiterebene stattfindet. Enge Biegungen innerhalb der Bandleiterebene führen dagegen wesentlich leichter zu Materialschädigungen innerhalb der supraleitenden Schicht und/oder zu einer Delamination des Schichtsystems. Die beschriebene helixförmige Wicklung weist aber gerade den Vorteil auf, dass zu ihrer Herstellung keine oder nur eine sehr geringe Biegung innerhalb der Bandleiterebene erforderlich ist. So können auch relativ enge Biegeradien ermöglicht werden, was wiederum zu einer deutlichen Verlängerung der für den Wärmeeintrag wirksamen Länge L und somit zu einer Reduktion des Wärmeeintrags führt. Durch einen engen Biegeradius kann eine solche Wegverlängerung insbesondere auch in einer insgesamt kompakten Stromzuführung realisiert werden, da dann der Radius der Helix entsprechend klein gewählt werden kann. Es können also sowohl die Länge als auch die Breite der Stromzuführung sehr klein dimensioniert werden und es kann trotzdem ein geringer Wärmeeintrag erreicht werden.

[0028] Besonders vorteilhaft kann der wenigstens eine supraleitende Draht innerhalb der helixförmigen Wicklung einen Krümmungsradius r von sogar nur 10 mm oder weniger aufweisen. Auch eine solche besonders kompakte Wicklung ist mit modernen HTS-Bandleitern realisierbar.

[0029] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform kann das erste Leitelement nicht nur einen einzelnen Bandleiter, sondern einen Stapel von zwei oder mehr übereinanderliegenden supraleitenden Bandleitern umfassen. Insbesondere kann dann dieser Stapel von mehreren Bandleitern zusammen zu der helixförmigen Wicklung gewickelt sein. Als Bestandteile des ersten Leitelements können diese Bandleiter insbesondere miteinander elektrisch parallel geschaltet sein. Hierdurch kann für das erste Leitelement im Vergleich zu einem einzelnen Bandleiter eine höhere Stromtragfähigkeit erreicht werden. Innerhalb der helixförmigen Wicklung können die einzelnen Bandleiter des Stapels insbesondere so flach übereinander liegen, dass sie in radialer Richtung (bezogen auf die Helixachse **A**) aufeinanderfolgen. Eine solche Wicklungsgeometrie lässt sich in besonders einfacher Weise durch gemeinsames Aufwickeln des gesamten Stapels erreichen.

[0030] Weiterhin kann die Stromzuführung vorteilhaft ein zweites Leitelement umfassen. Dieses zweite Leitelement kann insbesondere ebenfalls Teil des ersten Leitungsteils sein. Bevorzugt ist auch das zweite Leitelement Teil der beschriebenen helixförmigen Wicklung und ist innerhalb dieser parallel zum ersten Leitelement geführt. Prinzipiell können das erste und das zweite Leitelement (und gegebenenfalls optional vorliegende weitere Leitelemente) entweder in axialer Richtung der Helix nebeneinanderliegen oder sie können in radialer Richtung (bezüglich der Helixachse) übereinanderliegend angeordnet sein. In jedem Fall können die einzelnen Leitelemente zum Transport voneinander unabhängiger Ströme ausgebildet sein. Dabei können wiederum innerhalb jedes einzelnen Leitelements allgemein mehrere untereinander elektrisch parallelschaltete Teilleiter vorgesehen sein.

[0031] Bei einer Ausführungsform mit zwei Leitelementen können diese allgemein so ausgestaltet sein, dass das erste Leitelement und das zweite Leitelement für den Stromtransport mit einander entgegengesetzten Stromflussrichtungen vorgesehen sind. Mit anderen Worten kann es sich also um einen Hinleiter und einen Rückleiter handeln. Es kann damit vorteilhaft eine Stromzuführung realisiert sein, innerhalb derer elektrische Anschlüsse für beide Stromflussrichtungen vorgesehen sind. Diese können insbesondere innerhalb eines gemeinsamen Leitungsteils verlaufen. Es kann also die Anbindung der zu verbindenden supraleitenden Spuleneinrichtung an einen äußeren Stromkreis idealerweise mit nur einer Stromzuführung erfolgen. Verglichen mit der im Stand der Technik typischen Anordnung, bei der Hinleiter und Rückleiter mit jeweils separaten Stromzuführungen realisiert werden, kann bei dieser Ausführungsform schon dadurch der Wärmeeintrag reduziert werden, dass weniger separate Verbindungen zwischen der warmen Umgebung und der kryogenen Umgebung der supraleitenden Spuleneinrichtung vorliegen. Es sind also insgesamt zum Anschluss der supraleitenden Spuleneinrichtung an einen äußeren Stromkreis vorteilhaft auch weniger Durchführungen durch ein thermisch isolierendes Gehäuse nötig.

[0032] Ein weiterer Vorteil der parallelen Führung von Hinleiter und Rückleiter innerhalb eines gemeinsamen Leitungsteils kann darin gesehen werden, dass durch die gemeinsame helixförmige Wicklung eine sogenannte bifilare Wicklung realisiert ist, wodurch sich die magnetischen Eigenfelder der einzelnen Teilwicklungen zumindest teilweise gegenseitig kompensieren. Auf diese Weise können Induktivitäten und Wechselstromverluste wirksam verringert werden. Hierdurch wird die beschriebene Geometrie vor allem für Wechselstromanwendungen noch vorteilhafter.

[0033] Grundsätzlich können in einer solchen Anordnung die beiden Leiterelemente unterschiedlich zueinander orientiert sein. Wenn die Leiterelemente beispielsweise jeweils einen supraleitenden Bandleiter mit einer „Substratseite“ und einer „Supraleiterseite“ aufweisen, können in einer vorteilhaften spiegelsymmetrischen Anordnung entweder die Substratseiten oder die Supraleiterseiten zueinander orientiert sein. Es kann aber auch grundsätzlich die Substratseite des einen Bandleiters der Supraleiterseite des anderen Bandleiters benachbart sein. Die beiden zuerst angeführten spiegelsymmetrischen Anordnungen weisen den Vorteil auf, dass durch die Symmetrie die magnetischen Felder noch besser kompensiert werden können.

[0034] Bei einer Ausführungsform mit zwei oder mehr Leiterelementen ist es grundsätzlich auch möglich, dass die einzelnen Leiterelemente zum Stromtransport für unterschiedliche Phasen innerhalb eines Wechselstromkreises ausgebildet sind. Insbesondere können für einen Dreiphasen-Wechselstromkreis zumindest drei solche Leiterelemente vorgesehen sein (oder auch vorteilhaft ein Vielfaches von drei). Diese Ausführungsform kann auch mit der vorgenannten kombiniert werden, d. h. es können sowohl die Leiterelemente mehrerer Phasen als auch die Hinleiter und Rückleiter für jede gegebene Phase innerhalb eines gemeinsamen ersten Leitungsteils und insbesondere innerhalb einer gemeinsamen helixförmigen Wicklung geführt sein. Dabei können für die einzelnen Phasen entweder jeweils separate Hinleiter und Rückleiter vorgesehen sein oder aber den einzelnen Phasen können zwar separate Hinleiter, aber kombinierte Rückleiter zugeordnet sein.

[0035] Allgemein und unabhängig von der genauen Anzahl und Ausgestaltung der einzelnen Leiterelemente kann die helixförmige Wicklung durch ein oder mehrere Tragelemente gehalten werden. Ein solches Tragelement kann insbesondere mechanisch so stabil sein, dass ein vergleichsweise flexibler supraleitender Draht durch das Tragelement in der beschriebenen helixförmigen Konfiguration festgehalten wird.

[0036] Beispielsweise kann die Stromzuführung ein helixartig geformtes Tragelement aufweisen, auf welchem das erste Leiterelement (und gegebenenfalls auch optionale weitere Leiterelemente) angeordnet ist. Ein solches helixförmiges Tragelement kann beispielsweise eine mechanische Flexibilität aufweisen, sodass es nach der Art einer Feder mechanische Längenänderungen ausgleichen kann. Eine solche Flexibilität kann insbesondere dann Vorteile bieten, wenn beim Betrieb der Spuleneinrichtung Vibrationen, mechanische Spannungen und/oder Unterschiede in den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der einzelnen Materialien zu erwarten sind. Allgemein kann das Tragelement ein metallisches Material aufweisen beziehungsweise aus einem solchen me-

tallischen Material bestehen. In einem solchen Fall ist es besonders vorteilhaft, wenn auch das Tragelement passend zur Geometrie der Wicklung helixartig geformt ist. Dies führt nämlich dann auch für das Tragelement zu einer Verlängerung des thermischen Pfads und somit zu einer Reduzierung des Wärmeeintrags in den kryogenen Bereich.

[0037] Bei einer elektrisch leitfähigen Ausgestaltung des Tragelements kann dieses (alternativ oder zusätzlich zu einem Shunt innerhalb des supraleitenden Drahtes) ebenfalls einen parallelen normalleitenden Strompfad zur Verfügung stellen. Bei Vorliegen mehrerer Leiterelemente kann es unter Umständen auch vorteilhaft sein, eine entsprechende Anzahl von Tragelementen vorzusehen, sodass für jedes Leiterelement ein zugeordnetes Tragelement existiert, welche gegebenenfalls für dieses Leiterelement die Funktion eines Shunts übernimmt.

[0038] So kann das Tragelement allgemein und unabhängig von seiner genauen Form und Ausgestaltung als normalleitendes Tragelement ausgeführt sein, um die Funktion eines Shunts zu übernehmen. Alternativ ist es aber auch möglich, dass das Tragelement elektrisch isolierend ist. Dies ist insbesondere dann zweckmäßig, wenn bereits innerhalb des supraleitenden Drahtes ein normalleitendes Element vorliegt, welches als Shunt wirken kann (beispielsweise ein Substrat und/oder eine Stabilisierungsschicht eines Bandleiters). Bei einer elektrisch nichtleitenden Ausführung kann das Tragelement dann auch vorteilhaft eine vergleichsweise geringe thermische Leitfähigkeit aufweisen.

[0039] Bei einer thermisch hoch leitfähigen und insbesondere metallischen Ausführungsform des Tragelements kann es vorteilhaft sein, wenn das gesamte Tragelement auf einem vorgegebenen Temperaturniveau fixiert ist. Beispielsweise kann so das gesamte Tragelement auf einer Temperatur vorliegen, welche unterhalb der Sprungtemperatur des supraleitenden Materials in dem supraleitenden Draht ist. So kann ein nahezu verlustfreier Stromtransport über den gesamten ersten Leitungsteil gewährleistet werden, wenn der supraleitende Draht thermisch an das Tragelement angekoppelt ist.

[0040] Alternativ ist es jedoch grundsätzlich auch möglich, dass sich die Temperatur des Tragelements kontinuierlich von der kalten Seite des ersten Leitungsteils zur warmen Seite des ersten Leitungsteils hin erhöht. Es kann also sein, dass der darauf angeordnete supraleitende Draht nicht über seine gesamte Länge supraleitend ist, sondern erst ab einer bestimmten Position. Bei dieser Ausführungsform kann sich also der Stromfluss zwischen dem Supraleiter und einem parallelen normalleitenden Strompfad aufteilen, wobei der Supraleiter einen umso höheren Teil des Stroms übernimmt, je näher der Leitungsteil der

supraleitenden Spule kommt und je kälter der Leitungsteil wird.

[0041] Alternativ zu der vorgenannten Ausführungsform mit einem helixförmigen Tragelement ist es aber auch möglich, dass die helixförmige Wicklung von einem rohrförmigen Tragelement gehalten wird. Dabei ist die Wicklung dann insbesondere helixförmig umlaufend um das Rohr herum angeordnet. Ein Vorteil dieser Ausführungsform ist, dass die helixförmige Wicklung durch ein solches Tragelement mechanisch noch fester gehalten werden kann. Zweckmäßig ist ein solches rohrförmiges Tragelement aus einem thermisch vergleichsweise schlecht leitenden Material ausgebildet, um den Wärmeeintrag durch den vergleichsweise kurzen thermischen Pfad des Rohrs gering zu halten. Beispielsweise kann ein solches Rohr als Material einen glasfaserverstärkten Kunststoff und/oder eine Keramik umfassen.

[0042] Bei einer Ausführungsform mit einem rohrförmigen Tragelement kann die helixförmige Wicklung aus dem wenigstens einen Leiterelement in helixartig umlaufenden Ausnehmungen auf der Außenseite des Rohrs angeordnet sein. Hierdurch kann auf einfache Weise eine besonders feste mechanische Halterung und eine zuverlässige Einhaltung einer vorgegebenen Geometrie für die Helixwicklung erreicht werden.

[0043] Ganz allgemein und unabhängig von der genauen Ausgestaltung des wenigstens einen Leiterelements und eines oder mehrerer optionaler Tragelemente kann die helixförmige Wicklung so ausgestaltet sein, dass der gewickelte supraleitende Draht eine Bogenlänge s aufweist, welche wenigstens einem Zweifachen der axialen Länge der Helixwicklung entspricht. Mit anderen Worten ist bei dieser Ausführungsform der thermische Pfad gegenüber einer linearen Anordnung des Drahtes um wenigstens einen Faktor zwei verlängert, was zu einer entsprechenden Verringerung des Wärmeeintrags führt. Beispielsweise kann durch eine entsprechend enge Ausführung der helixförmigen Wicklung relativ leicht ein Verlängerungsfaktor zwischen 2 und 10 erreicht werden. Hierdurch kann relativ einfach eine große thermische Wegverlängerung bei gleichzeitig kompakter Geometrie erreicht werden.

[0044] Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der supraleitenden Spuleneinrichtung kann diese als Spuleneinrichtung für eine Wechselstromanwendung ausgebildet sein. Beispielsweise kann es sich bei einer solchen Spuleneinrichtung um einen Transformator, um eine Strombegrenzungseinrichtung und/oder eine supraleitende Statorwicklung für eine elektrische Maschine handeln. Allgemein kommen bei einer Spuleneinrichtung für eine Wechselstromanwendung die Vorteile der Erfindung besonders zum Tragen - vor allem dann, wenn Hin-

leiter und Rückleiter beziehungsweise die Leiter für mehrere Phasen zusammen in einer gemeinsamen helixförmigen Wicklung geführt werden. Bei einer solchen Ausgestaltung werden die Wechselstromverluste vorteilhaft gering gehalten.

[0045] Allgemein kann innerhalb der Spuleneinrichtung die Stromzuführung ein erstes vergleichsweise kaltes Ende aufweisen, welches mit der supraleitenden Spulenumwicklung verbunden ist, und ein zweites vergleichsweise warmes Ende aufweisen, welches mit einem äußeren Stromkreis verbindbar ist. Dieser äußere Stromkreis soll nicht Teil der Spuleneinrichtung sein und kann beispielsweise eine Stromquelle, einen Umrichter und/oder weitere elektrische Bauelemente umfassen, um insbesondere die supraleitende Spulenumwicklung mit Strom zu versorgen.

[0046] Allgemein kann die Spuleneinrichtung ein thermisch isolierendes Außengehäuse aufweisen, in dessen Innerem die supraleitende Spulenumwicklung angeordnet ist. Bei dieser Ausführungsform kann die Spuleneinrichtung wenigstens eine Durchführung durch das Außengehäuse aufweisen, durch die zumindest ein Teil der wenigstens einen Stromzuführung in das Innere des Außengehäuses geführt ist. Hierbei dient das Außengehäuse zur thermischen Isolation der tiefkalten supraleitenden Spulenumwicklung von der vergleichsweise warmen äußeren Umgebung. Das Außengehäuse kann beispielsweise durch einen Kryostaten realisiert sein, welcher insbesondere einen Vakuumraum und gegebenenfalls eine zusätzliche thermische Isolation aufweisen kann. Zweckmäßig können für jede vorhandene Stromzuführung entweder genau eine Durchführung oder auch mehrere Durchführungen durch dieses Außengehäuse vorgesehen sein. Besonders vorteilhaft liegt nur eine einzige solche Stromzuführung vor, sodass eine einzige solche Durchführung durch das Außengehäuse ausreicht.

[0047] Allgemein vorteilhaft kann die Spuleneinrichtung und/oder die Stromzuführung ein oder mehrere Strahlungsschilde (sogenannte „Baffles“) aufweisen, um eine Wärmeeinstrahlung in die kryogenen Bereiche der Spuleneinrichtung zu vermindern. Bei einem solchen Strahlungsschild kann es sich beispielsweise um eine metallisch reflektierende Scheibe handeln. Eine solche Scheibe kann beispielsweise quer zur Hauptrichtung der beschriebenen helixförmigen Wicklung ausgerichtet sein. Sie kann ein Loch aufweisen, durch welches die helixförmige Wicklung der Stromzuführung hindurchgeführt ist. Wenn in axialer Richtung der Helix mehrere solche Strahlungsschilde angeordnet sind, kann es vorteilhaft sein, solche Löcher an unterschiedlichen azimuthalen Positionen der Helix anzuordnen. Auf diese Weise wird ein durchgehender offener Pfad für die Wärmeeinstrahlung zwischen dem warmen Bereich der Stromzuführung und

dem kryogenen Bereich der Stromzuführung vermieden.

[0048] Nachfolgend wird die Erfindung anhand einiger bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die angehängten Zeichnungen beschrieben, in denen:

Fig. 1 einen schematischen Querschnitt einer Spuleneinrichtung **1** nach einem ersten Ausführungsbeispiel zeigt,

Fig. 2 eine schematische Prinzipdarstellung einer beispielhaften Stromzuführung **3** zeigt,

Fig. 3 einen schematischen Querschnitt durch einen Teil einer beispielhaften helixförmigen Wicklung mit einem ersten Leiterelement und einem Tragkörper zeigt,

Fig. 4 eine schematische Darstellung einer Stromzuführung **3** nach einem zweiten Ausführungsbeispiel zeigt,

Fig. 5 einen schematischen Querschnitt durch eine weitere beispielhafte helixförmige Wicklung zeigt,

Fig. 6 einen schematischen Querschnitt durch ein weiteres beispielhaftes erstes Leiterelement **31a** zeigt,

Fig. 7 eine schematische Darstellung einer Stromzuführung **3** nach einem dritten Ausführungsbeispiel zeigt und

Fig. 8 eine schematische Darstellung einer Stromzuführung **3** nach einem vierten Ausführungsbeispiel zeigt.

[0049] In den Figuren sind gleiche oder funktionsgleiche Elemente mit gleichen Bezugszeichen versehen.

[0050] **Fig. 1** zeigt einen schematischen Querschnitt einer Spuleneinrichtung **1** nach einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung. Gezeigt ist eine supraleitende Spulenwicklung **5**, von welcher in der Querschnittsdarstellung zwei Spulenschenkel zu erkennen sind. Es kann sich dabei prinzipiell um eine Spulenwicklung für eine beliebige Anwendung handeln. Die Vorteile der Erfindung kommen allerdings besonders zum Tragen, wenn es sich um eine Wechselstromanwendung handelt. Beispielsweise kann es sich also bei der Spulenwicklung **5** um eine Wicklung eines Transformators, einer Strombegrenzeereinrichtung und oder einer Statorwicklung für eine elektrische Maschine handeln.

[0051] Um die supraleitende Spulenwicklung **5** auf eine Betriebstemperatur unterhalb der Sprungtemperatur des verwendeten Supraleiters zu kühlen, ist diese Spulenwicklung **5** innerhalb eines thermisch isolierenden Außengehäuses **9** angeordnet. Es kann

sich dabei beispielsweise um einen Kryostaten handeln. Auch hier können prinzipiell sehr unterschiedliche Gehäusetyper zum Einsatz kommen: So kann es sich beispielsweise um einen Badkryostaten handeln, dessen Innenraum mit einem fluiden Kühlmittel gefüllt sein kann. Alternativ kann es sich aber auch um einen Kryostaten mit einem innenliegenden Vakuumraum **V** handeln, welcher die Spulenwicklung **5** wenigstens teilweise umgibt und somit zu einer zuverlässigen thermischen Isolation der Spulenwicklung führt. Diese Variante ist beispielhaft in **Fig. 1** dargestellt. Alternativ zu der hier gezeigten Ausgestaltung kann das Gehäuse die Spulenwicklung **5** auch ringförmig umgeben, sodass ein innenliegender Bereich zwischen den Spulenschenkeln nicht im Gehäuse liegt und nicht mit gekühlt wird. Wesentlich ist bei den verschiedenartigen Varianten nur, dass die Wand des Außengehäuses die innenliegende Spulenwicklung **5** zuverlässig thermisch gegen die vergleichsweise warme äußere Umgebung isoliert.

[0052] Um die supraleitende Spulenwicklung **5** mit einem äußeren Stromkreis zu verbinden, ist hier eine Stromzuführung **3** vorgesehen, welche die Spulenwicklung **5** durch die Gehäusewand hindurch mit einem Verbindungsleiter **7** verbindet. Für die meisten Anwendungen sind zur Verbindung mit einem geschlossenen äußeren Stromkreis wenigstens zwei derartige Verbindungsleiter **7** nötig. Diese können prinzipiell entweder durch eine gemeinsame Stromzuführung oder auch durch zwei separate Stromzuführungen an die Spulenwicklung **5** angebunden sein. In der **Fig. 1** ist daher beispielhaft nur eine einzige solche Verbindung gezeigt.

[0053] Die Stromzuführung **3** der **Fig. 1** ist insgesamt mithilfe einer Durchführung **12** durch die Gehäusewand **9** geführt. Insgesamt weist die hier gezeigte Stromzuführung **3** zwei untereinander elektrisch in Serie geschaltete Leitungsteile auf, nämlich einen ersten Leitungsteil **13** und einen zweiten Leitungsteil **15**. Dabei ist der erste Leitungsteil supraleitend ausgeführt und ist innerhalb des thermisch isolierenden Gehäuses **9** angeordnet. Der zweite Leitungsteil **15** ist normalleitend ausgeführt und erstreckt sich im Bereich der Durchführung **12** durch die Gehäusewand. Insgesamt ergibt sich daher ein Temperaturgefälle über die Länge der Stromzuführung **3** hinweg, wobei das vergleichsweise kalte Ende **3a** dort vorliegt, wo der supraleitende erste Leitungsteil mit der supraleitenden Spulenwicklung **5** verbunden ist. Das vergleichsweise warme Ende **3b** liegt dort vor, wo außerhalb des thermisch isolierenden Gehäuses eine Verbindung mit dem äußeren Stromkreis vorgesehen ist.

[0054] Der supraleitende erste Leitungsteil **13** weist einen supraleitenden Draht auf, welcher in einer helixförmigen Wicklung angeordnet ist. Im gezeigten Beispiel handelt es sich um eine lineare Helix, deren Helixachse **A** sich vom zweiten Leitungsteil **15** hin zur

supraleitenden Spulenwicklung **5** erstreckt. Durch die helixförmige Ausgestaltung des supraleitenden Drahtes in diesem ersten Leitungsteil **13** wird eine wirksame Verlängerung der für den Wärmeeintrag maßgeblichen Weglänge L erreicht. Da die beiden Leitungsteile **13** und **15** elektrisch und thermisch in Serie geschaltet sind, wird hierdurch der insgesamt vorliegende Wärmeeintrag gegenüber einer rein linearen Leiteranordnung verringert.

[0055] In **Fig. 2** ist eine schematische Prinzipdarstellung einer beispielhaften Stromzuführung **3** gezeigt, wie sie insbesondere in der Spuleneinrichtung **1** der **Fig. 1** zum Einsatz kommen kann. Die Stromzuführung **3** weist wiederum ein kaltes Ende **3a** auf, das elektrisch mit der Spulenwicklung **5** verbunden ist und ein warmes Ende **3b**, das elektrisch mit einem Versorgungsleiter **7** eines äußeren Stromkreises verbunden ist. Die Stromzuführung **3** umfasst hier allgemein einen ersten supraleitenden Leitungsteil **13** und einen zweiten normalleitenden Leitungsteil **15**, wobei die beiden Leitungsteile miteinander elektrisch in Serie geschaltet sind. Hierbei ist der supraleitende erste Leitungsteil **13** auf der Seite des kalten Endes **3a** angeordnet und der normalleitende zweite Leitungsteil **15** auf der Seite des warmen Endes **3b**. Der supraleitende erste Leitungsteil **13** weist zumindest einen supraleitenden Teilleiter auf. Dabei können optional auch ein oder mehrere normalleitende Leiter vorhanden sein, welche insbesondere in der Art eines Shunts dem supraleitenden Leiter parallelgeschaltet sein können.

[0056] Prinzipiell ist es möglich, dass der supraleitende erste Leitungsteil **13** über seine ganze Länge auf einer derart tiefen Temperatur vorliegt, dass die Sprungtemperatur des verwendeten Supraleitermaterials im ganzen Bereich unterschritten ist. Alternativ ist es aber auch möglich, dass der erste Leitungsteil an seinem warmen Ende **13b** eine Temperatur aufweist, die noch oberhalb der Sprungtemperatur liegt. Der supraleitende Zustand wird dann erst in einem Bereich zwischen diesen beiden Leitungsenden **13a** und **13b** erreicht. Bei dieser Ausführungsvariante übernimmt das supraleitende Material erst allmählich mit abnehmender Temperatur einen immer höher werdenden Anteil des zu übertragenden Stroms.

[0057] **Fig. 3** zeigt einen schematischen Querschnitt durch einen Teil einer helixförmigen Wicklung, wie sie beispielsweise im ersten Leitungsteil **13** der Stromzuführung **3** der **Fig. 1** vorliegen kann. Diese helixförmige Wicklung umfasst beispielsweise ein erstes Leiterelement **31a** auf einem Tragelement **25**. Beim gezeigten Beispiel der **Fig. 3** weisen sowohl das erste Leiterelement **31a** als auch das Tragelement **25** die Form flacher Bänder auf, welche insbesondere gleich bereit sein können. Dies ist jedoch nicht zwingend notwendig, und es kann insbesondere das Tragelement **25** auch breiter ausgebildet sein als das darauf

angeordnete Leiterelement **31a**. Wesentlich ist, dass der Tragkörper **25** dem darauf angeordneten Leiterelement **31a** mechanische Festigkeit verleiht und dieses in der gewünschten helixartigen Form hält. Hierzu kann der Tragkörper **25** mechanisch wesentlich fester und insbesondere auch dicker ausgestaltet sein als das erste Leiterelement **31a**. Der gezeigte Stapel aus Tragkörper und Leiterelement ist innerhalb der helixförmigen Wicklung insbesondere so aufgewickelt, dass die Hauptflächen dieses Stapels auf der kreiszylindrischen Mantelfläche der Helix zu liegen kommen. Dementsprechend liegen die beiden gezeigten Elemente **25** und **31a** in radialer Richtung **R** benachbart vor. Im gezeigten Beispiel der **Fig. 3** kann beispielsweise das Tragelement **25** radial innen liegen und von hier aus das außenliegende Leiterelement **31a** halten. Dementsprechend ist durch die Lage der inneren Begrenzungsfläche des Tragelements ein innerer Radius R_i der Helix definiert und somit ein innerer Radius des ersten Leitungsteils **13**. In analoger Weise ist durch die äußere Begrenzungsfläche des ersten Leiterelements **31a** ein äußerer Radius R_a der Helix definiert und somit ein äußerer Radius des ersten Leitungsteils **13**.

[0058] Der erste Leitungsteil **31a** weist in diesem Beispiel als supraleitenden Draht einen flachen supraleitenden Bandleiter **33** auf, welcher ein Trägersubstrat **41**, eine darauf angeordnete supraleitende Schicht **43** und eine dem Trägersubstrat gegenüberliegende Stabilisierungsschicht **45** umfasst. Dabei sollen optionale zusätzliche Zwischenschichten, insbesondere geeignete Puffer-, Wachstums- und/oder Deckschichten innerhalb dieses Stapels nicht ausgeschlossen sein. Um diesen Schichtstapel herum ist eine umhüllende Isolierungsschicht **47** angeordnet. Hierbei kann es sich beispielsweise um eine isolierende Umwicklung oder aber auch um eine Ummantelung in Form einer Beschichtung aus einem entsprechend gut isolierenden Material (beispielsweise um ein isolierendes Polymer wie Teflon, ein Polyimid - insbesondere Kapton - und/oder ein Polyetheretherketon handeln).

[0059] Prinzipiell können entweder das Substrat **41**, die Stabilisierungsschicht **45** und/oder das Tragelement **25** aus einem elektrisch normalleitenden Material und insbesondere aus einem metallischen Material gebildet sein. Generell ist es vorteilhaft, wenn zumindest eines der genannten Elemente aus einem metallischen Material gebildet ist und zumindest abschnittsweise (und insbesondere auch durchgehend) leitend mit der supraleitenden Schicht **43** verbunden ist, sodass dieses normalleitende Element die Funktion eines parallelen Strompfades übernehmen kann. Dies ist insbesondere dann nützlich, wenn der erste Leitungsteil **13** nicht auf seiner ganzen Länge, sondern nur in einem Teilbereich ausreichend kalt ist, damit die Schicht **43** supraleitend wird. So kann das wenigstens eine genannte normalleitende Element zu-

mindest in einem warmen Teilbereich des ersten Leitungsteils **13** den Hauptteil des Stromtransports übernehmen.

[0060] Aber selbst dann, wenn der gesamte erste Leitungsteil **13** ausreichend kalt für einen supraleitenden Stromtransport ist, kann es nützlich sein, wenn ein paralleler Strompfad vorliegt. Dieser kann beispielsweise bei einem unerwünschten Zusammenbrechen der supraleitenden Eigenschaften als Shunt wirken und so eine Schädigung des supraleitenden Materials durch Überhitzung verhindern.

[0061] Fig. 4 zeigt eine schematische teilperspektivische Darstellung einer Stromzuführung **3** nach einem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung. Prinzipiell kann diese Stromzuführung **3** ähnlich ausgebildet sein wie die bereits in Fig. 1 dargestellte Stromzuführung. Im Unterschied zu dem dort dargestellten Beispiel wird hier jedoch eine innerhalb eines Außengehäuses **9** angeordnete supraleitende Spulenwicklung **5** über eine gemeinsame Stromzuführung **3** mit zwei Verbindungsleitern **7** verbunden. Hierzu umfasst die Stromzuführung **3** wiederum einen ersten Leitungsteil **13** und an dessen warmes Ende **13b** anschließend einen zweiten Leitungsteil **15**. Beide Leitungsteile weisen jeweils zwei parallel geführte Leiterelemente auf, um die Verbindung zu den zwei Verbindungsleitern **7** zu ermöglichen. Innerhalb des ersten Leitungsteils **13** liegen hierzu zwei separate supraleitende Leiterelemente **31a** und **31b** vor, welche zusammen zu einer helixförmigen Wicklung gewickelt sind. Innerhalb des zweiten Leitungsteils **15** liegen zwei normalleitende Leiterelemente vor, welche separat mit **15** bezeichnet sind und welche hier parallel zueinander durch jeweils separat realisierte Durchführungen **12** durch die Gehäusewand **9** hindurchgeführt sind.

[0062] Die beiden supraleitenden Leiterelemente **31a** und **31b** des ersten Leitungsteils **13** weisen ähnlich wie beim vorhergehenden Beispiel jeweils einen supraleitenden Bandleiter auf. Diese beiden Bandleiter sind jeweils mit den zugeordneten normalleitenden Leiterelementen **15** elektrisch verbunden und werden dann zusammen als gemeinsamer flacher Stapel in Form einer Helixwicklung geführt. Der Stapel, aus dem diese Helix gebildet ist, umfasst aber nicht nur die beiden Bandleiter, sondern auch ein ebenfalls bandförmiges Tragelement **25**, welches hier mechanisch an einem zentralen Befestigungsbolzen **23** zwischen den beiden Stromdurchführungen **12** befestigt ist. Am gegenüberliegenden Ende der helixförmigen Wicklung (mit Helixachse **A**) ist dieser Leiterstapel mit einem Anschlusspunkt **35** verbunden. Dieser Anschlusspunkt **35** kann beispielsweise zur koaxialen Stromführung der beiden elektrisch unabhängigen Leiter ausgestaltet sein und so die Stromzuführung **3** an die entsprechende supraleitende Spulenwicklung **5** anbinden. In Fig. 4 sind

beispielhaft nur wenige Windungen der helixförmigen Wicklung gezeigt. Diese können jedoch exemplarisch für eine deutlich höhere Windungszahl und auch für eine wesentlich steilere oder auch flachere Helixgeometrie stehen. Wesentlich ist vor allem, dass durch die helixförmige Anordnung der Wicklung der thermisch wirksame Pfad verlängert wird.

[0063] Fig. 5 zeigt einen schematischen Querschnitt durch einen Teil einer helixförmigen Wicklung, wie sie beispielsweise im ersten Leitungsteil **13** der Stromzuführung **3** der Fig. 4 vorliegen kann. Im Unterschied zur Darstellung der Fig. 3 liegt hier ein Stapel aus einem ersten Tragelement **25a** und zwei flach darauf liegenden supraleitenden Bandleitern vor. Dabei bildet ein solcher Bandleiter das erste Leiterelement **31a** und der zweite Bandleiter bildet das zweite Leiterelement **31b**. Ähnlich wie beim Beispiel der Fig. 3 ist auch hier ein bezüglich der radialen Richtung **R** der Helix radialer Schichtstapel gebildet. Der innere Radius **R_i** des ersten Leitungsteils **13** wird also wieder durch eine Hauptfläche des ersten Tragelements **25a** gebildet, und der äußere Radius **R_a** wird durch eine Hauptfläche des nun zusätzlich vorliegenden zweiten Leiterelement **31b** gebildet. Im gezeigten Beispiel sind die beiden Leiterelemente **31a** und **31b** jeweils analog wie das Leiterelement **31a** der Fig. 3 aufgebaut. Bei dem hier dargestellten Aufbau sind jeweils die beiden Stabilisierungsschichten **41** zueinander orientiert. Es sind jedoch auch andere Anordnungen denkbar, bei denen zum Beispiel die beiden Substrate **45** zueinander orientiert sind oder bei denen das Substrat eines Bandleiters zur Stabilisierungsschicht des anderen Bandleiters hin orientiert ist. Auch hier übernimmt das erste Tragelement **25a** die mechanisch tragende Funktion, sodass die beiden Bandleiter in der gewünschten helixförmigen Geometrie gehalten werden. Auch hier können entweder das erste Tragelement **25a** und/oder das jeweilige Substrat **41** und/oder die jeweilige Stabilisierungsschicht **45** einem normalleitenden parallelen Strompfad ausbilden.

[0064] Die beiden einzelnen Leiterelemente **31a** und **31b** können elektrisch unabhängig zum Transport unterschiedlicher Ströme ausgebildet sein. Beispielsweise kann ein Leiterelement als Hinleiter und das andere Element als Rückleiter ausgestaltet sein. Bei dieser Ausführungsform liegt durch die helixförmige Wicklung eine bifilare Wicklung vor, durch die Wechselstromverluste wirksam verringert werden können.

[0065] Es können innerhalb der helixförmigen Wicklung auch mehr als diese zwei gezeigten Leiterelemente zum Transport unabhängiger Ströme vorliegen. So können beispielsweise mehrere Leiterelemente vorliegen, welche jeweils den unterschiedlichen Phasen eines Mehrphasen-Wechselstromsystems zugeordnet sind. Zusätzlich können auch für jede dieser Phasen prinzipiell sowohl ein Hinleiter

als auch ein Rückleiter vorliegen. Bei einer solchen elektrisch unabhängigen Ausgestaltung der einzelnen Leiterelemente kann es zweckmäßig sein, wenn der parallele normalleitende Strompfad nicht durch das erste Tragelement **25a**, sondern bereits innerhalb der jeweiligen Bandleiter (beispielsweise über das Substrat **41** und/oder die Stabilisierungsschicht **45**) zur Verfügung gestellt wird. Bei einer solchen Ausgestaltung liegen also für die einzelnen unabhängigen Supraleiterelemente **43** auch jeweils zugeordnete normalleitende Elemente vor. In einem solchen Fall kann das erste Tragelement **25a** auch elektrisch isolierend ausgebildet sein und eine im Wesentlichen mechanisch tragende Funktion erfüllen.

[0066] Optional kann der Wicklungsstapel der **Fig. 5** auch noch ein zweites Tragelement **25b** umfassen, welches hier radial außenliegend als gestricheltes Element dargestellt ist. Ein solches zweites Tragelement **25b** kann insbesondere bei der gezeigten Konfiguration mit zwei Leiterelementen **31a** und **31b** sinnvoll sein, um den Stapel möglichst symmetrisch auszugestalten. Bei einem solchen sandwichartigen Aufbau können insbesondere entweder beide Tragelemente normalleitend oder beide nichtleitend ausgestaltet sein. Bei der normalleitenden Ausführungsform kann jedes der beiden Tragelemente elektrisch dem benachbarten Leiterelement zugeordnet und zumindest abschnittsweise mit dessen leitenden Bestandteilen verbunden sein. Dagegen ist mit einer elektrisch nicht leitenden Ausführungsform der Tragelemente der Vorteil verbunden, dass für die Tragelemente auch ein thermisch vergleichsweise schlecht leitendes Material gewählt werden kann und so ein zusätzlicher Wärmeeintrag über diese Elemente vermindert wird.

[0067] In **Fig. 6** ist ein schematischer Querschnitt durch ein weiteres beispielhaftes erstes Leiterelement **31a** gezeigt, wie es insbesondere alternativ in den Beispielen der **Fig. 1** beziehungsweise 4 zum Einsatz kommen kann. Im Unterschied zu den im Zusammenhang mit den **Fig. 3** und **Fig. 5** beschriebenen Leiterelementen liegt hier ein Stapel **61** aus zwei flach übereinanderliegenden Bandleitern **33** vor. Diese beiden Bandleiter **33** können elektrisch miteinander parallel geschaltet sein, um eine höhere Stromtragfähigkeit des entsprechenden Leiterelements zu ermöglichen. Die einzelnen Bandleiter können wiederum analog aufgebaut sein wie im Zusammenhang mit den **Fig. 3** und **Fig. 5** beschrieben. Diese beiden Bandleiter können wiederum optional mit einer gemeinsamen isolierenden Schicht **47** umhüllt sein.

[0068] In **Fig. 7** ist eine schematische teilperspektivische Darstellung einer Stromzuführung **3** nach einem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung gezeigt. Diese Stromzuführung **3** ist insgesamt ähnlich ausgebildet wie die Stromzuführung der **Fig. 4**. Zusätzlich zu den dort gezeigten Elementen sind hier zusätz-

lich zwei Strahlungsschilde **71** vorgesehen, um einen Wärmeeintrag durch Strahlungswärme in den Bereich der supraleitenden Spulenwicklung **5** zu verringern. Diese Strahlungsschilde **71** können als Scheiben ausgestaltet sein, welche quer zur Achse **A** der helixförmigen Wicklung ausgerichtet sind, sodass sie insbesondere einen Eintrag von Strahlungswärme parallel zu dieser Achse reduzieren können. Die beschriebene helixförmige Wicklung ist dabei durch entsprechende Ausnehmungen **73** in diesen Scheiben geführt. Zweckmäßig sind bei Vorliegen von mehreren solchen Strahlungsschilden **71** die Ausnehmungen seitlich versetzt angeordnet, wie dies beispielhaft für das untere, nur gestrichelt dargestellte Strahlungsschild angedeutet ist.

[0069] Im linken Teil der **Fig. 7** ist durch eine gestrichelte Linie ein untenliegender Bereich innerhalb des Vakuumsraums **V** angedeutet, in dem sich die helixförmige Wicklung auf einer Temperatur **T** befindet, welche die Sprungtemperatur **T_c** des eingesetzten Supraleitermaterials unterschreitet. In diesem Beispiel wird also kein thermischer Anker verwendet, sodass der erste Leitungsteil **13** nicht auf einem einheitlichen Temperaturniveau liegt, sondern die Temperatur in Richtung des kalten Endes **13a** allmählich absinkt. Eine solche kontinuierliche Veränderung der Temperatur über die Länge dieses Leitungsteils kann wiederum vorteilhaft sein, um den gesamten Wärmeeintrag zu reduzieren. Ein ausreichend hoher Stromtransport über die gesamte Länge dieses ersten Leitungsteils **13** wird dabei durch den beschriebenen parallelen normalleitenden Strompfad sichergestellt.

[0070] In **Fig. 8** ist eine schematische teilperspektivische Darstellung einer Stromzuführung **3** nach einem vierten Ausführungsbeispiel dargestellt. In elektrischer Hinsicht ist diese Stromzuführung ähnlich aufgebaut wie die Stromzuführung der **Fig. 4** beziehungsweise 7. Im Unterschied dazu ist das Tragelement, welches die beiden supraleitenden Leiterelemente **31a** und **31b** trägt, hier nicht als helixförmiges Element, sondern als hohlzylindrisches, rohrförmiges Tragelement **27** ausgebildet. Ein solches rohrförmiges Tragelement kann insbesondere mechanisch stabiler ausgestaltet sein als die helixförmig gewickelten Tragelemente der vorhergehenden Beispiele. Da der thermisch wirksame Pfad für die Wärmeleitung des Tragelements **27** hier jedoch kürzer ist, ist es zweckmäßig, ein solches rohrförmiges Tragelement aus einem thermisch vergleichsweise schlecht leitfähigen Material auszuführen. Auf diese Weise können die Vorteile der Erfindung durch die helixförmige Ausgestaltung der eingesetzten Leiterelemente trotzdem zum Tragen kommen.

Bezugszeichenliste

1	Spuleneinrichtung
3	Stromzuführung
3a	kaltes Ende
3b	warmes Ende
5	supraleitende Spulenwicklung
7	Verbindungsleiter
9	Außengehäuse
12	Durchführung
13	erster Leitungsteil
13a	kaltes Ende
13b	warmes Ende
15	zweiter Leitungsteil
23	Befestigungsbolzen
25	helixförmiges Tragelement
25a	erstes Tragelement
25b	zweites Tragelement
27	rohrförmiges Tragelement
31a	erstes Leiterelement
31b	zweites Leiterelement
33	Bandleiter
35	Anschlusspunkt
41	Trägersubstrat
43	supraleitende Schicht
45	Stabilisierungsschicht
47	isolierende Schicht
61	Bandleiterstapel
71	Strahlungsschild
73	Ausnehmung
A	Helixachse
I_a	erste Stromflussrichtung
I_b	zweite Stromflussrichtung
R	radiale Richtung der Helix
R_a	Außenradius des ersten Leitungsteils
R_a'	alternativer Außenradius
R_i	Innenradius des ersten Leitungsteils
T	Temperatur
T_c	Sprungtemperatur
V	Vakuumraum

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- DE 102007013350 B4 [0006]
- DE 102009028413 A1 [0007]

Patentansprüche

1. Stromzuführung (3) für eine supraleitende Spuleneinrichtung (1), umfassend

- wenigstens einen ersten Leitungsteil (13) mit wenigstens einem ersten Leiterelement (31a), welches wenigstens einen supraleitenden Draht (33) aufweist, - wobei das erste Leiterelement (31) in einer helixförmigen Wicklung angeordnet ist.

2. Stromzuführung (3) nach Anspruch 1, bei welcher der wenigstens eine supraleitende Draht ein Bandleiter (33) ist, welcher eine hochtemperatursupraleitende Schicht (43) auf einem Trägersubstrat (41) aufweist.

3. Stromzuführung (3) nach Anspruch 2, bei welcher der wenigstens eine Bandleiter (33) zumindest eine normalleitende Stabilisierungsschicht (45) aufweist, wobei die hochtemperatursupraleitende Schicht (43) zwischen dem Trägersubstrat (41) und der Stabilisierungsschicht (45) angeordnet ist.

4. Stromzuführung (3) nach einem der Ansprüche 2 oder 3, bei welcher der wenigstens eine Bandleiter (33) zumindest auf einer seiner beiden Hauptflächen eine elektrisch isolierende Schicht (47) aufweist.

5. Stromzuführung (3) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welcher der wenigstens eine Draht (33) innerhalb der helixförmigen Wicklung einen Krümmungsradius r von 40 mm oder weniger aufweist.

6. Stromzuführung (3) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welcher das erste Leiterelement (31a) einen Stapel (61) von zwei oder mehr übereinanderliegenden supraleitenden Bandleitern (33) umfasst.

7. Stromzuführung (3) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, welche ein zweites Leiterelement (31b) umfasst, welches innerhalb der helixförmigen Wicklung parallel zum ersten Leiterelement (31a) geführt ist.

8. Stromzuführung (3) nach Anspruch 7, bei welcher das erste Leiterelement (31a) und das zweite Leiterelement (31b) zum Stromtransport mit einander entgegengesetzten Stromflussrichtungen (I_a, I_b) ausgebildet sind.

9. Stromzuführung (3) nach Anspruch 7, bei welcher das erste Leiterelement (31a) und das zweite Leiterelement (31b) zum Stromtransport für unterschiedliche Phasen innerhalb eines Wechselstromkreises ausgebildet sind.

10. Stromzuführung (3) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, welche ein helixartig geformtes

Tragelement (25,25a) aufweist, auf welchem das erste Leiterelement (31a) angeordnet ist.

11. Stromzuführung (3) nach Anspruch 10, bei welcher das helixartig geformte Tragelement (25,25a) zumindest teilweise aus einem normalleitenden Material gebildet ist.

12. Stromzuführung (3) nach einem der Ansprüche 1 bis 9, welche ein rohrförmiges Tragelement (27) aufweist, um welches das erste Leiterelement (31a) gewickelt ist.

13. Supraleitende Spuleneinrichtung (1) mit wenigstens einer Stromzuführung (3) nach einem der vorstehenden Ansprüche und einer supraleitenden elektrischen Spulenwicklung (5).

14. Spuleneinrichtung (1) nach Anspruch 13, welche als Spuleneinrichtung für eine Wechselstromanwendung ausgebildet ist, insbesondere als Transformator, als Strombegrenzungseinrichtung und/oder als supraleitende Statorwicklung für eine elektrische Maschine ausgebildet ist.

15. Spuleneinrichtung (1) nach einem der Ansprüche 13 oder 14, wobei die Stromzuführung (3) ein erstes vergleichsweise kaltes Ende (3a) aufweist, welches mit der supraleitenden Spulenwicklung (5) verbunden ist, und ein zweites vergleichsweise warmes Ende (3b) aufweist, welches mit einem äußeren Stromkreis verbindbar ist.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

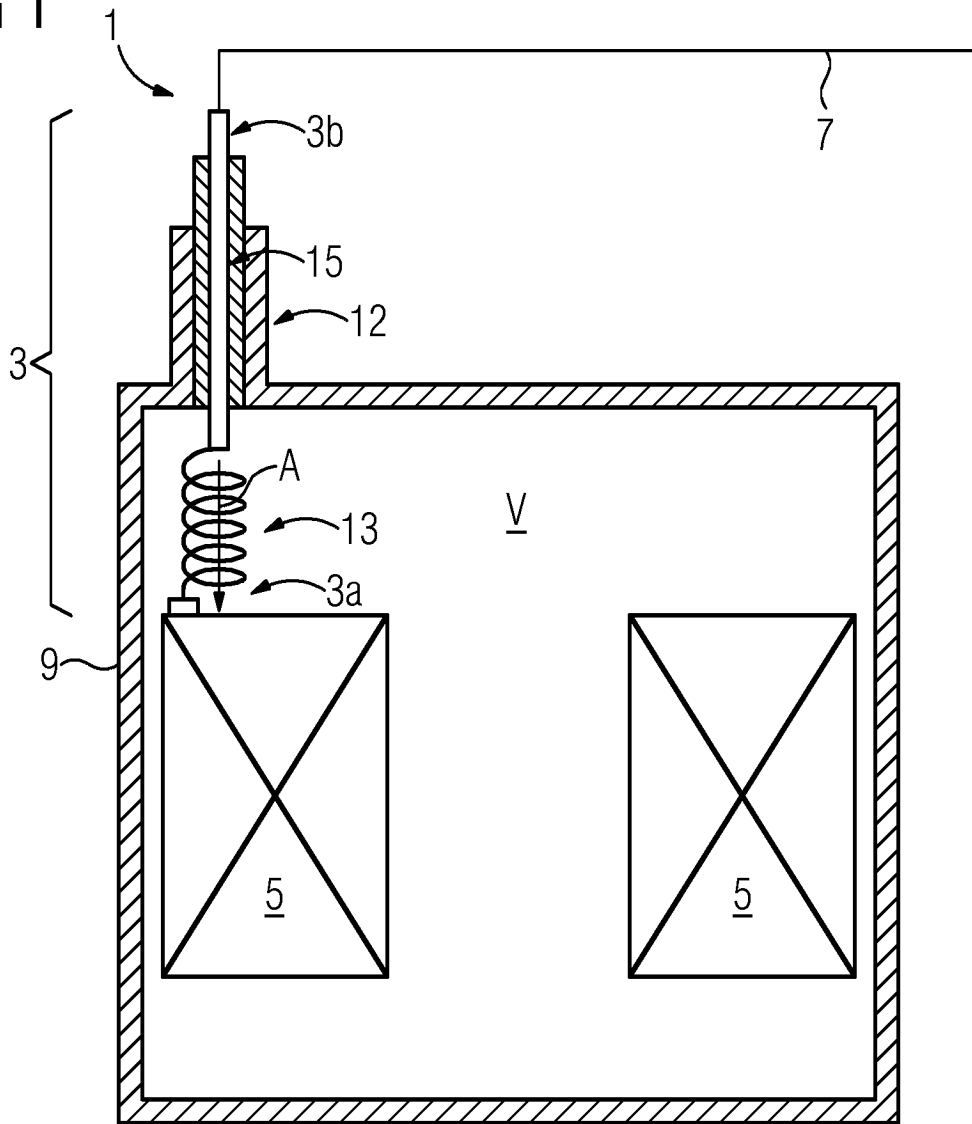


FIG 2

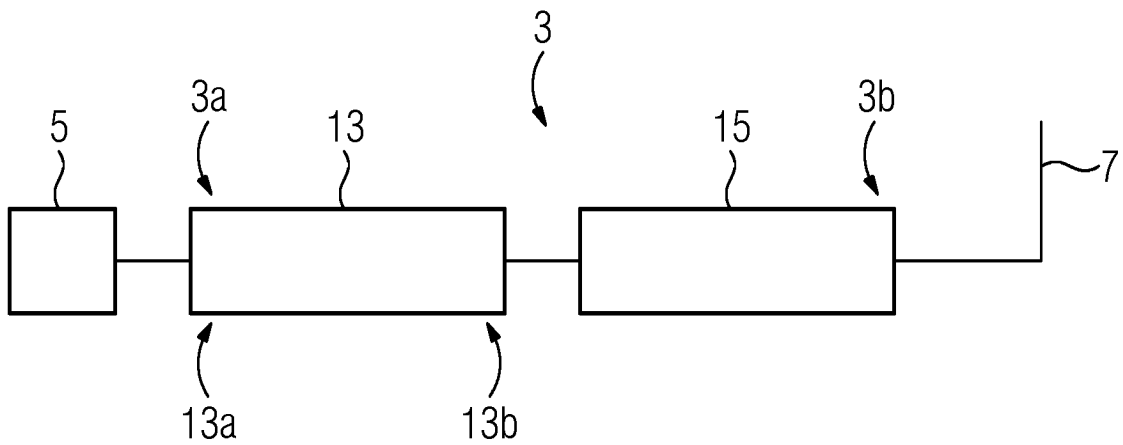


FIG 3

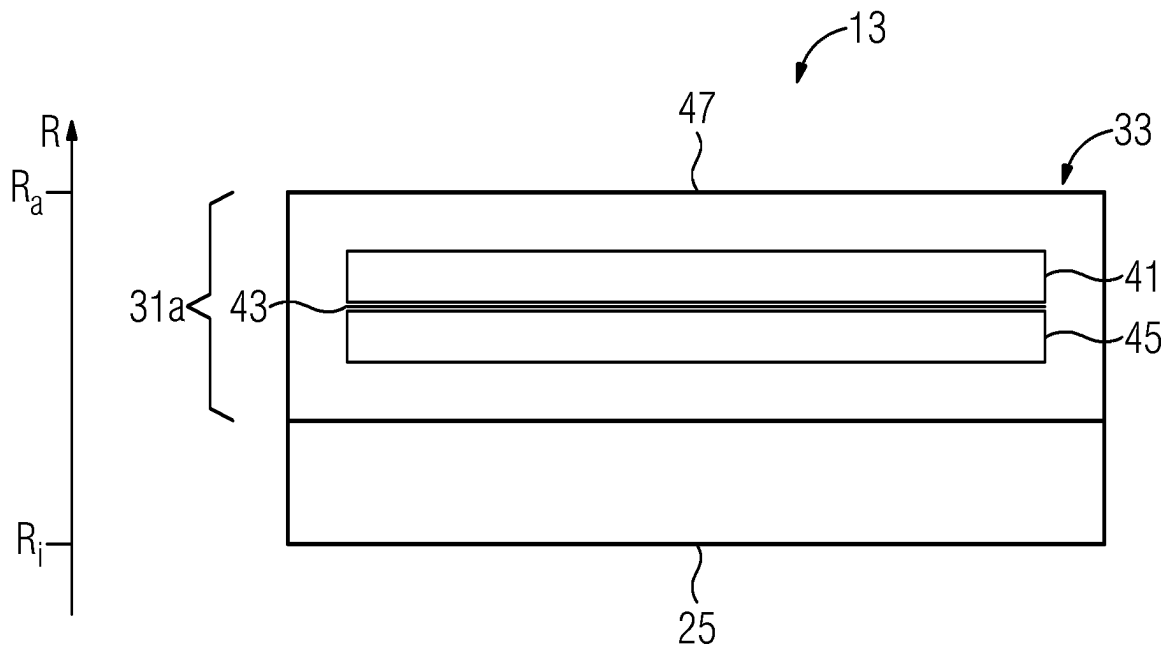


FIG 4

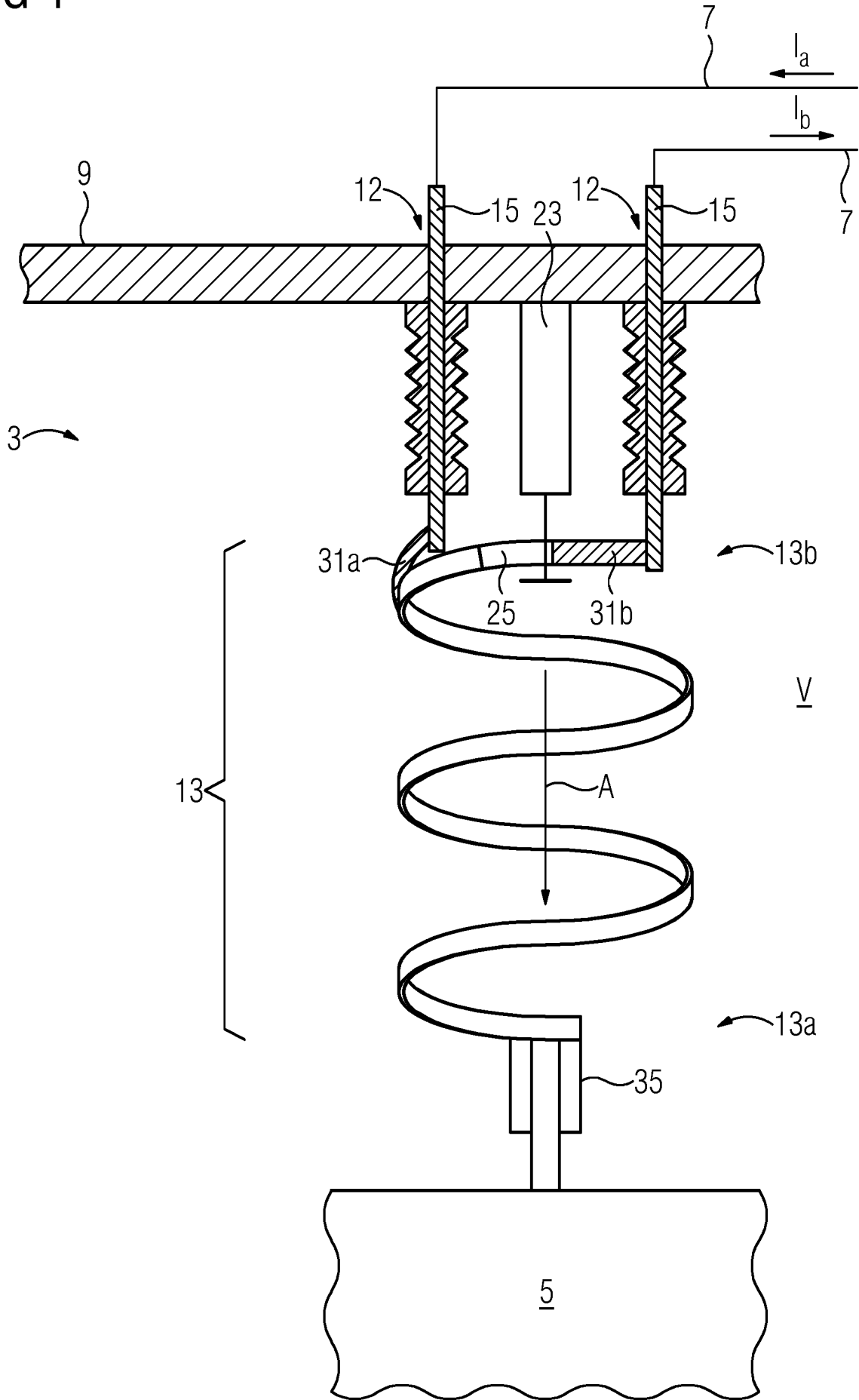


FIG 5

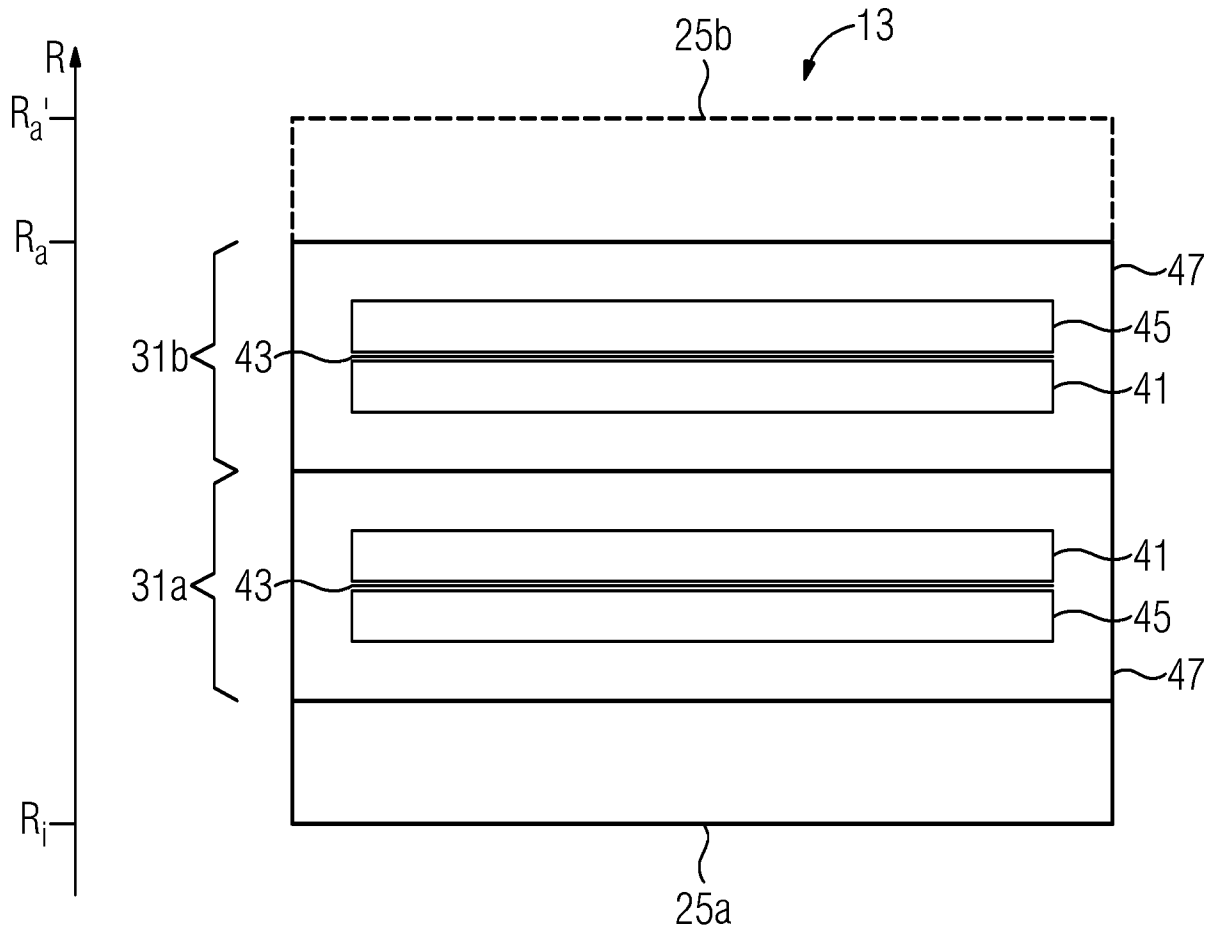


FIG 6

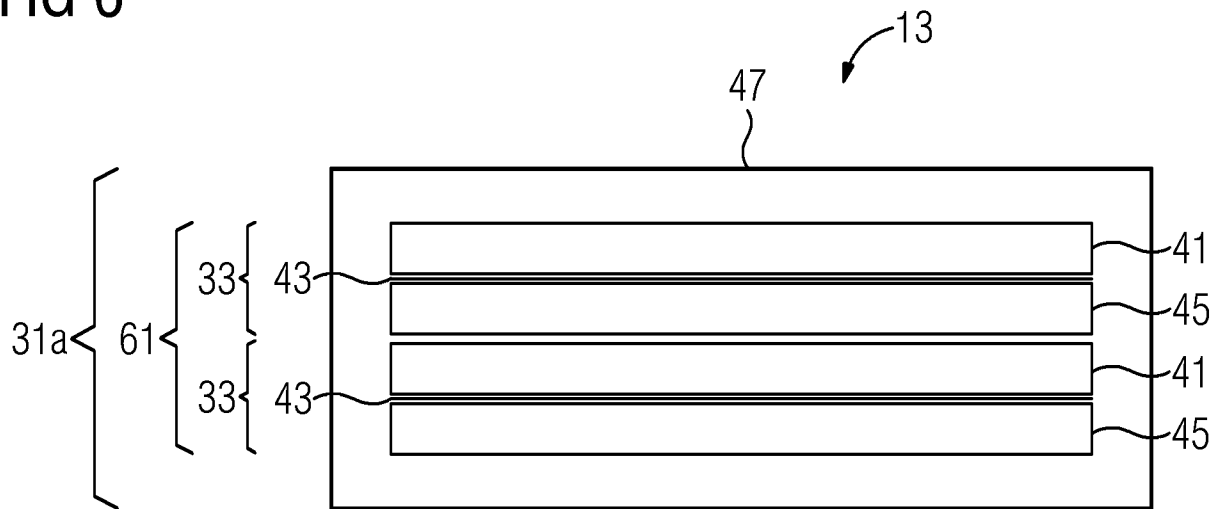


FIG 7

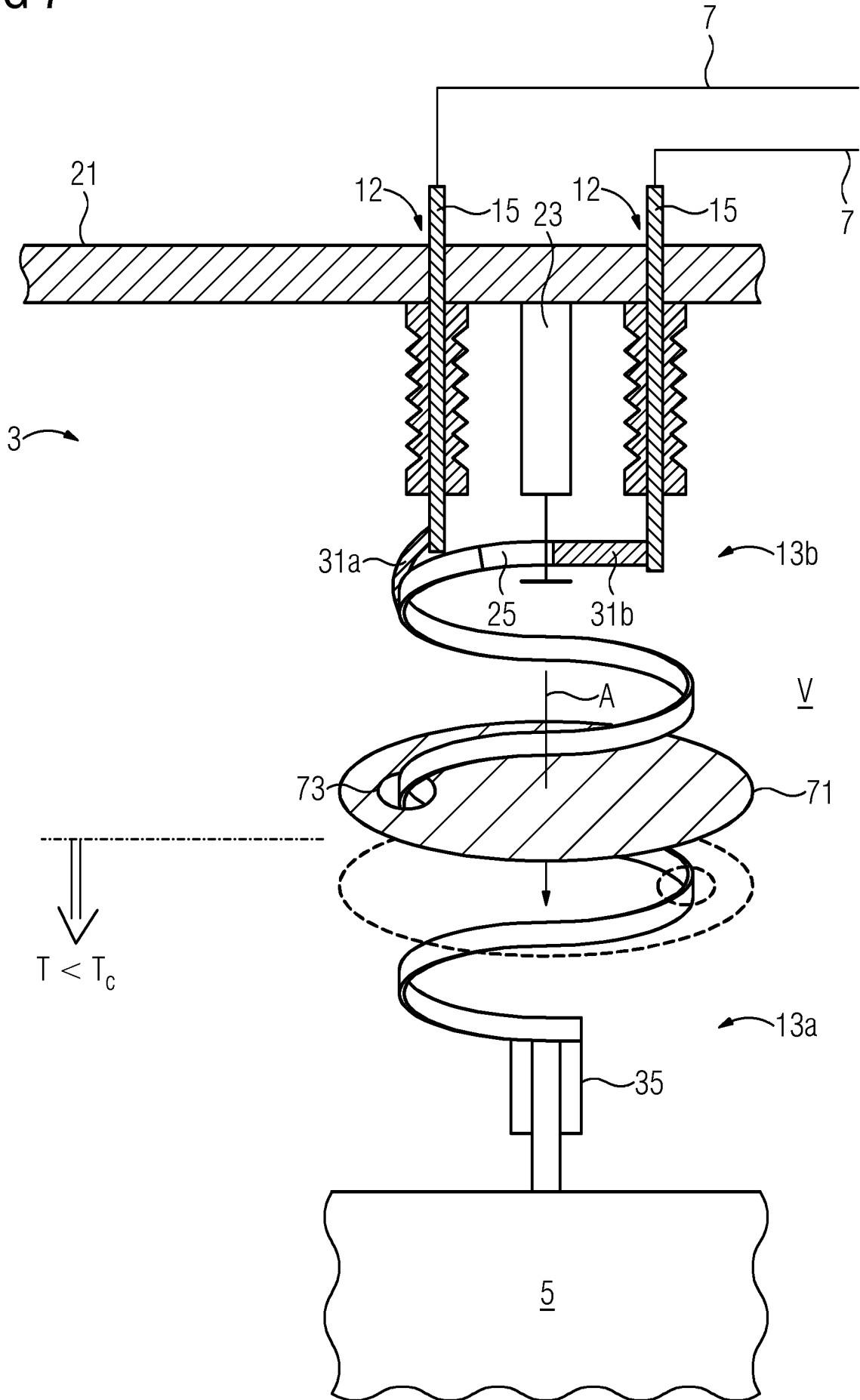


FIG 8

