



(11) **EP 3 557 595 A1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
23.10.2019 Patentblatt 2019/43

(51) Int Cl.:
H01F 38/02 (2006.01) **H02H 9/02 (2006.01)**
H01F 6/06 (2006.01) **H01F 6/00 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: **18167724.6**

(22) Anmeldetag: **17.04.2018**

(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:
KH MA MD TN

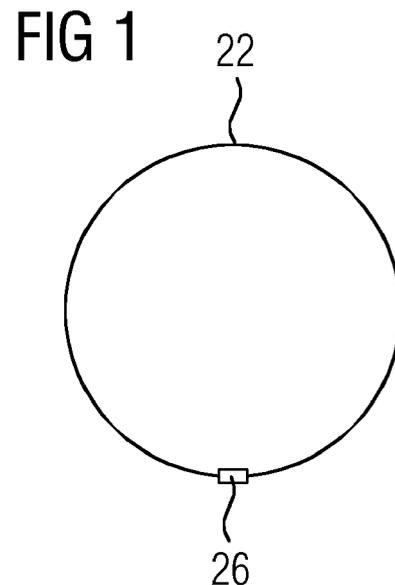
(71) Anmelder: **Siemens Aktiengesellschaft**
80333 München (DE)

(72) Erfinder:
• **Schacherer, Christian**
91352 Hallerndorf (DE)
• **Bauer, Anne**
90768 Fürth (DE)

(54) **BEGRENZEN EINES ELEKTRISCHEN BETRIEBSSTROMS EINES BETRIEBSSTROMKREISES**

(57) Die Erfindung betrifft eine Strombegrenzungseinrichtung (10) zum Begrenzen eines elektrischen Betriebsstroms eines Betriebsstromkreises mit:

- einem ersten und einem zweiten elektrischen Anschluss (12, 14) zum Anschließen an den Betriebsstromkreis,
- einer ersten Wicklung (16), die wenigstens einen ersten elektrischen Leiter (18) aufweist, wobei jeweils ein Leiterende des wenigstens einen ersten elektrischen Leiters (18) an einen jeweiligen der elektrischen Anschlüsse (12, 14) angeschlossen ist,
- einer zweiten Wicklung (20) mit wenigstens einer zweiten elektrischen Leiter (22) aus einem elektrisch supraleitenden Werkstoff, dessen Leiterenden miteinander elektrisch gekoppelt sind, wobei die erste und die zweite Wicklung (16, 20) zum Herstellen einer magnetischen Kopplung geeignet angeordnet sind,
- einer Kühlungseinheit (24), die ausgebildet ist, die zweite Wicklung (20) im bestimmungsgemäßen Betrieb auf eine Temperatur zu kühlen, die kleiner als eine Sprungtemperatur des elektrisch supraleitenden Werkstoffs ist, sowie einer Schalteinheit (26) zum elektrischen Koppeln der Leiterenden des wenigstens einen zweiten elektrischen Leiters (22) abhängig von einem Schaltzustand der Schalteinheit (26).



EP 3 557 595 A1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Strombegrenzungseinrichtung zum Begrenzen eines elektrischen Betriebsstroms eines Betriebsstromkreises mit einem ersten und einem zweiten elektrischen Anschluss zum Anschließen an den Betriebsstromkreis, einer ersten Wicklung, die wenigstens einen ersten elektrischen Leiter aufweist, wobei jeweils ein Leiterende des wenigstens einen ersten elektrischen Leiters an einen jeweiligen der elektrischen Anschlüsse angeschlossen ist, einer zweiten Wicklung mit wenigstens einem zweiten elektrischen Leiter aus einem elektrisch supraleitenden Werkstoff, dessen Leiterenden miteinander elektrisch gekoppelt sind, wobei die erste und die zweite Wicklung zum Herstellen einer magnetischen Kopplung geeignet angeordnet sind, sowie einer Kühlungseinheit, die ausgebildet ist, die zweite Wicklung im bestimmungsgemäßen Betrieb auf eine Temperatur zu kühlen, die kleiner als eine Sprungtemperatur des elektrisch supraleitenden Werkstoffs ist. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zum Betreiben einer Strombegrenzungseinrichtung zum Begrenzen eines elektrischen Betriebsstroms eines Betriebsstromkreises, bei dem eine erste Wicklung, die wenigstens einen ersten elektrischen Leiter aufweist und an den Betriebsstromkreis angeschlossen ist, mit einem elektrischen Betriebsstrom des Betriebsstromkreises beaufschlagt wird, eine zweite Wicklung mit wenigstens einem zweiten elektrischen Leiter aus einem elektrisch supraleitenden Werkstoff, dessen Leiterenden miteinander elektrisch gekoppelt sind, mit der ersten Wicklung magnetisch gekoppelt wird, sowie die zweite Wicklung im bestimmungsgemäßen Betrieb auf eine Temperatur gekühlt wird, die kleiner als eine Sprungtemperatur des elektrisch supraleitenden Werkstoffs ist. Schließlich betrifft die Erfindung auch ein Verfahren zum Herstellen einer Strombegrenzungseinrichtung zum Begrenzen eines elektrischen Betriebsstroms eines Betriebsstromkreises, bei dem eine erste Wicklung mit wenigstens einem ersten elektrischen Leiter hergestellt wird, wobei jeweils ein Leiterende des wenigstens einen ersten elektrischen Leiters an einen jeweiligen von zwei elektrischen Anschlüssen zum Anschließen der Strombegrenzungseinrichtung an den Betriebsstromkreis angeschlossen wird, eine zweite Wicklung mit wenigstens einem zweiten elektrischen Leiter aus einem elektrisch supraleitenden Werkstoff hergestellt wird, dessen Leiterenden miteinander elektrisch gekoppelt werden, die erste und die zweite Wicklung zum Herstellen einer magnetischen Kopplung geeignet angeordnet werden, sowie eine Kühlungseinheit angeordnet wird, die ausgebildet ist, die zweite Wicklung im bestimmungsgemäßen Betrieb auf eine Temperatur zu kühlen, die kleiner als eine Sprungtemperatur des elektrisch supraleitenden Werkstoffs ist.

[0002] Strombegrenzungseinrichtungen der gattungsgemäßen Art, Verfahren zu deren Betrieb sowie auch Verfahren zu deren Herstellung sind im Stand der Technik umfänglich bekannt. Gattungsgemäße Strombegren-

zungseinrichtungen, auch kurz supraleitende Strombegrenzer (SFCL) genannt, sind gut untersuchte Einrichtungen, die zur Begrenzung von Betriebsströmen außerhalb des bestimmungsgemäßen Betriebs, insbesondere bei einem Überstrom, der größer als ein Bemessungsstrom ist, wie zum Beispiel bei einem Kurzschlussfall in einer elektrischen Mittel- oder Hochspannungsanlage, dienen. Sie können mit unterschiedlichen Konzepten sowohl als überwiegend induktive als auch als überwiegend resistive Strombegrenzungseinrichtungen oder auch aus einer beliebigen Kombination beider Konzepte ausgebildet sein.

[0003] Resistive Strombegrenzungseinrichtungen sind unmittelbar mit dem Betriebsstromkreis elektrisch verbunden. Eine resistive Strombegrenzungseinrichtung weist in der Regel einen supraleitenden Bandleiter auf, der mit dem Betriebsstrom des Betriebsstromkreises beaufschlagt ist.

[0004] Bei einer induktiven Strombegrenzungseinrichtung sind zwei unterschiedliche Konzepte im Einsatz, und zwar einerseits mit einem abgeschirmten, ferromagnetischen Material und andererseits mit einem vormagnetisierten ferromagnetischen Material.

[0005] Bei einem abgeschirmten ferromagnetischen Material wird mittels einer vom Betriebsstrom durchströmten elektrischen Spule aufgrund einer magnetischen Kopplung in eine supraleitende Wicklung ein Strom induziert. Dadurch wird das ferromagnetische Material abgeschirmt und temporär unwirksam. Im Falle eines Überstroms das ferromagnetische Material wirksam und es tritt eine Änderung der Impedanz ein, die strombegrenzend wirkt. Eine elektrische Spannung, die im Falle eines Eingriffs der Begrenzungseinrichtung an der Strombegrenzungseinrichtung abfällt, kann über ein Windungsverhältnis der ersten und der zweiten Wicklung und über den resistiven Widerstand der supraleitenden Wicklung im nicht supraleitenden Zustand eingestellt werden.

[0006] Um eine Strombegrenzungseinrichtung in einer Mittel- oder Hochspannungsanlage sinnvoll einsetzen zu können, ist es zweckmäßig, dass die Strombegrenzungseinrichtung einen Überstrom, beispielsweise den Kurzschlussstrom, für eine vorgegebene Zeit, von zum Beispiel wenigen Sekunden, führen kann. Eine wichtige Bedingung für den Einsatz einer gattungsgemäßen Strombegrenzungseinrichtung ist ferner, dass insbesondere im Kurzschlussfall der Strom im Supraleiter schnell unterbrochen wird. Bei einem induktiven Strombegrenzer nach dem Stand der Technik ist eine Unterbrechung des Stroms im Supraleiter nur durch Abschalten des Stroms durch die Drosselspule möglich. Maßgeblich ist hier also das Abschalten des Stroms im Supraleiter. Wenn möglich sollte die strombegrenzende Funktionalität beibehalten werden.

[0007] Darüber hinaus ist zu beachten, dass ein erwärmter supraleitender Werkstoff zur Herstellung seiner supraleitenden elektrischen Leitfähigkeit gegebenenfalls wieder unter die Sprungtemperatur gekühlt werden

muss, damit die supraleitende Stromführung, die im bestimmungsgemäßen Betrieb der Strombegrenzungseinrichtung vorliegt, wenn der Betriebsstrom kleiner als der Vergleichsstrom ist, wieder aufgenommen werden kann. Bei bekannten Konzepten kann für eine entsprechende Kühlung ein Zeitraum von mehreren Sekunden erforderlich sein. Dies gilt für die häufig genutzten vorgenannten Konzepte sowohl für die resistive Strombegrenzungseinrichtung als auch für die induktive Strombegrenzungseinrichtung mit dem abgeschirmten ferromagnetischen Material.

[0008] Strombegrenzungseinrichtungen werden im Allgemeinen in der Energietechnik, insbesondere der elektrischen Energieversorgung, eingesetzt. In der elektrischen Energietechnik werden derartige Strombegrenzungseinrichtungen unter Verwendung von Drosselspulen nach dem Prinzip des abgeschirmten Eisenkerns (abgeschirmtes, ferromagnetisches Material) oder des gleichstromvormagnetisierten Eisenkerns (vormagnetisiertes ferromagnetisches Material) eingesetzt. Bei diesen Strombegrenzungseinrichtungen erweist es sich als nachteilig, dass die dort verwendeten Eisenkerne ein hohes Volumen und ein hohes Gewicht aufweisen und im Übrigen im bestimmungsgemäßen Betrieb außerhalb der Strombegrenzungsfunktionalität eine vergleichsweise hohe Impedanz bezüglich des Betriebsstromkreises, an dem sie angeschlossen sind, bewirken.

[0009] Eine gattungsgemäße Strombegrenzungseinrichtung offenbart zum Beispiel die DE 10 2007 007 087 A1, die eine Vorrichtung zur Strombegrenzung mit einer veränderbaren Spulenimpedanz offenbart. Durch Einsatz einer supraleitenden Spule im Inneren einer Drosselspule kann die Induktivität und demzufolge auch die Impedanz der Drosselspule reduziert werden. Dies erfolgt dadurch, dass in der supraleitenden Spule durch die Drosselspule ein Strom induziert wird, der ein Magnetfeld der Drosselspule zumindest teilweise kompensiert. Die supraleitende Spule ist mittels eines Kryostaten auf eine Temperatur gekühlt, die kleiner als die Sprungtemperatur des jeweils genutzten supraleitenden Werkstoffs ist. Diese Spule ist kurzgeschlossen.

[0010] In einem Normalbetrieb außerhalb einer strombegrenzenden Funktionalität kompensiert die supraleitende Spule das Magnetfeld der Drosselspule zumindest teilweise. Dadurch wird die Induktivität der Drosselspule reduziert und ein Spannungsabfall an der Drosselspule entsprechend reduziert. Die Strombegrenzungsfunktionalität wird dadurch realisiert, dass bei einem bestimmten Stromwert des Betriebsstroms, mit dem die Drosselspule beaufschlagt ist und der größer als der Vergleichswert ist, das supraleitende Material der supraleitenden Spule in einen Normalzustand übergeht. Dadurch erhöht sich die Induktivität der Drosselspule insgesamt, sodass dadurch eine Strombegrenzungsfunktionalität der Drosselspule erreicht werden kann. Die Strombegrenzungseinrichtung ist hier also aus einer Drosselspule gebildet, die magnetisch mit der supraleitenden Spule gekoppelt ist. Dadurch braucht die Strombegrenzungseinrichtung

dem Grunde nach kein ferromagnetisches Material, insbesondere auch keinen Eisenkern.

[0011] Um eine Strombegrenzungseinrichtung, insbesondere basierend auf der Funktionalität eines supraleitenden Werkstoffs, nach einer Auslösung der Strombegrenzungsfunktionalität wieder in normalen Betriebszustand zu setzen, ist es beim Stand der Technik erforderlich, die Strombegrenzungseinrichtung zu deaktivieren, beispielsweise indem sie mittels eines separat angeordneten Leistungsschalters freigeschaltet wird oder dergleichen. Bei einer resistiven Strombegrenzungseinrichtung kann dann der Überstrom beziehungsweise Kurzschlussstrom durch eine parallele Drosselspule geführt werden, solange der supraleitende Werkstoff aufgrund der Betätigung des Leistungsschalters freigeschaltet ist. Dies wird auch äußere Abschaltung genannt.

[0012] Dem Grunde nach ist das vorgenannte Vorgehen auch bei einer induktiven Strombegrenzungseinrichtung einsetzbar, die auf dem Prinzip des abgeschirmten Eisenkerns basiert. Da bei diesem Konzept jedoch die Strombegrenzungswirkung in der Regel geringer als bei einer resistiven Strombegrenzungseinrichtung ist, wird üblicherweise auf eine parallelgeschaltete Drosselspule verzichtet. Bei diesem Konzept ist es jedoch nicht ohne Weiteres möglich, den elektrischen Strom, der die zweite Wicklung durchströmt, zu unterbrechen, weil der elektrische Strom in der zweiten Wicklung allein über eine magnetische Kopplung mit der ersten Wicklung induziert wird. Aus diesem Grund wird deshalb in der Regel auch die erste Wicklung aus dem Betriebsstromkreis abgeschaltet und damit der Betriebsstrom unterbrochen.

[0013] Aus der DE 10 2016 223 022 A1 ist ferner ein induktiver Strombegrenzer für Gleichstromanwendungen bekannt, der als induktiver supraleitender Strombegrenzer ausgebildet ist, auch englisch als Superconducting Fault Current Limiter (SFCL), und dessen Funktion darauf basiert, ein Magnetfeld einer vom Betriebsstrom durchströmten Drosselspule mittels einer kurzgeschlossenen Spule aus einem supraleitenden Material zu kompensieren, um außerhalb der Begrenzungsfunktionalität eine möglichst geringe Induktivität durch die Drosselspule bereitzustellen. Ist der Betriebsstrom durch die Drosselspule allerdings größer als ein vorgegebener Vergleichswert, kann die supraleitende Spule den entsprechenden Spulenstrom nicht mehr supraleitend führen, wodurch die Kompensation des Magnetfelds deutlich reduziert wird. In der Folge steigt die Induktivität der Drosselspule entsprechend stark an.

[0014] Um nach einem Auslösen diese Strombegrenzungseinrichtung wieder in Betrieb zu setzen, ist es erforderlich, dass der Strom in der supraleitenden Spule entsprechend reduziert wird. Zudem ist zu beachten, dass die supraleitende Spule eventuell aufgrund thermischer Wirkungen während des ausgelösten Zustands zunächst wieder unter die Sprungtemperatur zu kühlen ist.

[0015] Auch wenn sich diese Realisierungen des Stands der Technik bewährt haben, besteht weiter Verbesserungsbedarf. So hat die resistive Lötverbindung

zum Beispiel den Nachteil der begrenzten Wirksamkeit. Die Zeit bis zur Wiederherstellung des normalen Betriebszustands außerhalb des ausgelösten Zustands ist vergleichsweise lang.

[0016] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Reaktivieren der Strombegrenzungseinrichtung nach einem Auslösen aufgrund eines Betriebsstroms, der größer als der Vergleichsstrom ist, zu verbessern.

[0017] Als Lösung werden mit der Erfindung eine Strombegrenzungseinrichtung, ein Verfahren zum Betreiben der Strombegrenzungseinrichtung sowie auch ein Verfahren zum Herstellen der Strombegrenzungseinrichtung gemäß den unabhängigen Ansprüchen vorgeschlagen.

[0018] Vorteilhafte Weiterbildungen ergeben sich anhand von Merkmalen der abhängigen Ansprüche.

[0019] Bezüglich einer gattungsgemäßen Strombegrenzungseinrichtung wird insbesondere vorgeschlagen, dass diese eine Schalteinheit zum elektrischen Koppeln der Leiterenden des wenigstens einen zweiten elektrischen Leiters abhängig von einem Schaltzustand der Schalteinheit aufweist.

[0020] Bezüglich eines gattungsgemäßen Betriebsverfahrens wird insbesondere vorgeschlagen, dass die Leiterenden des wenigstens einen zweiten elektrischen Leiters abhängig von einem Schaltzustand einer die Leiterenden koppelnden Schalteinheit elektrisch gekoppelt werden.

[0021] Bezüglich eines Herstellverfahrens wird insbesondere vorgeschlagen, dass eine Schalteinheit angeordnet wird, mittels der die Leiterenden des wenigstens einen zweiten elektrischen Leiters abhängig von einem Schaltzustand der Schalteinheit elektrisch gekoppelt werden.

[0022] Die Erfindung basiert auf dem Gedanken, dass durch Integration einer Schalteinheit in die Strombegrenzungseinrichtung eine Abschaltbarkeit für einen Stromfluss in der zweiten Wicklung erreicht werden kann, so dass die nachteiligen Auswirkungen, die durch das Auslösen der Strombegrenzungseinrichtung entstehen, schnell und zügig zurückgeführt werden können. Dadurch kann ein bestimmungsgemäßer Betrieb der Strombegrenzungseinrichtung möglichst zeitnah wieder erreicht werden.

[0023] Die Schalteinheit kann je nach Bedarf ein oder mehrere elektromechanische Schaltelemente sowie gegebenenfalls auch Halbleiterschalter umfassen. Natürlich können auch Kombinationen hiervon vorgesehen sein. Vorzugsweise ist die Schalteinheit unmittelbar im Bereich der zweiten Wicklung angeordnet und kann darüber hinaus auch einstückig mit der zweiten Wicklung ausgebildet sein. Dadurch kann eine kompakte Bauform erreicht werden, sodass die bestimmungsgemäße Funktionalität der Strombegrenzungseinrichtung verbessert werden kann.

[0024] Der Betriebsstromkreis ist ein Stromkreis, bei dem im bestimmungsgemäßen Betrieb in einem ungestörten Zustand ein vorgegebener Betriebsstrom strömt.

Dieser Strom kann vorzugsweise dauerhaft im Betriebsstromkreis geführt werden. Der Betriebsstromkreis kann somit zum Beispiel ein elektrisches Energieversorgungsnetz, insbesondere ein Mittelspannungsnetz oder ein Hochspannungsnetz, sein. Jedoch ist die Erfindung nicht auf die Anwendung bei Mittelspannung oder Hochspannung begrenzt. Sie kann natürlich auch bei einer Niederspannung zum Einsatz kommen, insbesondere einer Niederspannung gemäß der Richtlinie 2014/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt. Niederspannung meint insbesondere eine Wechselspannung zwischen etwa 50 V und 1000 V beziehungsweise eine Gleichspannung zwischen etwa 75 V und etwa 1500 V. Mittelspannung meint insbesondere eine elektrische Wechselspannung zwischen etwa 1000 V bis etwa 52 kV. Hochspannung meint insbesondere eine Wechselspannung, die größer als etwa 52 kV, insbesondere größer als 60 kV, vorzugsweise größer als 63 kV, ist.

[0025] Vorzugsweise dient deshalb der Betriebsstromkreis dazu, elektrische Einrichtungen wie zum Beispiel elektrische Verbraucher, elektrische Energieerzeuger und/oder dergleichen zum Zwecke des Austauschens von elektrischer Energie miteinander elektrisch zu koppeln. Der Betriebsstrom ist deshalb ein elektrischer Strom, der dazu dient, die elektrische Energie zwischen den an den Betriebsstromkreis angeschlossenen elektrischen Einrichtungen zu verteilen.

[0026] Die Strombegrenzungseinrichtung weist vorzugsweise den ersten und den zweiten elektrischen Anschluss zum Anschließen an den Betriebsstromkreis auf. Die Strombegrenzungseinrichtung ist deshalb insbesondere dazu ausgelegt, an den Betriebsstromkreis derart angeschlossen zu werden, dass der Betriebsstrom des Betriebsstromkreises die Strombegrenzungseinrichtung ebenfalls durchströmt. Diesem Zweck dienen der erste und der zweite elektrische Anschluss.

[0027] Die Strombegrenzungseinrichtung kann deshalb als einzeln handhabbare Baugruppe ein eigenes Gehäuse aufweisen, an dem die beiden elektrischen Anschlüsse angeordnet sind, um einen Anschluss an den Betriebsstromkreis zu ermöglichen. Zu diesem Zweck können entsprechende elektromechanische Verbindungsmittel wie Steck- und/oder Schraubklemmen, Lötverbindungen, Klemmverbindungen und/oder dergleichen vorgesehen sein.

[0028] Die Strombegrenzungseinrichtung weist die erste Wicklung auf, die wenigstens einen elektrischen Leiter aufweist, wobei jeweils ein Leiterende des wenigstens einen ersten elektrischen Leiters an einen jeweiligen der elektrischen Anschlüsse angeschlossen ist. Sind zwei oder noch mehr erste elektrische Leiter vorgesehen, sind diese vorzugsweise parallel an die Anschlüsse angeschlossen. Die mehreren ersten elektrischen Leiter sind vorzugsweise auch räumlich im Wesentlichen par-

allel angeordnet. Die erste Wicklung kann somit eine Drosselspule bereitstellen, die in bekannter Weise eine elektrische Induktivität bereitstellt. Die erste Wicklung weist wenigstens eine einzige Windung des wenigstens einen ersten elektrischen Leiters auf. In der Regel sind jedoch mehrere Windungen des wenigstens einen elektrischen Leiters zum Ausbilden der ersten Wicklung vorgesehen.

[0029] Der erste elektrische Leiter kann ein gewöhnlicher elektrischer Leiter sein, der je nach Bedarf unterschiedlichste Querschnittsformen wie rund, eckig, Kombinationen hiervon und/oder dergleichen aufweisen kann. Denkbar sind auch Hohlleiter beispielsweise Rohre, zur Kühlung zum Beispiel mittels Wasser. Dies könnte bei diesem Konzept besonders interessant sein, aufgrund der vorteilhaften kompakten Bauweise, insbesondere in Bezug auf eine magnetische Kopplung zwischen der ersten und der zweiten Wicklung.

[0030] Der elektrische Leiter kann vorzugsweise eine Isolationsschicht aufweisen, sodass insbesondere bei mehreren benachbart angeordneten Windungen eine elektrische Isolation gegenüber benachbart angeordneten Windungen beziehungsweise weiteren ersten elektrischen Leitern erreicht werden kann. Der wenigstens eine erste elektrische Leiter kann aus einem Werkstoff wie Kupfer, Aluminium, Legierungen hiervon und/oder dergleichen gebildet sein. Ein Leiterquerschnitt des ersten elektrischen Leiters ist vorzugsweise an einen Bemessungsstrom für den Betriebsstromkreis angepasst ausgebildet. Die Leiterenden sind vorzugsweise unmittelbar an den ersten und den zweiten elektrischen Anschluss angeschlossen.

[0031] Die Strombegrenzungseinrichtung weist ferner die zweite Wicklung mit dem wenigstens einem zweiten elektrischen Leiter aus einem elektrisch supraleitenden Werkstoff auf. Der elektrisch supraleitende Werkstoff kann zum Beispiel YBCO oder dergleichen sein. Aber auch andere geeignete Werkstoffe, die supraleitende Eigenschaften zeigen, können hier eingesetzt werden. Auch Kombinationen hiervon können vorgesehen sein. Der wenigstens eine zweite elektrische Leiter kann ebenso wie der erste elektrische Leiter einen geeigneten Querschnitt aufweisen, um im bestimmungsgemäßen betrieb die gewünschte Stromführung in der zweiten Wicklung realisieren zu können. Auch wenn eine Form des Querschnitts des wenigstens einen zweiten elektrischen Leiters ebenso wie der wenigstens eine erste elektrische Leiter gewählt sein kann, ist der zweite elektrische Leiter vorzugsweise bandförmig ausgebildet. Die Form der Querschnitte des wenigstens einen ersten und des wenigstens einen zweiten Leiters können etwa gleich und auch abweichend voneinander gewählt sein. Der zweite elektrische Leiter weist ebenfalls Leiterenden auf, die hier jedoch - anders als der wenigstens eine erste elektrische Leiter - elektrisch miteinander gekoppelt sind, sodass die zweite Wicklung im Wesentlichen kurzgeschlossen sein kann.

[0032] Die erste und die zweite Wicklung sind zum Her-

stellen einer magnetischen Kopplung zueinander geeignet angeordnet. Dadurch ist es möglich, dass die erste und die zweite Wicklung miteinander magnetisch in Wechselwirkung treten. Wird die erste Wicklung vom Betriebsstrom durchströmt, erzeugt sie ein Magnetfeld, welches in der zweiten Wicklung einen entsprechenden Stromfluss bewirkt. Da die zweite Wicklung durch das Koppeln der Leitungsenden des zweiten elektrischen Leiters im Wesentlichen kurzgeschlossen sein kann, kann hierdurch eine Kompensation des durch die erste Wicklung erzeugten Magnetfeldes erreicht werden. Eine Induktivität der ersten Wicklung kann dadurch reduziert werden.

[0033] Die Kompensation der Induktivität kann besonders günstig dadurch erreicht werden, dass der supraleitende Werkstoff mittels der Kühlungseinheit auf eine Temperatur gekühlt wird, die kleiner als seine Sprungtemperatur ist. Dadurch ist die zweite Wicklung supraleitend, wenn sie entsprechend kalt ist. Dadurch kann eine große Kompensationswirkung in Bezug auf die Induktivität der ersten Wicklung erreicht werden.

[0034] Solange der Betriebsstrom kleiner als der Vergleichswert ist, der einem Vergleichsstrom entsprechen kann, kann somit eine nahezu vollständige Kompensation der Induktivität der ersten Wicklung erreicht werden, besonders auch dann, wenn die zweite Wicklung innerhalb der ersten Wicklung angeordnet und/oder ausgerichtet ist.

[0035] Erreicht oder überschreitet der Betriebsstrom den Vergleichsstrom, steigt der Stromfluss in der zweiten Wicklung derart an, dass der supraleitende Effekt des wenigstens einen zweiten elektrischen Leiters nachlässt oder sogar vollständig verloren geht. Entsprechend steigt infolgedessen die Induktivität der ersten Wicklung an, sodass die Strombegrenzungseinrichtung eine große Induktivität bereitstellt, um die gewünschte Strombegrenzungsfunktion erreichen zu können.

[0036] Solange also der Betriebsstrom kleiner als der Vergleichsstrom ist, wirkt die Strombegrenzungseinrichtung nahezu kaum auf den Betriebsstromkreis ein. Wird hingegen der Betriebsstrom größer als der Vergleichsstrom, erhöht sich, vorzugsweise nahezu unmittelbar, die Induktivität, sodass die gewünschte Strombegrenzungswirkung bereitgestellt werden kann. Der Vergleichswert, der von Eigenschaften der zweiten Wicklung abhängig ist, bestimmt somit, ab welchem Strom die Strombegrenzungseinrichtung ihre Strombegrenzungsfunktionalität bereitstellt. Dadurch kann der Vergleichswert beziehungsweise der Vergleichsstrom festgelegt werden.

[0037] Die Kühlungseinheit kann zum Beispiel als integrierter Kryostat oder dergleichen ausgebildet sein. Dem Grunde nach kann die Kühlungseinheit natürlich auch lediglich durch eine geeignete Wärmetauschereinrichtung gebildet sein, die an eine entsprechende Wärmesenke angeschlossen ist. Die Kühlungseinheit ist vorzugsweise mit der zweiten Wicklung, insbesondere dem zweiten elektrischen Leiter, thermisch gut gekoppelt.

[0038] Um die Strombegrenzungseinrichtung nach ei-

nem Auslösen, das heißt, nachdem der Betriebsstrom größer als der Vergleichsstrom war, wieder aktivieren zu können, das heißt, in einen Bereitschaftsmodus beziehungsweise nicht ausgelösten Zustand zu versetzen, ist gemäß der Erfindung die Schalteinheit vorgesehen. Mittels der Schalteinheit können nämlich die Leiterenden des wenigstens einen zweiten elektrischen Leiters abhängig vom Schaltzustand der Schalteinheit voneinander elektrisch getrennt werden. Dadurch kann ein Stromfluss im zweiten elektrischen Leiter unterbrochen werden, sodass der Bereitschaftsmodus der Strombegrenzungseinrichtung nahezu zeitnah wieder hergestellt werden kann. Durch das Trennen braucht der Ausgangszustand nicht sofort wiederhergestellt zu werden. Nach dem Trennen kann eine Rückkühlzeit abzuwarten sein, bevor anschließend die Schalteinheit wieder in den eingeschalteten Schaltzustand geschaltet wird. Dann ist der Ausgangszustand wiederhergestellt.

[0039] Zu diesem Zweck können ein oder mehrere elektromechanische Schaltelemente sowie auch alternativ oder ergänzend Halbleiterschaltelemente vorgesehen sein. Das Schaltelement beziehungsweise die Schaltelemente können in die zweite Wicklung integriert angeordnet sein. Vorzugsweise ist eine separate Steuereinheit vorgesehen, mittels der die Schalteinheit in gewünschter Weise steuerbar ist. Die Schalteinheit kann vorzugsweise wenigstens zwei Schaltzustände einnehmen, nämlich einen eingeschalteten Schaltzustand sowie einen ausgeschalteten Schaltzustand. Im eingeschalteten Schaltzustand sind die Leiterenden des zweiten elektrischen Leiters unmittelbar miteinander elektrisch verbunden. Im ausgeschalteten Schaltzustand sind die Leiterenden dagegen voneinander elektrisch getrennt, sodass ein Stromfluss im Wesentlichen unterbrochen werden kann.

[0040] Die Wicklung, und zwar die erste und/oder die zweite Wicklung, ist vorzugsweise aus dem wenigstens einen elektrischen Leiter gebildet, der zumindest eine Windung für diese Wicklung bereitstellt. Natürlich können auch mehrere Leiter vorgesehen sein, die vorzugsweise benachbart zueinander angeordnet sind und die miteinander in Reihe geschaltet und/oder auch parallelgeschaltet sein können. Bei mehreren Windungen kann vorgesehen sein, dass der elektrische Leiter beziehungsweise die elektrischen Leiter elektrisch isoliert gegenüber einander angeordnet sind. Bezüglich der zweiten Wicklung kann ferner vorgesehen sein, dass bei mehreren elektrischen Leitern die jeweiligen elektrischen Leiter mittels der Schalteinheit kurzgeschlossen werden können. Die Schalteinheit kann hierfür entsprechende Schaltelemente vorsehen.

[0041] Durch das Trennen beziehungsweise Abschalten oder Unterbrechen nur einiger der zweiten elektrischen Leiter kann zudem der Betriebsstrom abgesenkt und dadurch den Anforderungen des Energieversorgungsnetzes angepasst werden.

[0042] Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung ist die Schalteinheit ebenfalls thermisch mit der zweiten Wick-

lung gekoppelt. Dadurch kann erreicht werden, dass ein Wärmegradient innerhalb der zweiten Wicklung weitgehend vermieden werden kann. Insbesondere im Bereitschaftsmodus kann deshalb ein Aufwand für die Kühlung des zweiten Leiters möglichst gering gehalten werden. Die thermische Kopplung der Schalteinheit kann zum Beispiel dadurch erreicht werden, dass die Schalteinheit einstückig mit der zweiten Wicklung ausgebildet ist.

[0043] Die Leiterenden des wenigstens einen elektrischen Leiters der zweiten Wicklung sind vorzugsweise gegenüberliegend zueinander angeordnet und die Schalteinheit ist ausgebildet, das elektrische Koppeln der Leitungsenden mittels wenigstens einer Kontaktbrücke herzustellen. Dadurch können die Leiterenden auf einfache Weise miteinander elektrisch gekoppelt werden, ohne dass die Leiterenden mechanisch bewegt oder betätigt werden müssten. Gerade bei supraleitenden Werkstoffen, die häufig mechanisch ungünstige Eigenschaften haben, ist dies vorteilhaft. Dadurch kann eine zuverlässige Schalteinheit bereitgestellt werden.

[0044] Gemäß einer Weiterbildung wird vorgeschlagen, dass die Schalteinheit eine Mikroschalteranordnung mit einer Mehrzahl von Mikroschaltern umfasst. Durch die Mikroschalteranordnung ist es möglich, die Schalteinheit auf einfache Weise insbesondere in die zweite Wicklung zu integrieren. Die Mikroschalteranordnung kann nach Art eines Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) gebildet sein. Die Mikroschalter können insbesondere durch elektromechanische Schaltelemente gebildet sein und beispielsweise Abmessungen im Bereich von etwa 10 µm bis etwa 100 µm oder mehr aufweisen. Die Mikroschalter können durch Herstellungsprozesse aus der Halbleitertechnologie, beispielsweise unter Nutzen von Ätzen oder dergleichen, hergestellt werden. Vorzugsweise können die Mikroschalter unmittelbar mit dem wenigstens einen zweiten elektrischen Leiter verbunden, insbesondere auf dem supraleitenden Werkstoff oder dessen Schutzschicht, die vorzugsweise aus Silber der Gold bestehen kann, des wenigstens einen zweiten Leiters aufgebracht sein.

[0045] Die Nutzung eines solchen Mikroschalters kann den weiteren Vorteil haben, dass dadurch auch insbesondere im Bereitschaftsmodus ein leichter resistiver elektrischer Widerstand geschaffen werden kann, der für das Reduzieren des Stroms in der zweiten Wicklung vorteilhaft genutzt werden kann. Dadurch können separate Einrichtungen beziehungsweise Einheiten, mittels denen die Strombegrenzungseinrichtung wieder in einen Bereitschaftsmodus gebracht werden kann, eingespart werden. Insbesondere braucht in den Anschluss des Betriebsstromkreises nicht eingegriffen zu werden. Dadurch kann insgesamt auch die Zuverlässigkeit verbessert werden.

[0046] Die Schaltelemente, insbesondere die Mikroschalter, können ausgebildet sein, beispielsweise elektrostatisch, elektromagnetisch, elektrothermomechanisch oder auch piezoelektrisch oder dergleichen betätigt zu werden. Diese Antriebsmechanismen für die Schalt-

elemente beziehungsweise die Mikroschalter benötigen vorzugsweise keinen unmittelbaren mechanischen Kontakt, um das Schaltelement beziehungsweise den Mikroschalter betätigen zu können. Dies ist insbesondere auch im Hinblick darauf vorteilhaft, dass die Schaltelemente beziehungsweise die Mikroschalter in die zweite Wicklung integriert angeordnet sein können. Da die zweite Wicklung, insbesondere deren zweiter elektrischer Leiter, in der Regel gekühlt werden müssen, kann hierdurch auf einfache Weise eine Steuerung der Schaltelemente beziehungsweise der Mikroschalter auch außerhalb eines gekühlten Bereichs realisiert sein.

[0047] Vorzugsweise sind die Schaltelemente beziehungsweise die Mikroschalter gegenüber einer magnetischen Einwirkung im Wesentlichen unempfindlich ausgebildet, sodass die Funktionalität auch durch ein etwaiges Magnetfeld der ersten Wicklung weitgehend vermieden werden kann. Zwar könnten die Schaltelemente beziehungsweise die Mikroschalter auch innerhalb der zweiten Wicklung angeordnet sein, wobei sie dann im Bereitschaftsmodus in einem magnetisch abgeschirmten Bereich angeordnet wären, jedoch ist dabei zu bedenken, dass bei Überschreiten des Vergleichsstroms durch den Betriebsstrom die supraleitende Wirkung des Werkstoffs verloren gehen beziehungsweise abgeschwächt werden kann, wodurch eine Abschirmwirkung entsprechend reduziert ist beziehungsweise entfällt und die Schaltelemente beziehungsweise die Mikroschalter dann dem Magnetfeld ausgesetzt wären.

[0048] Weiterhin wird vorgeschlagen, dass die Mikroschalter zumindest teilweise parallelgeschaltet sind. Dadurch besteht die Möglichkeit, standardisierte Mikroschalter einzusetzen und diese je nach Bedarf parallelzuschalten, um einen vorgebbaren Bemessungsstrom im eingeschalteten Schaltzustand führen zu können. Dies erweist sich insbesondere dann als vorteilhaft, wenn eine Mehrzahl von standardisierten Mikroschaltern auf einem gemeinsamen Träger angeordnet ist. Dadurch kann auf einfache Weise zugleich auch das Parallelschalten realisiert sein, welches zumindest teilweise auch über den Träger erreicht werden kann.

[0049] Ferner wird vorgeschlagen, dass die Mikroschalter zumindest teilweise in Reihe geschaltet sind. Diese Weiterbildung hat den Vorteil, dass eine verbesserte Spannungsfestigkeit erreicht werden kann. Da mittels der Mikroschalter in der Regel nur relativ kleine Kriech- und Luftstrecken realisiert werden können, kann es zur Erreichung einer vorgegebenen Spannungsfestigkeit sinnvoll sein, eine geeignete Anzahl von Mikroschaltern in Reihe zu schalten. Dadurch können die Anforderungen hinsichtlich der Kriech- und Luftstrecken besser eingehalten werden. Natürlich kann diese Weiterbildung auch ergänzend ein zumindest teilweise Parallelschalten der Mikroschalter umfassen.

[0050] Vorzugsweise ist zumindest ein Teil der Mikroschalter auf einem gemeinsamen Träger angeordnet. Dadurch können die Mikroschalter auf einfache Weise unter Nutzung bekannter Herstellungsverfahren aus der

Halbleitertechnologie hergestellt werden. Darüber hinaus kann auf diese Weise erreicht werden, dass die Mikroschalter mit im Wesentlichen gleichen elektrischen und/oder mechanischen Eigenschaften ausgebildet werden können, sodass eine zuverlässige Funktion der einzelnen Mikroschalter bei geringen Toleranzen erreicht werden kann. Zugleich kann auf diese Weise ein einfaches Anordnen der Mikroschalteranordnung im Bereich der zweiten Wicklung erreicht werden.

[0051] Gemäß einer Weiterbildung wird vorgeschlagen, dass die Mikroschalteranordnung ausgebildet ist, wenigstens einige der Mikroschalter mittels eines gemeinsamen Steuersignals zu steuern. Dadurch kann ein gleichmäßiges Betätigen der einzelnen Mikroschalter erreicht werden. Besonders vorteilhaft erweist sich dies, wenn einige der Mikroschalter parallelgeschaltet oder auch in Reihe geschaltet sind. Insgesamt kann damit ein zuverlässiger Schaltvorgang erreicht werden.

[0052] Es wird ferner vorgeschlagen, dass die Mikroschalter einen jeweiligen Schwenkhebel aufweisen, dessen Schwenkzustand mittels eines Antriebselements zumindest abhängig vom Schaltzustand der Schalteinheit einstellbar ist. An dem Schwenkhebel kann ein geeignetes Kontaktelement angeordnet sein, welches in einer jeweiligen Schwenkposition ein gegenüberliegendes Kontaktelement oder auch mehrere Kontaktelemente, welche vorzugsweise ortsfest positioniert sind, kontaktieren kann. Der Schwenkzustand des Schwenkhebels kann mittels des Antriebselements entsprechend eingestellt werden, sodass der gewünschte Schaltzustand der Schalteinheit hergestellt werden kann. Das Antriebselement beziehungsweise die Antriebseinheit kann je nach Antriebsart durch einen Kontakt gebildet sein, der über ein Kraftfeld auf den Schwenkhebel einwirkt, um diesen in die gewünschte Schwenkposition, die dem jeweiligen Schaltzustand entspricht, verschwenken zu können.

[0053] Vorzugsweise ist jedem Schwenkhebel der Mikroschalter ein eigenes Antriebselement zugeordnet, wobei die Mikroschalteranordnung ausgebildet ist, die Antriebselemente unabhängig voneinander zu steuern. Dadurch ist es möglich, bestimmte Eigenschaften der Mikroschalteranordnung, insbesondere bezüglich der jeweiligen Schaltzustände justieren zu können. So kann zum Beispiel vorgesehen sein, dass bei parallelgeschalteten Mikroschaltern durch Einwirken einer jeweiligen Kraft des Antriebselements auf den Schwenkhebel die Stromverteilung der Mikroschalter im Parallelbetrieb eingestellt werden kann. Dadurch ist es möglich, dass bei parallelgeschalteten Mikroschaltern die Mikroschalter möglichst mit dem gleichen elektrischen Strom beaufschlagt werden, sodass es nicht zu einer Überlastung einer oder mehrerer einzelner Mikroschalter kommt. Natürlich können diesbezüglich auch entsprechende Feder-elemente ergänzend vorgesehen sein, mittels denen die Kraft entsprechend geeignet kalibriert werden kann.

[0054] Vorzugsweise sind jedoch die Antriebselemente unabhängig voneinander steuerbar, sodass bedarfsweise die Stromführung der einzelnen Mikroschalter na-

hezu individuell variiert werden kann.

[0055] Ferner wird vorgeschlagen, dass die Mikroschalter magnetisch unbeeinflussbar ausgebildet sind. Dadurch kann erreicht werden, dass die Funktionalität der Mikroschalter nicht durch ein Magnetfeld der ersten und/oder der zweiten Wicklung beeinflusst wird. Dies kann durch Auswahl von einem oder mehreren geeigneten Werkstoffen für die Mikroschalter erreicht werden, die vorzugsweise nicht ferromagnetisch sind.

[0056] Gemäß einer Weiterbildung wird vorgeschlagen, dass die zweite Wicklung wenigstens zwei voneinander elektrisch getrennt ausgebildete elektrische Leiter umfasst und die Schalteinheit ausgebildet ist, die jeweiligen Leiterenden dieser elektrischen Leiter elektrisch getrennt abhängig vom Schaltzustand der Schalteinheit zu koppeln. Vorzugsweise können die wenigstens zwei zweiten elektrischen Leiter nahezu unabhängig voneinander betrieben werden. Vorzugsweise sind sie elektrisch isoliert gegenüber einander ausgebildet. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Funktionalität der zweiten Wicklung bedarfsgerecht anpassen zu können.

[0057] Ferner wird vorgeschlagen, dass die Schalteinheit ausgebildet ist, für die zweiten elektrischen Leiter voneinander unabhängige jeweilige Schaltzustände vorzusehen. Dadurch ist es möglich, die Strombegrenzungseinrichtung nicht nur bei einer Inbetriebnahme, sondern auch während eines bestimmungsgemäßen Betriebs nachträglich noch einstellen zu können. Dadurch kann eine hochflexible Strombegrenzungseinrichtung erreicht werden.

[0058] Insgesamt kann auch eine günstige Herstellung der Strombegrenzungseinrichtung gemäß der Erfindung erreicht werden. Dabei kann es sich als vorteilhaft erweisen, dass die Herstellung der Mikroschalter zumindest teilweise zum Herstellungsprozess des zweiten elektrischen Leiters aus dem supraleitenden Werkstoff vergleichbar sein kann. Es besteht nämlich dadurch die Möglichkeit, die Mikroschalter unmittelbar, vorzugsweise direkt, auf oder auch in dem supraleitenden zweiten Leiter herzustellen, insbesondere zu integrieren. Besonders vorteilhaft erweist sich dies, wenn der wenigstens eine zweite elektrische Leiter als Bandleiter ausgebildet ist. So ist es möglich, spezielle, kurze supraleitende Bandleiter als zweite elektrische Leiter mit den Mikroschaltern zu bestücken und diese kurzen supraleitenden Bandleiter als Brücke, insbesondere als Lotbrücke, zum Verbinden der Leiterenden des wenigstens einen zweiten elektrischen Leiters zu nutzen.

[0059] Darüber hinaus kann es sich insbesondere auch als vorteilhaft erweisen, wenn in dem wenigstens einen zweiten elektrischen Leiter, insbesondere in Windungen hiervon, lediglich eine geringe Induktionsspannung vorliegt. Dies kann dadurch erreicht werden, dass der wenigstens eine zweite elektrische Leiter lediglich eine einzelne Windung der zweiten Wicklung bildet. Natürlich können auch mehrere zweite elektrische Leiter vorgesehen sein, die jeweilige weitere einzelne Windungen bilden. Jede dieser Windungen kann mittels einer

Mikroschalteranordnung entsprechend schaltbar ausgerüstet sein.

[0060] Durch die erfindungsgemäße Kombination von einer Schalteinheit, insbesondere einer Mikroschalteranordnung, in Verbindung mit einer Wicklung aus wenigstens einem zweiten elektrischen Leiter aus einem supraleitenden Werkstoff kann einerseits eine gute Dämpfung des Stromes der zweiten Wicklung erreicht werden. Andererseits kann der wenigstens eine zweite elektrische Leiter, nachdem die Strombegrenzungseinrichtung aktiviert worden ist, abgeschaltet werden, ohne dass die erste Wicklung, die nach Art einer Drosselspule in dem Betriebsstromkreis geschaltet ist, von dem Betriebsstromkreis trennen zu müssen. Durch die Schalteinheit, insbesondere die Mikroschalteranordnung, kann eine galvanische Trennung der entsprechenden Leiterenden erreicht werden. Ferner ermöglicht es die Schalteinheit, insbesondere die Mikroschalteranordnung, eine sehr kurze Abschaltzeit, beispielsweise von wenigen Mikrosekunden oder dergleichen, erreichen zu können. Da durch eine geeignete Konstruktion mit vorzugsweise wenigen Windungen auch eine kleine induzierte Spannung erreicht werden kann, können Probleme beim Abschalten der zweiten Wicklung mittels der Schalteinheit Lichtbögen weitgehend vermieden werden.

[0061] Die für die erfindungsgemäße Strombegrenzungseinrichtung angegebenen Vorteile und Wirkungen gelten natürlich gleichermaßen auch für das Verfahren zu deren Betrieb sowie für das Verfahren zu deren Herstellung und umgekehrt. Infolgedessen können Vorrichtungsmerkmale auch als Verfahrensmerkmale und umgekehrt formuliert sein.

[0062] Weitere Vorteile und Wirkungen ergeben sich durch die im Folgenden beschriebenen Ausführungsbeispiele anhand der Figuren. In den Figuren bezeichnen gleiche Bezugszeichen gleiche Merkmale und Funktionen.

[0063] Es zeigen:

- 40 FIG 1 in einer schematischen Draufsicht eine erste Ausgestaltung für eine zweite Wicklung einer Strombegrenzungseinrichtung gemäß der Erfindung,
- FIG 2 eine schematische Draufsicht einer zweiten Ausgestaltung für eine zweite Wicklung einer Strombegrenzungseinrichtung gemäß der Erfindung,
- 45 FIG 3 eine schematische Schaltbildarstellung für eine Mikroschalteranordnung einer Schalteinheit der Strombegrenzungseinrichtung gemäß der Erfindung,
- FIG 4 in einer schematischen Schnittdarstellung einen einzelnen Mikroschalter der Mikroschalteranordnung gemäß FIG 3,
- 50 FIG 5 eine schematische dreidimensionale Schnittdarstellung eines Ausschnitts des Mikroschalters gemäß FIG 4 in einem Kontaktbereich,
- 55 FIG 6 eine schematische Schnittdarstellung des Mi-

- kroschalters gemäß FIG 4 und 5 in einem ausgeschalteten Schaltzustand,
 FIG 7 eine Darstellung wie FIG 6, wobei der Mikroschalter nunmehr jedoch in einem eingeschalteten Schaltzustand dargestellt ist,
 FIG 8 eine schematische Darstellung der Strombegrenzungseinrichtung gemäß der Erfindung,
 FIG 9 eine schematische Seitenansicht der Darstellung gemäß FIG 1, und
 FIG 10 eine schematische Seitenansicht der Darstellung gemäß FIG 2.

[0064] FIG 8 zeigt in einer schematischen Schnittansicht eine Strombegrenzungseinrichtung 10 zum Begrenzen eines elektrischen Betriebsstroms eines nicht weiter dargestellten Betriebsstromkreises. Die Strombegrenzungseinrichtung 10 weist einen ersten und einen zweiten elektrischen Anschluss 12, 14 zum Anschließen an den Betriebsstromkreis auf. Dies ist in FIG 8 lediglich schematisch dargestellt. Ferner umfasst die Strombegrenzungseinrichtung 10 eine erste Wicklung 16 nach Art einer Drosselspule, die einen ersten elektrischen Leiter 18 aus einer Kupferlegierung aufweist, der mit einer Mehrzahl von Windungen die erste Wicklung 16 bildet. Die erste Wicklung 16 ist nach Art einer Zylinderspule ausgebildet. Leiterenden des ersten elektrischen Leiters 18 sind an einen jeweiligen der elektrischen Anschlüsse 12, 14 angeschlossen. Dadurch kann die erste Wicklung 16 mit dem Betriebsstrom des Betriebsstromkreises beaufschlagt werden.

[0065] Die Strombegrenzungseinrichtung 10 umfasst ferner eine zweite Wicklung 20 mit einer Mehrzahl von zweiten elektrischen Leitern 22 aus einem elektrisch supraleitenden Werkstoff, vorliegend Magnesiumdiborid. Magnesiumdiborid weist eine Sprungtemperatur von etwa 39 K auf und gilt somit als Hochtemperatursupraleiter, wobei jedoch weitere supraleitende Werkstoffe bekannt sind, die höhere Sprungtemperaturen aufweisen. Es ist jedoch für Magnesiumdiborid festzustellen, dass es im Vergleich insbesondere zu oxidkeramischen Hochtemperatursupraleitern leicht herstellbar ist und dadurch eine hohe Flexibilität bezüglich der Herstellung des zweiten elektrischen Leiters und der zweiten Wicklung erlaubt. Alternativ oder zusätzlich kann der supraleitende Werkstoff auch einen oxidkeramischen Werkstoff als Hochtemperatursupraleiter umfassen. Insbesondere kann es sich hierbei um ein Material des Typs $REBa_2Cu_3O_x$ handeln. Diese Werkstoffklasse erlaubt vorteilhaft die Ausbildung von elektrischen Leitern mit hohen Sprungtemperaturen, insbesondere in Bezug auf die Sprungtemperatur von Magnesiumdiborid. Die Anwendung der Erfindung ist jedoch nicht auf diese Werkstoffe begrenzt. Es können bedarfsweise natürlich auch andere geeignete supraleitende Werkstoffe genutzt werden. So eignet sich zum Beispiel insbesondere auch YBCO (ReBCO) als supraleitendes Material welches alternativ zu Magnesiumdiborid eingesetzt werden kann.

[0066] Von den in FIG 8 dargestellten zweiten elektri-

5 schen Leitern 22 bildet jeder der zweiten elektrischen Leiter 22 eine einzige eigene Windung, wobei die jeweiligen Leiterenden eines jeweiligen der zweiten elektrischen Leiter 22 miteinander elektrisch gekoppelt sind.
 10 Dadurch bildet jeder der zweiten elektrischen Leiter 22 eine kurzgeschlossene Windung der zweiten Wicklung 20. Die einzelnen Windungen sind koaxial benachbart zueinander angeordnet, sodass auch hier im Wesentlichen eine Spule nach Art einer Zylinderspule ausgebildet ist.
 15 **[0067]** Die erste und die zweite Wicklung 16, 20 sind zum Herstellen einer magnetischen Kopplung geeignet angeordnet. In der vorliegenden Ausgestaltung ist vorgesehen, dass die erste und die zweite Wicklung, die jeweils im Wesentlichen zylinderförmig ausgebildet sind,
 20 derart zueinander angeordnet sind, dass die zweite Wicklung 20 innerhalb eines Innendurchmessers der ersten Wicklung 16 konzentrisch zur ersten Wicklung 16 in Bezug auf eine Achse A angeordnet ist. Die erste und die zweite Wicklung haben vorliegend etwa die gleiche axiale Erstreckung. Dadurch bilden die Windungen der zweiten elektrischen Leiter 22 kurzgeschlossene Einzelwindungen. Die erste und die zweite Wicklung 16, 20 sind somit magnetisch gekoppelt.

[0068] Ferner ist eine Kühlungseinheit 24 vorgesehen, die einen Behälter aus einem thermisch isolierenden Material und eine im Wesentlichen zylindrische Becherform aufweist, die an einem ersten Ende geschlossen ausgebildet und an einem zweiten Ende mittels einer kreisförmigen Scheibe geschlossen werden kann. Die zweite
 25 Wicklung 20 ist innerhalb des Behälters der Kühlungseinheit 24 angeordnet. Der Behälter ist zusammen mit der zweiten Wicklung 20 innerhalb des Innendurchmessers der ersten Wicklung 16 angeordnet.

[0069] Innerhalb des Behälters ist ferner ein Kühlfluid 38 angeordnet, mittels dem die zweite Wicklung 20 auf eine kleinere Temperatur als die Sprungtemperatur des supraleitenden Werkstoffs der zweiten elektrischen Leiter 22 gekühlt werden kann. Der Behälter der Kühlungseinheit 24 ist aus einem nicht ferromagnetischen Werkstoff gebildet.
 30

[0070] Aufgrund der Wirkung der magnetisch gekoppelten Wicklungen 16, 20 ist ein Innenraum der zweiten Wicklung 20, der unter anderem durch einen Innendurchmesser der zweiten Wicklung 20 begrenzt ist, im Wesentlichen magnetfeldfrei. In einem unteren Bereich der FIG 8 ist eine schematische Diagrammdarstellung vorgesehen, aus der ein Verlauf einer magnetischen Feldstärke abhängig von einem Radius in Bezug auf die Achse A dargestellt ist. Unterhalb eines vorgegebenen Vergleichsstroms, bei dem die zweite Wicklung 20 einen Strom im supraleitenden Betriebszustand führt, ist eine magnetische Feldstärke H innerhalb der zweiten Wicklung 20 etwa null. In einem Bereich zwischen dem Innenradius und einem Außenradius der zweiten Wicklung 20 nimmt die magnetische Feldstärke H zu bis auf einen maximalen Wert von H_1 . Dieser Wert der magnetischen Feldstärke bleibt bis zum Innendurchmesser der ersten Wicklung 16 im Wesentlichen konstant. Im weiteren Ver-
 40
 45
 50
 55

lauf radial nach außen nimmt dann die magnetische Feldstärke H in bekannter Weise ab, bis sie einen minimalen Wert erreicht, um sich dann außerhalb der ersten Wicklung 16 mit zunehmenden Radius null zu nähern.

[0071] Mittels eines Graphen 40 ist der Feldstärkeverlauf der magnetischen Feldstärke abhängig vom radialen Abstand von der Achse A schematisch dargestellt.

[0072] In dem in FIG 8 dargestellten Zustand befindet sich die Strombegrenzungseinrichtung 10 in einem Bereitschaftsmodus, der solange erhalten bleibt, wie der Betriebsstrom kleiner als der Vergleichsstrom ist. Ist der Vergleichsstrom dagegen größer als der Vergleichswert, verlässt die zweite Wicklung 20, insbesondere deren zweite elektrische Leiter 22, den supraleitenden Zustand und der Feldstärkeverlauf verändert sich dahingehend, dass nunmehr auch innerhalb der zweiten Wicklung 20 ein Magnetfeld auftritt. Durch diesen Effekt erhöht sich entsprechend die Induktivität der ersten Wicklung 16, wodurch die Strombegrenzungseinrichtung 10 eine hohe Impedanz bezüglich des Betriebsstroms bereitstellt. Dadurch kann der Betriebsstrom, wenn er größer als der Vergleichswert ist, begrenzt werden.

[0073] FIG 1 und FIG 9 zeigen nun eine erste Ausgestaltung für die zweite Wicklung 20 gemäß der Erfindung. In einem oberen Bereich ist eine schematische Draufsicht auf die zweite Wicklung 20 dargestellt. In einem unteren Bereich ist eine zugeordnete schematische Seitenansicht der Wicklung 20 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Leiterenden der zweiten elektrischen Leiter 22 mit jeweiligen Mikroschalteranordnungen 26 als Schalteinheiten elektrisch verbunden sind. Dadurch kann abhängig von einem jeweiligen Schaltzustand der Mikroschalteranordnung 26 der jeweilige zweite elektrische Leiter 22 entweder kurzgeschlossen oder geöffnet werden. Die zweiten elektrischen Leiter 22 sind vorliegend als Bandleiter ausgebildet und die Mikroschalteranordnungen 26 sind an den jeweiligen Leiterenden befestigt.

[0074] FIG 2 und FIG 10 zeigen eine alternative Ausgestaltung der zweiten Wicklung 20, bei der die Leiterenden der zweiten elektrischen Leiter 22 nach innen gebogen sind und die Mikroschalteranordnungen 26 an den innenliegenden Leiterenden befestigt sind. Bei dieser Ausgestaltung sind die Mikroschalteranordnungen 26 in einem Bereitschaftsmodus der Strombegrenzungseinrichtung 10, bei der der Betriebsstrom kleiner als der Vergleichsstrom ist, im Wesentlichen vor Magnetfeld geschützt angeordnet. Dies ist auch dann besonders vorteilhaft, wenn andere Schalter als MEMS genutzt werden.

[0075] FIG 3 zeigt eine schematische Schaltbilddarstellung einer Mikroschalteranordnung 26, wie sie in den vorhergehenden Ausgestaltungen gemäß der FIG 1 und 2 beziehungsweise 9 und 10 zum Einsatz kommen kann. Daraus ist ersichtlich, dass eine Mehrzahl von Mikroschaltern 30, die auf einem gemeinsamen Träger 32 (FIG 4) angeordnet sind, in Reihe geschaltet sind, um im ausgeschalteten Zustand eine vorgegebene Spannungsfestigkeit bereitstellen zu können. Um zugleich auch eine

entsprechende Strombelastbarkeit im eingeschalteten Zustand erreichen zu können, sind mehrere der vorgenannten Reihenschaltungen parallelgeschaltet. Durch die Anzahl der in Reihe geschalteten und/oder parallelgeschalteten Mikroschalter 30 kann bedarfsweise ein Bemessungsstrom sowie auch eine Bemessungsspannung eingestellt werden.

[0076] In der vorliegenden Ausgestaltung ist vorgesehen, dass die zweiten elektrischen Leiter 22 bandförmig ausgebildet sind und eine Breite von etwa 12 mm aufweisen. Eine Dicke der bandförmigen zweiten Leiter 22 beträgt etwa 0,15 mm. Durch das besondere Design der zweiten Wicklung 20 kann erreicht werden, dass beim Öffnen der Mikroschalteranordnung 26 lediglich eine Spannung von einigen 10 V anliegt, obwohl die Strombegrenzungseinrichtung 10 in einem Betriebsstromkreis betrieben werden kann, der für eine Bemessungsspannung von etwa 10 kV oder mehr ausgelegt ist. Die Anzahl der parallelgeschalteten Reihenschaltungen von Mikroschaltern 30 kann abhängig vom Bemessungsstrom gewählt sein, der zum Beispiel in einem Bereich von etwa 100 A bis etwa 1 kA oder mehr liegen kann.

[0077] FIG 4 zeigt nun in einer schematischen Schnittdarstellung einen einzelnen Mikroschalter 30 der Mikroschalteranordnung 26. Zu erkennen ist, dass der Mikroschalter 30 auf einem Substrat 32 beziehungsweise dem Träger angeordnet ist. Auch wenn vorliegend lediglich ein einziger Mikroschalter dargestellt ist, ist in der vorliegenden Ausgestaltung vorgesehen, dass sämtliche der Mikroschalter 30 gemäß FIG 3 auf dem gemeinsamen Substrat 32 angeordnet sind. Vorliegend ist das Substrat 32 aus Glas gebildet. Es kann jedoch auch ein anderes geeignetes Material gewählt sein. Das Substrat 32 ist mittels eines eutektischen Klebers 48 mit einer Siliziumplatte 50 verbunden, wobei die Siliziumplatte 50 und das Substrat 32 mittels bekannter Verfahren entsprechend behandelt werden, um einen Schwenkhebel 34 des jeweiligen der Mikroschalter 30 auszubilden. Der Schwenkhebel 34 ist aufgrund seiner Abmessungen elastisch und kann deshalb zur Realisierung einer Schaltfunktion des Mikroschalters 30 genutzt werden. Der Schwenkhebel 34 ist zu diesem Zweck mit einem ersten Ende 52 fixiert angeordnet, sodass ein zweites Ende 54 in vorgegebener Weise schwenkbar ist.

[0078] Am zweiten Ende 54 ist eine Kontaktbrücke 28 angeordnet, die mit dem zweiten Ende 54 des Schwenkhebels 34 fest verbunden ist. Die Kontaktbrücke 28 weist ein elektrisch leitfähiges Verbindungselement 46 auf.

[0079] Gegenüberliegend zum an der Kontaktbrücke 28 angeordneten Verbindungselement 46 sind elektrische Kontaktelemente 42, 44 an den entsprechenden Leiterenden der zweiten elektrischen Leiter 22 angeordnet. Im eingeschalteten Zustand wird mittels des Verbindungselements 46 der Kontaktbrücke 28 ein elektrischer Kontakt zwischen den Kontaktelementen 42, 44 hergestellt. Im ausgeschalteten Schaltzustand ist hingegen die Kontaktbrücke 28 mit dem Verbindungselement 46 entfernt von den Kontaktelementen 42, 44 angeordnet, so-

dass ein Strom durch den jeweiligen der zweiten elektrischen Leiter 22 unterdrückt ist. Zu erkennen ist dies in der perspektivischen Darstellung eines Ausschnitts des Mikroschalters 30 in der schematischen Darstellung gemäß FIG 5.

[0080] In der vorliegenden Ausgestaltung gemäß der FIG 4 und 5 beträgt ein Kontakthub vorliegend etwa 2 μm bis etwa 3 μm . Eine Länge des Schwenkhebels 34 beträgt vorliegend etwa 200 μm bis etwa 300 μm .

[0081] Um die gewünschte Schaltfunktion realisieren zu können, ist vorliegend ein elektrostatisches Antriebselement 36 vorgesehen. Das Antriebselement 36 umfasst eine Metallisierung als Elektrode, die mittels eines nicht dargestellten Steuergeräts mit einer vorgegebenen elektrischen Spannung beaufschlagt werden kann. Hierdurch kann eine elektrostatische Kraft auf den Schwenkhebel 34 ausgeübt werden, die abhängig von der am Antriebselement 36 anliegenden Spannung ist, sodass in vorgebar Weise die gewünschten Schaltzustände eingestellt werden können.

[0082] Die FIG 6 und 7 zeigen den Mikroschalter 30 in den zwei voneinander unterschiedlichen Schaltzuständen, wobei FIG 6 den ausgeschalteten Schaltzustand und FIG 7 den eingeschalteten Schaltzustand darstellen. Die weiteren Angaben entsprechen dem, was bereits anhand der FIG 4 und 5 erläutert wurde, weshalb diesbezüglich auf die entsprechenden Ausführungen verwiesen wird.

[0083] Die Mikroschalteranordnung 26 ist vorliegend nach Art von Micro-Electro-Mechanical-Systems realisiert und nutzt Technologien, die bereits zur Bearbeitung von Halbleitermikroelektronik auf Basis von Silizium bekannt ist. Bezüglich der Realisierung der Mikroschalteranordnung 26 wird ferner auf Keimel et al., Micro-Electromechanical-Systems based switches for power applications, IEEE Transactions on industrial applications, 48(4), 1163 bis 1169, Juli 2012, verwiesen.

[0084] In der vorliegenden Ausgestaltung ist ein Betätigungsmechanismus für die Mikroschalter 30 auf Elektrostatik basierend.

[0085] Eine Betätigungsspannung kann zum Beispiel in einem Bereich von etwa 35 V bis etwa 80 V liegen. Ein Kontaktwiderstand kann zum Beispiel im eingeschalteten Schaltzustand etwa 1 Ω betragen. Als Kontaktmaterial ist vorliegend Gold vorgesehen, es kann jedoch auch bedarfsweise ein anderer geeigneter Werkstoff genutzt werden. Vorteilhaft kann auch sein, die ortsfesten und die bewegten Kontaktelemente aus unterschiedlichen Werkstoffen zu bilden. Die gegenüberliegenden Kontakte brauchen also nicht notwendigerweise aus dem gleichen Werkstoff sein.

[0086] In der vorliegenden Ausgestaltung kann der Mikroschalter 30 für eine Bemessungsspannung von etwa 40 V bis etwa 100 V ausgebildet sein. Eine Strombelastung kann in einem Bereich von etwa 0,05 A bis etwa 0,2 A liegen. Eine Größe des Mikroschalters 30 kann etwa 0,0004 cm^2 bis etwa 0,001 cm^2 betragen. Hierdurch kann eine Stromdichte von etwa 200 bis etwa 250 A/ cm^2 er-

reicht werden. Eine Schaltzeit kann in einem Bereich von etwa 1 μs bis etwa 20 μs erreicht werden. In dieser Anordnung ist es möglich, dass etwa 10.000 bis etwa 100.000 Schaltspiele erreicht werden können.

[0087] Durch eine Kombination der Mikroschalter 30 zur Mikroschalteranordnung 26 gemäß FIG 3 ist es möglich, Bemessungsspannungen in einem Bereich bis zu etwa 1.000 V erreichen zu können. Hierbei kann ein Strom von etwa 630 A erreicht werden. Zu diesem Zweck können etwa 25 Mikroschalter 30 in Reihe und etwa 3.150 solche Reihenschaltungen parallel geschaltet werden. Dadurch kann sich eine Anzahl von Mikroschaltern 30 von etwa 236.250 ergeben.

[0088] Auch wenn vorliegend die Schalteinheit durch eine Mikroschalteranordnung 26 gebildet ist, kann in alternativen Ausgestaltungen vorgesehen sein, dass die Schalteinheit auch durch Halbleiterschalter gebildet sein kann, beispielsweise basierend auf Transistoren wie Isolated Gate Bipolar Transistor (IGBT), Feldeffekttransistoren, Thyristoren und/oder dergleichen. Denkbar sind auch handelsübliche mechanische Niederspannungsschalter.

[0089] Die in den FIG dargestellten Ausführungsbeispiele dienen ausschließlich der Erläuterung der Erfindung und sollen diese nicht beschränken.

[0090] Insbesondere kann natürlich auch die Anordnung der Wicklungen zueinander bedarfsweise angepasst werden. Auch ein Querschnitt der Wicklungen braucht nicht kreisrund zu sein. Er kann auch elliptisch oder eckig sein. Auch Kombinationen hiervon können vorgesehen sein. Darüber hinaus kann für die Kühlungseinheit 24 vorgesehen sein, dass das Kühlfluid 38 über nicht dargestellte Anschlussleitungen zu einer Kühleinrichtung gefördert wird, um dort auf eine vorgegebene Temperatur gekühlt zu werden. Hierdurch kann ein Kühlkreislauf für die Kühlungseinheit 24 gebildet werden.

[0091] Denkbar wäre auch eine Drehung des Schwenkarms um seine Längsachse, um den Kontakt zu schließen. Es wäre auch denkbar, dass die Mikroschalter sowohl aktiv, das heißt, ohne Schaltsignal, "Ein" als auch aktiv "Aus" sind. Technisch würde man dies als normally open (NO) und normally closed (NC) bezeichnen.

Bezugszeichenliste

[0092]	
10	Strombegrenzungseinrichtung
12	Anschluss
14	Anschluss
16	erste Wicklung
18	erster Leiter
20	zweite Wicklung
22	zweiter Leiter
24	Kühlungseinheit
26	Mikroschalteranordnung
28	Kontaktbrücke
30	Mikroschalter

32 Substrat
 34 Schwenkhebel
 36 Antriebselement
 38 Kühlfluid
 40 Graph
 42 Kontaktelement
 44 Kontaktelement
 46 Verbindungselement
 48 Kleber
 50 Siliziumplatte
 52 Ende
 54 Ende
 A Achse

Patentansprüche

1. Strombegrenzungseinrichtung (10) zum Begrenzen eines elektrischen Betriebsstroms eines Betriebsstromkreises mit:

- einem ersten und einem zweiten elektrischen Anschluss (12, 14) zum Anschließen an den Betriebsstromkreis,
- einer ersten Wicklung (16), die wenigstens einen ersten elektrischen Leiter (18) aufweist, wobei jeweils ein Leiterende des wenigstens einen ersten elektrischen Leiters (18) an einen jeweiligen der elektrischen Anschlüsse (12, 14) angeschlossen ist,
- einer zweiten Wicklung (20) mit wenigstens einem zweiten elektrischen Leiter (22) aus einem elektrisch supraleitenden Werkstoff, dessen Leiterenden miteinander elektrisch gekoppelt sind, wobei die erste und die zweite Wicklung (16, 20) zum Herstellen einer magnetischen Kopplung geeignet angeordnet sind, sowie
- einer Kühlungseinheit (24), die ausgebildet ist, die zweite Wicklung (20) im bestimmungsgemäßen Betrieb auf eine Temperatur zu kühlen, die kleiner als eine Sprungtemperatur des elektrisch supraleitenden Werkstoffs ist,

gekennzeichnet durch

eine Schalteinheit (26) zum elektrischen Koppeln der Leiterenden des wenigstens einen zweiten elektrischen Leiters (22) abhängig von einem Schaltzustand der Schalteinheit (26).

2. Strombegrenzungseinrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Schalteinheit (26) thermisch mit der zweiten Wicklung (20) gekoppelt ist.

3. Strombegrenzungseinrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Leiterenden des wenigstens einen zweiten elek-

trischen Leiters (22) der zweiten Wicklung (20) gegenüberliegend zueinander anordnet sind und die Schalteinheit (26) ausgebildet ist, das elektrische Koppeln der Leitungsenden mittels wenigstens einer Kontaktbrücke (28) herzustellen.

5

4. Strombegrenzungseinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Schalteinheit (26) eine Mikroschalteranordnung mit einer Mehrzahl von Mikroschaltern (30) umfasst.

10

5. Strombegrenzungseinrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mikroschalter (30) zumindest teilweise parallelgeschaltet sind.

15

6. Strombegrenzungseinrichtung nach Anspruch 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mikroschalter (30) zumindest teilweise in Reihe geschaltet sind.

20

7. Strombegrenzungseinrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest ein Teil der Mikroschalter (30) auf einem gemeinsamen Träger (32) angeordnet ist.

25

8. Strombegrenzungseinrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mikroschalteranordnung ausgebildet ist, wenigstens einige der Mikroschalter (30) mittels eines gemeinsamen Steuersignals zu steuern.

30

35

9. Strombegrenzungseinrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mikroschalter (30) einen jeweiligen Schwenkhebel (34) aufweisen, dessen Schwenkzustand mittels eines Antriebselements (36) zumindest abhängig vom Schaltzustand der Schalteinheit (26) einstellbar ist.

40

10. Strombegrenzungseinrichtung nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** jedem Schwenkhebel der Mikroschalter (30) ein eigenes Antriebselement (36) zugeordnet ist, wobei die Mikroschalteranordnung ausgebildet ist, die Antriebselemente (36) unabhängig voneinander zu steuern.

45

11. Strombegrenzungseinrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mikroschalter (30) magnetisch unbeeinflussbar ausgebildet sind.

55

12. Strombegrenzungseinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
 die zweite Wicklung (20) wenigstens zwei voneinander elektrisch getrennt ausgebildete zweite elektrische Leiter (22) umfasst und die Schalteinheit (26) ausgebildet ist, die jeweiligen Leiterenden dieser elektrischen Leiter (22) elektrisch getrennt abhängig vom Schaltzustand der Schalteinheit (26) zu koppeln.
13. Strombegrenzungseinrichtung nach Anspruch 12,
dadurch gekennzeichnet, dass
 die Schalteinheit (26) ausgebildet ist, für die zweiten elektrischen Leiter (22) voneinander unabhängige jeweilige Schaltzustände vorzusehen.
14. Verfahren zum Betreiben einer Strombegrenzungseinrichtung (10) zum Begrenzen eines elektrischen Betriebsstroms eines Betriebsstromkreises, bei dem:

- eine erste Wicklung (16), die wenigstens einen ersten elektrischen Leiter (18) aufweist und an den Betriebsstromkreis angeschlossen ist, mit einem elektrischen Betriebsstrom des Betriebsstromkreises beaufschlagt wird,
- eine zweite Wicklung (20) mit wenigstens einem zweiten elektrischen Leiter (22) aus einem elektrisch supraleitenden Werkstoff, dessen Leiterenden miteinander elektrisch gekoppelt sind, wobei die zweite Wicklung (20) mit der ersten Wicklung (16) magnetisch gekoppelt wird, und
- die zweite Wicklung (20) im bestimmungsgemäßen Betrieb auf eine Temperatur gekühlt wird, die kleiner als eine Sprungtemperatur des elektrisch supraleitenden Werkstoffs ist,

dadurch gekennzeichnet, dass
 die Leiterenden des wenigstens einen zweiten elektrischen Leiters (22) abhängig von einem Schaltzustand einer die Leiterenden koppelnden Schalteinheit (26) elektrisch gekoppelt werden.

15. Verfahren zum Herstellen einer Strombegrenzungseinrichtung (10) zum Begrenzen eines elektrischen Betriebsstroms eines Betriebsstromkreises, bei dem:
- eine erste Wicklung (16) mit wenigstens einem ersten elektrischen Leiter (18) hergestellt wird, wobei jeweils ein Leiterende des wenigstens einen ersten elektrischen Leiters (18) an einen jeweiligen von zwei elektrischen Anschlüssen (12, 14) zum Anschließen der Strombegrenzungseinrichtung (10) an den Betriebsstromkreis angeschlossen wird,

- eine zweite Wicklung (20) mit wenigstens einem zweiten elektrischen Leiter (22) aus einem elektrisch supraleitenden Werkstoff hergestellt wird, dessen Leiterenden miteinander elektrisch gekoppelt werden,
- die erste und die zweite Wicklung (16, 20) zum Herstellen einer magnetischen Kopplung geeignet angeordnet werden, sowie
- eine Kühlungseinheit (24) angeordnet wird, die ausgebildet ist, die zweite Wicklung (20) im bestimmungsgemäßen Betrieb auf eine Temperatur zu kühlen, die kleiner als eine Sprungtemperatur des elektrisch supraleitenden Werkstoffs ist,

dadurch gekennzeichnet, dass
 eine Schalteinheit (26) angeordnet wird, mittels der die Leiterenden des wenigstens einen zweiten elektrischen Leiters (22) abhängig von einem Schaltzustand der Schalteinheit (26) elektrisch gekoppelt werden.

FIG 1

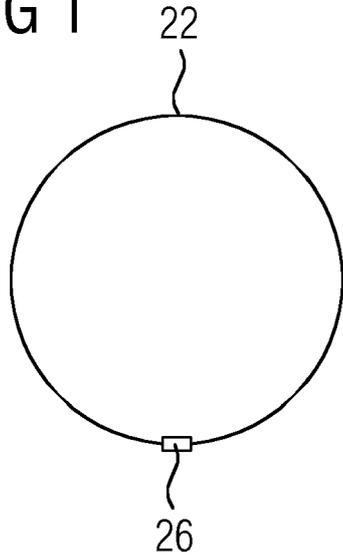


FIG 2

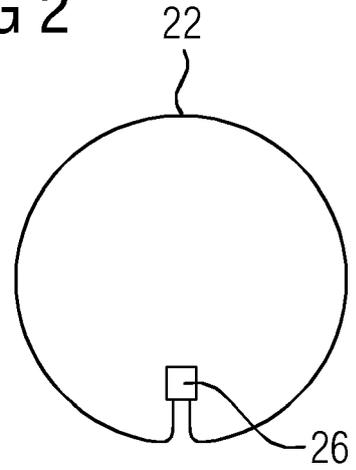


FIG 3

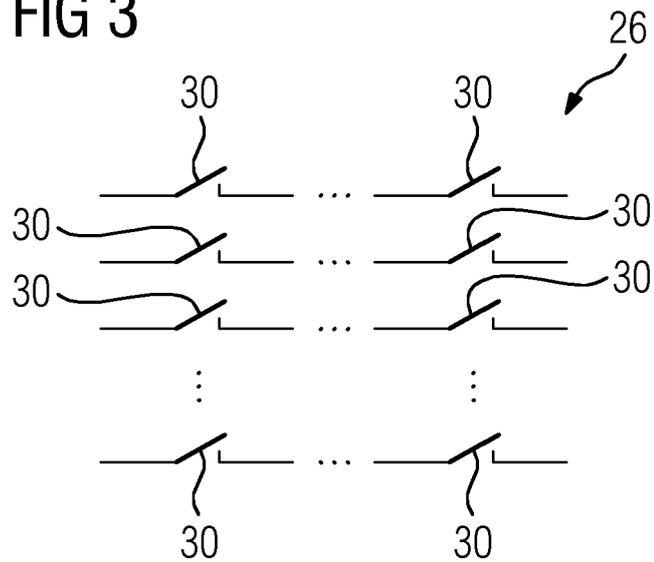


FIG 4

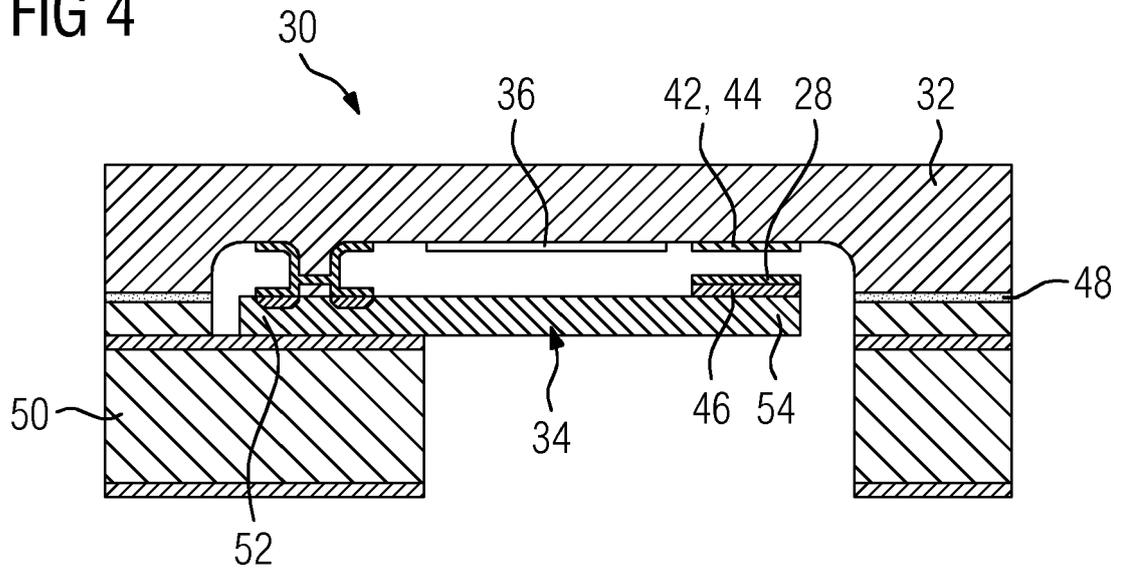


FIG 5

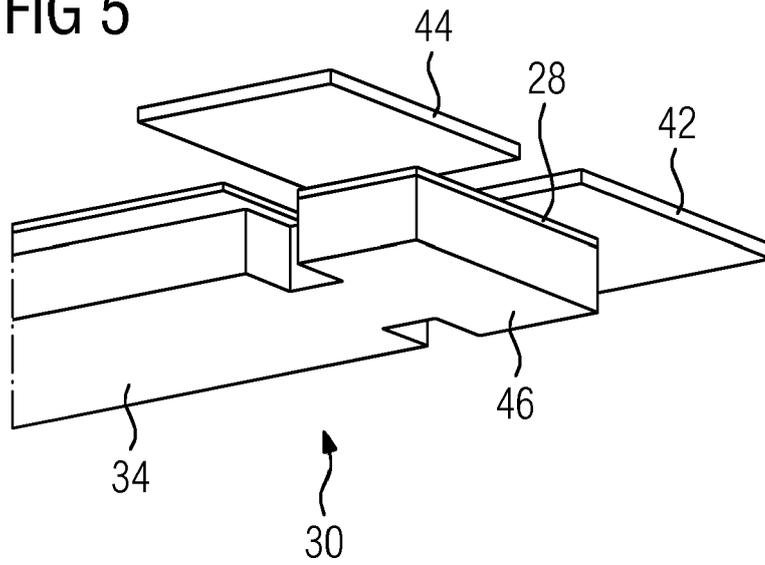


FIG 6

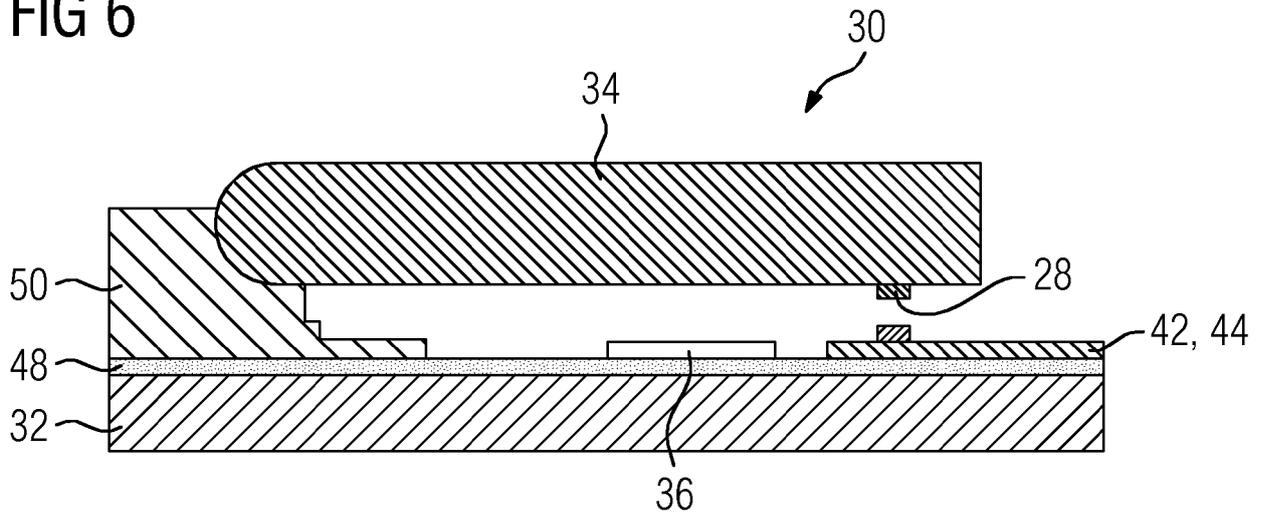


FIG 7

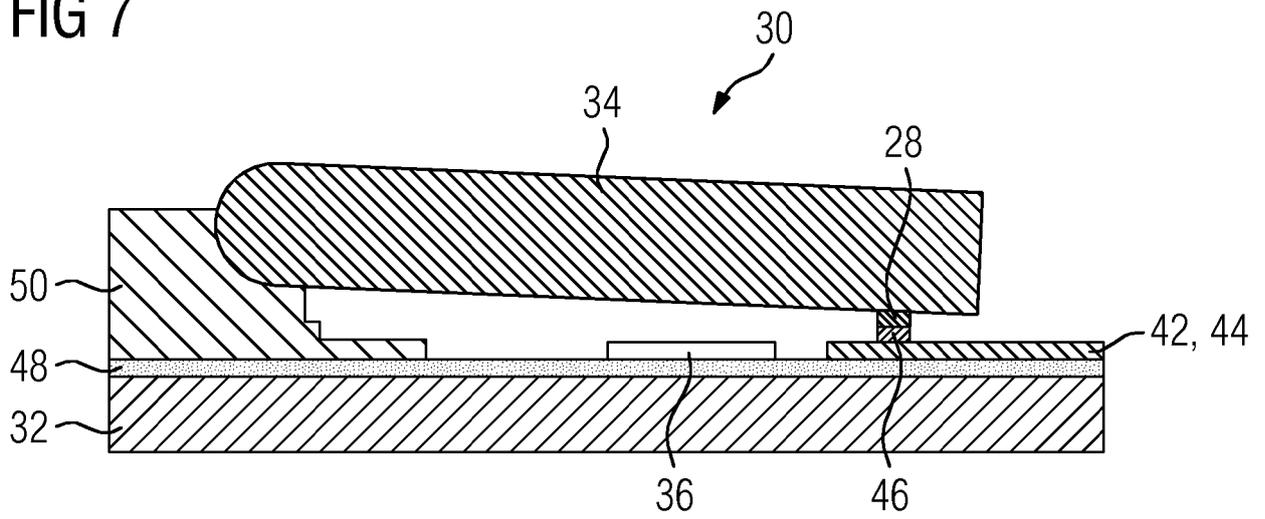


FIG 8

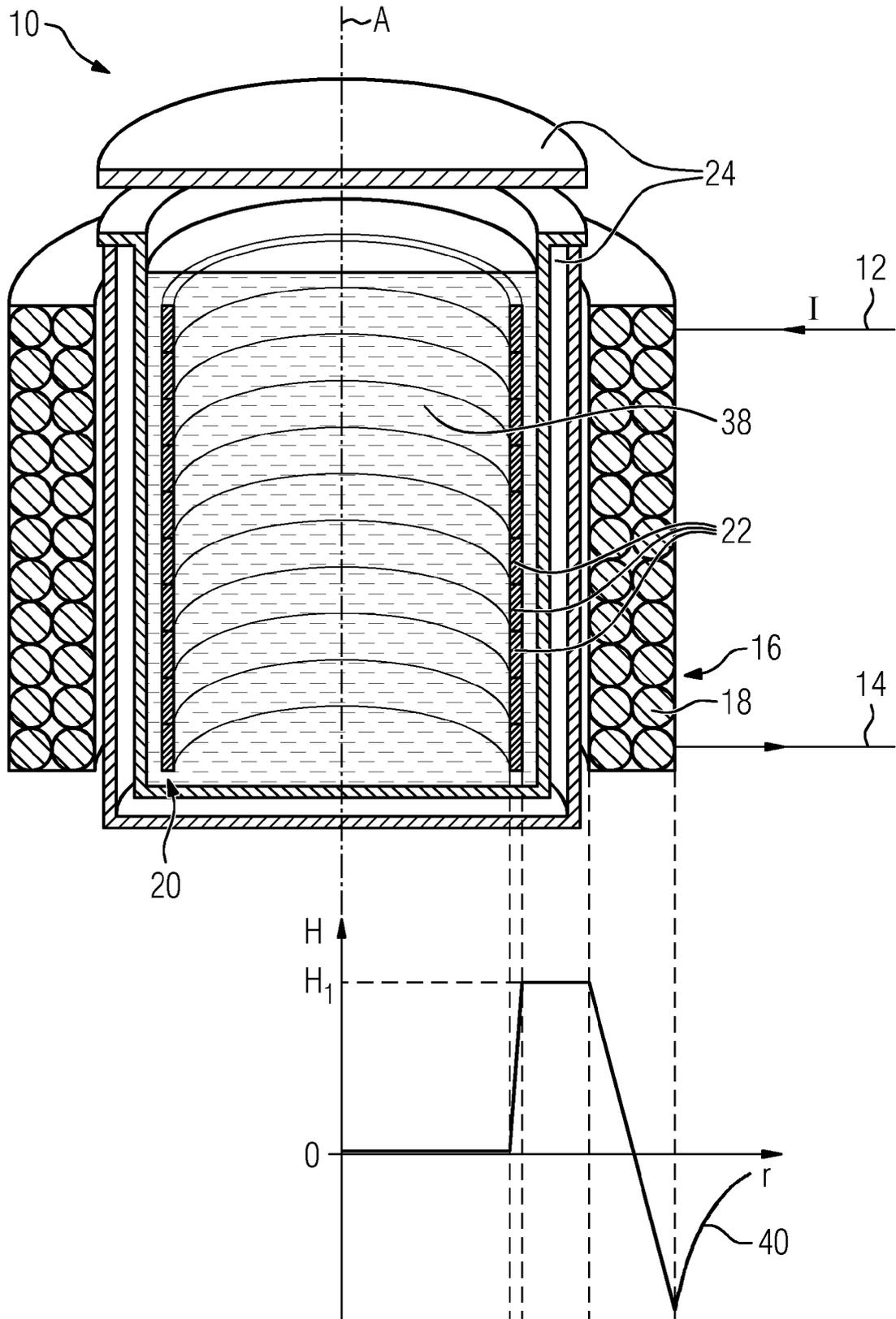


FIG 9

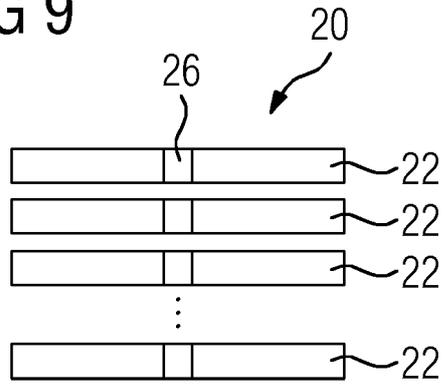
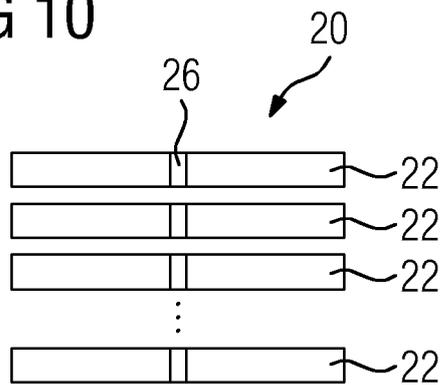


FIG 10





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 18 16 7724

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	EP 1 060 553 A1 (ABB RESEARCH LTD [CH]) 20. Dezember 2000 (2000-12-20)	1-3, 12-15	INV. H01F38/02
Y	* Absatz [0015] - Absatz [0017]; Abbildungen 2,3 * * Absätze [0007] - [0011]; Ansprüche 1,3,4 *	4-11	H02H9/02 ADD. H01F6/06 H01F6/00
Y	----- CHRIS KEIMEL ET AL: "Microelectromechanical-Systems-Based Switches for Power Applications", 1. Juli 2012 (2012-07-01), IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, PAGE(S) 1163 - 1169, XP011452384, ISSN: 0093-9994 * das ganze Dokument *	4-11	
A	----- DD 130 084 A1 (GERLACH HORST) 1. März 1978 (1978-03-01) * Zusammenfassung *	1-15	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			H01F H02H
2 Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 19. Oktober 2018	Prüfer Warneck, Nicolas
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 Patentedokument, 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	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

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

EP 18 16 7724

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.

19-10-2018

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 1060553 A1	20-12-2000	AU 2509299 A	20-09-1999
		DE 19809314 A1	09-09-1999
		DK 1060553 T3	16-09-2002
		EP 1060553 A1	20-12-2000
		WO 9945622 A1	10-09-1999

DD 130084 A1	01-03-1978	KEINE	

EPO FORM P0461

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

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 102007007087 A1 [0009]
- DE 102016223022 A1 [0013]
- EP 201435EU A, Richtlinie [0024]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **KEIMEL et al.** Micro-Electromechanical-Systems based switches for power applications. *IEEE Transactions on industrial applications*, Juli 2012, vol. 48 (4), 1163-1169 [0083]