

(19)



(11)

EP 4 377 977 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:

25.06.2025 Patentblatt 2025/26

(21) Anmeldenummer: **22757881.2**

(22) Anmeldetag: **26.07.2022**

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
H01F 29/14^(2006.01)

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
H01F 29/14; H01F 2029/143

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2022/070916

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2023/006730 (02.02.2023 Gazette 2023/05)

(54) **STEUERBARE DROSSELSPULE UND VERFAHREN ZUR BEGRENZUNG EINES ELEKTRISCHEN STROMS**

CONTROLLABLE INDUCTOR COIL AND METHOD FOR RESTRICTING ELECTRIC CURRENT

BOBINE D'ARRÊT POUVANT ÊTRE COMMANDÉE ET PROCÉDÉ DE LIMITATION D'UN COURANT ÉLECTRIQUE

(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**

(30) Priorität: **28.07.2021 DE 102021119659**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
05.06.2024 Patentblatt 2024/23

(73) Patentinhaber: **Fenske, Florian
34121 Kassel (DE)**

(72) Erfinder: **Fenske, Florian
34121 Kassel (DE)**

(74) Vertreter: **Walther Bayer Faber Patentanwälte
PartGmbB
Heimradstraße 2
34130 Kassel (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:
**EP-B1- 2 686 931 US-A- 3 207 976
US-A- 4 020 440**

- **PFEIFFER ET AL: "Impact of implementation of auxiliary bias-windings on controllable inductors for power electronic converters", 22ND EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS, 7 September 2020 (2020-09-07), pages 1 - 10, XP033835192, DOI: 10.23919/EPE20ECCEEUROPE43536.2020.9215616**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

EP 4 377 977 B1

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine steuerbare Drosselspule und ein darauf basierendes Verfahren zur Begrenzung eines elektrischen Stroms.

STAND DER TECHNIK

[0002] Drosselspulen werden als Strombegrenzer im Bereich der Stromversorgung elektrischer oder elektronischer Geräte, in der Leistungselektronik sowie in der Nieder- und Hochfrequenztechnik eingesetzt. Beispielsweise fungieren sie als Stellglieder im Energienetz, zur Filterung, als Überspannungsschutz, in Blindleistungskompensationsvorrichtungen, als Energiespeicher oder zur Lastflusssteuerung.

[0003] Drosselspulen umfassen wenigstens eine Drosselwicklung und einen üblicherweise magnetischen Spulenkern, insbesondere aus einem weichmagnetischen Werkstoff, welcher in massiver oder laminierter Ausführung, beispielsweise in Form von gesinterten Ferriten oder Elektroblech, vorliegt. Die Induktivität von Drosselspulen wird maßgeblich durch die Ausgestaltung des magnetischen Kreises bestimmt, und im Stand der Technik ist es bekannt, die Induktivität einer Drosselspule mittels einer gezielten Änderung der Länge eines Luftspalts im Spulenkern zu variieren. Figur 1a zeigt eine schematische Querschnittsdarstellung einer derartigen Drosselspule 1a mit einer Drosselwicklung 2 und einem magnetischen Spulenkern 3 mit einem Luftspalt 30, dessen Spaltbreite δ mittels Verlagerung eines beweglichen Spulenkernsegments variierbar ist.

[0004] Figur 1b zeigt zugehörige Kennlinien der Drosselspule in Abhängigkeit von der Spaltbreite δ , nämlich die Flussverkettung ψ , d.h. der gesamte magnetischen Fluss durch die Drosselspule, und die Induktivität L als Funktion des Stroms I durch die Drosselwicklung (jeweils in beliebigen Einheiten). Die ψ - I -Kennlinien weisen einen linearen Verlauf bis zur Sättigung der Magnetisierung des Spulenkerns auf, wobei die Variation der Spaltbreite δ zu einer symmetrischen Verkipfung der Kennlinien führt. Dem entspricht eine über den gesamten Arbeitsbereich der Drosselspule konstante Induktivität L , welche mittels Vergrößerns der Spaltbreite δ monoton absenkbar ist. Aus regelungstechnischer Sicht ist eine derartige Steuerbarkeit der Induktivität einer Drosselspule überaus wünschenswert. Nachteilig an dem dargestellten Konzept sind jedoch die langsamen Schaltzeiten der Drosselspule bedingt durch die mechanische Verlagerung des Spulenkernsegmentes, welche typischerweise im Sekundenbereich liegen. Das verschiebbar gelagerte Spulenkernsegment stellt außerdem ein Verschleißteil dar, insbesondere aufgrund der in typischen Anwendungsumgebungen auftretenden Vibrationen aufgrund von elektromechanischen Kräften. Diese Verschleißanfälligkeit begrenzt die Lebensdauer der Drosselspule und bedingt zudem ein Ausfallrisiko.

[0005] Eine Alternative stellt das sogenannte Virtual-

Air-Gap Konzept dar, welches beispielsweise in der Druckschrift EP 2 686 931 B1 offenbart ist. Figur 2a zeigt eine schematische Querschnittsansicht einer dementsprechenden Drosselspule 1b und Figur. 2b die zugehörigen ψ - I - bzw. L - I -Kennlinien. Das Virtual-Air-Gap Konzept basiert auf einer einstellbaren Vormagnetisierung des Spulenkerns 3 mittels einer bestrombaren Steuerwicklung, welche sich durch die beiden Bohrungen 4 im Spulenkern 3 erstreckt. Die Bohrungen 4 verlaufen dabei senkrecht zur magnetischen Hauptflussrichtung des betreffenden Segments des Spulenkerns 3. Bei Bestromung der Steuerwicklung mittels eines Steuerstroms I_s wird ein magnetischer Fluss um die Bohrungen 4 in den Spulenkern 3 eingebracht, welcher anhand der strichlierten bzw. strichpunktlierten Flusslinien schematisch dargestellt ist. Mittels des Steuerstroms I_s kann somit auf die Flussverkettungscharakteristik $\psi(I, I_s)$ und die Induktivität $L(I, I_s)$ der Drosselspule Einfluss genommen werden. Im Unterschied zur vorgenannten Drosselspule mit mechanisch variierbarer Luftspaltlänge ist die Variation der Induktivität jedoch zusätzlich stark abhängig vom jeweiligen Arbeitspunkt der Drosselspule, d.h., es ist keine über den gesamten Arbeitsbereich der Drosselspule konstante Induktivität einstellbar, was aus regelungstechnischer Sicht unbefriedigend ist.

[0006] Es ist im Stand der Technik bekannt, dass die ψ - I - bzw. L - I -Kennlinien der Figur 2b durch einen geregelten Steuerstrom I_s in die Kennlinien der Figur 1b überführbar sind, wie der Projektabschlussbericht NR²-RPC (Förderkennzeichen BMWi 0324106A, Verbundnummer 01171672) offenbart. Dazu enthält der Steuerstrom I_s neben dem Gleichstrom einen Wechselstromanteil, welcher aus einem Spektrum an Oberschwingungen in Bezug zum Drosselstrom I besteht. Das Spektrum des Wechselstromanteils muss durch die Regelung in der Amplitude und der Phasenverschiebung zum Drosselstrom I bestimmt und durch die Stromquelle des Steuerstromes I_s bereitgestellt werden. Dabei ist die Bestimmung des Oberschwingungsspektrums durch die Regelung nicht trivial und die zugehörige Stromquelle des Steuerstroms I_s weist einen aufwendigen Aufbau auf. Das Verfahren ist somit nachteilig komplex und fehleranfällig.

OFFENBARUNG DER ERFINDUNG

[0007] Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung eine steuerbare Drosselspule und ein zugehöriges Verfahren zur Begrenzung eines elektrischen Stromes vorzuschlagen, welche auf einer schnellen, ausfallsicheren und zweckmäßigen Steuerbarkeit der Induktivität der Drosselspule basieren.

[0008] Diese Aufgabe wird ausgehend von einer Drosselspule gemäß Anspruch 1 und einem Verfahren gemäß Anspruch 14 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

[0009] Die technische Lehre der Erfindung offenbart eine steuerbare Drosselspule, umfassend wenigstens eine Drosselwicklung und einen magnetischen Spulenkern, welcher eine Längserstreckungsrichtung entsprechend der magnetischen Hauptflussrichtung, eine erste Quererstreckungsrichtung und eine zweite Quererstreckungsrichtung aufweist, wobei die drei Erstreckungsrichtungen paarweise senkrecht zueinander orientiert sind, wobei der Spulenkern wenigstens drei Bohrungen aufweist,

- wobei die Bohrungen im Wesentlichen entlang der zweiten Quererstreckungsrichtung verlaufen,
- wobei in jeder Quererstreckungsebene des Spulenkerns, welche durch die erste Quererstreckungsrichtung und die zweite Quererstreckungsrichtung aufgespannt ist, höchstens eine Bohrung verläuft, und
- wobei ein Abstand wenigstens einer Bohrung zu einem Außenrand des Spulenkerns in der ersten Quererstreckungsrichtung größer ist als

o ein Abstand der Bohrung zu einer weiteren Berandung des Spulenkerns,

wobei eine Steuerwicklung durch die Bohrungen verläuft, derart, dass mittels eines Steuerstroms durch die Steuerwicklung eine Vormagnetisierung des Spulenkerns erzeugbar ist.

[0010] Die Erfindung geht dabei von dem Gedanken aus, eine zweckmäßige Modifikation des Virtual-Air-Gap Konzeptes vorzunehmen, welche die Anzahl der Bohrungen zur Aufnahme der Steuerwicklung und deren Anordnung zueinander bzw. relativ zur Brandung des Spulenkerns betrifft. Damit gelingt die Einstellung komplexerer Vormagnetisierungsmuster im Spulenkern, deren Zweckmäßigkeit für die Steuerbarkeit der Drosselspule später im Detail aufgezeigt wird. Insbesondere ist es mit dem erfindungsgemäßen Konzept möglich, die Induktivität der Drosselspule über ihren gesamten Arbeitsbereich im Wesentlichen monoton und näherungsweise linear mittels des Steuerstroms zu variieren, insbesondere mittels eines Gleichstroms.

[0011] Zur Veranschaulichung der erfindungsgemäßen Anordnung der Bohrungen dienen zunächst die Figuren 3a bis 3c. Diese zeigen schematische Ansichten eines Abschnitts eines Spulenkerns 3, durch welchen eine bzw. zwei Bohrungen 4 verlaufen. Der Spulenkern 3 weist eine Längserstreckungsrichtung Z auf, welche der lokalen magnetischen Hauptflussrichtung entspricht sowie eine zu der Längserstreckungsrichtung Z orthogonale Quererstreckungsebene, welche durch die erste Quererstreckungsrichtung X und die zweite Quererstreckungsrichtung Y aufgespannt ist. Die Bohrungen 4 verlaufen im Wesentlichen entlang der zweiten Quererstreckungsrichtung Y, wobei in jeder Quererstreckungsebene höchstens eine Bohrung 4 verläuft. Erfindungsgemäß ist der Abstand x_1 einer Bohrung 4 zu einem Außenrand des Spulenkerns 3 in der ersten Quererstreckungsrichtung

Y größer als ein Abstand x_2 bzw. ein Abstand z_1 der Bohrung 4 zu einer weiteren Berandung des Spulenkerns 3 (Figuren 3a und 3b), nicht Teil der Erfindung ist folgendes Kriterium: der Abstand x_1 ist größer als der halbe Abstand d_4 zu einer weiteren Bohrung 4 (Figur 3c).

[0012] Selbstverständlich bildet nicht ein beliebiger Außenrand des Spulenkerns den Referenzabstand (x_1) zur Beurteilung der relativen Anordnung der betrachteten Bohrung, vielmehr ist erfindungsgemäß nur der Abstand zu einem der beiden nächstliegenden Außenränder des Spulenkerns in der ersten Quererstreckungsrichtung maßgeblich. Anders ausgedrückt sind nur die Abmessungen desjenigen Segments des Spulenkerns von Belang, in welchem die betrachtete Bohrung angeordnet ist. Wie nachstehend detaillierter dargestellt wird, zielt die erfindungsgemäße Anordnung der Bohrungen immer auf die Schaffung einer geometrischen Engstelle für den durch die Steuerwicklung eingebrachten magnetischen Fluss, und in diesem Zusammenhang sind allein die Abstände der Bohrung zu den nächstliegenden Außenrändern des Spulenkerns maßgeblich. Die Abstände zu den nächstliegenden Außenrändern bestimmen die sich einstellende Magnetisierungsverteilung um die bestromte Steuerwicklungsbohrung herum, und der Einfluss der sonstigen maßlichgeometrischen Ausbildung des Spulenkerns ist demgegenüber vernachlässigbar.

[0013] Im Rahmen der vorliegenden Anmeldung ist unter der magnetischen Hauptflussrichtung jeweils die lokale Hauptflussrichtung in einem betreffenden Spulenkernsegment zu verstehen, wie Figur 4 veranschaulicht. Darin ist beispielhaft ein U-förmiger Spulenkern 3 dargestellt, welcher einen horizontalen und zwei vertikale Spulenkernsegmente umfasst, deren Übergänge durch die gestrichelten Begrenzungslinien dargestellt sind. Einhergehend mit den unterschiedlichen Hauptflussrichtungen des magnetischen Flusses Φ' , Φ'' , Φ''' in den drei Spulenkernsegmenten sind im Sinne der vorliegenden Anmeldung auch die Längserstreckungsrichtung Z' , Z'' , Z''' sowie die Quererstreckungsrichtungen X' , X'' , X''' und Y' , Y'' , Y''' lokal unterschiedlich orientiert, wobei sich die erfindungsgemäßen Vorschriften betreffend die Anordnung der Bohrungen in Bezug auf das jeweils lokal gültige Koordinatensystem X, Y, Z des betreffenden Spulenkernsegments beziehen.

[0014] Weiterhin zeigen die Figuren 5a bis 5c schematische Ansichten eines Spulenkerns 3 mit alternativen, aber nicht erfindungsgemäß angeordneten Bohrungen 4, durch welche jeweils die Steuerwicklung 5 verläuft, die im Falle der Figur 5a jede Bohrung 4 nur einmal durchläuft und im Falle der Figuren 5b und 5c mehrfach durch jede Bohrung 4 verläuft. Bei Letzteren wird durch den Steuerstrom eine höhere Steuerdurchflutung erzeugt bzw. es ist ein geringerer Steuerstrom zur Erzeugung einer identischen Steuerdurchflutung vonnöten. In dieser Alternative oder im Rahmen der vorliegenden Erfindung können unterschiedliche Wicklungskonzepte der Steuerwicklung zur zweckmäßigen Beeinflussung

der Vormagnetisierung des Spulenkerns Verwendung finden.

[0015] Zur Veranschaulichung des Grundgedankens der vorliegenden Erfindung sind in den Figuren 6, 7, 8 und 9a simulierte Verteilungen der magnetischen Flussdichte in weichmagnetischen Spulenkernen 3 als Feldlinienbilder dargestellt, welche sich bei Bestromung der Steuerwicklung unter unterschiedlichen Anordnungen der Bohrungen 4 ergeben. Im jeweils linken Teilbild ist eine schematische Darstellung des zugrundeliegenden Modells gezeigt, d.h., der Lage der Bohrungen 4 im Spulenkern 3, wobei die Lage jeweils systematisch variiert wird, worauf die in den weiteren Teilbildern dargestellten Verteilungen der magnetischen Flussdichte jeweils beruhen. Der Simulation liegt dabei eine feste Steuerdurchflutung durch die Bohrungen 4 zugrunde, wobei die Drosselwicklung der zugehörigen Drosselspule jeweils stromlos ist. Das Vorzeichen der Steuerdurchflutung jeder Bohrung 4 ist durch ein Punkt- bzw. Kreuzsymbol dargestellt.

[0016] In Figur 6 wird eine systematische Variation des Abstandes der Bohrungen 4 zu den Außenrändern des Spulenkerns 3 in der ersten Quererstreckungsrichtung X, d.h., eine Variation des Verhältnisses x_2/x_1 vorgenommen. Bei mittlerer Anordnung der Bohrungen 4, d.h., bei $x_2/x_1 = 1$ resultiert eine symmetrische Flussdichteverteilung, welche einer entsprechenden Verteilung der Vormagnetisierung des Spulenkerns 3 entspricht. Bei ausreichend hohem Steuerstrom wird die Vormagnetisierung in den Erstreckungsebenen der beiden Bohrungen 4 vollständig in die Sättigung getrieben, sodass der Spulenkern 3 keinen weiteren magnetischen Fluss aus einer Bestromung der Drosselwicklung aufzunehmen vermag und somit die Induktivität der Drosselspule stark abgesenkt ist. Diese ausschließlich mittige Anordnung der Bohrungen 4 entspricht dem Virtual-Air-Gap Konzept nach dem Stand der Technik und resultiert in charakteristischen Kennlinien, welche den Darstellungen der Figur 2b entsprechen. Bei einer Verschiebung der Bohrungen 4 in der ersten Quererstreckungsrichtung X, d.h., bei einer Verringerung des Verhältnisses x_2/x_1 bildet sich eine in den Quererstreckungsebenen X-Y asymmetrische Verteilung von magnetischer Flussdichte und Vormagnetisierung des Spulenkerns 3 aus. Bei diesen außermittigen Anordnungen der Bohrungen 4 ist es mittels des Steuerstroms praktisch unmöglich, eine vollständige Sättigung der Vormagnetisierung in der gesamten Quererstreckungsebene der jeweiligen Bohrung 4 zu erzeugen, da aufgrund der Quellenfreiheit der magnetischen Flussdichte die durch den Abstand x_2 gegebene Engstelle den magnetischen Fluss limitiert. So ist bei $x_2/x_1 = 0,33$ die in den Spulenkern eingebrachte Flussdichte bereits wesentlich geringer als beispielsweise bei $x_2/x_1 = 1$, und im Extremfall $x_2=0$ (in der Praxis wenig relevant) wird bei der zugrundeliegenden Steuerdurchflutung der Bohrungen 4 (nahezu) kein magnetischer Fluss in den Spulenkern 3 eingebracht.

[0017] In Figur 7 werden die Flussverteilungen bei

einer Variation des Verhältnisses von Länge L_z zu Breite B_x des Spulenkerns 3, d.h., bei einer Variation des Verhältnisses z_1/x_1 dargestellt. Bei Anordnungen mit $z_1/x_2 < 1$ stellt der Abstand z_1 zwischen der Bohrung 4 und dem Außenrand des Spulenkerns 3 eine den magnetischen Fluss begrenzende Engstelle dar, sodass in diesen Anordnungen mittels des Steuerstroms praktisch keine vollständige Sättigung der Vormagnetisierung des Spulenkerns 3 in der Quererstreckungsebene X-Y der Bohrung 4 erzeugbar ist.

[0018] Figur 8 zeigt die Verteilung der magnetischen Flussdichte im Spulenkern 3 bei Variation des Abstandsverhältnisses x_2/x_1 der Bohrungen 4 zu den Außenrändern des Spulenkerns 3 in der ersten Quererstreckungsrichtung X, wobei die Bohrungen 4 in entgegengesetzte Richtungen versetzt werden und eine gleichsinnige Steuerdurchflutung aufweisen. Im Vergleich zum Beispiel der Figur 6 ergeben sich in den Quererstreckungsebenen der Bohrungen 4 ähnliche Flussverteilungen, wohingegen der Bereich zwischen den Bohrungen 4 aufgrund der Unterschiede in der Orientierung der Steuerdurchflutung unterschiedlich vormagnetisiert wird.

[0019] Figur 9a zeigt die Verteilungen der magnetischen Flussdichte im Spulenkern 3 unter Variation des Abstandes d_4 in Längserstreckungsrichtung Z zwischen den beiden gegensinnig durchfluteten Bohrungen 4. Im Bereich zwischen den Bohrungen 4 kommt es zu einer konstruktiven Überlagerung der magnetischen Teilflüsse, sodass der Spulenkern 3 dort als Erstes in einen Zustand vollständig gesättigter Vormagnetisierung überführt wird, womit abermals eine Begrenzung des magnetischen Flusses in den jeweiligen Quererstreckungsebenen X-Y der Bohrungen 4 einhergeht, sodass dort mittels des Steuerstroms im Wesentlichen keine vollständige Sättigung der Vormagnetisierung erzeugbar ist.

[0020] Figur 9b zeigt zu den Simulationen der Figur 9a gehörige Kennlinien des magnetischen Flusses Φ (in Einheiten des Sättigungsflusses Φ_{sat}) im Spulenkern als Funktion einer durch Bestromung der Drosselwicklung erzeugte magnetische Spannung V bei konstanter Steuerdurchflutung Ξ_s der Steuerwicklung unter Variation des d_4/x_1 -Verhältnisses gemäß der Darstellung der Figur 9a. Bei $d_4/x_1=0$, d.h., bei einer Anordnung der Bohrungen, mittels welcher praktisch kein magnetischer Fluss über einen Steuerstrom in den Spulenkern einbringbar ist, entspricht die Kennlinie $\Phi(V)$ einer gewöhnlichen Spule mit weichmagnetischem Kern. Bei Erhöhung des d_4/x_1 -Verhältnisses, d.h., bei Vorliegen einer durch die Steuerdurchflutung Ξ_s bedingten Vormagnetisierung des Spulenkerns weisen die Kennlinien $\Phi(V)$ charakteristische Plateaus auf, welche Ummagnetisierungsprozesse der Vormagnetisierung aufgrund der anliegenden magnetischen Spannung V widerspiegeln. Je nach konkreter Anordnung der Bohrungen ist die Vormagnetisierung unterschiedlich ausgeprägt, sodass die Lage der Plateaus in den $\Phi(V)$ Kennlinien variiert. Auf dieser Erkenntnis beruht ein wesentlicher Aspekt der

vorliegenden Erfindung, nämlich eine zweckmäßige Ausgestaltung, d.h., insbesondere eine Linearisierung der $\Phi(V)$ Kennlinien mittels einer Kombination von Bohrungen in unterschiedlichen Anordnungen zur abschnittsweise unterschiedlich ausgeprägten Vormagnetisierung des Spulenkerns.

[0021] Dies zeigt beispielhaft Figur 10a, in welcher die Ergebnisse einer Simulation zur Verteilung der magnetischen Flussdichte und der resultierenden $\Phi(V)$ Kennlinie basierend auf einem Spulenkern 3 mit drei Paaren von Bohrungen 4 dargestellt sind, wobei die Paare unterschiedliche Abstände d_4 in der Längserstreckungsrichtung Z zwischen den zugehörigen Bohrungen 4 aufweisen. In den $\Phi(V)$ Kennlinien bei Anliegen eines Steuerstroms I_s als Gleichstrom zeigt sich eine Mehrzahl von Stufen entsprechend der Ummagnetisierungsprozesse um die einzelnen Bohrungen 4, und bei Erhöhung des Steuerstroms I_s resultiert eine Verkipfung der Kennlinien.

[0022] In Figur 10b sind die zugehörigen Kennlinien der Flussverkeftung Ψ im Spulenkern und der Induktivität L der Drosselspule über dem Strom I durch die Drosselwicklung aufgetragen. Hier zeigt sich nun die gewünschte Charakteristik, welche annäherungsweise dem idealen Verhalten einer Drosselspule mit mechanisch variierbarer Luftspaltbreite gemäß der Figuren 1a und 1b entspricht, d.h., eine Induktivität, welche über den gesamten Arbeitsbereich der Drosselspule näherungsweise konstant ist und sich mittels des Steuerstroms I_s monoton und näherungsweise linear (Potenzfunktion mit einem Exponenten zwischen 1 und 2) über einen weiten Wertebereich variieren lässt. Ein besonderer erfindungsgemäßer Vorteil besteht darin, dass lediglich ein Gleichstrom als Steuerstrom I_s zur vorgenannten Steuerung der Induktivität der Drosselspule notwendig ist, d.h., dass auf den komplexen Aufbau gemäß Stand der Technik zur Erzeugung eines angepassten Wechselstroms als Steuerstrom verzichtet werden kann.

[0023] Beispielsweise weist der Spulenkern der erfindungsgemäßen Drosselspule wenigstens einen Luftspalt auf, welcher sich in einer Quererstreckungsebene des Spulenkerns erstreckt, wobei durch den Luftspalt eine Berandung des Spulenkerns gebildet ist. Das Vorhalten von Luftspalten dient der "statischen" Beeinflussung der Induktivität der Drosselspule.

[0024] Wie bereits beispielhaft anhand der Figur 10a dargestellt, weist der Spulenkern beispielsweise eine Mehrzahl von Paaren von Bohrungen auf, wobei die Paare unterschiedliche Abstände zwischen den zugehörigen Bohrungen aufweisen. Weiterhin können die Bohrungen beispielsweise unterschiedliche Abstände zu einem Außenrand des Spulenkerns in der ersten Quererstreckungsrichtung aufweisen. Dadurch sind unterschiedlich dimensionierte Engstellen für den magnetischen Fluss in den Quererstreckungsebenen der Bohrungen angelegt, woraus die gewünschte Quasi-Linearisierung der Kennlinien des magnetischen Flusses als Funktion der magnetischen Spannung resultiert.

[0025] Beispielsweise kann wenigstens eine der Boh-

rungen als ein Langloch ausgebildet sein. Ein Langloch kann eine größere Anzahl an Windungen der Steuerwicklung aufnehmen, sodass eine höhere Steuerdurchflutung erzielbar ist.

[0026] In einer speziellen Ausführungsform weist der Spulenkern eine Mehrzahl von quaderförmigen Spulenkernsegmenten auf, welche durch Luftspalte voneinander getrennt sind, wobei jedes Spulenkernsegment eine Bohrung aufweist und wobei die Spulenkernsegmente unterschiedliche Abmessungen in der Längserstreckungsrichtung relativ zur Abmessung in der ersten Quererstreckungsrichtung aufweisen.

[0027] In einer weiteren Ausführungsform ist die erfindungsgemäße Drosselspule mehrphasig ausgebildet, wobei die Drosselspule mehrere Drosselwicklungen und mehrere zugehörige Spulenkernschenkel umfasst, wobei die Drosselwicklungen für jeweils eine Phase eines Mehrphasenwechselstroms vorgesehen sind.

[0028] Beispielsweise umfasst die erfindungsgemäße Drosselspule eine Gleichstromquelle und eine zugehörige Steuerung, mittels welchen der Steuerstrom zur Erzeugung einer gewünschten Vormagnetisierung im Spulenkern in die Steuerwicklung einbringbar ist.

[0029] Die Erfindung betrifft weiterhin ein Verfahren zur Begrenzung eines elektrischen Stroms mittels einer erfindungsgemäßen steuerbaren Drosselspule, wobei der zu begrenzende Strom in die Drosselwicklung eingebracht wird und wobei ein Steuerstrom in die Steuerwicklung eingebracht wird, welche eine zur gewünschten Strombegrenzung geeignete Vormagnetisierung in dem Spulenkern der Drosselspule erzeugt.

[0030] Dabei wird der Steuerstrom beispielsweise durch eine Gleichstromquelle erzeugt.

[0031] In einer Ausführungsform des Verfahrens ist der zu begrenzende Strom als ein gepulster Gleichstrom ausgebildet, welcher nach dem Durchlaufen der Drosselwicklung die Steuerwicklung durchläuft, wodurch der Steuerstrom gebildet wird. Der gepulste Gleichstrom weist einen Gleich- und einen Wechselstromanteil auf, wobei der Wechselstromanteil gegenüber dem Gleichstromanteil vorzugsweise deutlich kleiner ist, beispielsweise ein Drittel des Gleichstromanteils beträgt. In dieser Ausführungsform wird folglich die Induktivität der Drosselspule durch den zu begrenzenden Strom bestimmt.

[0032] Sofern der zu begrenzende Strom als ein Mischstrom ausgebildet ist, können im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens der Gleichstromanteil und der Wechselstromanteil des Mischstroms voneinander getrennt werden, wobei der Steuerstrom durch den Gleichstromanteil gebildet wird. Die Trennung in Gleichstrom- und Wechselstromanteile kann beispielsweise mittels einer Drosselwicklung vorgenommen werden, welche zwei parallele Wicklungen umfasst, von denen eine aus einem Litzenbündel und die andere aus einem niederohmigen Vollendraht oder einem sonstigen massiven Leiter, z.B. mit Rechteckprofil, ausgebildet ist, sodass der Wechselstromanteil durch das Litzenbündel und der Gleichstromanteil durch den massiven Leiter

verläuft, wobei der Gleichstromanteil anschließend noch die Steuerwicklung als Steuerstrom durchläuft.

[0033] Im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens kann der Steuerstrom zudem aus einer Kombination eines von einer Gleichstromquelle gelieferten Anteils und eines Anteils aus dem zu begrenzenden Strom gebildet werden. Dazu können beispielsweise zwei separate Steuerwicklungen vorgesehen sein.

BEVORZUGTE AUSFÜHRUNGSBEISPIELE DER ERFINDUNG

[0034] Weitere, die Erfindung verbessernde Maßnahmen werden nachstehend mit der Beschreibung von bevorzugten Ausführungsbeispielen der Erfindung anhand von Figuren näher dargestellt.

[0035] Figur 11 bis Figur 20 zeigen erfindungsgemäße Drosselspulen 100 in schematischer Querschnittsansicht. Der Übersichtlichkeit halber sind in den meisten Figuren die Steuerwicklungen jeweils nicht dargestellt. Entsprechend der vorhergehenden Beschreibung verlaufen die Steuerwicklungen jeweils durch die Bohrungen im Spulenkern. Die Anordnung der Bohrungen entspricht jeweils der technischen Lehre des Anspruchs 1.

[0036] Figur 11 zeigt eine Drosselspule 100 mit einem Spulenkern 3, welcher zwei U-förmige Spulenkernsegmente 3U umfasst, welche durch einen Luftspalt 30 voneinander getrennt sind, wobei die Bohrungen 4 in beide Spulenkernsegmente 3U eingebracht sind. Alternativ könnten Bohrungen in nur eines der Spulenkernsegmente 3U eingebracht sein. Die Bohrungen 4 bilden Paare, wobei die Paare unterschiedliche Abstände zwischen den zugehörigen Bohrungen 4 aufweisen. Die Drosselwicklung 2 umläuft den Spulenkern 3 abschnittsweise, wobei die Drosselwicklung 2 beispielhaft zwei Wicklungsabschnitte umfasst, welche entweder parallel oder in Reihe geschaltet sein können.

[0037] Figur 12 zeigt eine Drosselspule 100, deren Spulenkern 3 zwei E-förmige Spulenkernsegmente 3E umfasst, welche durch einen Luftspalt 30 voneinander getrennt sind, wobei die Bohrungen 4 in beide Spulenkernsegmente 3E eingebracht sind. Alternativ könnten Bohrungen in nur eines der Spulenkernsegmente 3E eingebracht sein. Eine der Bohrungen 4 ist als ein Langloch ausgebildet, wodurch eine höhere Steuerdurchflutung möglich ist. Alternativ kann der Spulenkern auch als Mantelkern mit nur einem Luftspalt in der Mitte oder Luftspalten nur in den äußeren Schenkeln ausgebildet sein.

[0038] Figur 13 zeigt eine Drosselspule 100, deren Spulenkern 3 vier I-förmige Spulenkernsegmente 3I umfasst, welche in einer rechteckförmigen Anordnung jeweils durch Luftspalte 30 voneinander getrennt sind, wobei die Bohrungen 4 hier beispielhaft in zwei der Spulenkernsegmente 3I eingebracht sind. Die Bohrungen 4 sind dabei zu Paaren gruppiert, wobei die Paare unterschiedliche Abstände zwischen den Bohrungen 4 aufweisen und wobei die Bohrungen 4 paarweise unter-

schiedliche Abstände zu einem Außenrand des Spulenkerns 3 in der ersten Quererstreckungsrichtung aufweisen.

[0039] Figur 14 und Figur 15 zeigen Drosselspulen 1, deren Spulenkern 3 jeweils ein I-förmiges Spulenkernsegment 3I und zwei U-förmige Spulenkernsegmente 3U umfassen, welche durch Luftspalte 30 voneinander getrennt sind, wobei die Bohrungen 4 beispielhaft in das I-förmige Spulenkernsegment 3I eingebracht sind. Alternativ können die äußeren Spulenkernsegmente auch als halbe Ringkerne ausgebildet sein.

[0040] Figur 16 und Figur 17 zeigen Drosselspulen 1, deren Spulenkern 3 ringförmig ausgebildet sind, wobei die Bohrungen 4 in axialer Richtung (Figur 16) beziehungsweise in radialer Richtung (Figur 17) durch den Spulenkern 3 verlaufen. Die Hauptflussrichtung des magnetischen Flusses Φ entsprechend der Längserstreckungsrichtung Z des Spulenkerns 3 verläuft hier kreisförmig und die erste Quererstreckungsrichtung X', X'' (Figur 16) bzw. die zweite Quererstreckungsrichtung Y', Y'' (Figur 17) sind radial orientiert, d.h., je Bohrung 4 unterschiedlich.

[0041] Figur 18 zeigt einen erfindungsgemäßen Strombegrenzer 100 für einen zweiphasigen Strom mit einer Drosselspule 100, welche zwei Drosselwicklungen 2.1, 2.2 und zwei zugehörige Spulenkernschenkel 3.1, 3.2 umfasst, wobei die Drosselwicklungen 2.1, 2.2 für jeweils eine Phase des zweiphasigen Stroms vorgesehen sind. Die Spulenkernschenkel 3.1, 3.2 weisen jeweils drei quaderförmige Spulenkernsegmente 3a, 3b, 3c auf, welche durch Luftspalte 30 voneinander getrennt sind, wobei jedes der Spulenkernsegmente 3a, 3b, 3c eine Bohrung 4 aufweist, und wobei die Spulenkernsegmente 3a, 3b, 3c unterschiedliche Abmessungen in der Längserstreckungsrichtung relativ zur Abmessung in der ersten Quererstreckungsrichtung aufweisen. Alternativ kann die Drosselspule 100 auch einphasig betrieben werden, wozu die beiden Drosselwicklungen 2.1, 2.2 in Reihe oder parallel zu schalten sind.

[0042] Figur 19 zeigt eine weitere zweiphasige Drosselspule 100 mit einem Spulenkern 3, welcher ein ringförmiges Spulenkernsegment 3R und ein darin angeordnetes I-förmiges Spulenkernsegment 3I umfasst, wobei die Bohrungen 4 beispielhaft nur in das I-förmige Spulenkernsegment 3I eingebracht sind. Die Drosselwicklungen 2.1, 2.2 für die beiden Stromphasen sind abschnittsweise um das ringförmige Spulenkernsegment 3R angeordnet.

[0043] Figur 20 zeigt eine Drosselspule 100 für einen Dreiphasen-Wechselstrom. Die drei Drosselwicklungen 2.1, 2.2, 2.3 sind für jeweils eine Phase IL1, IL2, IL3 des Dreiphasen-Wechselstroms vorgesehen und die zugehörigen Spulenkernschenkel 3.1, 3.2, 3.3 umfassen jeweils vier quaderförmige Spulenkernsegmente 3a, 3b, 3c, 3d, durch welche jeweils eine Bohrung 4 verläuft. Der Steuerstrom Is wird mittels der Steuerwicklung 5 durch sämtliche Bohrungen 4 geleitet, wobei aufeinanderfolgende Bohrungen 4 gegenseitig durchflutet werden, und

wobei die als Joch fungierenden Spulenkernsegmente 3I die Steuerwicklung 5 zwischen den Spulenkernschenkeln 3.1, 3.2, 3.3 führt.

Figurenverzeichnis:

[0044]

Fig. 1a: schematische Querschnittsansicht einer ersten Drosselspule gemäß Stand der Technik,
 Fig. 1b: simulierte Kennlinien zu Fig. 1a,
 Fig. 2a: schematische Querschnittsansicht einer zweiten Drosselspule gemäß Stand der Technik,
 Fig. 2b: simulierte Kennlinien zu Fig. 2a,
 Fig. 3a - 3c: schematische Darstellungen der erfindungsgemäßen Anordnung der Bohrungen,
 Fig. 4: schematische Darstellung der erfindungsgemäßen Richtungsbezeichnung,
 Fig. 5a - 5c: schematische Darstellungen der erfindungsgemäßen Steuerwicklungen,
 Fig. 6: simulierte Flussdichteverteilungen in einem Spulenkern bei Variation der Bohrungsanordnung,
 Fig. 7: simulierte Flussdichteverteilungen in einem Spulenkern bei Variation der Spulenkerngeometrie,
 Fig. 8: simulierte Flussdichteverteilungen in einem Spulenkern bei Variation der Bohrungsanordnung,
 Fig. 9a: simulierte Flussdichteverteilungen in einem Spulenkern bei Variation der Bohrungsanordnung,
 Fig. 9b: Kennlinien zu Fig. 9a,
 Fig. 10a: simulierte Flussdichteverteilungen in einem Spulenkern bei Variation der Bohrungsanordnung und zugehörige Kennlinien,
 Fig. 10b: Kennlinien zu Fig. 10a,
 Fig. 11: erstes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Drosselspule,
 Fig. 12: zweites Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Drosselspule,
 Fig. 13: drittes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Drosselspule,
 Fig. 14: viertes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Drosselspule,
 Fig. 15: fünftes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Drosselspule,
 Fig. 16: sechstes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Drosselspule,
 Fig. 17: siebtes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Drosselspule,
 Fig. 18: achttes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Drosselspule,
 Fig. 19: neuntes Ausführungsbeispiel einer er-

Fig. 20:

findungsgemäßen Drosselspule, und zehntes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Drosselspule.

5 Bezugszeichenliste:

[0045]

100 Drosselspule
 10 1a, 1b Drosselspule gemäß Stand der Technik
 2 Drosselwicklung
 2.1, 2.2, 2.3 Drosselwicklung für Drehstromphase
 3 Spulenkern
 3a, 3b, 3c Spulenkernsegment
 15 3U U-förmiges Spulenkernsegment
 3E E-förmiges Spulenkernsegment
 3I I-förmiges Spulenkernsegment
 3R ringförmiges Spulenkernsegment
 3.1, 3.2, 3.3 Spulenkernschenkel
 20 30 Luftspalt
 4 Bohrung
 5 Steuerwicklung
 X erste Quererstreckungsrichtung
 25 Y zweite Quererstreckungsrichtung
 Z Längserstreckungsrichtung
 x1, x2, z1 Abstand zu Berandung
 d4 Abstand zwischen Bohrungen
 Bx Abmessung erste Quererstreckungsrichtung
 30 Lz Abmessung Längserstreckungsrichtung
 δ Spaltbreite
 I zu begrenzender Strom
 Is Steuerstrom
 35 Ξ s Steuerdurchflutung
 Φ magnetischer Fluss
 Ψ Flussverkettung
 V magnetische Spannung
 L Induktivität
 40

Patentansprüche

1. Steuerbare Drosselspule (100), umfassend wenigstens eine Drosselwicklung (2) und einen magnetischen Spulenkern (3), welcher eine Längserstreckungsrichtung (Z) entsprechend der magnetischen Hauptflussrichtung, eine erste Quererstreckungsrichtung (X) und eine zweite Quererstreckungsrichtung (Y) aufweist, wobei die drei Erstreckungsrichtungen (X, Y, Z) paarweise senkrecht zueinander orientiert sind, wobei der Spulenkern (3) wenigstens drei Bohrungen (4) aufweist,

- wobei die Bohrungen (4) im Wesentlichen entlang der zweiten Quererstreckungsrichtung (Y) verlaufen,
 - wobei in jeder Quererstreckungsebene des Spulenkerns (3), welche durch die erste Quer-

erstreckungsrichtung (X) und die zweite Quererstreckungsrichtung (Y) aufgespannt ist, höchstens eine Bohrung (4) verläuft, und
- wobei ein Abstand (x1) wenigstens einer Bohrung (4) zu einem Außenrand des Spulenkerns (3) in der ersten Quererstreckungsrichtung (X) größer ist als

o ein Abstand (x2, z1) der Bohrung (4) zu einer weiteren Berandung des Spulenkerns (3),

wobei eine Steuerwicklung (5) durch die Bohrungen (4) verläuft, derart, dass mittels eines Steuerstroms (Is) durch die Steuerwicklung (5) eine Vormagnetisierung des Spulenkerns (3) erzeugbar ist.

2. Drosselspule (100) nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Spulenkern (3) wenigstens einen Luftspalt (30) aufweist, welcher sich in einer Quererstreckungsebene des Spulenkerns (3) erstreckt, wobei durch den Luftspalt (30) eine Berandung des Spulenkerns (3) gebildet ist.
3. Drosselspule (100) nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Spulenkern (3) eine Mehrzahl von Paaren von Bohrungen (4) aufweist, wobei die Paare unterschiedliche Abstände (d4) zwischen den zugehörigen Bohrungen (4) aufweisen.
4. Drosselspule (100) nach einem der vorgenannten Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Bohrungen (4) unterschiedliche Abstände (x1) zu einem Außenrand des Spulenkerns (3) in der ersten Quererstreckungsrichtung (X) aufweisen.
5. Drosselspule (100) nach einem der vorgenannten Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass wenigstens eine der Bohrungen (4) als ein Langloch ausgebildet ist.
6. Drosselspule (100) nach einem der vorgenannten Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Spulenkern (3) eine Mehrzahl von quaderförmigen Spulenkernsegmenten (3a, 3b, 3c, 3d) aufweist, welche durch Luftspalte (30) voneinander getrennt sind, wobei jedes Spulenkernsegment (3a, 3b, 3c, 3d) eine Bohrung (4) aufweist, und wobei die Spulenkernsegmente (3a, 3b, 3c, 3d) unterschiedliche Abmessungen (Lz) in der Längserstreckungsrichtung (Z) relativ zur Abmessung (Bx) in der ersten Quererstreckungsrichtung (X) aufweisen.

7. Drosselspule (100) nach einem Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Spulenkern (3) zwei U-förmige Spulenkernsegmente (3U) umfasst, welche durch einen Luftspalt (30) voneinander getrennt sind, wobei die Bohrungen (4) in eines der Spulenkernsegmente (3U) oder in beide Spulenkernsegmente (3U) eingebracht sind.
8. Drosselspule (100) nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Spulenkern (3) zwei E-förmige Spulenkernsegmente (3E) umfasst, welche durch einen Luftspalt (30) voneinander getrennt sind, wobei die Bohrungen (4) in eines der Spulenkernsegmente (3E) oder in beide Spulenkernsegmente (3E) eingebracht sind.
9. Drosselspule (100) nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Spulenkern (3) vier I-förmige Spulenkernsegmente (3I) umfasst, welche in einer rechteckförmigen Anordnung durch Luftspalte (30) voneinander getrennt sind, wobei die Bohrungen (4) in eines der Spulenkernsegmente (3I) oder in mehrere Spulenkernsegmente (3I) eingebracht sind.
10. Drosselspule (100) nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Spulenkern (3) ein I-förmiges Spulenkernsegment (3I) und ein oder zwei U-förmige Spulenkernsegmente (3U) umfasst, welche durch Luftspalte (30) voneinander getrennt sind, wobei die Bohrungen (4) in eines der Spulenkernsegmente (3I, 3U) oder in mehrere Spulenkernsegmente (3I, 3U) eingebracht sind.
11. Drosselspule (100) nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Spulenkern (3) ringförmig ausgebildet ist, wobei die Bohrungen (4) in radialer oder in axialer Richtung durch den Spulenkern (3) verlaufen, oder dass der Spulenkern (3) wenigstens ein ringförmiges Spulenkernsegment (3R) umfasst.
12. Drosselspule (100) nach einem der Ansprüche 1 bis 6,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Drosselspule (1) mehrphasig ausgebildet ist, wobei die Drosselspule (1) mehrere Drosselwicklungen (2.1, 2.2, 2.3) und mehrere zugehörige Spulenkernschenkel (3.1, 3.2, 3.3) umfasst, wobei die Drosselwicklungen (2.1, 2.2, 2.3) für jeweils eine Phase eines Mehrphasenwechselstroms vorgese-

hen sind.

13. Drosselspule (100) nach einem der vorgenannten Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Drosselspule (100) eine Gleichstromquelle und eine zugehörige Steuerung umfasst, mittels welcher der Steuerstrom (Is) zur Erzeugung einer gewünschte Vormagnetisierung im Spulenkern (3) in die Steuerwicklung (5) einbringbar ist.

5

10

14. Verfahren zur Begrenzung eines elektrischen Stroms mittels einer steuerbaren Drosselspule (100) nach einem der vorgenannten Ansprüche, wobei der zu begrenzende Strom (I) in die Drosselwicklung (2) eingebracht wird, und wobei ein Steuerstrom (Is) in die Steuerwicklung (5) eingebracht wird, welcher eine zur gewünschten Strombegrenzung geeignete Vormagnetisierung in dem Spulenkern (3) der Drosselspule (1) erzeugt.

15

20

15. Verfahren nach Anspruch 14,

dadurch gekennzeichnet,

dass der Steuerstrom (Is) durch eine Gleichstromquelle erzeugt wird.

25

16. Verfahren nach Anspruch 14,

dadurch gekennzeichnet,

dass der zu begrenzende Strom (I) als ein gepulster Gleichstrom ausgebildet ist, welcher nach dem Durchlaufen der Drosselwicklung (2) die Steuerwicklung (5) durchläuft, wodurch der Steuerstrom (Is) gebildet wird.

30

17. Verfahren nach Anspruch 14,

dadurch gekennzeichnet,

dass der zu begrenzende Strom (I) als ein Mischstrom ausgebildet ist, wobei der Gleichstromanteil und der Wechselstromanteil des Mischstroms voneinander getrennt werden, und wobei der Steuerstrom (Is) durch den Gleichstromanteil gebildet wird.

35

40

Claims

1. Controllable choke coil (100), comprising at least one choke winding (2) and a magnetic coil core (3) which has a longitudinal extension direction (Z) corresponding to the main magnetic flux direction, a first transverse extension direction (X) and a second transverse extension direction (Y), the three extension directions (X, Y, Z) being orientated in pairs perpendicular to one another, the coil core (3) having at least three boreholes (4),

45

50

- wherein the boreholes (4) extend substantially along the second transverse direction of extension (Y),

- wherein at most one borehole (4) extends in each transverse extension plane of the coil core (3), which is spanned by the first transverse extension direction (X) and the second transverse extension direction (Y), and

- wherein a distance (x1) of at least one borehole (4) from an outer edge of the coil core (3) in the first transverse extension direction (X) is greater than a distance (x2, z1) of the borehole (4) from a further outer edge of the coil core (3),

wherein a control winding (5) passes through the boreholes (4) in such a way that a pre-magnetisation of the coil core (3) can be generated by a control current (Is) through the control winding (5).

2. Choke coil (100) according to claim 1,

characterised in that

the coil core (3) has at least one air gap (30) which extends in a transverse extension plane of the coil core (3), wherein an outer edge of the coil core (3) is formed by the air gap (30).

3. Choke coil (100) according to claim 1 or 2,

characterised in that

the coil core (3) has a plurality of pairs of boreholes (4), the pairs having different distances (d4) between the associated boreholes (4).

4. Choke coil (100) according to one of the preceding claims,

characterised in that

the boreholes (4) have different distances (x1) from an outer edge of the coil core (3) in the first transverse extension direction (X).

5. Choke coil (100) according to one of the preceding claims,

characterised in that

at least one of the boreholes (4) is formed as an elongated borehole.

6. Choke coil (100) according to one of the preceding claims,

characterised in that

the coil core (3) has a plurality of cuboidal coil core segments (3a, 3b, 3c, 3d) which are separated from one another by air gaps (30), each coil core segment (3a, 3b, 3c, 3d) has a borehole (4), and wherein the coil core segments (3a, 3b, 3c, 3d) have different dimensions (Lz) in the longitudinal direction of extension (Z) relative to the dimension (Bx) in the first transverse direction of extension (X).

55

7. Choke coil (100) according to any one of claims 1 to 5,

characterised in that

the coil core (3) comprises two U-shaped coil core

segments (3U) which are separated from one another by an air gap (30), the boreholes (4) being formed in one of the coil core segments (3U) or in both coil core segments (3U).

8. Choke coil (100) according to one of claims 1 to 5, **characterised in that**

the coil core (3) comprises two E-shaped coil core segments (3E) which are separated from one another by an air gap (30), the boreholes (4) being formed in one of the coil core segments (3E) or in both coil core segments (3E).

9. Choke coil (100) according to one of claims 1 to 5, **characterised in that**

the coil core (3) comprises four I-shaped coil core segments (3I) which are separated from one another in a rectangular arrangement by air gaps (30), the boreholes (4) being formed in one of the coil core segments (3I) or in a plurality of coil core segments (3I).

10. Choke coil (100) according to one of claims 1 to 5, **characterised in that**

the coil core (3) comprises an I-shaped coil core segment (3I) and one or two U-shaped coil core segments (3U), which are separated from one another by air gaps (30), the boreholes (4) being formed in one of the coil core segments (3I, 3U) or in a plurality of coil core segments (3I, 3U).

11. Choke coil (100) according to one of claims 1 to 5, **characterised in that**

the coil core (3) is annular in shape, the boreholes (4) extending through the coil core (3) in the radial or axial direction, or **in that** the coil core (3) comprises at least one annular coil core segment (3R).

12. Choke coil (100) according to one of claims 1 to 6, **characterised in that**

the choke coil (100) is of multiphase design, wherein the choke coil (100) comprises a plurality of choke windings (2.1, 2.2, 2.3) and a plurality of corresponding coil core legs (3.1, 3.2, 3.3), wherein the choke windings (2.1, 2.2, 2.3) are each provided for one phase of a multiphase alternating current.

13. Choke coil (100) according to one of the preceding claims, **characterised in that**

the choke coil (100) comprises a direct current source and a related controller, by means of which the control current (Is) can be introduced into the control winding (5) to generate a desired pre-magnetisation in the coil core (3).

14. Method for limiting an electric current by means of a controllable choke coil (100) according to one of the

above-mentioned claims, wherein the current (I) to be limited is introduced into the choke winding (2), and wherein a control current (Is) is introduced into the control winding (5), which generates a pre-magnetisation in the coil core (3) of the choke coil (100) which is suitable for the desired current limitation.

15. Method according to claim 14,

characterised in that

the control current (Is) is generated by a direct current source.

16. Method according to claim 14,

characterised in that

the current (I) to be limited is a pulsed direct current which, after passing through the choke winding (2), passes through the control winding (5), whereby the control current (Is) is formed.

17. Method according to claim 14,

characterised in that

the current (I) to be limited is a mixed current, the direct current component and the alternating current component of the mixed current being separated from one another, and the control current (Is) being formed by the direct current component.

Revendications

1. Bobine d'arrêt commandable (100), comprenant au moins un enroulement d'arrêt (2) et un noyau de bobine magnétique (3), qui présente une direction d'extension longitudinale (Z) correspondant à la direction principale du flux magnétique, une première direction d'extension transversale (X) et une deuxième direction d'extension transversale (Y), les trois directions d'extension (X, Y, Z) étant orientées par paires perpendiculairement les unes aux autres, le noyau de bobine (3) présentant au moins trois alésages (4),

- dans lequel les alésages (4) s'étendent sensiblement le long de la deuxième direction d'extension transversale (Y),

- dans chaque plan d'extension transversal du noyau de bobine (3), qui est défini par la première direction d'extension transversale (X) et la deuxième direction d'extension transversale (Y), s'étend au maximum un alésage (4), et

- une distance (x1) d'au moins un alésage (4) à un bord extérieur du noyau de bobine (3) dans la première direction d'extension transversale (X) étant supérieure à une distance (x2, z1) de l'alésage (4) à un autre bord du noyau de bobine (3),

où un enroulement de commande (5) s'étend à

travers les alésages (4), de telle sorte qu'une pré-magnétisation du noyau de bobine (3) peut être générée au moyen d'un courant de commande (Is) à travers l'enroulement de commande (5).

2. Bobine d'arrêt (100) selon la revendication 1, **caractérisée en ce que** le noyau de bobine (3) présente au moins un entrefer (30), qui s'étend dans un plan d'extension transversal du noyau de bobine (3), un bord du noyau de bobine (3) étant formé par l'entrefer (30).
3. Bobine d'arrêt (100) selon la revendication 1 ou 2, **caractérisée en ce que** le noyau de bobine (3) présente une pluralité de paires de alésages (4), les paires présentant des distances (d4) différentes entre les alésages (4) associés.
4. Bobine d'arrêt (100) selon l'une des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** les alésages (4) présentent des distances (x1) différentes à un bord extérieur du noyau de bobine (3) dans la première direction d'extension transversale (X).
5. Bobine d'arrêt (100) selon l'une des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** au moins l'un des alésages (4) est réalisé sous la forme d'un trou oblong.
6. Bobine d'arrêt (100) selon l'une des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** le noyau de bobine (3) présente une pluralité de segments de noyau de bobine parallélépipédiques (3a, 3b, 3c, 3d) qui sont séparés les uns des autres par des entrefers (30), chaque segment de noyau de bobine (3a, 3b, 3c, 3d) présente un alésage (4), et dans lequel les segments de noyau de bobine (3a, 3b, 3c, 3d) présentent des dimensions (Lz) différentes dans la direction d'extension longitudinale (Z) par rapport à la dimension (Bx) dans la première direction d'extension transversale (X).
7. Bobine d'arrêt (100) selon l'une des revendications 1 à 5, **caractérisée en ce que** le noyau de bobine (3) comprend deux segments de noyau de bobine (3U) en forme de « U », qui sont séparés l'un de l'autre par un entrefer (30), les alésages (4) étant pratiqués dans l'un des segments de noyau de bobine (3U) ou dans les deux segments de noyau de bobine (3U).
8. Bobine d'arrêt (100) selon l'une des revendications 1

à 5,

caractérisée en ce que

le noyau de bobine (3) comprend deux segments de noyau de bobine (3E) en forme de « E », qui sont séparés l'un de l'autre par un entrefer (30), les alésages (4) étant pratiqués dans l'un des segments de noyau de bobine (3E) ou dans les deux segments de noyau de bobine (3E).

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

9. Bobine d'arrêt (100) selon l'une des revendications 1 à 5,

caractérisée en ce que

le noyau de bobine (3) comprend quatre segments de noyau de bobine (3I) en forme de « I », qui sont séparés les uns des autres dans une disposition rectangulaire par des entrefers (30), les alésages (4) étant pratiqués dans l'un des segments de noyau de bobine (3I) ou dans plusieurs segments de noyau de bobine (3I).

10. Bobine d'arrêt (100) selon l'une des revendications 1 à 5,

caractérisée en ce que

le noyau de bobine (3) comprend un segment de noyau de bobine (3I) en forme de « I » et un ou deux segments de noyau de bobine (3U) en forme de « U », qui sont séparés l'un de l'autre par des entrefers (30), les alésages (4) étant pratiqués dans un des segments de noyau de bobine (3I, 3U) ou dans plusieurs segments de noyau de bobine (3I, 3U).

11. Bobine d'arrêt (100) selon l'une des revendications 1 à 5,

caractérisée en ce que

le noyau de bobine (3) est de forme annulaire, les alésages (4) s'étendant dans la direction radiale ou axiale à travers le noyau de bobine (3), ou que le noyau de bobine (3) comprend au moins un segment de noyau de bobine (3R) de forme annulaire.

12. Bobine d'arrêt (100) selon l'une des revendications 1 à 6,

caractérisée en ce que

la bobine d'arrêt (1) est réalisée polyphasée, la bobine d'arrêt (1) comprenant plusieurs enroulements d'arrêt (2.1, 2.2, 2.3) et plusieurs branches de noyau de bobine (3.1, 3.2, 3.3) associées, les enroulements d'arrêt (2.1, 2.2, 2.3) étant prévus chacun pour une phase d'un courant alternatif polyphasé.

13. Bobine d'arrêt (100) selon l'une des revendications précédentes,

caractérisée en ce que

la bobine d'arrêt (100) comprend une source de courant continu et une commande associée, au moyen desquelles le courant de commande (Is) peut

être introduit dans l'enroulement de commande (5)
pour produire une prémagnétisation souhaitée dans
le noyau de bobine (3).

14. Procédé de limitation d'un courant électrique au 5
moyen d'une bobine d'arrêt (100) commandable
selon l'une des revendications précédentes, dans
lequel le courant (I) à limiter est introduit dans l'en-
roulement d'arrêt (2), et dans lequel un courant de 10
commande (Is) est introduit dans l'enroulement de
commande (5), lequel produit une prémagnétisation
appropriée à la limitation de courant souhaitée dans
le noyau de bobine (3) de la bobine d'arrêt (1).
15. Procédé selon la revendication 14, 15
caractérisé en ce que
le courant de commande (Is) est généré par une
source de courant continu.
16. Procédé selon la revendication 14, 20
caractérisé en ce que
le courant (I) à limiter est conçu comme un courant
continu pulsé, qui, après avoir traversé l'enroule-
ment d'arrêt (2), traverse l'enroulement de
commande (5), ce qui forme le courant de 25
commande (Is).
17. Procédé selon la revendication 14,
caractérisée en ce que
le courant (I) à limiter est conçu comme un courant 30
mixte, la partie de courant continu et la partie de
courant alternatif du courant mixte étant séparées
l'une de l'autre, et le courant (Is) de commande étant
formé par la partie de courant continu.

35

40

45

50

55

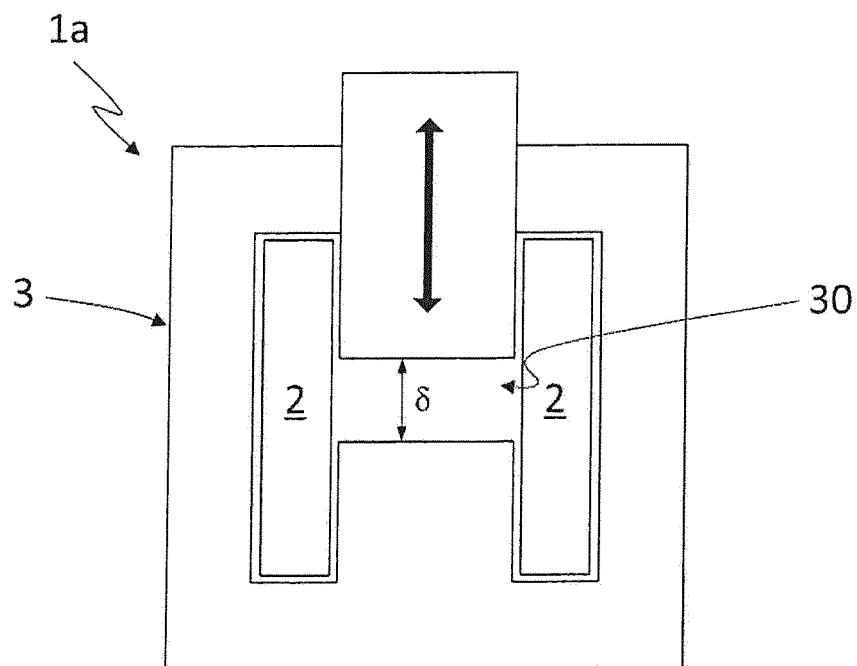


Fig. 1a

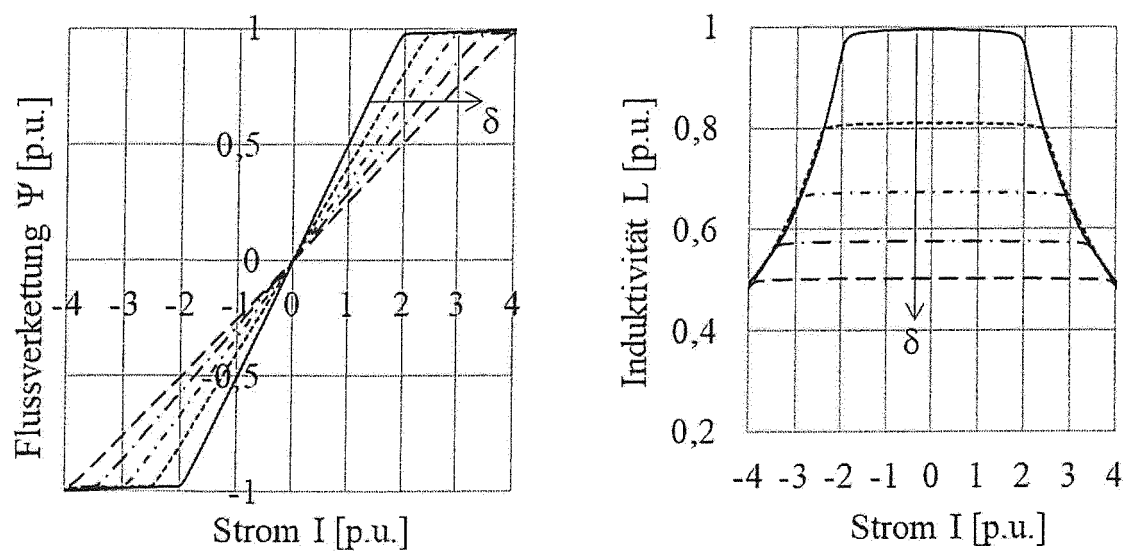


Fig. 1b

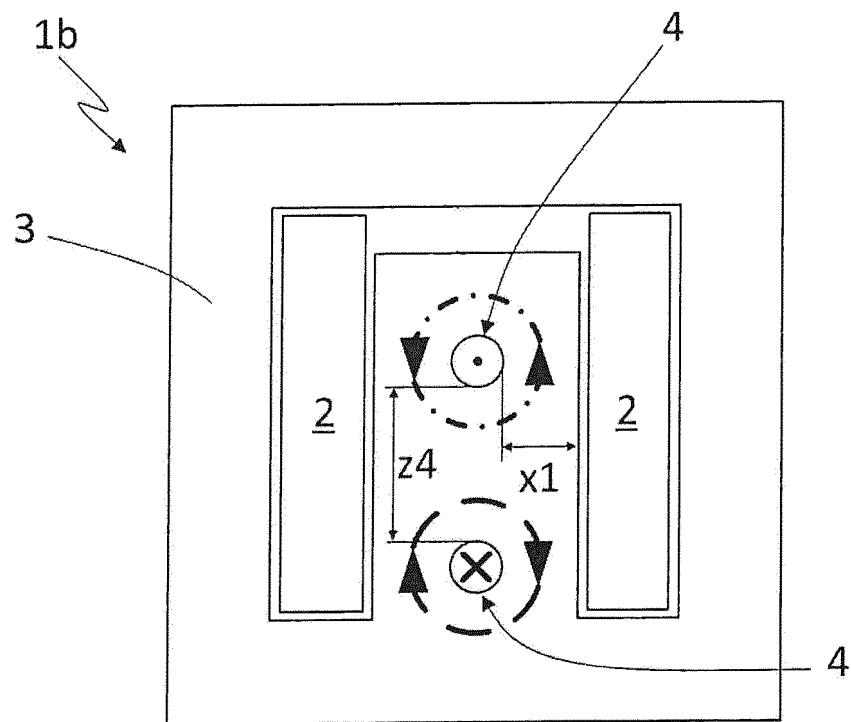


Fig. 2a

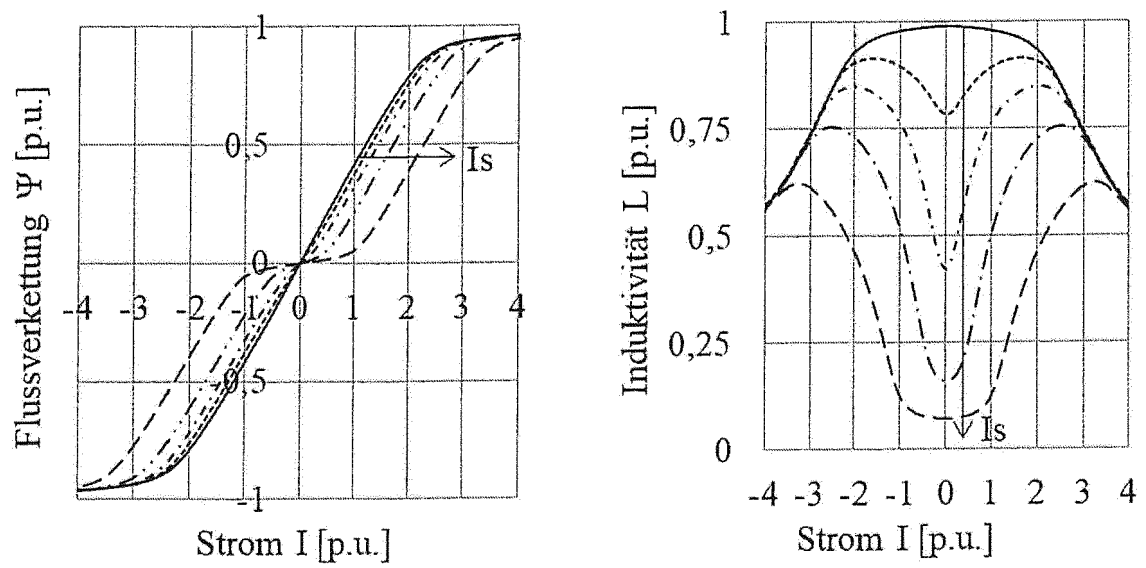


Fig. 2b

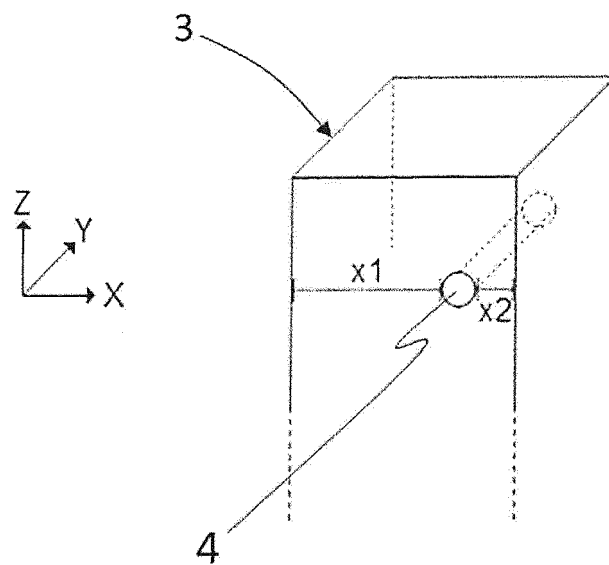


Fig. 3a

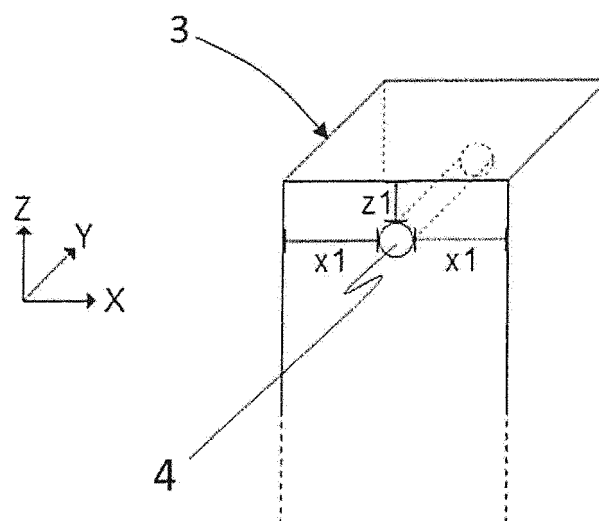


Fig. 3b

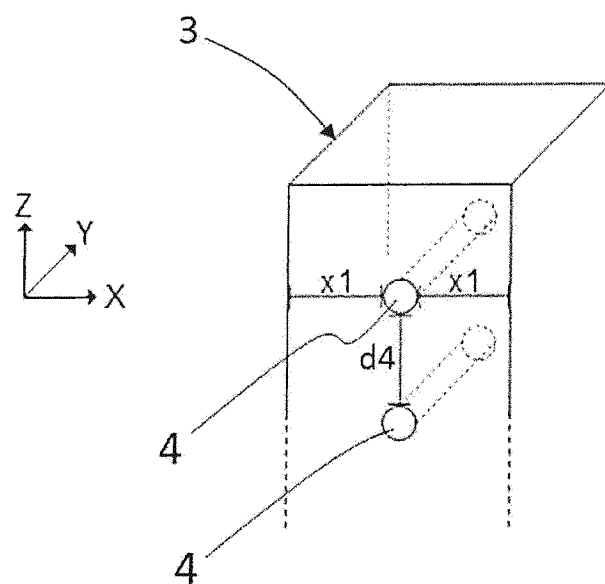


Fig. 3c

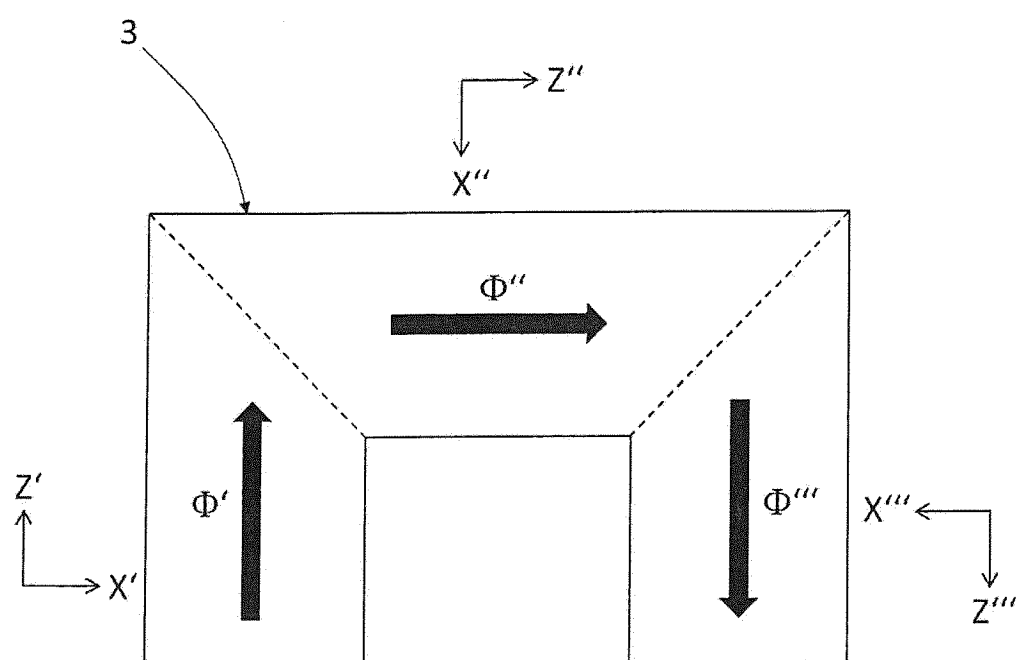
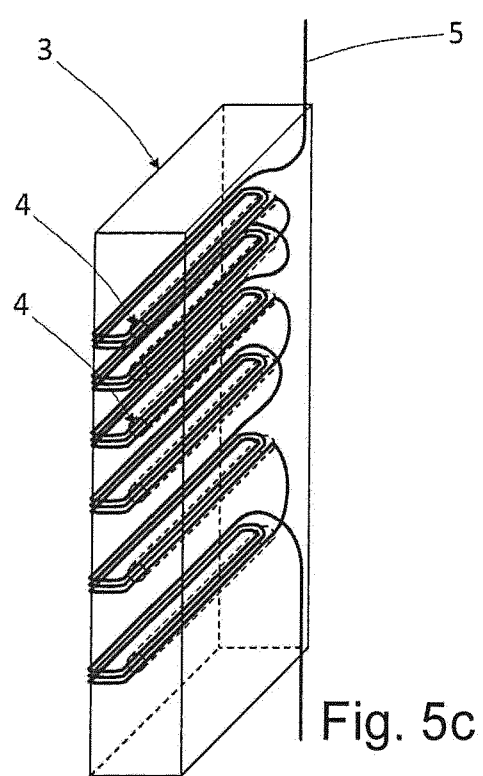
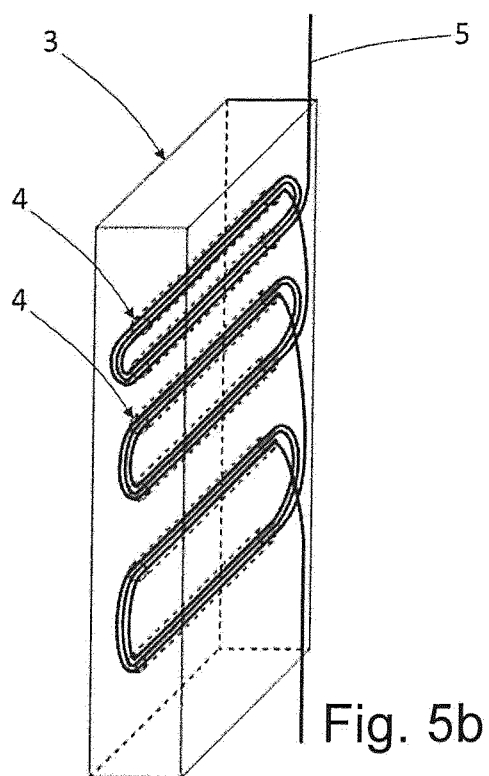
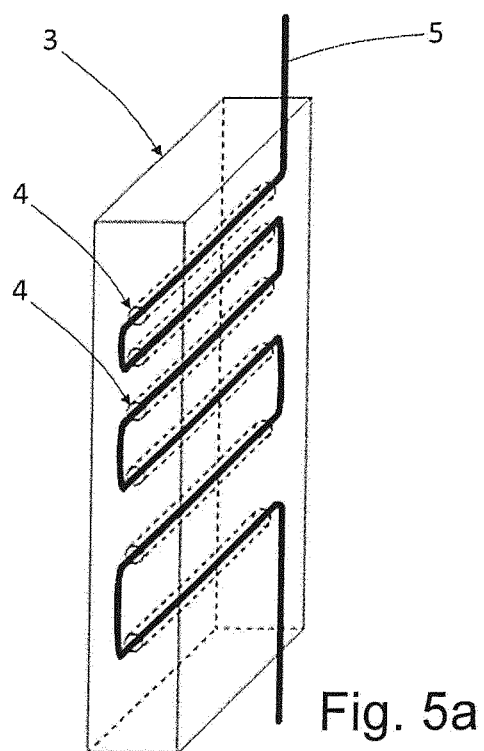


Fig. 4



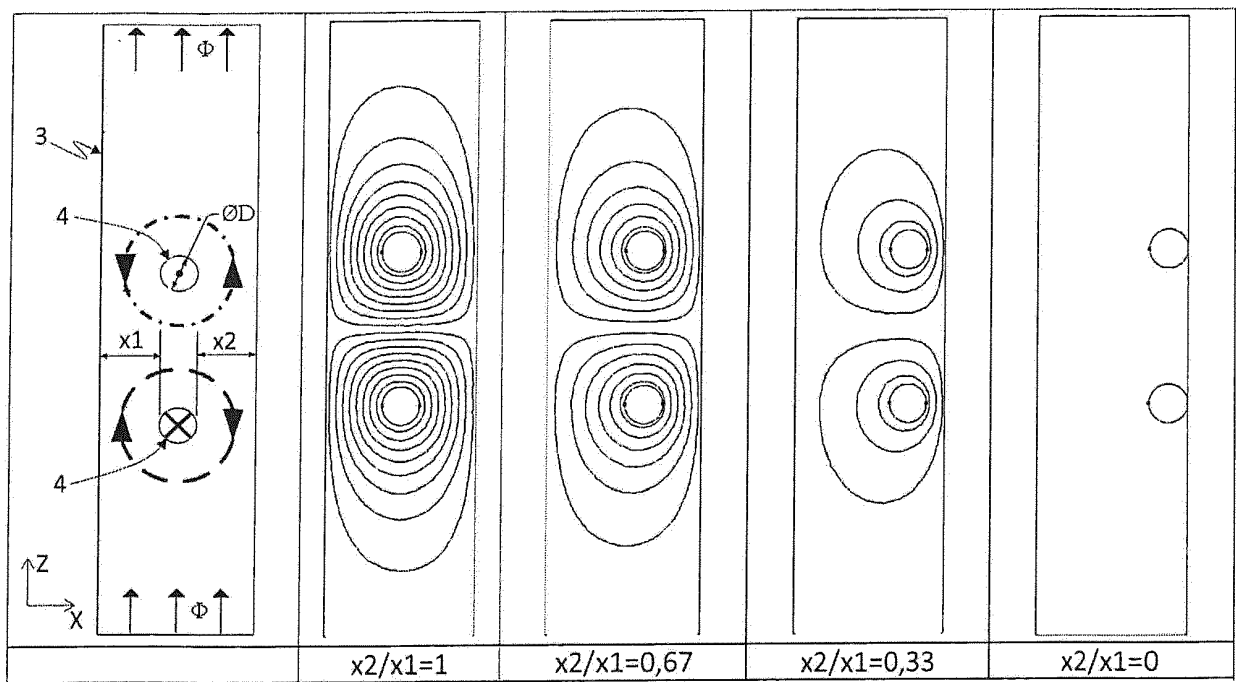


Fig. 6

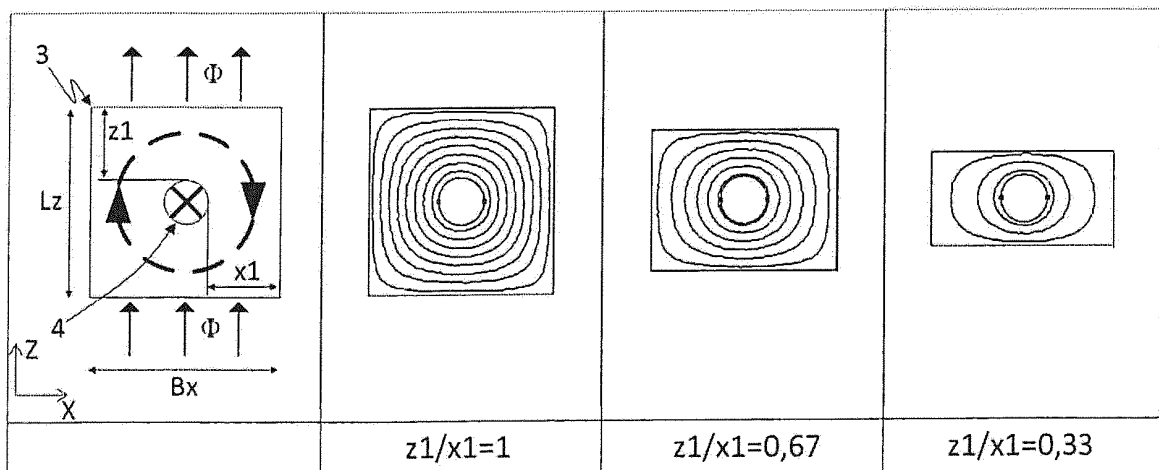


Fig. 7

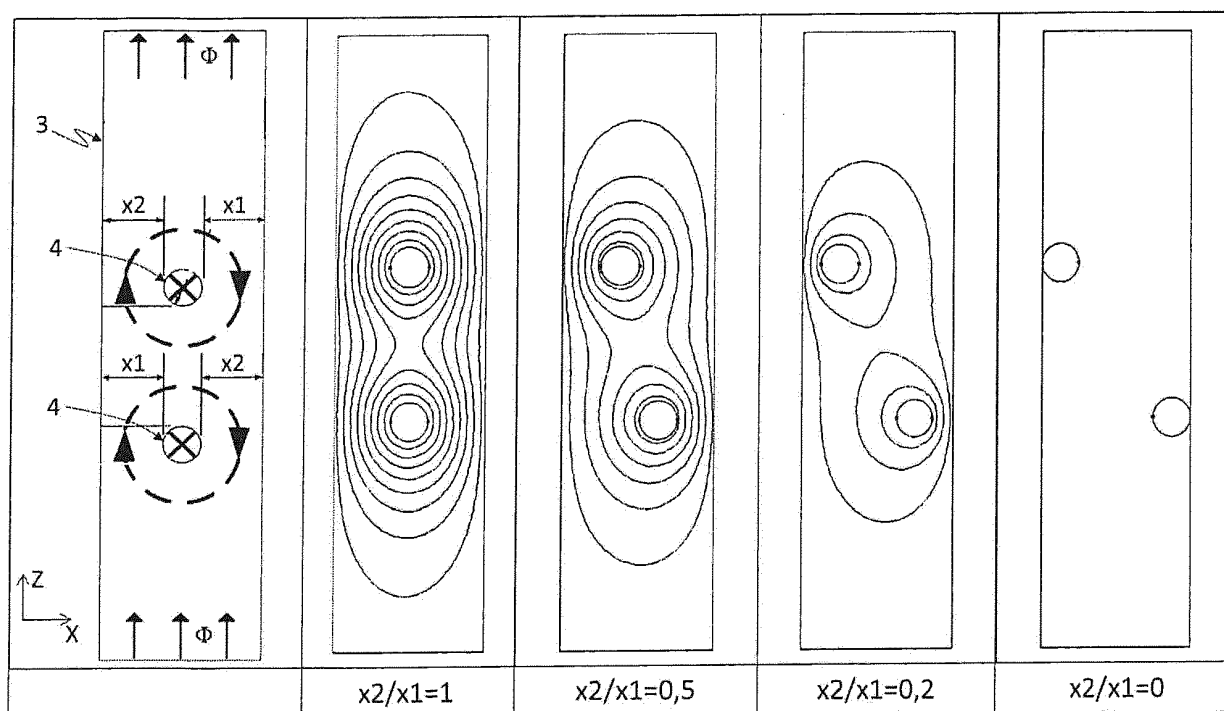


Fig. 8

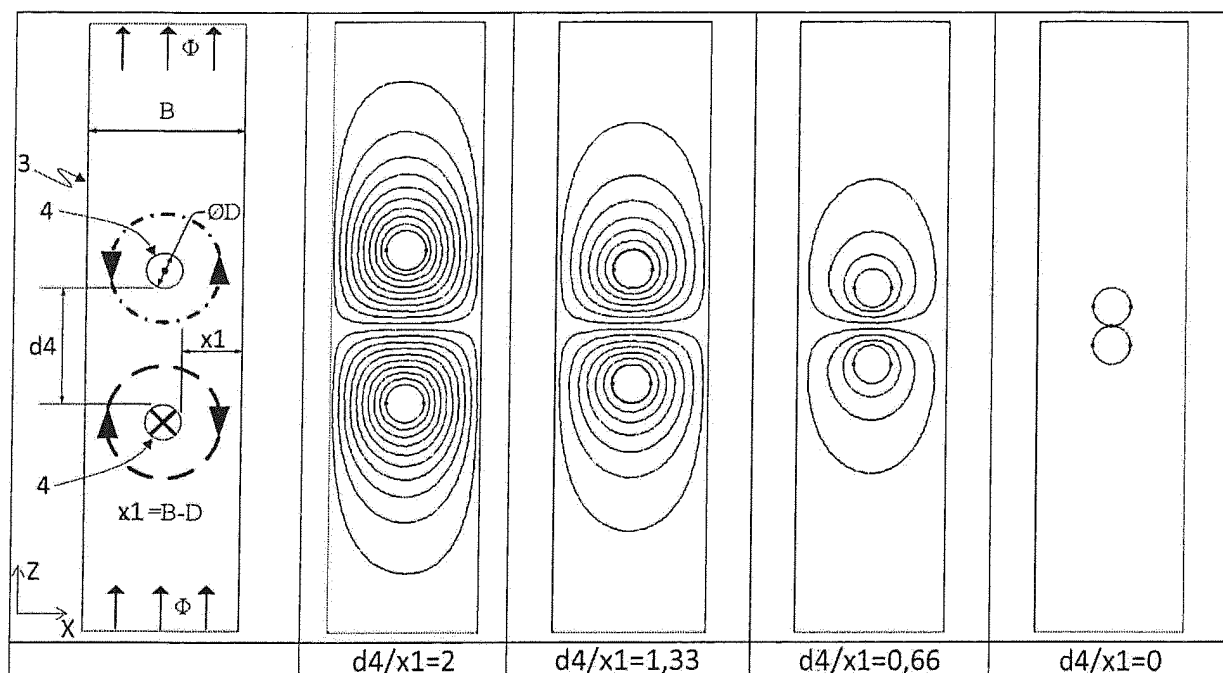


Fig. 9a

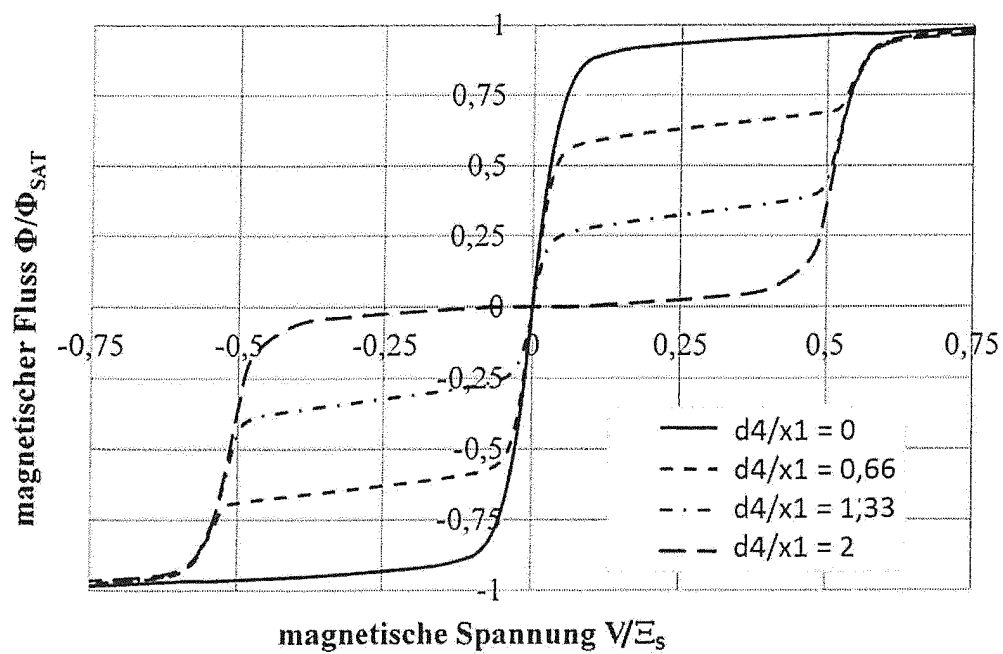


Fig. 9b

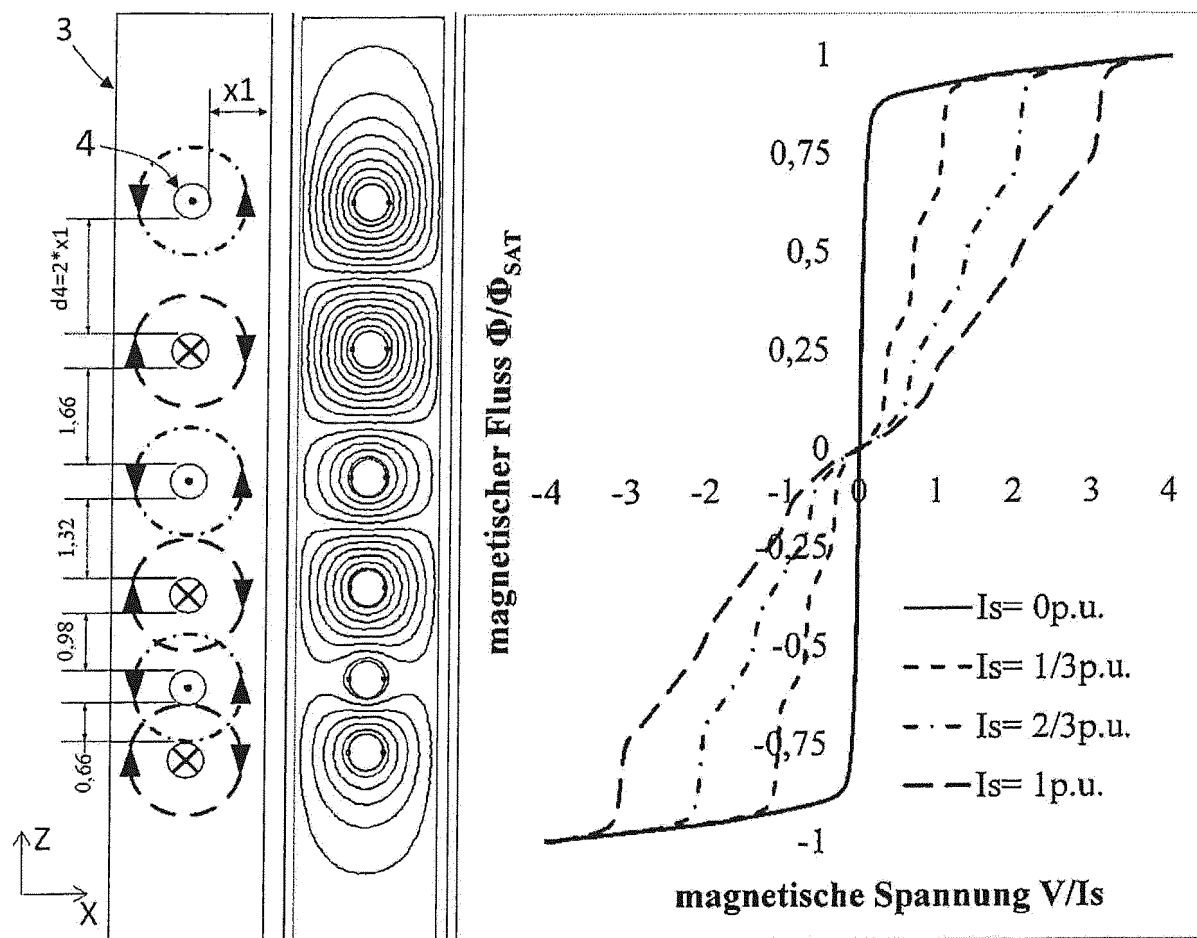


Fig. 10a

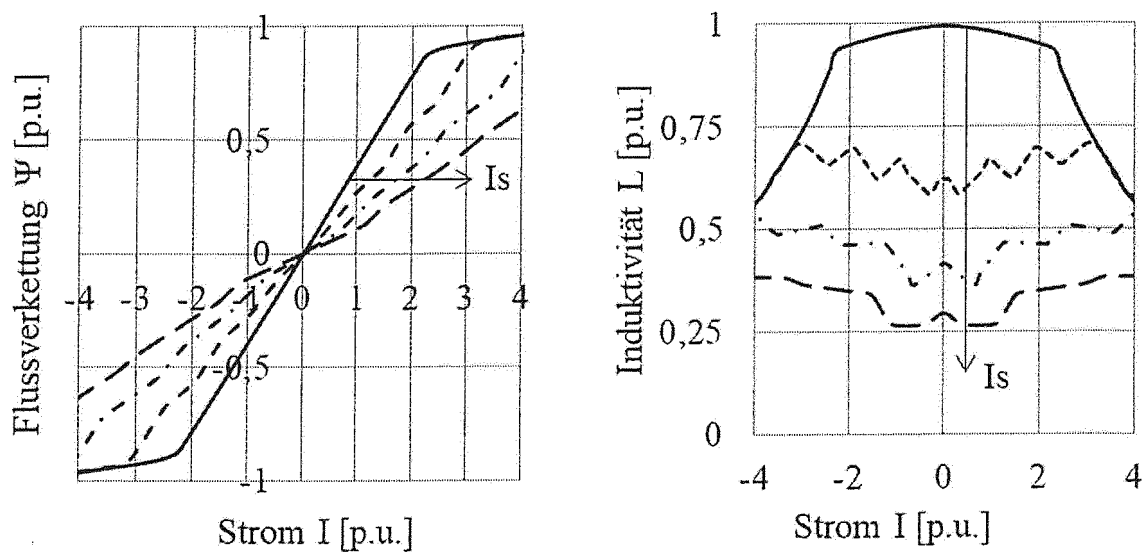


Fig. 10b

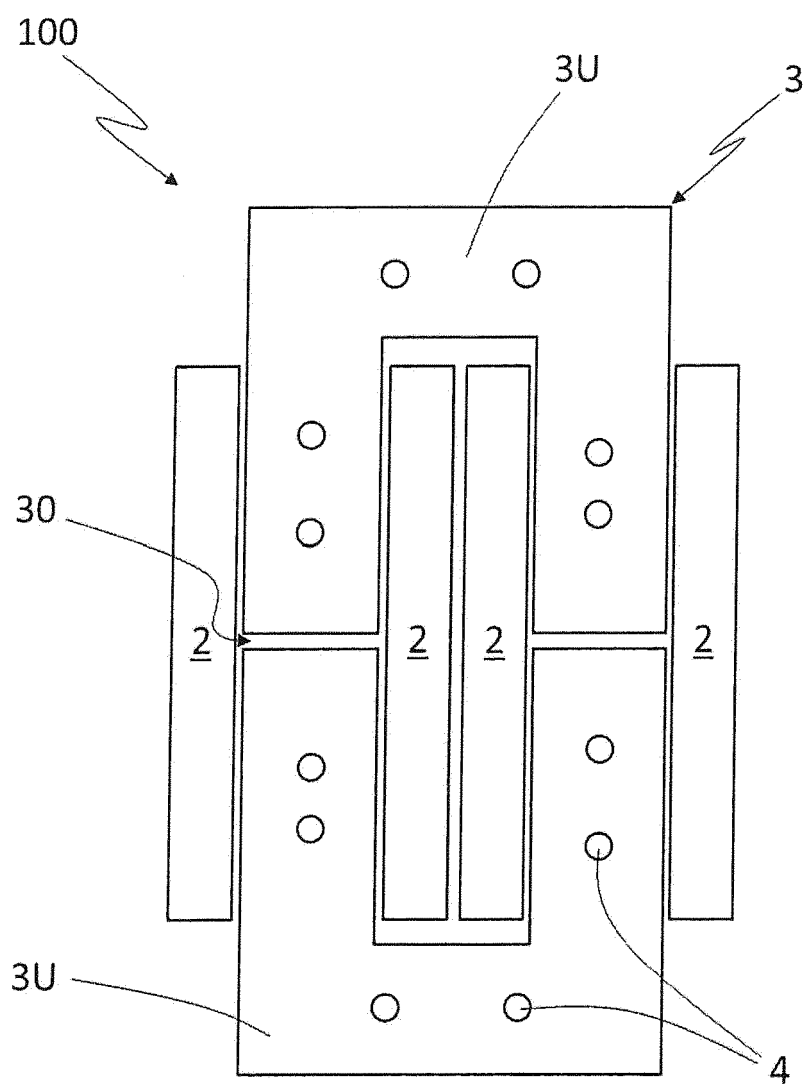


Fig. 11

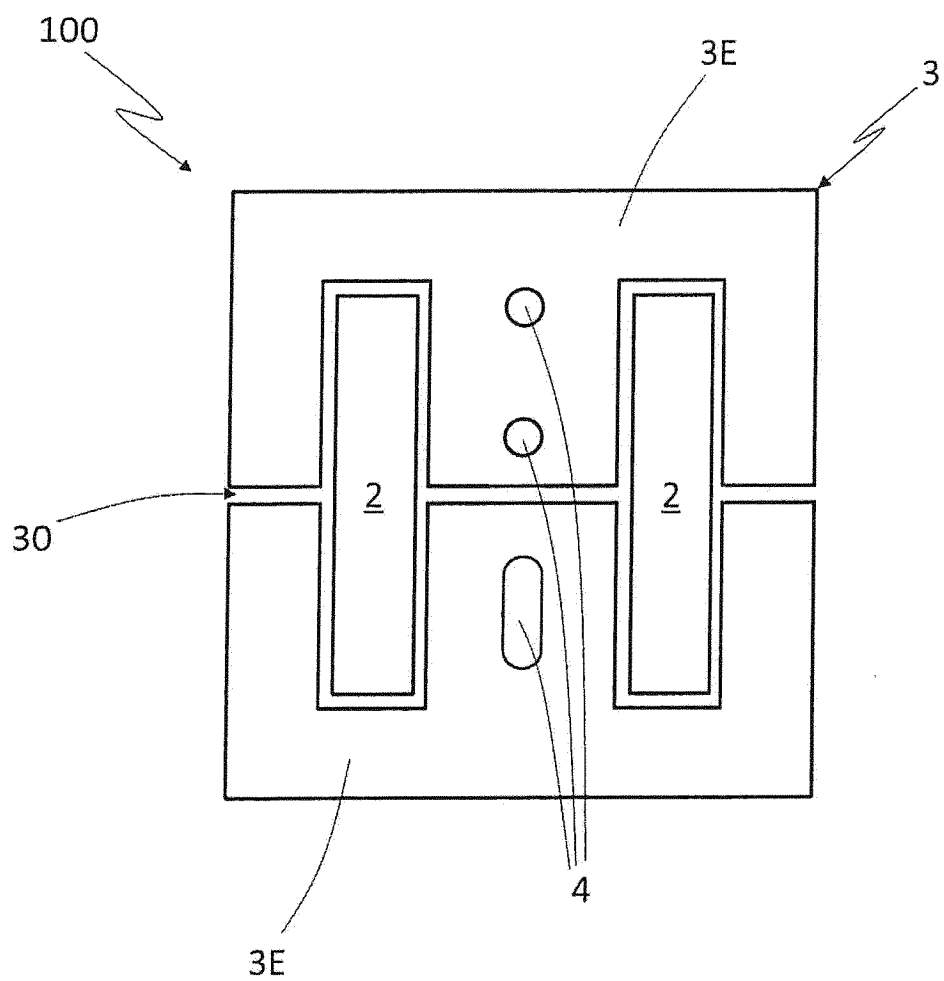


Fig. 12

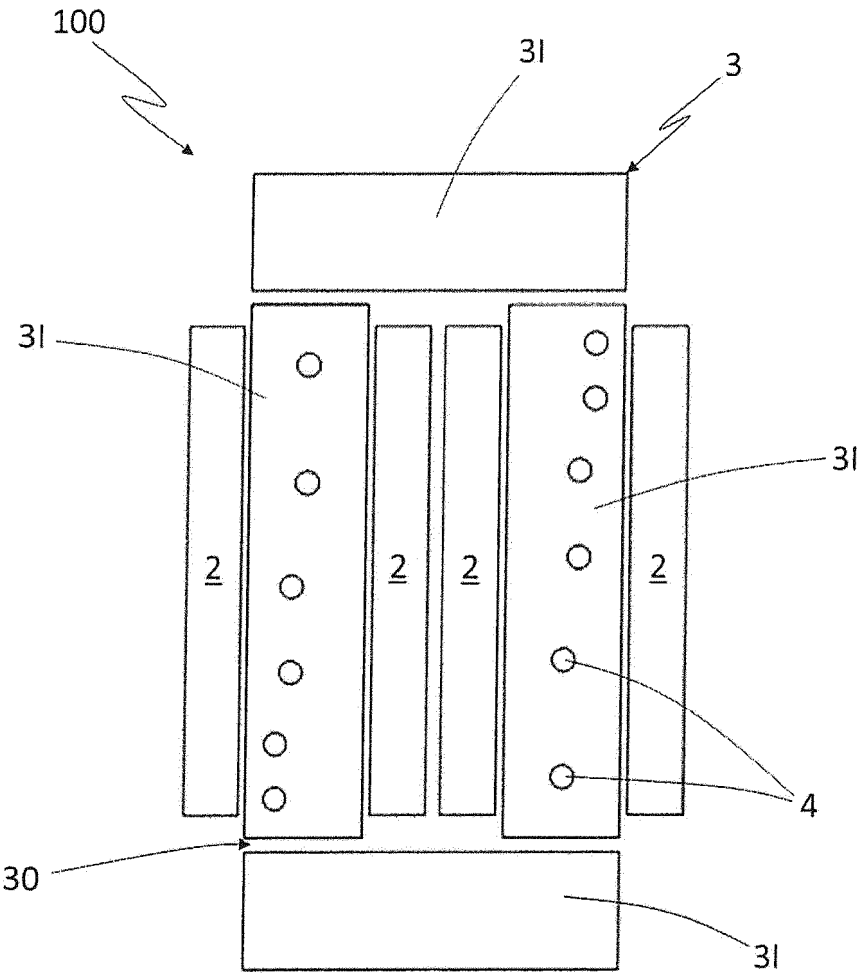


Fig. 13

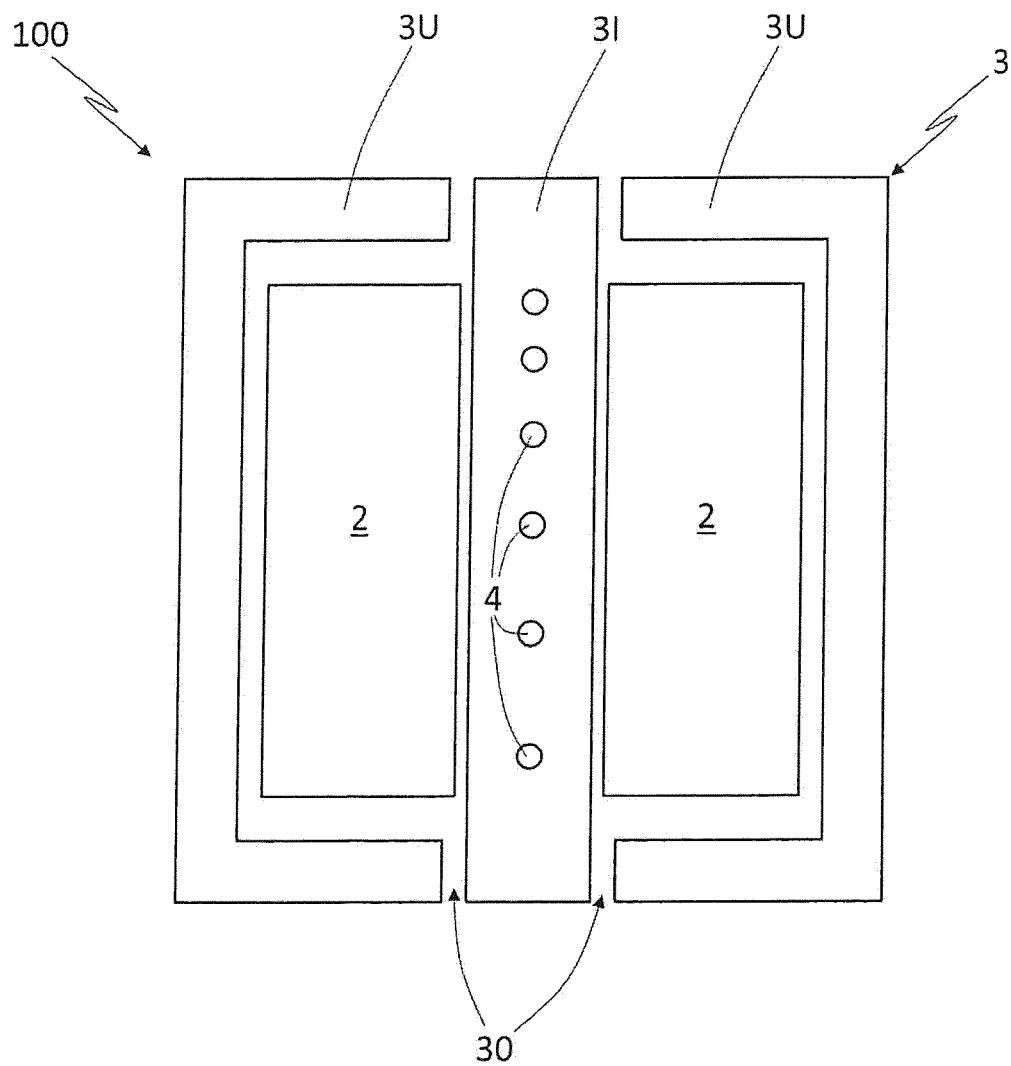


Fig. 14

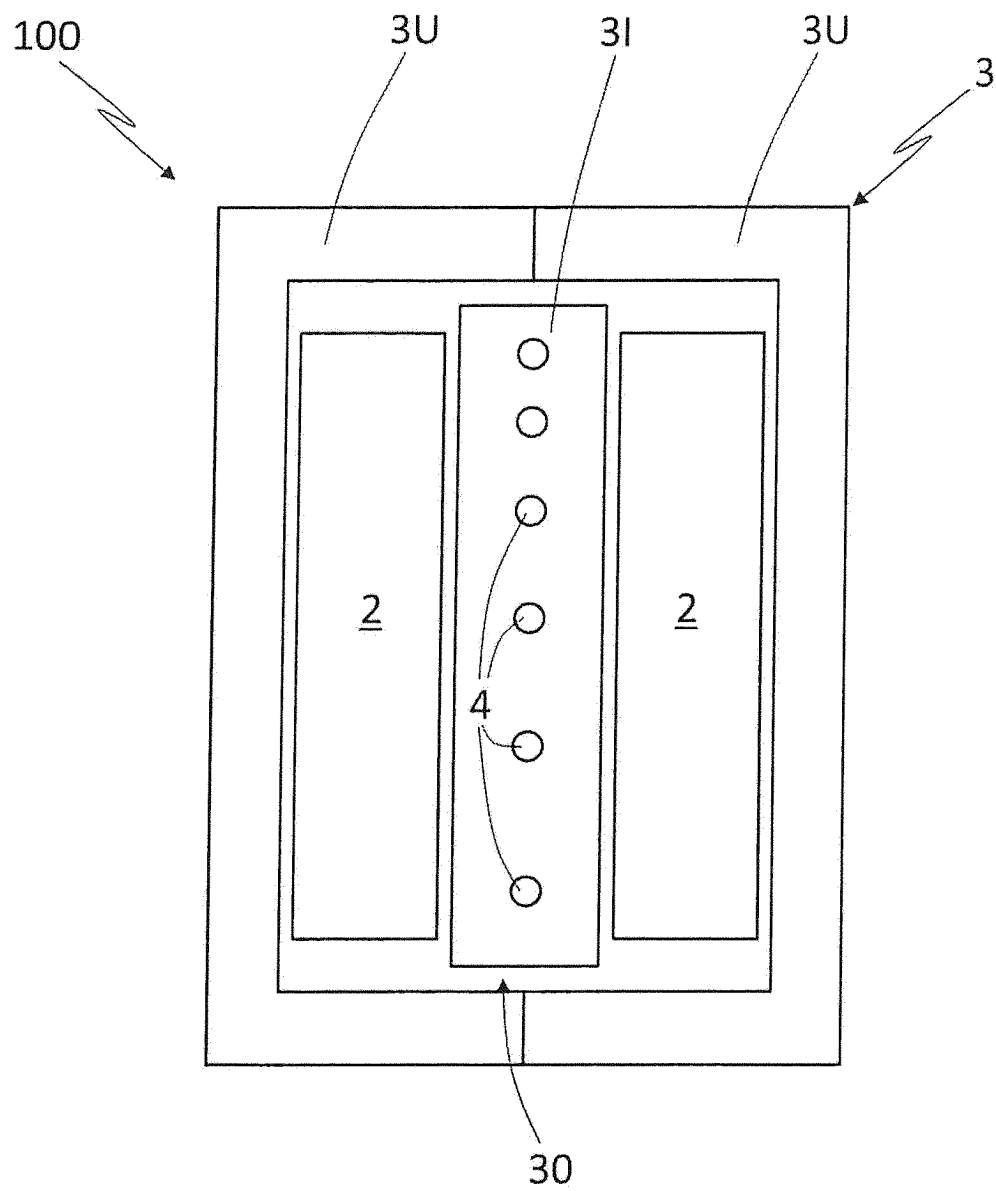


Fig. 15

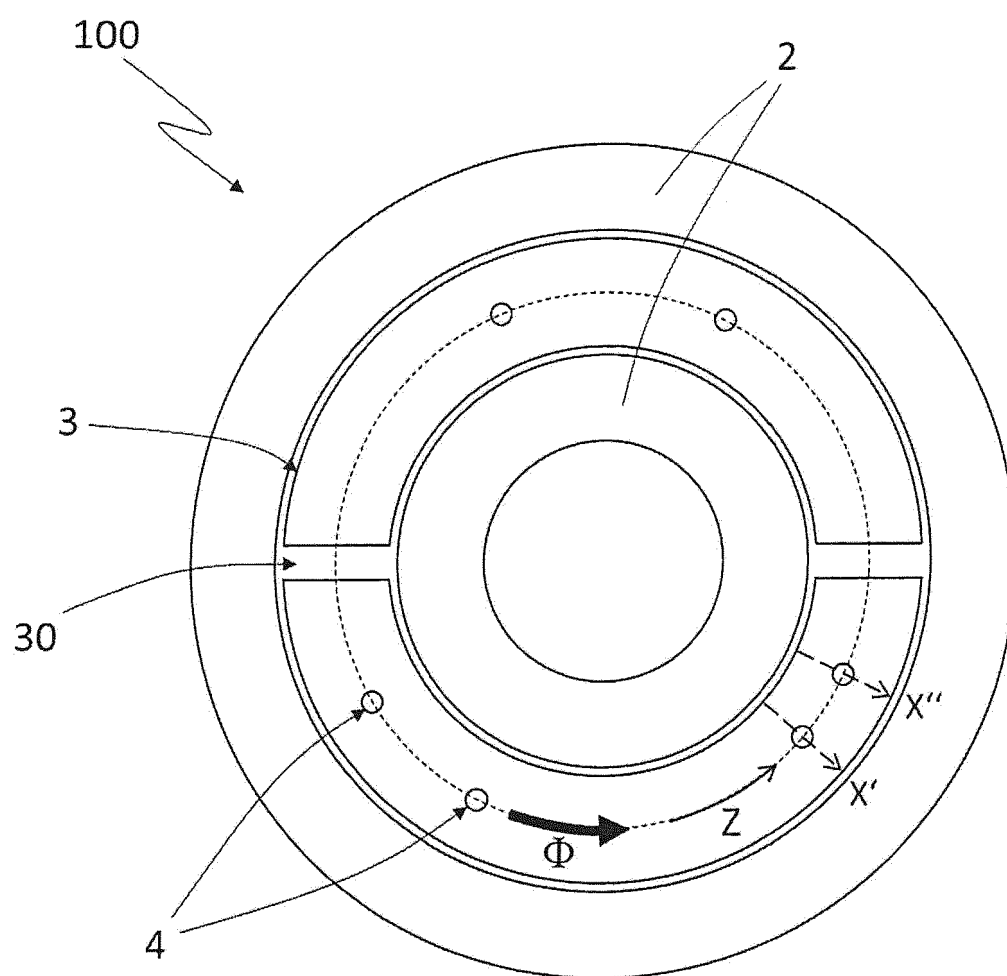


Fig. 16

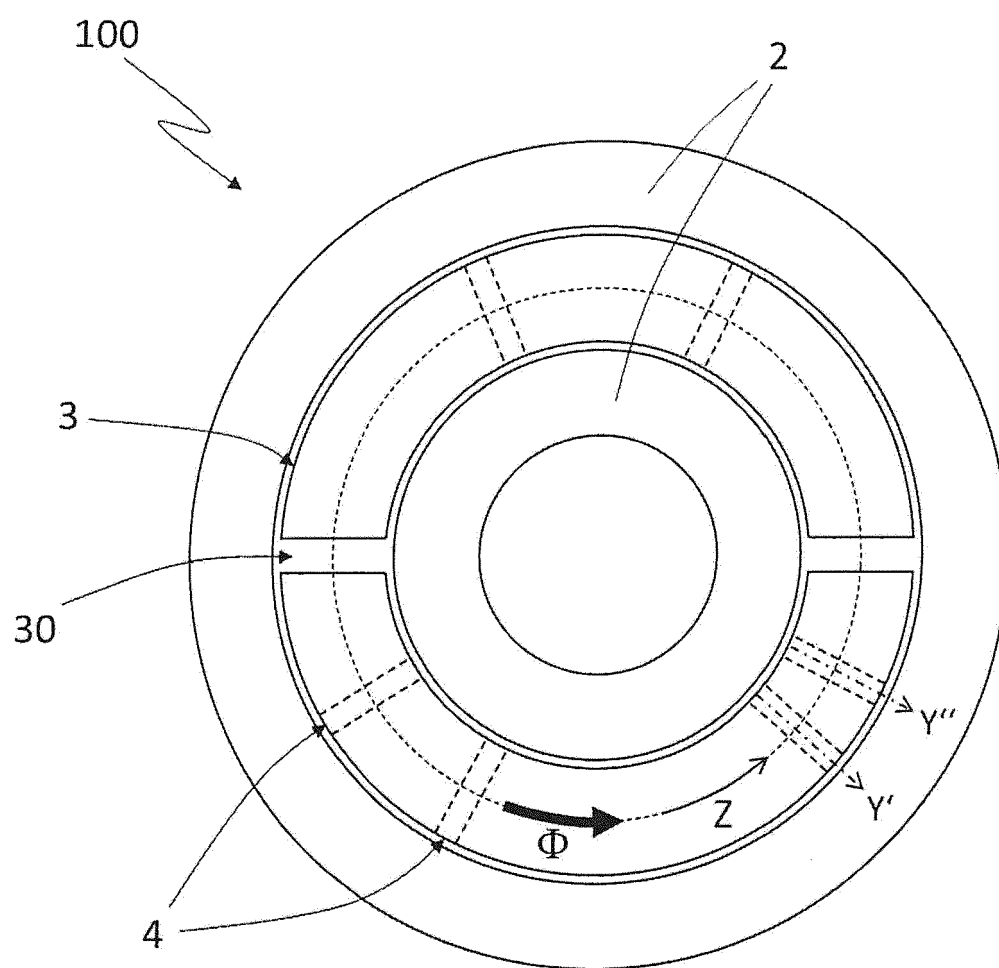


Fig. 17

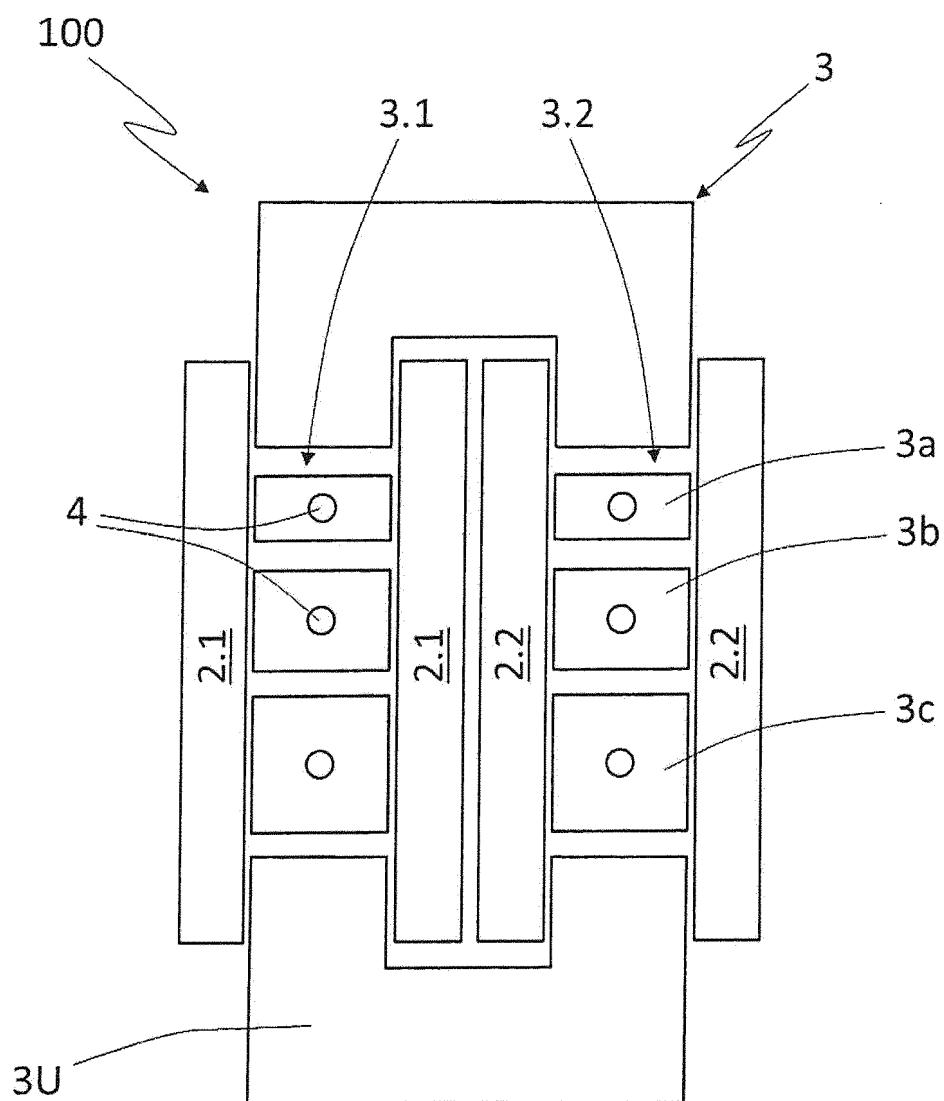


Fig. 18

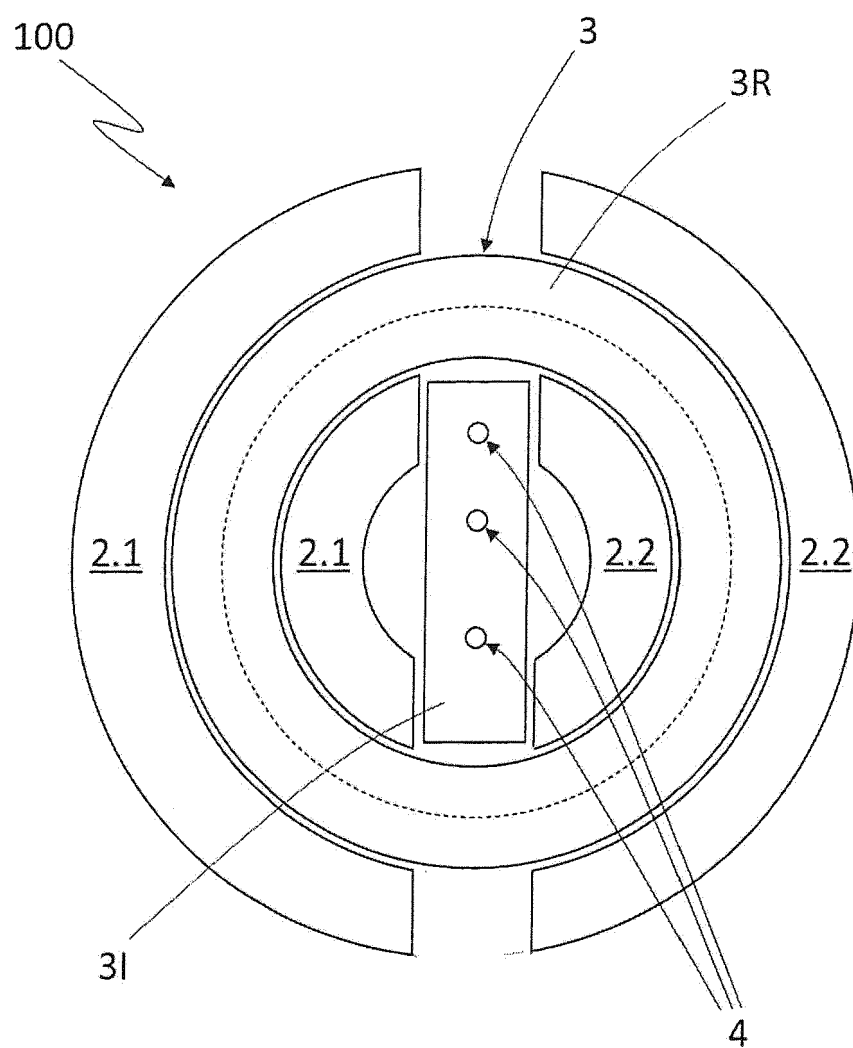


Fig. 19

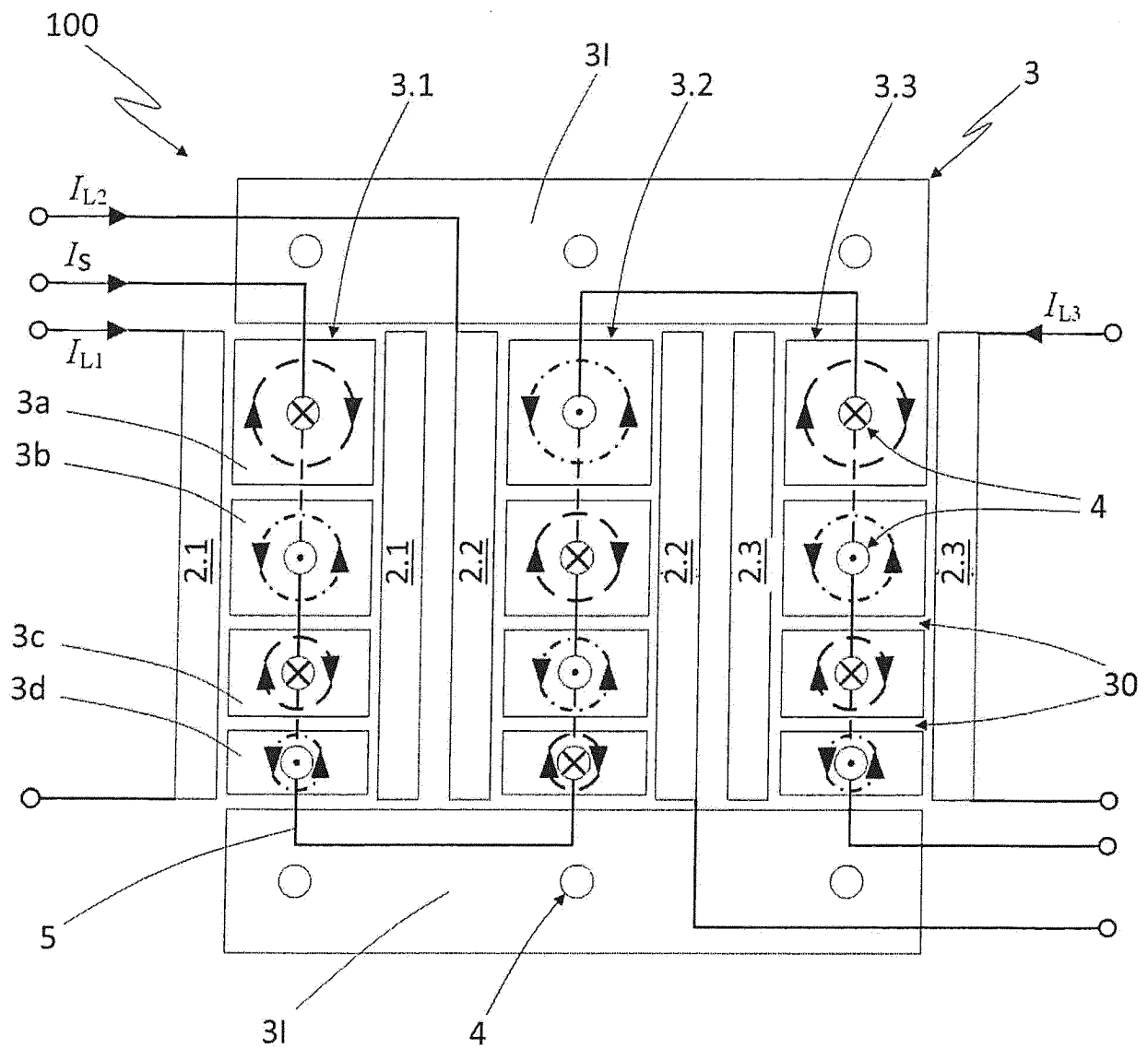


Fig. 20

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

- EP 2686931 B1 [0005]