



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

⑪ CH 649 647 A5

⑤① Int. Cl.⁴: H 01 F 5/08
G 01 R 33/24

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ **PATENTSCHRIFT** A5

⑳① Gesuchsnummer: 1695/79

㉔② Anmeldungsdatum: 21.02.1979

㉔③ Priorität(en): 21.02.1978 US 879298

㉔④ Patent erteilt: 31.05.1985

㉔⑤ Patentschrift
veröffentlicht: 31.05.1985

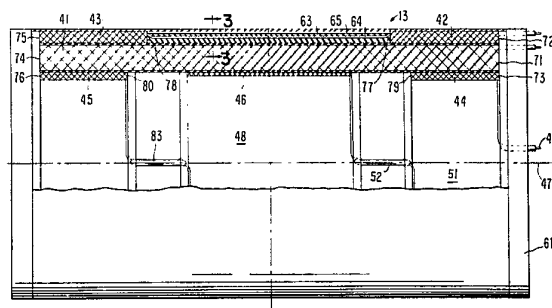
㉔⑦③ Inhaber:
Varian Associates, Inc., Palo Alto/CA (US)

㉔⑦② Erfinder:
Gang, Robert Edward, Sunnyvale/CA (US)

㉔⑦④ Vertreter:
Bovard AG, Bern 25

⑤④ **Supraleitende Spule für eine Kernresonanzeinrichtung.**

⑤⑦ Die supraleitende Spule mit Kompensation für axiale Gradienten der Ordnungen 1 bis 7 ist aus supraleitendem Draht mit rechteckigem Querschnitt hergestellt. Der Draht wird als Zylinderspule (13) mit einer Längsachse und mehreren wendelförmigen Lagen gewickelt, wobei benachbarte Windungen Steigungen in entgegengesetzten Richtungen haben. Die Spule weist einen Hauptwicklungsteil (41) sowie Hilfs- und Supplement-Wicklungsteile (42, 43, 44, 45) an jedem Ende des Hauptwicklungsteils auf. Die Hilfs- und Supplement-Wicklungsteile auf den Innen- und Aussen-Zylinderflächen des Hauptwicklungsteils (41) kompensieren Gradienten zweiter und vierter Ordnung. Ein weiterer Wicklungsteil (46) im Zentrum des Hauptwicklungsteils (41), auf dessen innerer Zylinderfläche kompensiert axiale Gradienten sechster Ordnung. Gradienten ungeradzahlgiger Ordnung werden kompensiert, weil jeder der Wicklungsteile etwa eine gleiche Windungszahl auf beiden Seiten einer zentral liegenden Querachse des Hauptwicklungsteils (41) hat.



PATENTANSPRÜCHE

1. Supraleitende Zylinderspule für eine Kernresonanzeinrichtung, bestehend aus einem supraleitenden Draht, der zu einer Zylinderspule (13) mit einer Längsachse (47) und mehreren wendelförmigen Lagen gewickelt ist, wobei benachbarte Lagen im wesentlichen aneinanderstossen und entgegengesetzte Steigungen haben, dadurch gekennzeichnet, dass der Hauptteil (41) der Zylinderspule mit einer Längsachse, einer zentral liegenden Querachse, zwei entgegengesetzten Endteilen und einem Zentralteil eine im wesentlichen gleiche Windungszahl auf beiden Seiten der Querachse aufweist und ein longitudinales Magnetfeld innerhalb des Spuleninneren erzeugt, zwei Hilfs-Zylinderspulen-Wicklungsteile (42, 43) koaxial zum Hauptwicklungsteil (41) im wesentlichen mit den beiden Endteilen des Hauptwicklungsteils ausgefluchtet sind und so gewickelt, angeschlossen und positioniert sind, dass das Magnetfeld des Hauptwicklungsteils in der Nähe der Endteile erhöht wird, wobei die beiden Hilfswicklungsteile (42, 43) im wesentlichen die gleiche Windungszahl haben und längs der Längsachse in etwa gleichen Distanzen von der Querachse angeordnet sind, zwei Supplement-Wicklungsteile (44, 45) koaxial zum Hauptwicklungsteil, die jeweils und im wesentlichen mit den beiden Enden des Hauptwicklungsteils ausgefluchtet sind und so gewickelt, positioniert und angeschlossen sind, dass das Magnetfeld des Hauptwicklungsteils in der Nähe der Endteile erhöht wird, wobei die beiden Supplement-Wicklungsteile (44, 45) im wesentlichen gleiche Windungszahlen haben und längs der Longitudinalachse in etwa gleichen Abständen von der Querachse positioniert sind, und einen weiteren Wicklungsteil (46) koaxial zum Hauptwicklungsteil (41), der mit dem Zentralteil des Hauptwicklungsteils ausgefluchtet ist und eine solche axiale Ausdehnung hat, dass kein Teil desselben mit irgendeinem Teil des Hilfs-Wicklungsteils oder des Supplement-Wicklungsteils ausgefluchtet ist, wobei dieser weitere Wicklungsteil (46) eine im wesentlichen gleiche Windungszahl auf beiden Seiten der Querachse aufweist und der weitere Wicklungsteil (46) so positioniert, gewickelt und angeschlossen ist, dass das Magnetfeld des Hauptwicklungsteils (41) in der Nachbarschaft des Zentralteils des Hauptwicklungsteils verstärkt wird.

2. Spule nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Wicklungsteile derart gewickelt und mit Strom von einer Aussenquelle erregt sind, dass $N_1 I_1 > N_2 I_2 > N_3 I_3 > N_4 I_4$, worin bedeuten:

- N_1 = Windungszahl des Hauptwicklungsteils (41)
- N_2 = kombinierte Windungszahl beider Hilfswicklungsteile (42, 43)
- N_3 = kombinierte Windungszahl beider Supplement-Wicklungsteile (44, 45)
- N_4 = Windungszahl des weiteren Wicklungsteils (46)
- I_1 = Strom zum Hauptwicklungsteil
- I_2 = Strom zu beiden Hilfswicklungsteilen
- I_3 = Strom zu beiden Supplement-Wicklungsteilen
- I_4 = Strom zu weiteren Wicklungsteil.

3. Spule nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass alle Wicklungsteile in Reihe gewickelt und geschaltet sind, so dass durch alle der gleiche Strom fliesst.

4. Spule nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Wicklungsteile so gewickelt sind, dass $N_1 > N_2 > N_3 > N_4$, worin bedeuten

- N_1 = Windungszahl des Hauptwicklungsteils (41)
- N_2 = kombinierte Windungszahl beider Hilfswicklungsteile (42, 43)
- N_3 = kombinierte Windungszahl beider Supplement-Wicklungsteile (44, 45)
- N_4 = Windungszahl des weiteren Wicklungsteils (46).

5. Spule nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der weitere Wicklungsteil (46) und die

Supplement-Wicklungsteile (44, 45) innen auf der Innenfläche des Hauptwicklungsteils (41) und die Hilfswicklungsteile (42, 43) aussen auf der Aussenfläche des Hauptwicklungsteils positioniert sind.

6. Spule nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass Stirnseiten (72, 73) des ersten Supplement-Wicklungsteils (44) und des ersten Hilfswicklungsteils (42) mit einer ersten Stirnseite (71) des Hauptwicklungsteils (41) ausgefluchtet sind und die beiden anderen Stirnseiten (77, 79) des ersten Supplement-Wicklungsteils und des ersten Hilfswicklungsteils fern von dieser Stirnseite des Hauptwicklungsteils liegen, Stirnseiten (75, 76) des zweiten Supplement-Wicklungsteils (45) und des zweiten Hilfswicklungsteils (43) mit der zweiten Stirnseite (74) des Hauptwicklungsteils ausgefluchtet sind und deren zweite Stirnseiten (78, 80) von der zweiten Stirnseite des Hauptwicklungsteils (41) entfernt sind, der erste Supplement-Wicklungsteil (44) mit dem weiteren Wicklungsteil (46) verbunden ist und der weitere Wicklungsteil mit den zweiten Supplement-Wicklungsteil (45) verbunden ist, so dass Strom von der äussersten Windung an der zweiten Stirnseite des ersten Wicklungsteils zu einer Windung bei und am ersten Ende des weiteren Wicklungsteils und von einer Windung am zweiten Ende des weiteren Wicklungsteils (46) zur innersten Windung an der zweiten Stirnfläche (80) des zweiten Supplement-Wicklungsteils (45) fliesst.

7. Spule nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Verbindungsleitungen sich längs der Längsachse zwischen den Supplement- und weiteren Wicklungen erstrecken.

8. Spule nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass jeder der Supplement-Wicklungsteile (44, 45) eine ungeradzahlige Anzahl von Lagen enthält.

9. Spule nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die äusserste Windung an der ersten Stirnseite (76) des zweiten Supplement-Wicklungsteils (45) mit der innersten Windung an der zweiten Stirnseite (74) des Hauptwicklungsteils (41) verbunden ist, die äusserste Windung an der ersten Stirnseite (71) des Hauptwicklungsteils mit der innersten Windung an der ersten Stirnseite (72) des ersten Hilfswicklungsteils (42) verbunden ist, die äusserste Windung des ersten Hilfswicklungsteils an der zweiten Stirnseite (77) mit der innersten Windung des zweiten Hilfswicklungsteils (43) an der zweiten Stirnseite (78) verbunden ist, die äusserste Windung an der zweiten Stirnseite (78) des zweiten Hilfswicklungsteils mit der äussersten Windung der zweiten Stirnseite (77) des ersten Hilfswicklungsteils (42) verbunden ist, die Windung an der ersten Stirnseite (72) des ersten Hilfswicklungsteils (42) mit einem ersten Spulenanschluss in der Nachbarschaft der ersten Stirnseite (71) des Hauptwicklungsteils (41) verbunden ist, der zweite Spulenanschluss in der Nachbarschaft der ersten Stirnseite (71) des Hauptwicklungsteils (41) mit der innersten Windung des Supplement-Wicklungsteils (44) an der ersten Stirnseite verbunden ist, wobei beide Supplement-Wicklungsteile (44, 45) eine ungeradzahlige Anzahl von Lagen haben und der Hauptwicklungsteil und die beide Hilfswicklungsteile (42, 43) eine gerade Anzahl von Lagen haben.

10. Spule nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Draht der supraleitenden Spule rechteckigen Querschnitt hat.

Die Erfindung betrifft eine Supraleitende Zylinderspule, für eine Kernresonanzeinrichtung, bestehend aus einem supraleitenden Draht, der zu einer Zylinderspule mit einer Längsachse und mehreren wendelförmigen Lagen gewickelt ist, wobei benachbarte Lagen im wesentlichen aneinander-

stossen und entgegengesetzte Steigungen haben.

Bei Spektrometern für die magnetische Kernresonanz ist es erwünscht, ein homogenes Feld in einer zu untersuchenden Probe zu erzeugen. Typischerweise wird die Probe in einer Phiole untergebracht, die in ein Magnetfeld eingesetzt wird, von dem gewünscht wird, dass es gleichförmige Charakteristiken über die ganze Länge der Probe hat. In einigen Spektrometern wird das Magnetfeld von einer supraleitenden Zylinderspule erzeugt, die einen Innenraum aufweist, in den die Phiole mit der Probe eingesetzt werden. Eine Vielzahl von Wicklungsanordnungen ist bei Versuchen verwendet worden, das Feld innerhalb des Inneren der Zylinderspule längs der Längsachse der Spule gleichförmig machen zu können.

Beispiel des Standes der Technik, die Einrichtungen zeigen, mit denen im wesentlichen homogene Magnetfelder in supraleitenden Zylinderspulen für die magnetische Kernresonanz erzeugt werden können, sind die US-Patentschriften 3 287 630, 3 419 904, 3 564 398 und 3 577 067. In der US-Patentschrift 3 287 630 wird eine Korrektur der axialen Feldgradienten erster, zweiter und dritter Ordnung dadurch erhalten, dass Korrektur-Trimmsspulen verwendet werden, die in der Nachbarschaft der äusseren zylindrischen Fläche einer Zylinderspule montiert sind, in Kombination mit einer Spulenordnung, die innerhalb der Hauptspulenwicklung in sehr enger Nachbarschaft zur die Probe haltenden Phiole montiert ist. Die Spulenordnung schliesst vier Gruppen von coaxial ausgefluchteten Spulen ein, die Korrekturen erster, zweiter und dritter Ordnung für lineare Gradienten der Hauptspule liefern. Um Variationen des Magnetfeldes der Hauptspule relativ zur Querachse der Spule zu kompensieren, sind kreisförmige Spulen vorgesehen, deren Längsachsen mit der Querachse der Hauptspule ausgefluchtet sind. Jeder Spulensatz bei diesem bekannten Gerät wird mit einem getrennten, unabhängig gesteuerten Strom versorgt, so dass die unterschiedlichen Spulensätze allgemein mit unterschiedlichen Strömen von einer Gleichstromquelle erzeugt werden.

Bei der Spule nach US-Patentschrift 3 564 398 ist eine Vielzahl von Korrekturspulen an unterschiedlichen Längsbereichen innerhalb der Hauptspule angeordnet, so dass einzelne Korrekturspulen räumlich unabhängig sind. Bei den beiden anderen erwähnten Patentschriften werden, ebenso wie bei der letztgenannten, unterschiedliche Ströme an die einzelnen Spulen geliefert, um die gewünschten Korrekturen zu erreichen.

Um die Erregung von supraleitenden Spulen zu erleichtern, ist es erwünscht, dass alle Spulensegmente mit dem gleichen Reihenstrom versorgt werden. Es ist schwierig, unterschiedliche Wicklungen oder Wicklungsteile der Spule in einem supraleitenden Magnetsystem mit unterschiedlichen Strömen zu versorgen, weil sich die Spule in einer relativ unzugänglichen Position relativ zur Stromversorgung befindet, d.h. im Inneren eines Dewargefässes, das auf einer kryogenen Temperatur in der Grössenordnung von 4,2 °K gehalten wird. Es ist auch erwünscht, die Anzahl der Leitungen zu minimieren, mit denen die Spule mit der Umgebungs-Aussen-seite des Dewars verbunden wird, um die Wärmekopplung von ausserhalb des Dewargefässes zur Spule zu reduzieren.

Weitere Nachteile waren beim Stand der Technik vorhanden. Insbesondere wurden gewöhnlich empirische Untersuchungen nötig, um den richtigen, an jede der Spulen zu liefernden Strom zu bestimmen. Während bei einigen bekannten Spulen Inhomogenitäten des longitudinalen Magnetfeldes bis zu Axialgradienten fünfter Ordnung korrigiert wurden, ist es für gewisse Zwecke notwendig, die axialen Gradienten bis zur siebten Ordnung hinauf zu korrigieren.

Es ist also Aufgabe der Erfindung, eine neue und verbesserte supraleitende Zylinderspule verfügbar zu machen.

Weiter soll durch die Erfindung eine supraleitende Zylind-

erspule mit Kompensation für Axialgradienten einer Hauptspule für Magnetfeldvariationen der ersten bis siebten Ordnung verfügbar gemacht werden.

Weiter soll durch die Erfindung eine neuartige und verbesserte supraleitende Zylinderspule verfügbar gemacht werden, die leicht geladen werden kann, weil alle Wicklungsteile in Reihe geschaltet sind, so dass ein einziger Leistungsstrom durch sie fliesst.

Zusätzlich soll durch die Erfindung eine neue und verbesserte supraleitende Spule verfügbar gemacht werden, bei der keine empirische Analyse dazu benötigt wird, die Grösse der Leitungsströme zu bestimmen, die verschiedenen Spulensektionen zugeführt werden müssen.

Weiterhin soll durch die Erfindung eine neue und verbesserte supraleitende Spule verfügbar gemacht werden, bei der die Leitungen für Erregungsstrom an eine Seite der Spule angeschlossen sind.

Die erfindungsgemässe supraleitende Zylinderspule ist dadurch gekennzeichnet, dass der Hauptteil der Zylinderspule mit einer Längsachse, einer zentral liegenden Querachse, zwei entgegengesetzten Endteilen und einem Zentralteil eine im wesentlichen gleiche Windungszahl auf beiden Seiten der Querachse aufweist und ein longitudinales Magnetfeld innerhalb des Spuleninneren erzeugt, zwei Hilfs-Zylinderspulen-Wicklungsteile coaxial zum Hauptwicklungsteil im wesentlichen mit den beiden Endteilen des Hauptwicklungsteils ausgefluchtet sind und so gewickelt, angeschlossen und positioniert sind, dass das Magnetfeld des Hauptwicklungsteils in der Nähe der Endteile erhöht wird, wobei die beiden Hilfswicklungsteile im wesentlichen die gleiche Windungszahl haben und längs der Längsachse in etwa gleichen Distanzen von der Querachse angeordnet sind, zwei Supplement-Wicklungsteile coaxial zum Hauptwicklungsteil, die jeweils und im wesentlichen mit den beiden Enden des Hauptwicklungsteils ausgefluchtet sind und so gewickelt, positioniert und angeschlossen sind, dass das Magnetfeld des Hauptwicklungsteils in der Nähe der Endteile erhöht wird, wobei die beiden Supplement-Wicklungsteile im wesentlichen gleiche Windungszahlen haben und längs der Longitudinalachse in etwa gleichen Abständen von der Querachse positioniert sind, und einen weiteren Wicklungsteil coaxial zum Hauptwicklungsteil, der mit dem Zentralteil des Hauptwicklungsteils ausgefluchtet ist und eine solche axiale Ausdehnung hat, dass kein Teil desselben mit irgendeinem Teil des Hilfs-Wicklungsteils oder des Supplement-Wicklungsteils ausgefluchtet ist, wobei dieser weitere Wicklungsteil eine im wesentlichen gleiche Windungszahl auf beiden Seiten der Querachse aufweist und der weitere Wicklungsteil so positioniert, gewickelt und angeschlossen ist, dass das Magnetfeld des Hauptwicklungsteils in der Nachbarschaft des Zentralteils des Hauptwicklungsteils verstärkt wird.

Die Gradienten sechster und siebter Ordnung können dadurch eliminiert werden, dass der supraleitende Draht mit rechteckigem Querschnitt zu einem Haupt-Zylinderspulen-Wicklungsteil mit N_1 -Windungen, zwei Hilfs-Zylinderspulen-Wicklungsteilen mit N_2 Windungen, zwei Supplement-Zylinderspulen-Wicklungsteilen mit N_3 -Windungen und einem weiteren Wicklungsteil mit N_4 -Windungen gewickelt wird, wobei N_1 grösser ist als N_2 , N_2 grösser ist als N_3 und N_3 grösser ist als N_4 . Der Haupt-Zylinderspulen-Wicklungsteil weist eine Längsachse auf, eine querverlaufende, zentral liegende Achse sowie zwei entgegengesetzte Enden und einen Zentralteil. Die beiden Hilfs-Zylinderspulen-Wicklungsteile sind coaxial zum Haupt-Wicklungsteil und ihre Enden sind jeweils mit den beiden Endteilen des Hauptwicklungsteils ausgefluchtet. Die Hilfs-Wicklungsteile sind so gewickelt, angeschlossen und positioniert, dass das Magnetfeld des

Hauptwicklungsteils erhöht wird, ein Resultat, das vorzugsweise dadurch erreicht wird, dass die Hilfstteile auf die äussere Zylinderfläche des Hauptwicklungsteils gewickelt werden. Die beiden Supplement-Wicklungsteile sind ebenfalls koaxial zum Hauptwicklungsteil und ihre Enden sind mit den beiden Enden des Hauptwicklungsteils ausgefluchtet. Die Supplement-Wicklungsteile sind so gewickelt, positioniert und angeschlossen, dass das Magnetfeld des Hauptwicklungsteils in der Nachbarschaft der Endteile erhöht wird, ein Resultat, das vorzugsweise dadurch erreicht wird, dass die Supplement-Wicklungsteile auf die innere Zylinderfläche des Hauptwicklungsteils gewickelt werden. Die Hilfs- und Supplement-Wicklungsteile sind so positioniert und gewickelt, dass Axialgradienten zweiter und vierter Ordnung des Hauptwicklungsteils kompensiert werden.

Um Axialgradienten sechster Ordnung kompensieren zu können, wird der weitere Wicklungsteil koaxial mit dem Hauptwicklungsteil gewickelt und mit dessen Zentralteil ausgefluchtet. Der weitere Wicklungsteil hat eine solche axiale Ausdehnung, dass kein Teil von ihm mit irgendeinem Teil des Hilfstwicklungsteils oder des Supplementwicklungsteils ausgefluchtet ist. Der weitere Wicklungsteil ist so positioniert, gewickelt und angeschlossen, dass das Magnetfeld des Hauptwicklungsteils in der Nachbarschaft des Zentralteils verstärkt wird.

Um Gradienten ungradzahliger Ordnung eliminieren zu können, sind die Haupt- und andere Wicklungsteile symmetrisch relativ zu der zentralen Querachse angeordnet, und es herrscht Symmetrie zwischen den Hilfs- und Supplement-Wicklungsteilen an entgegengesetzten Enden der Hauptwicklung. Die symmetrischen Beziehungen werden erreicht, weil: (1) die Haupt- und übrigen Wicklungsteile im wesentlichen gleiche Windungszahlen auf beiden Seiten der Querachse haben, (2) die Hilfstwicklungen an beiden Enden der Hauptwicklung etwa die gleiche Windungszahl haben und (3) die Supplementwicklungen an beiden Enden des Hauptwicklungsteils etwa die gleiche Windungszahl haben.

Eine weitere Ausbildung der Erfindung besteht darin, dass beide Anschlüsse der Zylinderspule auf einer Seite eines Spulenkörpers sein können, um den die Spule gewickelt wird, ohne irgendwelche Überkreuzungen, die zur Dicke der Spule hinzukommen. Dieses Resultat wird dadurch erreicht, dass einer der Supplement-Wicklungsteile vorzugsweise auf der inneren Zylinderfläche des Hauptwicklungsteils, mit einer ungradzahligen Windungszahl ausgeführt werden und die Supplement- und übrigen Wicklungsteile miteinander über eine Leitung verbunden werden, die sich axial durch zwei Schlitze auf der Aussenseite des Spulenkörpers erstrecken, längs der Längsachse des Hauptwicklungsteils.

Weitere Aufgaben der Erfindung ergeben sich aus der folgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels in Verbindung mit der Zeichnung; es zeigen:

Fig. 1 einen Schnitt durch ein Spektrometer für gyromagnetische Kernresonanz mit einer supraleitenden Spule nach der Erfindung in Kombination mit Geräten, die die Benutzung des Spektrometers ermöglichen;

Fig. 2 einen Teilschnitt durch eine supraleitende Spule gemäss einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung; und

Fig. 3 einen Schnitt längs der Linie 3-3 in Fig. 2.

In Figur 1 ist ein Kernresonanzspektrometer dargestellt, bei dem ein Supraleitungsmagnetsystem verwendet wird. Eine hinsichtlich ihrer magnetischen Kernresonanzeigenschaften zu untersuchende Probe 11 ist in einer Phiole 12 angeordnet, die in einem homogenen Magnetfeld H_0 angeordnet wird, das mit einer supraleitenden Spule 13 in seinem Inneren oder Zentralkern erzeugt wird. Zwei Senderspulen 14 übergreifen die Phiole 12 im Kern der Zylinderspule 13, so dass die Ach-

sen der Spulen 14 im wesentlichen miteinander ausgefluchtet sind und rechtwinklig zum Feld H_0 liegen. Die Senderspulen 14 sprechen auf HF-Energie an, die von einem HF-Sender 15 geliefert wird, um HF-Energie an die Probe 11 zu liefern.

Rechtwinklig zu den Richtungen der Achsen der Spulen 14 und des Feldes H_0 liegt die Achse einer Empfängerspule 16, die im Kern der Zylinderspule 11 positioniert ist, in der Nachbarschaft der Phiole 12, so dass die Spule 16 ein Signal ableitet, das die Kernresonanzeigenschaften der Probe 11 anzeigt. Die Empfängerspule 16 liefert ein Eingangssignal an einen Empfänger 17.

Die supraleitende Spule 13 wird über Leitungen 19 von einer Gleichstromversorgung 18 erregt; diese Leitungen 19 erstrecken sich durch eine relativ enge Hülse im Dewargefäss 12, sie sind schematisch so dargestellt, als ob sie sich durch das Dewargefäss erstrecken, und sind so geschaltet, dass die Spule 13 erregt wird. Aufgrund eines Erregungsstroms von der Stromversorgung 18 erzeugt die Spule 13 ein homogenes magnetisches Gleichfeld H_0 relativ hoher Intensität, das sich durch das Volumen der Probe 11 erstreckt. Typischerweise fliesst ein Erregungsstrom von 50 bis 60 A in der supraleitenden Spule 13, um ein magnetisches Gleichfeld H_0 in der Grössenordnung von 100 kG zu erzeugen. Wie bei modernen Kernresonanzspektrometern, in denen supraleitende Spulen verwendet werden, üblich, wird die Spule 13, sobald sie durch die Stromversorgung 18 erregt worden ist, von der Stromversorgung getrennt, ausgenommen unter ungewöhnlichen Umständen.

Um einen Sweep der Eigenschaften der Probe 11 zu erreichen, liefert der Sender 15-HF-Energie-Impulse an die Spule 14, und diese Impulse werden selektiv von der Probe absorbiert. Die Auffangspule 16 wandelt die Energie, die von der Probe 11 wieder abgestrahlt wird, um und liefert ein Signalspektrum an den Empfänger 17. Der Empfänger 17 enthält Fouriertransformations-Berechnungseinrichtungen, die es ermöglichen, eine Kurve der Kernresonanzeigenschaften der Probe 11 zu entwickeln und in einem X-Y-Schreiber 21 auszugeben.

Die Spule 13 wird auf kryogenen Temperaturen des flüssigen Heliums in der Grössenordnung von 4,2 °K gehalten. Bei einer bevorzugten Ausführungsform wird die kryogene Temperatur der Zylinderspule 13 mit einem Dewargefäss 20 mit einer äusseren Aluminiumschale 21 erhalten, in der eine Aluminiumbüchse 22 angeordnet ist, die flüssigen Stickstoff auf etwa 77 °K enthält. Unterhalb der Flüssigstickstoffbüchse 22 befindet sich eine weitere Büchse 23, die mit flüssigem Helium gefüllt ist. Die Büchse 23 umgibt einen Zylinder 24, in dem die supraleitende Spule 13 angeordnet ist. Ein evakuierter Raum, typischerweise ein Vakuum 10^{-5} Torr, existiert zwischen der Wand 25, der Büchse 23 und dem Boden 25 der Büchse 21, sowie zwischen der Wand 24 und der Seitenwand 26 und dem Boden 27 eines Wärmeschirms 28 aus Aluminium. Im evakuierten Raum unmittelbar ausserhalb der Büchse 23 befindet sich ein weiterer Wärmeschild 29 aus Aluminium. Ein weiterer evakuierter Raum existiert zwischen der Decke 21 und Seitenwand 32 der Büchse 22, sowie zwischen der Wand 26 und dem Boden 27 des Schirms 28 und der Schale 21. In diesem weiteren evakuierten Raum befindet sich ein weiterer Wärmeschirm 33. Um das Minimieren des Wärmeflusses vom Äusseren des Dewargefässes 20 zur supraleitenden Spule 13 zu unterstützen, sind der Schirm 33, der Deckel 31, der Boden 25 und der Schirm 29 jeweils mit Hülssen 34, 35 und 36 versehen, die alle konzentrisch zur Bohrung 37 sind, die sich durch das Innere der Büchse 23 erstreckt. Die Bohrung 37 ist koaxial zur Hülse 38, die sich zwischen den diametralen Enden des Dewargefässes 20 erstreckt. Die Spule 13 ist koaxial mit den Hülssen 34 bis 36, so dass das Magnetfeld H_0 sich auch in der gleichen Richtung erstreckt

wie die gemeinsame Längsachse der Hülsen.

Erfindungsgemäss liefert die Zylinderspule 13 ein sehr homogenes Magnetfeld H_0 durch die ganze Probe 11. Die Zylinderspule 13 kann als Spule achter Ordnung betrachtet werden, d.h. die Spule hat flache Magnetfeldcharakteristiken längs ihrer Längsachse für die polynomialen Ordnungen 1 bis 7. Zusätzlich weist das Magnetfeld H_0 praktisch keine spiralförmigen oder radialen Komponenten in dem Bereich auf, in dem die Probe 11 untergebracht ist, d.h. praktisch alle Komponenten des durch die Probe 11 verlaufenden Feldes sind mit der Längsachse der Spule 13 ausgefluchtet.

Zu diesem Zweck weist die Zylinderspule 13 einen Hauptwicklungsteil 41, zwei Hilfs-Wicklungsteile 42 und 43, zwei Supplement-Wicklungsteile 44 und 45 und einen weiteren Wicklungsteil 46 auf. Jeder der Wicklungsteile 41 bis 46 ist koaxial zur Längsachse 47 der Spule 13. Alle Wicklungsteile 41 bis 46 sind auf einen zylindrischen, unmagnetischen Spulenkörper 48 gewickelt und in Reihe miteinander geschaltet, so dass die Spule 13 durch Strom erregt werden kann, der durch Leitungen 49 und 50 fliesst, die sich durch eine gemeinsame Stirnseite 61 an einem Ende des Spulenkörpers 48 erstrecken.

Alle Wicklungsteile 41 bis 46 sind aus supraleitenden Draht mit rechteckigem Querschnitt gewickelt, wie er in der US-Patentanmeldung Nr. 875 291 «Spektrometer mit supraleitender Spule» beschrieben wird. Vorzugsweise hat der supraleitende Draht eine Monofil-Konfiguration mit einem Kerndraht aus Niob-Titan-Legierung mit einem kreisförmigen Querschnitt, umgeben von einem Kupfermantel mit rechteckigem Querschnitt. Typischerweise hat das Rechteck eine Basis von 0,41 mm und eine Höhe von 0,33 mm; unter diesen Umständen hat der Kern einen Durchmesser von 0,25 mm. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass supraleitender Draht mit rechteckigem Querschnitt mit anderen Querschnittsabmessungen verwendet werden kann, solange der Querschnitt des Supraleiters klein genug ist, um dem Magnetfeld, das aufgrund des durch den Supraleiter fliessenden Stroms erzeugt wird, eine gleichförmige Position relativ zum Querschnitt des Drahtes zu ermöglichen.

Jeder der Wicklungsteile 41 bis 45 ist als Vielzahl von wendelförmigen Lagen gewickelt, von denen jede konzentrisch zur Achse 47 ist. Unmittelbar benachbarte wendelförmige Lagen sind so gewickelt, dass sie entgegengesetzt gerichtete Steigungen haben. Zwischen benachbarten wendelförmigen Lagen befindet sich eine nicht dargestellte dünne dielektrische Lage aus Mylar, die elektrisch benachbarte Lagen voneinander isoliert, selbst wenn die supraleitenden Kerne benachbarter Lagen normal werden, d.h. nicht mehr supraleitend bleiben. Während des Supraleitungsbetriebes ist die Impedanz des Kupfermantels relativ zur Impedanz des supraleitenden Drahtes so gross, dass das Kupfer vergleichsweise isolierend ist. Wenn der supraleitende Kern normal wird, bildet der Kupfermantel einen Nebenschlussweg für den Teil des Kerns, der normal geworden ist, damit wird versucht, die Möglichkeit zu vermeiden, dass die ganze Spule normal wird, wenn nur ein kleines Segment normal wird.

Wegen des rechteckigen Querschnitts des supraleitenden Drahtes sind benachbarte, entgegengesetzt gewickelte Lagen der Zylinderspule 13 wahre Wendeln mit konstanter Steigung über ihre Länge. Benachbarte Flächen benachbarter Wendelagen stossen im wesentlichen gegeneinander an und sind voneinander nur durch die dielektrische Zwischenlage getrennt. Jede anstossende Lage hat einen wahren zylindrischen Aussenumfang mit praktisch konstantem Radius, im Gegensatz zu dem variierenden Radius einer Wendel, die aus Draht mit kreisförmigem Querschnitt hergestellt ist.

Der supraleitende Draht ist so gewickelt, dass benachbarte, sich orthogonal erstreckende Flächen so angeordnet

sind, dass sich die breitere Fläche rechtwinklig zur Längsachse 47 befindet und die Schmalseite des Drahtes parallel zur Achse 47. Wenn die Flächen des rechteckigen Querschnitts des supraleitenden Drahtes auf diese Weise angeordnet werden, ist die Neigung benachbarter Windungen einer Wendellage, zur Seite her vorhergewickelten Windungen zu sacken, im wesentlichen vermieden.

Wenn der Hauptwicklungsteil 41 die einzige Wicklung wäre, die die Zylinderspule 13 bildet, würde das Magnetfeld im Inneren der Wicklung, wo die Probe 11 angeordnet ist, Variationen zeigen, deren räumliche Beziehung wie folgt angeschrieben werden kann

$$H_0 = a + bz + cz^2 + dz^3 + ez^4 + fz^5 + gz^6 + hz^7 + iz^8 + \dots$$

15 worin bedeuten:

H_0 = das Magnetfeld im Inneren der Spule

z = Distanz längs der Längsachse 47 von der zentralen Querachse 53, und

20 a, b, c, d, e, f, g, h und i = Konstanten.

Die Konstanten $a-i$ haben allgemein fallende Grösse, so dass die Magnetfeldgradienten längs Achse 47 für die achte Ordnung und höher gewöhnlich vernachlässigbaren Einfluss auf die longitudinalen Feldgradienten innerhalb des Zentral- 25 teils des Innenraums der Zylinderspule 13 haben.

Erfindungsgemäss sind die Wicklungsteile 42 bis 46 so angeordnet, dass die Grössen der Koeffizienten b bis h 0 sind und das Magnetfeld innerhalb der Spule 13 angeschrieben werden kann als: $H_0 = a + iz^8 \dots$. Weil i und die übrigen Koeffizienten höherer Ordnung relativ kleine Werte haben, ist 30 erkennbar, dass ein extrem gleichförmiger Magnetfeldgradient innerhalb des Kerns der Spule 13 erzeugt wird.

Zu diesem Zweck bauen die Hilfswicklungen 42, 43, 44, 45 und 46 ein Magnetfeld auf, das zum Magnetfeld des 35 Hauptwicklungsteils 41 addiert. Die Wicklungsteile 42–45 eliminieren die Komponenten zweiter und vierter Ordnung, d.h. sorgen dafür, dass die Werte c und e in der Gleichung 0 werden, während der weitere Wicklungsteil 46 den Effekt sechster Ordnung eliminiert (dessen Vorhandensein ein Trimmen der Wicklungsteile 42–45 erfordert) und dafür sorgt, dass der Koeffizient g in der Gleichung den Wert 0 annimmt. Die 40 Wicklungsteile 41–46 sind symmetrisch relativ zur zentralen Querachse 53 gewickelt, um Komponenten ungradzahliger Ordnung zu eliminieren, d.h. um dafür zu sorgen, dass die 45 Werte der Koeffizienten b, d, f , und i 0 werden.

Symmetrie tritt auf, weil die Windungszahlen des Haupt- und des weiteren Wicklungsteils 41 und 46 auf beiden Seiten der Achse 53 gleich sind und weil die Wicklungsteile 42 und 43 im wesentlichen gleiche Windungszahlen haben und weil 50 die Wicklungsteile 44 und 45 im wesentlichen gleiche Windungszahlen haben.

Das vom Hauptwicklungsteil 41 erzeugte Magnetfeld übersteigt die kombinierten Magnetfelder aller von den anderen Wicklungsteilen 42 bis 46 erzeugten Felder; die kombinierten Magnetfelder, die durch die Hilfswicklungsteile 42 55 und 43 erzeugt werden, übersteigen die kombinierten Magnetfelder, die durch die Supplement-Wicklungsteile 44 und 45 erzeugt werden, und das Magnetfeld, das vom Wicklungsteil 46 erzeugt wird, ist kleiner als das Magnetfeld, das von 60 irgendeinem der anderen Wicklungsteile 41 bis 45 erzeugt wird. Zu diesem Zweck stehen die Ampère-Windungen der Wicklungsteile in folgender Beziehung:

$$N_1 I_1 > N_2 I_2 > N_3 I_3 > N_4 I_4$$

65 worin bedeuten:

N_1 = Windungszahl des Hauptwicklungsteils 41

N_2 = kombinierte Windungszahl der Hilfs-Wicklungsteile 42 und 43

- N_3 = kombinierte Windungszahl der
 Hilfs-Supplement-Wicklungsteile 44 und 45
 N_4 = Windungszahl des weiteren Wicklungsteils 46
 I_1 = zum Hauptwicklungsteil 41 gelieferter Strom
 I_2 = zu den beiden Hilfs-Wicklungsteilen 42 und 43
 gelieferter Strom
 I_3 = zu den beiden Supplement-Wicklungsteilen 44 und
 45 gelieferter Strom
 I_4 = zum weiteren Wicklungsteil 46 gelieferter Strom.

Da die Wicklungsteile 41 bis 46 in Reihe geschaltet sind,
gilt

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4,$$

so dass

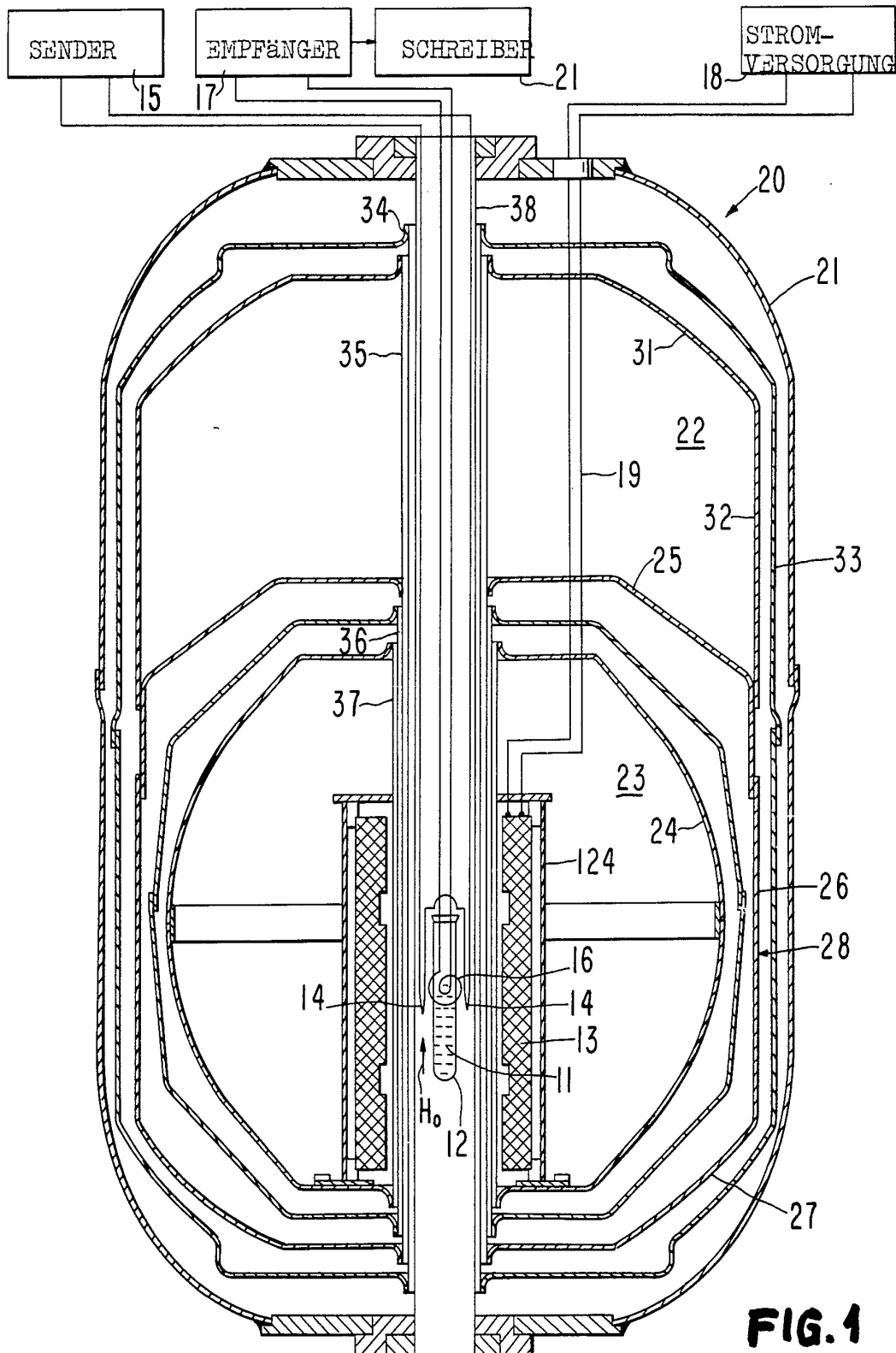
$$N_1 > N_2 > N_3 > N_4$$

Die Hilfswicklungsteile 42 und 43 sind auf die äussere Zylinderfläche des Hauptwicklungsteils 41 gewickelt und erstrecken sich über eine erhebliche Länge längs der Längsachse. Die Supplement-Wicklungsteile 44 und 45 sind auf die Innenseite der inneren Zylinderfläche des Hauptwicklungsteils 41 gewickelt. Die Wicklungsteile 42 bis 45 sind ausgefluchtet mit den als Endteilen des Hauptwicklungsteils 41 zu bezeichnenden Teilen. Die Supplement-Wicklungsteile 44 und 45 haben jedoch eine axiale Ausdehnung kleiner als die axiale Ausdehnung der Hilfs-Wicklungsteile 42 und 43, um bei der Herabsetzung des Magnetfeldgradienten sechster Ordnung zu assistieren. Eine erste Stirnseite 71 des Wicklungsteils 41 ist mit Stirnseiten 72 und 73 der Wicklungsteile 42 und 44 ausgefluchtet, während die zweite Stirnseite 74 des Wicklungsteils 41 mit Stirnseiten 75 und 76 der Wicklungsteile 43 und 45 ausgefluchtet ist. Die anderen Stirnseiten 77 und 78 der Wicklungsteile 44 und 45 sind ferner von der zentralen Querachse 53 als die zweiten Stirnseiten 79 und 80 der Wicklungsteile 42 und 43. Ein weiterer Wicklungsteil 46 ist so angeordnet, dass er sich auf der Innenwand des Hauptwicklungsteils 41 befindet. Bei einer bevorzugten Ausführungsform weist zur Erreichung einer Zylinderspule achter Ordnung jeder der Wicklungsteile 42 und 43 zehn Lagen auf und hat eine axiale Ausdehnung von 26,68% der Länge des Wicklungsteils 41, weist jeder der Wicklungsteile 44 und 45 fünf Lagen auf und hat eine axiale Ausdehnung von 23,58% der Länge des Hauptwicklungsteils 41, und weist der weitere Wicklungsteil 46 eine einzige Lage auf und hat eine axiale Ausdehnung von 37,37% relativ zur Länge des Hauptwicklungsteils 41.

Damit die Leitungen 49 und 50 durch die Stirnplatte 61

des Spulenkörpers 48 herausgebracht werden können, ohne dass sich irgendwelche Oberkreuzungen mit den Spulenwindungen ergeben, die zur Spulendicke beitragen, und um zu ermöglichen, dass mehrere Wicklungsteile in Reihe miteinander geschaltet werden können, so dass nur ein einziges Paar Zuleitungen vorgesehen werden müssen, werden die Wicklungsteile wie folgt geformt. Zunächst wird eine ungerade Anzahl (beispielsweis fünf) wendelförmige Lagen um einen zylindrischen Spulenkörperteil 51 gewickelt, um den Wicklungsteil 44 zu bilden. Die letzte Windung des Wicklungsteils 44 befindet sich auf der äussersten Lage des Wicklungsteils 44 in der Nachbarschaft der zweiten Stirnfläche 79. Der Draht wird dann radial gezogen, bis er im wesentlichen die Längsachse 47 durchsetzt, und wird dann durch Rohr 52 von der Platte 61 weggezogen, das sich in Längsrichtung durch den Spulenkörper 48 auf Achse 47 erstreckt. Dann wird der Draht radial nach aussen gezogen, um den weiteren Wicklungsteil 46 zu bilden. Von der letzten Windung des Wicklungsteils 46 wird der Draht radial einwärts zu einem weiteren Rohr 83 gezogen, das sich in Längsrichtung durch die Spule 48 auf Achse 47 erstreckt. Der Draht wird dann durch Rohr 83 weg von der Platte 51 gezogen und wird dann radial nach aussen gezogen und der Wicklungsteil 45 wird um das zylindrische Spulenkörpersegment 54 gewickelt. Wenn der Wicklungsteil 45 komplett ist, befindet sich die letzte Windung an der Stirnseite 76 der äussersten Lage des Wicklungsteils 45. Der Hauptwicklungsteil 41 wird dann als ungerade Anzahl von wendelförmigen Lagen gewickelt, so dass die letzte Windung des Wicklungsteils 41 sich an Stirnseite 71 befindet, auf der äussersten Lage des Wicklungsteils 41.

Nachdem der Wicklungsteil 41 komplett ist, werden die Wicklungsteile 42 und 43 gewickelt. In der fertigen Spule weist jeder Wicklungsteil 42 und 43 eine gerade Anzahl von Lagen auf. Wenn der Wicklungsteil 42 anfänglich gewickelt wird, weist er jedoch eine Lage weniger als seine Gesamtanzahl auf. Die vorletzte Lage des Wicklungsteils 42 wird an Stirnseite 77 beendet. Dann wird der Draht als Leitung 64 longitudinal parallel zur Achse 47 vom Wicklungssegment 42 zur innersten Lage des Wicklungsteils 43 über vorher abgelegten Lagen 63 aus dielektrischem Band gezogen, wie in Fig. 2 und 3 dargestellt. Der Wicklungsteil 43 wird dann als Wendel mit einer geraden Anzahl von Lagen gewickelt, so dass die letzte Windung des Wicklungsteils 43 sich auf der Aussenlage des Wicklungsteils an Stirnseite 78 befindet. Der Draht wird dann wieder als Leitung 65 longitudinal parallel zur Achse 47 über die Lagen 63 zum Wicklungsteil 42 gezogen. Dann wird die letzte Lage des Wicklungsteils 42 gewickelt und der Draht wird durch eine entsprechende Bohrung in Platte 61 herausgeführt.



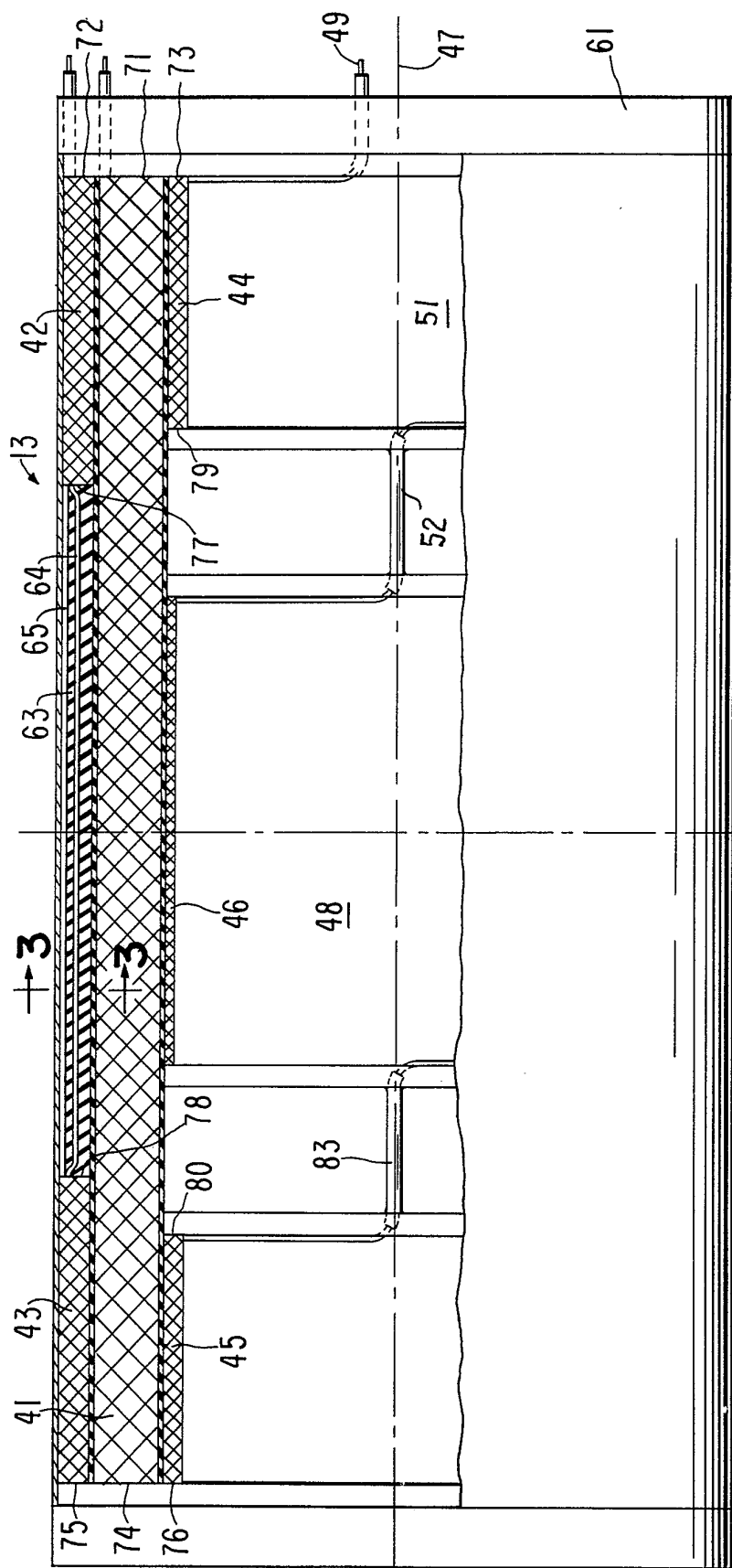


FIG. 2

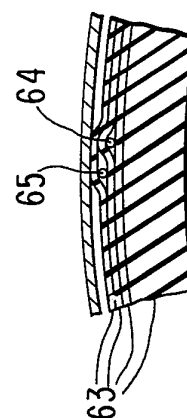


FIG. 3