

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Erzeuger zeitvariabler Magnetfelder mit einer primären Gradientenspuleneinheit zur Erzeugung eines Gradientenmagnetfeldes in einem Untersuchungsbereich eines Magnetresonanzgeräts. Des Weiteren betrifft die Erfindung ein Magnetresonanzgerät mit mindestens einem derartigen Erzeuger zeitvariabler Magnetfelder.

[0002] Die Magnetresonanztechnik ist eine bekannte Technik unter anderem zum Gewinnen von Bildern eines Körperinneren eines Untersuchungsobjekts. Dabei werden in einem Untersuchungsbereich des Magnetresonanzgeräts (MR-Geräts) einem vorliegenden statischen Grundmagnetfeld B_0 , das von einem Grundfeldmagneten erzeugt wird, schnell geschaltete magnetische Gradientenfelder überlagert, welche mittels Gradientenspulen erzeugt werden. Zum Auslösen von Magnetresonanzsignalen umfasst das Magnetresonanzgerät ferner eine Hochfrequenzantenne (HF-Antenne), die HF-Signale, das so genannte B_1 -Feld, in das Untersuchungsobjekt einstrahlt. Mithilfe dieser Antenne oder weiterer Lokalantennen können die ausgelösten Magnetresonanzsignale aufgenommen werden und anschließend zu Magnetresonanzbildern verarbeitet werden. Das B_1 -Feld wird allgemein von Ströme durch einen Leiter erzeugt.

Stand der Technik

[0003] Beispielsweise aus der US 6,433,550 ist ein offenes Magnetresonanzgerät mit einem C-förmigen Grundfeldmagneten bekannt. In der Öffnung des C-förmigen Grundfeldmagneten ist ein Patientenaufnahmeraum des Magnetresonanzgeräts angeordnet, in dem das Grundmagnetfeld des Magnetresonanzgeräts möglichst homogen erzeugt wird. Des Weiteren sind zwei Polplatten an den beiden Enden der C-Struktur angeordnet, an denen in Richtung hin zum Patientenaufnahmeraum im Wesentlichen planar ausgebildete Teile eines Gradientenspulensystems und daran anschließend ebenfalls im Wesentlichen planar ausgebildete Teile eines Antennensystems des Magnetresonanzgeräts angeordnet sind. Gradientenspulen für vorgenanntes Gradientenspulensystem sind beispielsweise in der DE 40 37 894 A1 und DE 19544779A1 näher beschrieben. Aktiv geschirmte Gradientenspulen für MR-Geräte sind z.B. aus DE 44 22 781 C1 und DE 44 22 782 C1 bekannt.

[0004] Ferner ist aus der DE 42 32 884 A1 eine Antennenanordnung für ein Kernspinresonanzgerät bekannt, bei dem ein Grundmagnetfeld zwischen zwei Polplatten aufgebaut wird. An jeder Polplatte ist eine Teilantenne angeordnet, in die ein Hochfrequenzstrom eingespeist wird. Die Teilantennen bestehen aus einem geschlossenen, geerdeten, der jeweiligen Polplatte zugewandten Schirm und einer flächenhaf-

ten, in Abstand zum Schirm und im Wesentlichen parallel zu diesem angeordneten Leiterstruktur. Weiterhin ist aus der DE 42 32 884 A1 bekannt, dass man bei Polplattengrundfeldmagneten bestrebt ist, den Polplattenabstand möglichst klein zu halten, damit das Gewicht des Grundfeldmagneten klein bleibt und eine bessere Grundmagnetfeldhomogenität erzielt wird. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, alle Einbauten zwischen den Polplatten, wie das Gradientenspulensystem, der Hochfrequenzschirm und die Antennenanordnung, so flach wie möglich zu halten. Andererseits ist für einen hohen Wirkungsgrad der beschriebenen Antennenanordnung ein möglichst großer Abstand der Antennenanordnung zum Hochfrequenzschirm vorteilhaft. Dies gilt insbesondere bei der Nutzung der Antennenanordnung zum Empfangen von Magnetresonanzsignalen.

[0005] Aus DE 101 24 737 A1 ist eine zirkulare planare Hochfrequenzantenne für offene Magnetresonanzgeräte bekannt. Sie weist zwei beabstandete Systeme aus ebenen auf einer Tragplatte angeordneten Leitern für einander kreuzende Ströme auf. Die Leiter sind zur Abstimmung auf die gewünschte Resonanzfrequenz durch auf Masse gelegte Abstimmkondensatoren an wenigstens einem Ende kapazitiv verkürzt. Auf jeder Tragplatte ist nur eine flächige Metallschicht angeordnet, in die um 90° versetzt die beiden wiederum um 90° phasenversetzten Ströme eingespeist werden. An der Einspeisungsstelle und der gegenüberliegenden Seite sind Abstimmkondensatoren angeordnet.

[0006] Da allgemein bei Magnetresonanzenanlagen der Platz innerhalb des homogenen Grundmagnetfeldes B_0 , d.h. der Polplattenabstand, kostspielig und deswegen begrenzt ist, ist jeder Ansatz, den verfügbaren Raum minimal durch Einbauten zu belegen bzw. maximal für den Patienten zur komfortablen Untersuchung zu nutzen, von Vorteil.

Aufgabenstellung

[0007] Eine Aufgabe der Erfindung ist es, einen Erzeuger zeitvariabler Magnetfelder und ein Magnetresonanzgerät mit einem derartigen Erzeuger anzugeben, die bei einer hohen Effizienz einen möglichst kompakten Aufbau, insbesondere von Gradientenspuleneinheit und Hochfrequenzantenne, aufweisen.

[0008] Die erstgenannte Aufgabe bezogen auf den eingangs erwähnten Erzeuger mit einer primären Gradientenspuleneinheit wird dadurch gelöst, dass die primäre Gradientenspuleneinheit zur Aufnahme mindestens eines Gradientenspulensleiters einen Zentralbereich, einen Außenbereich und mindestens einen die beiden Bereiche verbindenden Verbindungsbereich aufweist, wobei der Außenbereich den Zentralbereich umgibt und wobei zwischen dem Zentralbereich und dem Außenbereich mindestens ein

Zwischenraum angeordnet ist, der frei vom Gradientenspulenleiter der primären Gradientenspule ist und in dem ein Hochfrequenzantennenelement angeordnet ist.

[0009] Ein Vorteil der Erfindung liegt darin, dass z.B. die Leiterführung der primären Gradientenspuleinheit nicht zwangsweise geschlossen als Spulenwindung im Zentralbereich stattfinden muss, sondern dass über den Verbindungsbereich auch außerhalb des Zentralbereichs eine Schließung von Spulenwindungen erfolgen kann. Dadurch wird die Erzeugung von Gradientenmagnetfeldern effizienter, da eine Rückführung des Leiters in größerer Entfernung erfolgen kann und somit in einem Untersuchungsgebiet die Erzeugung von Magnetfeldern, die dem Gradientenmagnetfeld entgegenwirken, verringert wird. Je größer der Verbindungsbereich ist, desto mehr Spulenwindungen können außerhalb des Zentralbereichs geschlossen werden und desto effizienter ist die Erzeugung des Gradientenmagnetfeldes. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass der Zwischenraum zur Bildung einer HF-Antenne mittels der HF-Antennenelemente genutzt wird. Dies ermöglicht einen sehr kompakten Aufbau von Gradientenspuleinheit und HF-Antenne. Ein derartig als Gradientenspulen-Hochfrequenzantenneneinheit aufgebauter Erzeuger weist einen hohen Integrationsgrad von Gradientenspuleinheit und Hochfrequenzantenneneinheit auf. Mithilfe eines oder mehrerer Verbindungsbereiche lassen sich höhere Anforderungen an das Gradientenfeld erfüllen. Die Effizienz der HF-Antenne, insbesondere der Verlauf des HF-Feldes, wird durch die Beschränkung der Antennenelemente auf die Zwischenräume beeinträchtigt. Letzteres kann z.B. durch stärkere HF-Sender und kontrastverbesserte MR-Messesequenzen kompensiert werden.

[0010] Die zweitgenannte Aufgabe wird durch ein Magnetresonanzgerät mit mindestens einem derartigen Erzeuger gelöst. Bei der Verwendung derartiger Erzeuger, insbesondere bei offenen MR-Geräten, steht dem Patienten ein großer Untersuchungsgebiet zur Verfügung.

[0011] Beispielsweise basiert das Magnetresonanzgerät auf einem C-förmigen Permanentmagneten mit z.B. vertikalem Grundmagnetfeld. Das Grundmagnetfeld liegt zwischen zwei gegenüberliegenden Polplatten und ist im Untersuchungsgebiet des Magnetresonanzgeräts möglichst homogen. Ist an jeder Polplatte ein erfindungsgemäßer Erzeuger angeordnet, kann ein Gradientenmagnetfeld effizient im Untersuchungsgebiet erzeugt werden.

[0012] In einer besonders vorteilhaften Ausbildungsform des Erzeugers ergänzen sich die Bereiche der primären Gradientenspuleinheit im Wesentlichen plattenartig, d.h. die Bereiche liegen in der gleichen Ebene. Die Ebene kann dabei planar oder

auch beispielsweise gebogen an den Untersuchungsbereich angepasst sein.

[0013] In einer besonders vorteilhaften Ausführungsform des Erzeugers ist der Zentralbereich kreisrund, der Außenbereich kreisringartig und der Verbindungsbereich speichenartig ausgebildet. Diese Ausführungsform hat den Vorteil, dass die Geometrie der Gradientenspuleinheit besonders günstig an zylindersymmetrische Grundmagnetfelder von C-bogenförmigen Magnetresonanzgeräten angepasst ist. Alternativ könnten die Bereiche z.B. auch viereckig ausgebildet sein.

[0014] In einer vorteilhaften Ausbildungsform des Erzeugers umfasst die Gradientenspuleinheit mehrere Gradientenspulenleiter, die einzeln oder gemeinsam bestrombar sind. Vorteilhafterweise verläuft einer der Gradientenspulenleiter vom Außenbereich über einen ersten der Verbindungsbereiche zum Zentralbereich und über einen zweiten der Verbindungsbereiche wieder zurück zum Außenbereich. Bei der Schließung von Gradientenspulenwindungen kann auf diese Weise ein einen Rückstrom führenden Abschnitt eines Gradientenleiters beispielsweise radial nach außen in den Außenbereich verlegt werden.

[0015] Alternativ kann ein einen Rückstrom führender Abschnitt eines Gradientenleiters z.B. als Shim-Leiter zur Abschirmung von Magnetfeldern der ersten Gradientenspuleinheit außerhalb des Untersuchungsgebiets verwendet werden. Dazu wird beispielsweise einer der Gradientenspulenleiter an einer Position den Außenbereich in Richtung der dem Untersuchungsgebiet abgewandten Seite verlassen und anschließend insbesondere auf der dem Untersuchungsgebiet abgewandten Seite der primären Gradientenspuleinheit, zu einer anderen Position des Außenbereichs verlaufen und dort wieder in diesen eintreten.

[0016] In einer vorteilhaften Ausführungsform des Erzeugers umfasst dieser einen Feldrückflussraum, der auf der dem Untersuchungsgebiet abgewandten Seite der primären Gradientenspuleinheit angeordnet ist, und wobei der Zwischenraum den Feldrückflussraum und den Untersuchungsgebiet miteinander derart verbindet, dass die zeitvariablen Magnetfelder im Zwischenraum, im Feldrückflussraum und im Untersuchungsgebiet verlaufen. Vorzugsweise sind der Zwischenraum, der Feldrückflussraum und der Untersuchungsgebiet derart ausgebildet, dass sie eine Schließung von Gradientenmagnetfeldern und Hochfrequenzmagnetfeldern ermöglichen. Die Verwendung eines derartigen Feldrückflussraumes ermöglicht einen sehr kompakten Aufbau einer mit einer Hochfrequenzantenne kombinierten Gradientenspuleinheit bei hoher Effizienz.

[0017] Vorzugsweise sind die Bereiche der primären Gradientenspuleneinheit jeweils einzeln von Abschnitten eines als Hochfrequenzschirm wirkenden elektrischen Leiters umschlossen. Eine derartige Hochfrequenzabschirmung reduziert Verluste durch Vermeidung des Eindringens des Hochfrequenzfeldes in die Gradientenspulen. Vorzugsweise ist der elektrische Leiter derart durchbrochen und mit Kondensatoren verschaltet, dass er im Frequenzbereich der Gradientensignale keine signifikanten Wirbelströme entwickelt, jedoch im Bereich der Magnetresonanzfrequenzen im Wesentlichen als eine zusammenhängende Leiterfläche wirkt.

[0018] In einer vorteilhaften Ausführungsform des Erzeugers ist der elektrische Leiter oder ein Teilbereich des elektrischen Leiters Teil eines Hochfrequenzantennenresonanzkreises, der zusätzlich mindestens eines der HF-Antennenelemente umfasst, das insbesondere den Abschnitt des elektrischen Leiters um den Außenbereich mit dem Abschnitt des elektrischen Leiters um den Zentralbereich hochfrequenzmäßig verbindet. Vorzugsweise dient dabei der elektrische Leiter als eine Art Rückstromleiter des HF-Antennen-Resonanzkreises. Zusätzlich ist es vorteilhaft, wenn der elektrische Leiter den Feldrückflussraum bis auf den Bereich, an den der Zwischenraum angrenzt, umschließt, und so den vom HF-Feld einnehmbaren Bereich innerhalb des Erzeugers begrenzt.

[0019] In einer besonders vorteilhaften Ausführungsform des Erzeugers weist das Antennenelement Mittel zur Einspeisung eines Hochfrequenzsignals zur Erzeugung eines Hochfrequenz-Magnetfeldes und/oder zum Auslesen eines Magnetresonanzsignals auf.

[0020] In einer besonders vorteilhaften Ausführungsform des Erzeugers sind vier symmetrisch angeordnete Verbindungsbereiche derart ausgebildet, dass sich vier Zwischenräume ausbilden, in denen jeweils mindestens ein Antennenelement angeordnet ist. Eine derartige Gradientenspuleneinheit setzt sich z.B. aus vier gleichartigen 90°-Winkelsegmenten zusammen. Jeweils zwei gegenüberliegende Verbindungsbereiche nehmen dabei vorzugsweise von Gradientenspulensleiter zur Gradientenfelderzeugung für eine transversale Richtung auf. Wird ein hochwertiges Gradientenfeld in nur einer transversalen Richtung benötigt, könnte der Erzeuger auf nur zwei Verbindungsbereiche und entsprechend zwei Zwischenräume reduziert werden.

[0021] In einer vorteilhaften Ausführungsform des Erzeugers ist zusätzlich eine sekundäre Gradientenspuleneinheit vorhanden, die insbesondere auf der dem Untersuchungsbereich abgewandten Seite der Grenzfläche des Feldrückflussraums angeordnet und zur Abschirmung der primären Gradientenspulenein-

heit ausgebildet ist. Dies hat den Vorteil, dass Verfälschungen des gewünschten raum-zeitlichen Gradientenmagnetfeldes durch Wirbelströme oder Hysterese-Effekte vermieden werden können.

[0022] Weitere vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung sind durch die Merkmale der Unteransprüche gekennzeichnet.

Ausführungsbeispiel

[0023] Es folgt die Erläuterung von mehreren Ausführungsbeispielen der Erfindung anhand der [Fig. 1](#) bis [Fig. 6](#). Es zeigen:

[0024] [Fig. 1](#) schematisch ein Magnetresonanzgerät mit einem C-förmigen Grundfeldmagneten und zwei Gradientenspuleneinheiten,

[0025] [Fig. 2](#) einen Schnitt durch eine beispielhafte erfindungsgemäße Gradientenspuleneinheit mit einer Primär- und einer Sekundärgradientenspuleneinheit mit mehreren Primär- und Sekundärgradientenspulen sowie mit integrierter Hochfrequenzantenne,

[0026] [Fig. 3](#) eine primärgradientenspulenseitige Aufsicht auf die Gradientenspuleneinheit aus [Fig. 2](#) zur Verdeutlichung von möglichen Leiteranordnungen von primären Gradientenspulen,

[0027] [Fig. 4](#) eine schematische Darstellung zur Erzeugung eines Gradientenfeldes in X-Richtung,

[0028] [Fig. 5](#) eine schematische Darstellung zur Erzeugung eines B1-Feldes und

[0029] [Fig. 6](#) eine Skizze zum B1-Feldverlauf.

[0030] [Fig. 1](#) zeigt schematisch ein offenes Magnetresonanzgerät **1** zur medizinischen Untersuchung von Patienten z.B. mittels MR-Tomographie oder MR-Spektroskopie in einem Grundmagnetfeld **B0**, welches mit einem C-förmigen Grundfeldmagneten **3** erzeugt wird. Das zeitlich konstante **B0**-Feld wird entsprechend des angegebenen Koordinatensystems in Y-Richtung erzeugt und liegt z.B. in der Größenordnung von 0,3 T. Schematisch dargestellt ist weiterhin eine Patientenliege **5** mit der ein Patient **7** in den Untersuchungsbereich **9** eingebracht werden kann.

[0031] Zwei an Polelemente **11A**, **11B** des Grundfeldmagneten **3** angepasste Erzeuger zeitvariabler Magnetfelder **13A**, **13B** erzeugen im Untersuchungsbereich **9** einerseits Gradientenfelder und andererseits B1-Hochfrequenzfelder, welche senkrecht zum Grundmagnetfeld **B0** ausgerichtet sind. Die Erzeuger **13A**, **13B** stellen somit Gradientenspuleneinheiten mit integrierten HF-Antenneneinheiten (Gradientenspulen-Hochfrequenzantennen-Einheiten) dar und ermöglichen z.B. eine orts aufgelöste MR-Bildaufnahme.

me. Die Erzeuger **13A**, **13B** weisen die erfindungsgemäßen Merkmale auf. Je nach Aufbau des MR-Geräts **1** kann es erforderlich sein nur eine (üblicherweise die vertikale) oder mehrere Raumrichtungen aktiv zu schirmen. Moderne Gradientenspuleneinheiten umfassen üblicherweise drei primäre Gradientenspulen zur Erzeugung von Gradientenmagnetfeldern in drei orthogonalen Raumrichtungen sowie drei entsprechende sekundäre Gradientenspulen zur Erzeugung von Magnetfeldern, die den primären Gradientenfeldern außerhalb des Untersuchungsbereichs **9** aktiv entgegenwirken.

[0032] Eine Gradientenspule weist üblicherweise eine oder mehrere als Gradientenspulenwicklungen ausgebildete Gradientenspulenleiter auf. Dieser bzw. diese werden zur Magnetfelderzeugung entsprechend bestromt. Die Gradientenspulenwicklung umfasst üblicherweise Bereiche, die das gewünschte Gradientenmagnetfeld im Wesentlichen erzeugen, sowie Bereiche mit rückführenden Leitern, die zur Wicklung des Leiters benötigt werden. Je weiter letztere von den das gewünschte Gradientenmagnetfeld erzeugenden Leiterbereiche entfernt angeordnet werden können, desto weniger beeinflusst das Magnetfeld der rückführenden Leiter im Untersuchungs-bereich **9** das gewünschte Magnetfeld und desto effizienter können die Gradientenmagnetfelder erzeugt werden. Beispiele für verschiedene Gradientenspulenwicklungen für verschiedene Raumrichtungen sind z.B. aus den eingangs genannten Patentschriften bekannt. Dabei sind auch Verschaltungen von primären und sekundären Gradientenspulen möglich.

[0033] Die Polelemente **11A**, **11B** und damit auch die Erzeuger **13A**, **13B** haben beispielsweise einen Durchmesser in der Größenordnung des Untersuchungs-bereichs **9**. Um einen möglichst großen Patientenkomfort durch ein möglichst offenes MR-Gerät **1** zu gewährleisten, weisen die Erzeuger **13A** und **13B** einen möglichst hohen baulichen Integrationsgrad von Gradientenspule(n) und HF-Antenne auf.

[0034] [Fig. 2](#) zeigt als ein Ausführungsbeispiel der Erfindung einen Schnitt durch eine perspektivisch dargestellte Hälfte eines erfindungsgemäßen Erzeugers **13C**. Eine derartige Gradientenspulen-HF-Antenneneinheit **13C** kann besonders vorteilhaft bei einem offenen MR-Gerät, wie es in [Fig. 1](#) skizziert ist, verwendet werden. Beispielsweise kann die dargestellte Gradientenspulen-HF-Antenneneinheit **13C** an dem unteren Polelement **11B** des C-förmigen Grundfeldmagneten **3** des Magnetresonanzgeräts **1** aus [Fig. 1](#) und eine weitere um 180° gedrehte, identische Gradientenspulen-HF-Antenneneinheit an dem oberen Polelement **11A** eingesetzt werden.

[0035] Die dargestellte Gradientenspulen-HF-Antenneneinheit **13C** umfasst einen scheibenförmigen Zentralbereich **14A**, einen den Zentralbereich **14A**

ringförmigen umgebenden Außenbereich **14B** und mehrere Verbindungsbereiche **14C**, **14F**. Gemeinsam bilden diese Bereiche eine plattenförmige primäre Gradientenspuleneinheit **15**. In den verschiedenen Bereichen verlaufen Gradientenspulenleiter für die Gradientenfelderzeugung in drei Raumrichtungen. Im Bereich **14A** sind elektrische Leiterbereiche **15A**, ...**15C** und im Bereich **14B** sind elektrische Leiterbereiche **15A'**, ...**15C'** der primären Gradientenspuleneinheit **15** für drei Raumrichtungen angeordnet (X-,Y-,Z-Gradientenspulen). Die Verbindungsbereiche **14C**, **14F** stellen eine Gradientenleiter führende Verbindung zwischen dem Zentralbereich **14A** und dem Außenbereich **14B** dar.

[0036] Parallel zur primären Gradientenspuleneinheit **15** ist auf der einem Untersuchungs-bereich **9A** abgewandten Seite eine sekundäre, ebenfalls scheibenförmige Gradientenspuleneinheit **18** angeordnet. Das durch Leiter der sekundären Gradientenspuleneinheit **18** erzeugte Magnetfeld schirmt das primäre Gradientenmagnetfeld z.B. im Bereich eines Metallgehäuses einer Polplatte ab, um ungewollte Wirbelströme und damit verbundene störende Magnetfelder zu verhindern. Die Dicken der primären und sekundären Gradientenspuleneinheiten **15**, **18** liegen z.B. in der Größenordnung von 2 cm.

[0037] Des Weiteren ist es vorteilhaft, einen Bereich im Erzeuger **13C** zur Aufnahme von Teilen eines passiven Shim-Systems und/oder eines Kühlsystems vorzusehen. Insbesondere ein stielartiger, die Zentren der Gradientenspuleneinheiten **15**, **18** verbindender Bereich **25** ermöglicht eine elektrische Verbindung mit im Zentralbereich **14A** angeordneten Leitern oder die Versorgung eines darin angeordneten Kühlsystems zur Kühlung der Gradientenleiter. Dies ist aufgrund der ummantelnden Ausbildung eines, im Folgenden beschriebenen, HF-abschirmenden elektrischen Leiters **19** ohne die Notwendigkeit von Hochfrequenzdurchführungen möglich.

[0038] Symmetrielinien **33A**, **33B** unterteilen den Erzeuger **13C** in vier gleichartige Winkelsegmente I, ...IV. Jedes der Winkелеlemente I, ... weist einen Zwischenraum **16A**, ... auf, der sich über einen Winkel α zwischen dem Zentralbereich **14A** und dem Außenbereich **14B** erstreckt. Die vier Zwischenräume **16A**, ... sind ringförmig um den Zentralbereich **14A** angeordnet, wobei der Ring durch die Verbindungsbereiche **14C**, ... unterbrochen ist. Die Zwischenräume **16A**, ... fungieren als Öffnung und Zugang für einen, auf der dem Untersuchungs-bereich **9A** abgewandten Seite liegenden, bezüglich der Zwischenräume **16A**, ... eine Hinterschneidung ausbildenden, Felddruckraum **17**. In den Zwischenräumen **16A**, ... sind Hochfrequenzantennenelemente **21A**, ... angeordnet, die Teil eines HF-Antennenschwingkreises sind, der zur Erzeugung von HF-Magnetfeldern und zum Empfang von MR-Signalen verwendet wird. Die An-

tennenelemente **21A**, ... sind stellvertretend für entsprechend aufwändige HF-Schaltungen durch Längskondensatoren schematisch dargestellt. Die HF-Schaltungen ermöglichen z.B. ein Abstimmen einer Resonanzfrequenz sowie ein Einspeisen und Auslesen von HF-Signalen.

[0039] Der schon erwähnte, als HF-Schirm wirkende elektrischer Leiter **19** umgibt die primäre Gradientenspuleneinheit **15** und kleidet die Wände des Feldrückflussraums **17** von Innen aus. Bevorzugt ist er dabei in seiner Struktur derart durchbrochen und/oder mit Kondensatoren verschaltet, dass er im Frequenzbereich der Gradientensignale keine signifikanten Wirbelströme entwickelt, jedoch im Bereich der MR-Frequenzen im Wesentlichen als eine zusammenhängende Leiterfläche wirkt und somit ein Eindringen der HF-Felder in die Gradientenspulenheiten **15**, **18** verhindert. Dazu kann der Hochfrequenzschirm **19** in bekannter Weise beispielsweise mehrere Lagen einer elektrisch leitfähigen Folie umfassen und mit kapazitiv überbrückten Schlitzern ausgebildet sein. Die Dicke des Leiters **19** liegt z.B. in der Größenordnung von 15 μm .

[0040] Die Primärgradientenspuleneinheit **15** kann abweichend von der Zylindersymmetrie eine beliebige Form aufweisen. Die Ausbildung der Primärgradientenspuleneinheit **15** als kreisförmige Platte, wie in [Fig. 2](#) dargestellt, ist besonders vorteilhaft bei offenen MR-Systemen, bei denen die beiden Polplatten des Magneten durch gegenüberliegende, kreisförmige Platten realisiert sind.

[0041] [Fig. 3](#) zeigt zur Verdeutlichung von möglichen Gradientenleiteranordnungen eine primärgradientenspulenseitige Aufsicht auf den Erzeuger **13c** aus [Fig. 2](#). Man erkennt wieder die Unterteilung in vier gleichartige Winkelsegmente I, ...IV, in denen sich beispielsweise die Zwischenräume **16A**, ... jeweils über einen Winkel von $\alpha = 45^\circ$ erstrecken. Dies ist im Winkelsegment I verdeutlicht. In den Zwischenräumen **16A**, ... können ein oder mehrere Antennenelemente angeordnet werden. Neben einem einzigen Antennenelement sind Anordnungen besonders vorteilhaft, die die Speisung eines einzigen Antennenelements **21A**, ... erlauben. Als Beispiel wurde im Zwischenraum **16A** eine Anordnung von drei HF-Antennenelementen **21E** angedeutet, die aufgrund der symmetrischen Anordnung ein Einspeisen eines HF-Signals am mittleren der HF-Antennenelemente **21E** erlaubt.

[0042] In den Winkelsegmenten II und III ist schematisch eine Hälfte einer Gradientenleiteranordnung für eine Gradientenfelderzeugung in X-Richtung angegeben. Gradientenleiter **35A** verlaufen in Z-Richtung von einer Seite des Außenbereichs **14B** über den Verbindungsbereich **14F**, den Zentralbereich **14A**, den Verbindungsbereich **14D** wieder zum Au-

ßenbereich **14B**. Die Gradientenfelderzeugung erfolgt hauptsächlich durch die parallel zueinander geführten Leiter **35A** im Zentralbereich **14A**.

[0043] Aufgrund der speichenartigen Anordnung der Verbindungsbereiche **14C**, ... können notwendige Rückleiter **35B** weiter radial nach außen in den Außenbereich **14B** verschoben werden. Alternativ können einige oder alle Rückführungen der Gradientenleiter **35A** als Schirmspulenleiter der sekundären Gradientenspuleneinheit **18** eingesetzt werden. Letzteres erfolgt durch Verschaltung der Leiter am Rand des Außenbereichs **14B** mit der Ebene unterhalb der Primärgradientenspuleneinheit **15**.

[0044] Den Verlauf der gesamten Gradientenspulenwicklung erhält man durch Spiegeln der Gradientenleiter **35A**, ... an der Symmetrielinie **33B**.

[0045] In einer weiteren Ausführungsform schließen sich Gradientenleiter auch innerhalb des Zentralbereichs **14A**. Dies ist schematisch im Winkelsegment IV durch die Leiter **35C** angedeutet. Dies hat allerdings den Nachteil, dass die im Zentralbereich weiter außen liegenden rückführenden Leiter der Gradientenfelderzeugung entgegenwirken. Da allerdings aufgrund der Verbindungsbereiche nicht für alle Gradientenleiter innerhalb des Zentralbereichs **14A** die Spulenwindungen geschlossen werden müssen, gibt es im Zentralbereich **14A** eine reduzierte Zahl von Rückleitern, die dem zu erzielenden Gradientenfeld entgegenwirken.

[0046] Eine Gradientenspulenwicklung zur Erzeugung eines Gradientenmagnetfeldes in Z-Richtung erhält man durch Drehen der Anordnung um 90° . Entsprechend werden die Verbindungsbereiche **14C** und **14E** zur Leiteraufnahme verwendet. Vorzugsweise befinden sich die Gradientenleiter für X- und Z-Richtung zumindest im Zentralbereich **14A** in verschiedenen Ebenen.

[0047] Eine Gradientenspulenwicklung für ein Gradientenmagnetfeld in Y-Richtung basiert im Wesentlichen auf einer spiralförmig verlaufenden Leiterstruktur, die sowohl vom Zentralbereich **14A** als auch vom Außenbereich **14B** aufgenommen werden kann.

[0048] Da allgemein die Größe der Zwischenräume **16A**, ... proportional zur Empfindlichkeit der Hochfrequenzantenne ist, kann durch Abstimmen der Größenverhältnisse der Zwischenräume **16A**, ... zu den Verbindungsbereichen **14C**, ... zwischen der Leistungsfähigkeit der Hochfrequenzantenne und der Gradientenspulen abgewogen werden. Dabei ist zu bedenken, dass eine reduzierte Sendeleistung durch größere HF-Verstärker ausgeglichen werden kann, wogegen die Geometrie der Gradientenleiteranordnung direkt in die Ortsauflösung eingeht. Durch die Verbindungsbereiche **14C**, ... können die Anforde-

rungen an das Gradientenspulendesign leichter erfüllt werden.

[0049] Wird nur eine einzige transversale Gradientenspule der oben beschriebenen Art verwendet, werden z.B. nur zwei gegenüberliegende Verbindungsbereiche **14C**, ... benötigt und es stehen größere Zwischenräume **16A**, ... für die Hochfrequenzfelderzeugung zur Verfügung.

[0050] Die Gradientenspulenteile **35A**, ... der primären Gradientenspule **15** sind in den drei Raumrichtungen X, Y und Z in **Fig. 2** in parallelen Ebenen angeordnet. Um ein Wechseln der Gradientenspulenteile von der primären Gradientenspule **15** zur sekundären Gradientenspule **18** im Außenbereich **14B** zu ermöglichen, ist der Außenbereich **14B** im Randbereich mit der sekundären Gradientenspule **18** verbunden. Beispielsweise weist diese Verbindung eine Dicke von zwei Gradiententeilerlagen à 4 mm auf.

[0051] **Fig. 4** zeigt schematisch einen räumlichen Verlauf eines Gradientenfeldes, wie es mit einer Anordnung von Gradiententeilern entsprechend den Winkelsegmenten II und III aus **Fig. 3** erzeugt wird. In der **Fig. 4** erkennt man im Schnitt entlang der Symmetrielinie **33A** die Gradiententeile **35A**, die im Zentralbereich **14A** senkrecht zur Symmetrielinie **33A** verlaufen, die im Außenbereich **14B** verlaufenden Gradiententeile **35B** und Leiter **41** der sekundären Gradiententeileinheit **18**. Die für die Gradiententeileanordnung nicht benötigten Verbindungsbereiche **14C** und **14E** sind nicht dargestellt.

[0052] Wird allgemein eine Gradientenspule der Primärgradientenspule **15** bestromt, so bilden sich ein Gradientenmagnetfeld aus, das sich mit dem Grundmagnetfeld B_0 innerhalb des Untersuchungsbereichs **9A** in der jeweiligen Raumrichtung überlagert. Wird gleichzeitig die entsprechende Gradientenspule der sekundären Gradiententeileinheit **18** bestromt, so kompensiert diese im Wesentlichen das Gradientenfeld der Primärgradiententeileinheit **15** außerhalb des Untersuchungsbereichs **9A**. Dazu fließt z.B. der Strom in den Gradiententeilern **35A** im Vergleich zum Strom in den Gradiententeilern **35B** und in den sekundären Gradiententeilern **41** in entgegengesetzter Richtung. Dabei kennzeichnet das Symbol \odot eine an dieser Stelle aus der Zeichenebene austretende Strom und das Symbol \otimes eine an dieser Stelle in die Zeichenebene eintretende Strom.

[0053] Entsprechend den dargestellten Stromrichtungen wurde in **Fig. 4** ein Gradientenmagnetfeld **43** zu einem Zeitpunkt angedeutet. Die Magnetfeldlinien des Gradientenmagnetfelds **43** schließen sich durch den Feldrückflussraum **17**.

[0054] Der Amplitudenverlauf einer Y-Komponente G_y des Gradientenmagnetfeldes **43** in X-Richtung ist

ebenfalls in **Fig. 4** am Beispiel eines negativen Gradienten gezeigt: Mit zunehmendem x-Wert nimmt das Gradientenfeld G_y ab und wechselt mittig die Richtung. Zur Erzeugung eines möglichst linearen Gradientenfeldes G_y ist es vorteilhaft, zwei gegenüberliegende Erzeuger zu verwenden.

[0055] Die **Fig. 5** und **Fig. 6** dienen der Verdeutlichung der Funktion des Erzeugers **13C** als HF-Antenne, mit der ein B_1 -Feld erzeugt und mit dem Magnetresonanzsignale empfangen werden können. **Fig. 5** verdeutlicht die Wirkungsweise anhand des Stromflusses bei der Erzeugung eines B_1 -Feldes und **Fig. 6** skizziert schematisch den dazugehörigen B_1 -Feldverlauf.

[0056] Zentraler Bestandteil der HF-Antenne sind die HF-Antennenelemente **21A**, ..., die jeweils speichenförmig die Zwischenräume **16A**, ... überbrücken. Sie bilden zusammen mit Bereichen des als Hochfrequenzschirm wirkenden elektrischen Leiters **19** den HF-Resonator. An jedem der HF-Antennenelemente **21A**, ... wird ein HF-Signal eingespeist (oder beim Empfang ausgelesen). In **Fig. 5** wurde angenommen, dass zu diesem Zeitpunkt nur in den HF-Antennenelementen **21A** und **21C** ein Strom fließt. Dies entspricht z.B. dem Zeitpunkt maximalen Stroms in den HF-Antennenelementen **21A** und **21C** und kein Strom in den HF-Antennenelementen **21B** und **21D**. Dies entspricht auch der Situation bei der Erzeugung eines linearen B_1 -Feldes mit zwei gegenüberliegenden HF-Antennenelementen.

[0057] Zur Erzeugung eines um die Richtung des Grundmagnetfelds B_0 rotierendes (zirkularen) B_1 -Feldes werden beispielsweise die HF-Antennenelemente **21A** und **21C** phasenversetzt zu den HF-Antennenelementen **21B** und **21D** mit einem HF-Signal gespeist.

[0058] Der wesentliche Strom fließt auf den Bereichen des elektrischen Leiters **19**, die die Zwischenräume **16A**, ... auskleiden. Diese Wände bilden eine Art Rückstromleiter im HF-Resonator. Die Stromrichtung der Einspeisung zu einem festen Zeitpunkt und die dazugehörigen Stromrichtungen auf den Wänden wurden jeweils mit Pfeilen gekennzeichnet. Allerdings breitet sich der Stromfluss zusätzlich, falls möglich, über den gesamten elektrischen Leiter **19** aus. Die Stromrichtungen in den beiden Hälften der Zwischenräume sind spiegelsymmetrisch zur Symmetrieachse durch die HF-Antennenelemente **21A** und **21D**. Bei einer derartigen Anregung von zwei spiegelsymmetrisch zueinander angeordneten Erzeugern wird im Untersuchungsraum **9A**, d.h. zwischen den Erzeugern, ein Magnetfeld **51** erzeugt, dessen Feldlinien **53** sich durch die Zwischenräume **21A**, **21C** und den Feldrückflussraum **17** schließen. Dabei kennzeichnet das Symbol \odot eine an dieser Stelle aus der Zeichenebene austretende Feldlinie

und das Symbol \otimes eine an dieser Stelle in die Zeichenebene eintretende Feldlinie.

[0059] Aufgrund des Phasenbezugs der Anregung der beiden Paare von HF-Resonatoren ergibt sich das zirkulare B1-Feld im Untersuchungsraum **9A**.

[0060] In [Fig. 6](#) sind zwei spiegelsymmetrisch zueinander angeordnete Erzeuger **13C**, **13D** im Schnitt durch die gegenüberliegenden HF-Antennenelemente **21A** und **21C** skizziert. Bei einer Bestromung gemäß [Fig. 5](#) bildet sich das B1-Feld **51** aus, dessen Magnetfeldlinien zwischen den Erzeugern **13C**, **13D** aus der Zeichenebene heraustreten (Symbol \odot) und im Feldrückflussraum **17** in die Zeichenebene hineintreten (Symbol \otimes) und sich somit schließt. Zusätzlich ist in [Fig. 6](#) ein Amplitudenverlauf des B1-Feldes in Schnittrichtung schematisch dargestellt, wie er mittig zwischen den Erzeugern vorliegt. Er weist im Bereich der HF-Antennenelemente **21A**, **21C** Maxima auf, ist aber im Untersuchungsraum **9A** im Wesentlichen konstant.

[0061] Je größer die Winkel sind, die die Verbindungsbereiche **14C**, ... einnehmen, desto leistungsfähiger sind zwar die Gradientenspulen, doch die Leistungsfähigkeit der HF-Antenne nimmt ab, da sie von der Größe der Zwischenräume abhängt. Ein auf die Anforderungen angepasstes Verhältnis der Größen von Zwischenraum und Verbindungsbereich wird durch ein Abwägen zwischen der Gradientenperformance und der Hochfrequenzperformance des Erzeugers bestimmt.

Patentansprüche

1. Erzeuger (**13A**, ...) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) mit einer primären Gradientenspuleneinheit (**15**) zur Erzeugung eines Gradientenmagnetfeldes in einem Untersuchungsbereich (**9**, **9A**) eines Magnetresonanzgeräts (**1**), wobei die primäre Gradientenspuleneinheit (**15**) zur Aufnahme mindestens eines Gradientenspulenleiters (**35A**, ...**35C**, **39A**, ...**39C**) einen Zentralbereich (**14A**), einen Außenbereich (**14B**) und mindestens einen die beiden Bereiche verbindenden Verbindungsbereich (**14C**, ...**14F**) aufweist, wobei der Außenbereich (**14B**) den Zentralbereich (**14A**) umgibt und wobei zwischen dem Zentralbereich (**14A**) und dem Außenbereich (**14B**) mindestens ein Zwischenraum (**16A**, ...**16D**) angeordnet ist, der frei vom Gradientenspulenleiter (**35A**, ...**35C**, **39A**, ...**39C**) der primären Gradientenspuleneinheit (**15**) ist und in dem ein Hochfrequenzantennenelement (**21A**, ...) angeordnet ist.

2. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach Anspruch 1, wobei sich die Bereiche (**14A**, ...**14F**) der primären Gradientenspuleneinheit (**15**) im Wesentlichen plattenartig, insbesondere zur planaren Gradientenspuleneinheit, er-

gänzen.

3. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach Anspruch 1 oder 2, wobei der Zentralbereich (**14A**) kreisrund, der Außenbereich (**14B**) kreisringartig und der Verbindungsbereich (**14C**, ...**14F**) speichenartig ausgebildet sind.

4. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die primäre Gradientenspuleneinheit (**15**) mehrere Gradientenspulenleiter (**35A**, ...**35C**, **39A**, ...**39C**) umfasst, die einzeln oder gemeinsam bestrombar sind.

5. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach Anspruch 4, wobei einer der Gradientenspulenleiter (**35A**, ...**35C**, **39A**, ...**39C**) vom Außenbereich (**14B**) über einen ersten der Verbindungsbereiche (**14C**, ...**14F**) zum Zentralbereich (**14A**) über einen zweiten der Verbindungsbereich (**14C**, ...**14F**) wieder zum Außenbereich (**14B**) verläuft.

6. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach Anspruch 4 oder 5, wobei einer der Gradientenspulenleiter (**35A**, ...**35C**, **39A**, ...**39C**) an einer Position den Außenbereich (**14B**) in Richtung der dem Untersuchungsbereich (**9**, **9A**) abgewandten Seite verlässt und anschließend, insbesondere auf der dem Untersuchungsbereich (**9**, **9A**) abgewandten Seite, zu einer anderen Position des Außenbereichs (**14B**) verläuft und dort wieder in diesen eintritt.

7. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei ein Feldrückflussraum (**17**) auf der dem Untersuchungsbereich (**9**, **9A**) abgewandten Seite der primären Gradientenspuleneinheit (**15**) angeordnet ist und wobei der Zwischenraum (**16A**, ...**16D**) den Feldrückflussraum (**17**) und Untersuchungsbereich (**9**, **9A**) miteinander derart verbindet, dass die zeitvariablen Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) im Zwischenraum (**16A**, ...**16D**), dem Feldrückflussraum (**17**) und dem Untersuchungsbereich (**9**, **9A**) verlaufen.

8. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die Gradientenspuleneinheit (**13A**, ...**13C**) einen als Hochfrequenzschirm wirkenden elektrischen Leiter (**19**) aufweist.

9. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach Ansprüche 8, wobei der elektrische Leiter (**19**) derart durchbrochen und/oder mit Kondensatoren verschaltet ist, dass er im Frequenzbereich der Gradientensignale keine signifikanten Wirbelströme entwickelt, jedoch im Bereich

der Magnetresonanzfrequenzen im Wesentlichen als eine zusammenhängende Leiterfläche wirkt.

10. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach Anspruch 8 oder 9, wobei die Bereiche der primären Gradientenspuleneinheit (**15**) jeweils einzeln von Abschnitten des elektrischen Leiters (**19**) umschlossen sind.

11. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach einem der Ansprüche 8 bis 10, wobei der elektrische Leiter (**19**) Teil eines Hochfrequenzantennen-Resonanzkreises ist, der zusätzlich mindestens eines der Antennenelemente (**21A**, ...) umfasst, das insbesondere den Abschnitt des elektrischen Leiters (**19**) um den Außenbereich (**14B**) mit dem Abschnitt des elektrischen Leiters (**19**) um den Zentralbereich (**14A**) hochfrequenzmäßig verbindet.

12. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach Ansprüche 11, wobei der elektrische Leiter (**19**) als Rückstromleiter eines das Hochfrequenzantennenelement (**21A**, ...) umfassenden Hochfrequenzantennen-Resonanzkreises ausgebildet ist.

13. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach einem der Ansprüche 8 bis 12, wobei der elektrische Leiter (**19**) derart ausgebildet ist, dass er auf der dem Untersuchungsbereich (**9**, **9A**) abgewandten Seite der primären Gradientenspuleneinheit (**15**) zusätzlich eine Grenzfläche des Feldrückflussraums (**17**) ausbildet, so dass der Feldrückflussraum (**17**) durch die Grenzfläche und durch die die Bereiche (**14A**, ...**14F**) der primären Gradientenspuleneinheit (**15**) umgebenden Abschnitte des elektrischen Leiters (**19**) begrenzt ist und zum Schließen von Magnetfeldlinien (**23**) eines Gradientenmagnetfeldes (**43**) der Gradientenspuleneinheit (**15**) und/oder eines Hochfrequenzmagnetfeldes (**51**, **53**, B1) des Hochfrequenzantennen-Resonanzkreises ausgebildet ist.

14. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach einem der Ansprüche 1 bis 13, wobei das Antennenelement (**21A**, ...) Mittel zur Einspeisung eines Hochfrequenzsignals zur Erzeugung eines Hochfrequenz-Magnetfeldes und/oder zum Auslesen von Magnetresonanzsignalen aufweist.

15. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei vier symmetrisch angeordnete Verbindungsbereiche (**14C**, ...**14F**) derart ausgebildet sind, dass sich vier Zwischenräume (**16A**, ...**16D**) ausbilden, in denen jeweils mindestens ein Antennenelement (**21A**, ...) angeordnet ist.

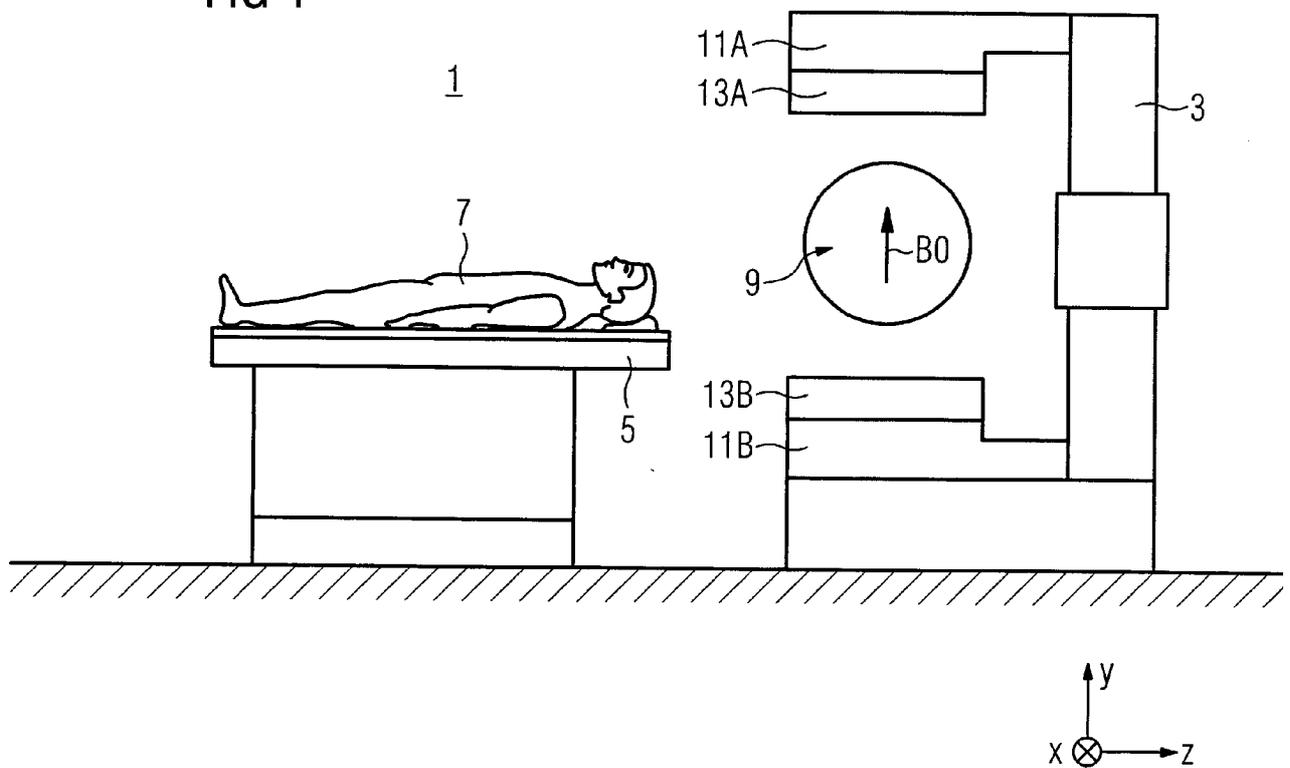
16. Erzeuger (**13A**, ...**13C**) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei zusätzlich eine sekundäre Gradientenspuleneinheit (**18**) vorhanden ist, die insbesondere auf der dem Untersuchungsbereich (**9**, **9A**) abgewandten Seite der Grenzfläche des Feldrückflussraums (**17**) angeordnet und zur Abschirmung von primären Gradientenmagnetfeldern ausgebildet ist.

17. Magnetresonanzgerät (**1**) mit einem Erzeuger (**13A**, ...) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) nach einem der vorangegangenen Ansprüche.

18. Magnetresonanzgerät (**1**) nach Anspruch 17, wobei das Magnetresonanzgerät (**1**) einen C-förmigen Permanentmagneten (**3**) mit zwei gegenüberliegenden Polplatten (**11A**, **11B**) zur Erzeugung eines Grundmagnetfeldes (B_0) aufweist, wobei zwischen den Polplatten (**11A**, **11B**) der Untersuchungsbereich (**9**, **9A**) angeordnet ist und wobei je ein Erzeuger (**13A**, ...) zeitvariabler Magnetfelder (**43**, **51**, **53**, B1) an einer der Polplatten (**11A**, **11B**) auf den dem Untersuchungsbereich (**9**, **9A**) zugewandten Seiten angeordnet ist.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

FIG 1



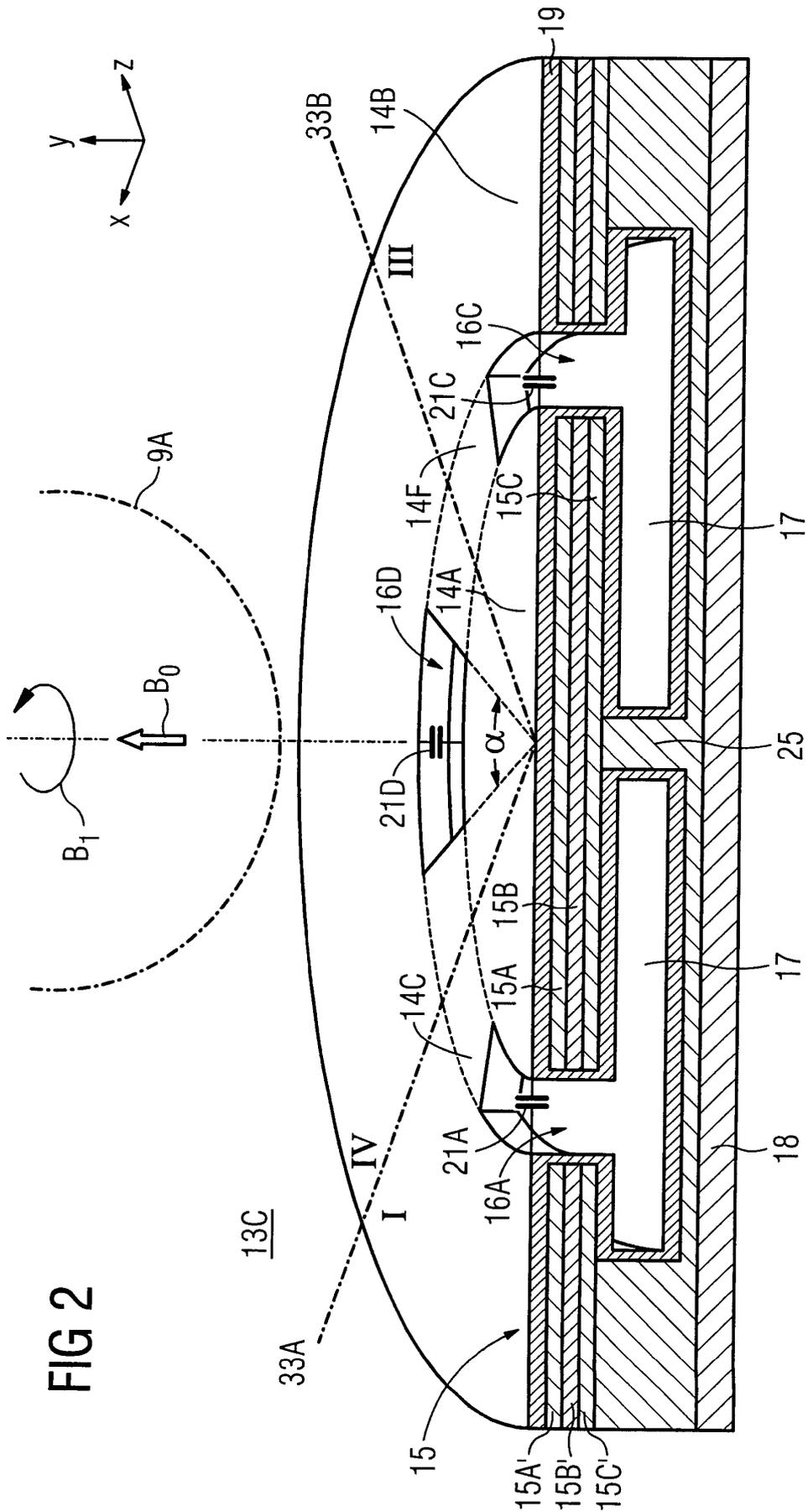


FIG 2

FIG 3

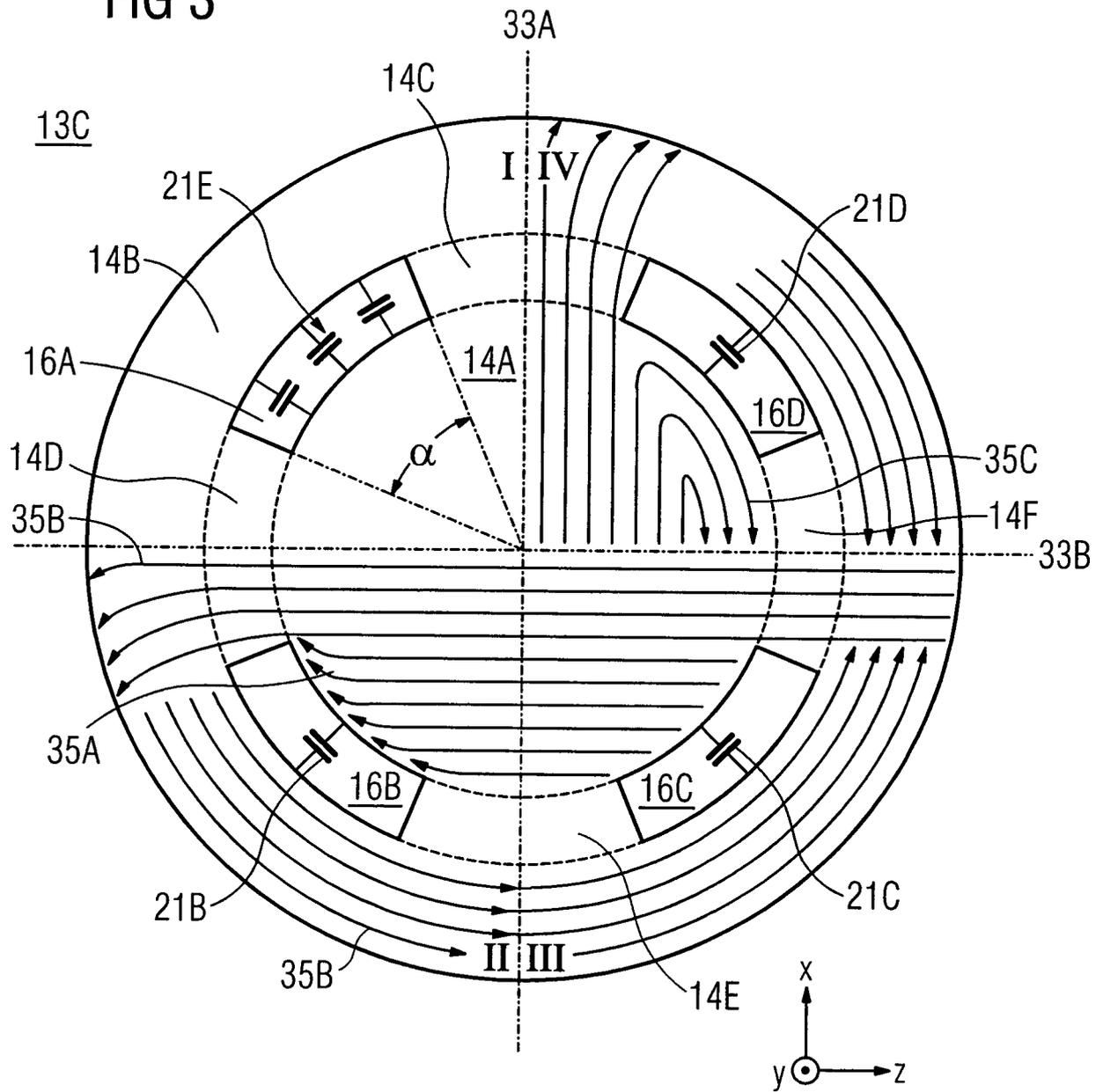


FIG 4

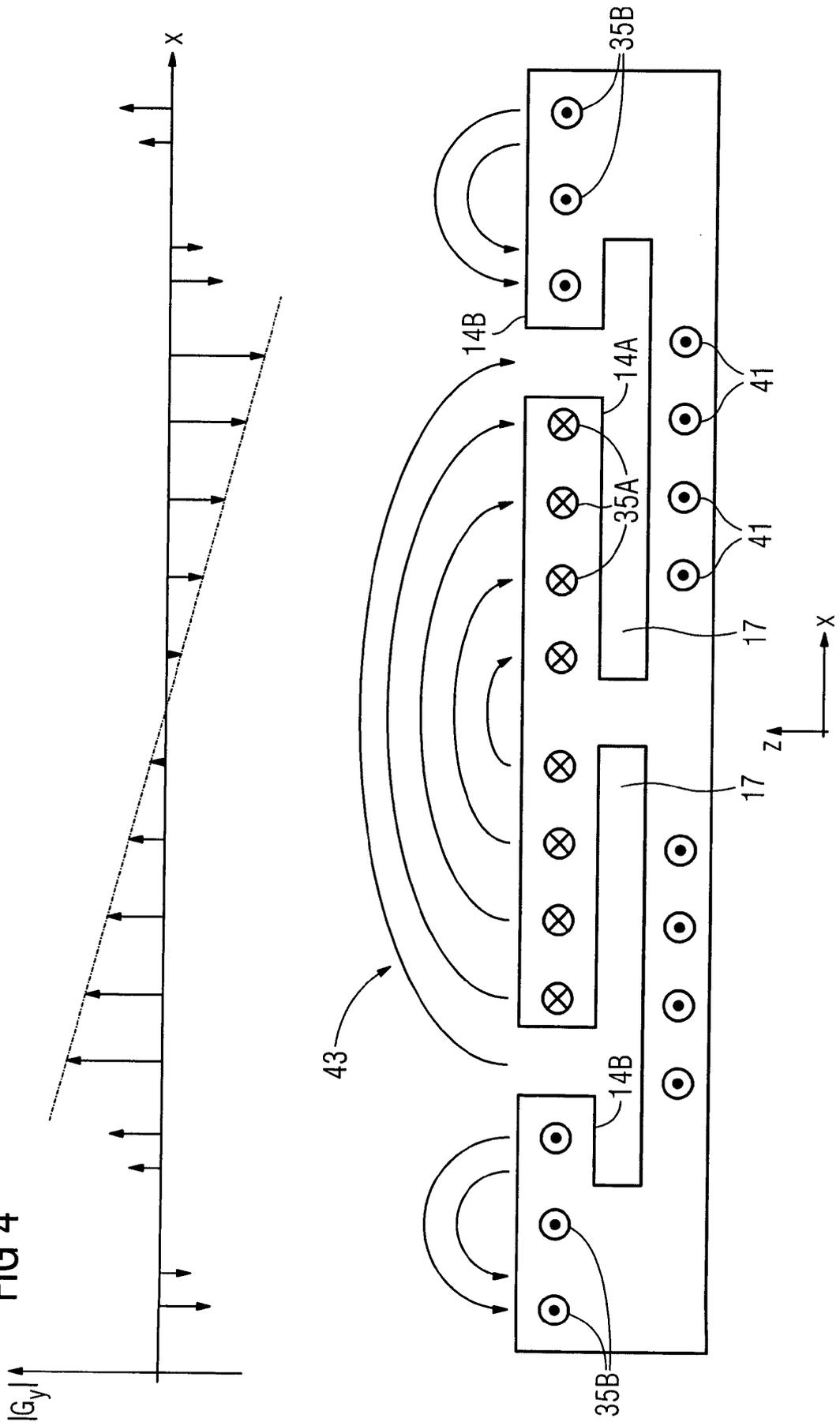


FIG 5

