



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 10 2005 018 937 B4 2007.11.22

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2005 018 937.7

(51) Int Cl.⁸: G01R 33/561 (2006.01)
G01R 33/58 (2006.01)

(22) Anmelddatum: 22.04.2005

(43) Offenlegungstag: 26.10.2006

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 22.11.2007

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 2 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Siemens AG, 80333 München, DE

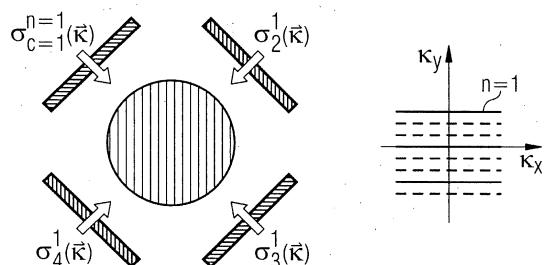
(72) Erfinder:
Griswold, Mark A., Dr., Shaker Heights, Ohio, US;
Kannengießer, Stephan, Dr., 91058 Erlangen, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:
DE 103 53 342 A1
DE 101 28 534 A1
US 66 80 610 B1
U.Katscher et al., "Transmit SENSE", Magn. Res. Med. 49 (2003), S. 144-150;
Y.Zhu, "Parallel excitation with an array of transmit coils", Magn. Reson. Med. 51 (2004), S. 775-784;
B.Madore, "UNFOLD-SENSE: a parallel MRI method with self-calibration and artifact suppression", Magn. Reson. Med. 52 (2004), S. 310-320;

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Gerät zur verbesserten sendeseitig beschleunigten PPA-basierten Volumen-selektiven Magnet-Resonanz-Bildgebung sowie Computersoftwareprodukt zur Implementierung des Verfahrens**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Bestimmung Sendespulen-spezifischer HF-Anregungspulse für ein Sendespulen-Array zur beschleunigten PPA-basierten Volumen-selektiven Anregung eines Gewebebereiches eines zu untersuchenden Patienten mit einem Kernspintomographie-Gerät, aufweisend einen Grundfeldmagneten, ein Gradientenspulensystem, ein Sendespulen-Array und ein Empfangsspulen-Array, aufweisend die folgenden Schritte:
a) Einstrahlen einer ersten Folge Volumen-selektiver HF-Anregungspulse entlang einer ersten auf Basis eines Beschleunigungsfaktors AF reduzierten Sende-Trajektorie im Sende-k-Raum durch eine erste Spule des Sendespulen-Arrays
b) Empfangen der von dieser ersten HF-Anregung erzeugten Kernspinresonanz-Antwortsignale aus dem angeregten Gewebebereich entlang einer vollständigen Empfangs-Trajektorie im Empfangs-k-Raum mit allen Spulen des Empfangsspulen-Arrays gleichzeitig
c) Wiederholen der Schritte a) und b) nacheinander mit allen weiteren Spulen des Sendespulen-Arrays
d) gleichzeitiges Einstrahlen einer zweiten Folge Volumenselektiver HF-Anregungspulse entlang einer weiteren reduzierten Sende-Trajektorie im Sende-k-Raum durch alle Spulen des Sendespulen-Arrays; und wiederum
e) Empfangen der von dieser zweiten HF-Anregung erzeugten Kernspinresonanz-Antwortsignale aus dem angeregten Gewebebereich entlang derselben vollständigen

Empfangs-Trajektorie im Empfangs-k-Raum mit allen Spulen des...



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich allgemein auf die Kernspintomographie (Synonym: Magnetresonanztomographie-MRT) wie sie in der Medizin zur Untersuchung von Patienten Anwendung findet. Dabei bezieht sich die vorliegende Erfindung insbesondere auf ein Verfahren sowie ein Kernspintomographiegerät zum Durchführen eines solchen, welches eine Verbesserung hinsichtlich sendeseitig beschleunigter PPA-basierter Volumen-selektiver Bildgebungsverfahren (engl.: Partially Parallel Acquisition-PPA) darstellt.

[0002] Die MRT basiert auf dem physikalischen Phänomen der Kernspinresonanz und wird als bildgebendes Verfahren seit über 20 Jahren in der Medizin und in der Biophysik erfolgreich eingesetzt. Bei dieser Untersuchungsmethode wird das Objekt einem starken, konstanten Magnetfeld ausgesetzt. Darauf richten sich die Kernspins der Atome in dem Objekt, welche vorher regellos orientiert waren, aus. Hochfrequenzfelder können nun diese "geordneten" Kernspins zu einer bestimmten Schwingung anregen. Diese Schwingung erzeugt in der MRT das eigentliche Messsignal, welches mittels geeigneter Empfangsspulen aufgenommen wird. Durch den Einsatz inhomogener Magnetfelder, erzeugt durch Gradientenspulen, kann dabei das Messsignal in alle drei Raumrichtungen räumlich kodiert werden. Das Verfahren erlaubt eine freie Wahl des abzubildenden Volumens, wodurch Schnittbilder des menschlichen Körpers in alle Richtungen aufgenommen werden können. Die MRT als Schnittbildverfahren in der medizinischen Diagnostik, zeichnet sich in erster Linie als "nichtinvasive" Untersuchungsmethode durch ein vielseitiges Kontrastvermögen aus. Aufgrund der hervorragenden Darstellbarkeit des Weichgewebes hat sich die MRT zu einem der Röntgencomputertomographie (CT) vielfach überlegenen Verfahren entwickelt. Die MRT basiert heute auf der Anwendung von Spinecho- und Gradientenecho-Sequenzen, die bei Messzeiten in der Größenordnung von Sekunden bis Minuten eine exzellente Bildqualität ermöglichen.

[0003] Die Aufnahme der Daten in der MRT geschieht im sogenannten (Empfangs-)k-Raum (Synonym: Frequenzraum). Das MRT-Bild im sogenannten Bildraum ist mittels Fourier-Transformation mit den MRT-Daten im k-Raum verknüpft. Die Ortskodierung des Objektes, welche den k-Raum aufspannt, kann auf verschiedene Weise erfolgen, am gebräuchlichsten jedoch ist eine kartesische oder eine projektionsweise Abtastung. Die Kodierung erfolgt mittels Gradienten in allen drei Raumrichtungen.

[0004] Die Hochfrequenz-Anregung des Objekts kann auf Basis ähnlicher Ortskodierung durch den Einsatz von Gradientenfeldern während der Anregung Volumen-selektiv durchgeführt werden. Die

ortsveränderliche Stärke der Anregung, d.h. der vom Ort abhängige Flipwinkel, entspricht für kleine Flipwinkel in erster Näherung analog zum Empfangsfall der Fourier-Transformierten des HF-Signals im Sende-k-Raum. Eine zeitlich effiziente Volumen-selektive Anregung war bisher nur in einer Raumrichtung, d.h. in Form von Schichtselektion, möglich, da die entsprechende k-Raum-Trajektorie einer einzelnen Linie im 3D-k-Raum entspricht.

[0005] Mehrdimensionale Volumen-selektive Anregungen bedingen das Aufspannen mehrdimensionaler k-Raum-Trajektorien. Dies benötigt, analog zur sogenannten 2D- und 3D-Phasenkodierung im Empfangsfall, ein Vielfaches an Zeit und verhindert zur Zeit die Anwendung der Volumen-selektiven Anregung, z.B. in der Spektroskopie, oder zur Homogenisierung der Flipwinkelverteilung bei Hochfeldgeräten.

[0006] Die effektivsten Verfahren zur Verkürzung der Bildmesszeit im Empfangsfall bei kartesischer Abtastung basieren auf einer Verringerung der Anzahl an zeitaufwendigen Phasenkodierschritten N_y und der Verwendung mehrerer Signalaufnahmespulen, was als sogenannte "teilweise parallele Akquisition", und im weiteren Verlauf mit PPA (Engl.: Partially Parallel Acquisition) bezeichnet wird. Dieses Prinzip kann auf Daten-Akquisitionsverfahren mit radialer oder spiralförmiger Abtastung übertragen werden indem die Anzahl an zeitaufwendigen Winkelschritten N_ϕ bzw. die Anzahl oder die Länge der Spiralarme verringert wird. Im Folgenden wird ohne Beschränkung der Allgemeinheit im Sende- und Empfangsfall eine kartesische k-Raum-Abtastung betrachtet. Um zwischen Sende- und Empfangs-k-Raum-Trajektorien zu unterscheiden, werden die ersten mit dem Symbol k (dem griechischen kappa) bezeichnet.

[0007] Der Grundgedanke bei der konventionellen empfangsseitigen PPA-Bildgebung ist, dass die k-Raum-Daten nicht von einer Einzelpule, sondern von beispielsweise in Form eines Spulenarrays linear, ringförmig oder matrixartig um das Objekt angeordneten Komponentenspulen aufgenommen werden. Infolge ihrer Geometrie liefert jede der räumlich unabhängigen Komponenten des Spulenarrays gewisse räumliche Informationen, welche genutzt werden, um durch eine Kombination der simultan akquirierten Spulendaten eine vollständige Ortskodierung zu erreichen. Das bedeutet, dass aus einer einzigen aufgenommenen k-Raum-Zeile mehrere "ausgelassene" Zeilen im k-Raum bestimmt werden können.

[0008] Empfängerseitige PPA-Verfahren verwenden also räumliche Informationen, die in den Komponenten einer Spulenordnung enthalten sind, um partiell die zeitaufwendige Weiterschaltung des Phasenkodier-Gradienten zu ersetzen. Dadurch wird die Bildmesszeit entsprechend dem Verhältnis von Anzahl der Zeilen des reduzierten Datensatzes zur An-

zahl der Zeilen des konventionellen (also vollständigen) Datensatzes reduziert. In einer typischen PPA-Akquisition wird im Vergleich zu der herkömmlichen Akquisition nur ein Bruchteil (1/2, 1/3, 1/4, etc.) der k-Raumzeilen akquiriert. Es wird dann eine spezielle Rekonstruktion auf die k-Raumdaten angewandt, um die fehlenden Zeilen zu rekonstruieren und damit das volle Field of View (FOV)-Bild in einem Bruchteil der Zeit zu erhalten. Das FOV wird gemäß dem Faktor $2\pi/k$ durch die Größe des betrachteten k-Raums festgelegt.

[0009] Etablierte PPA-Verfahren für kartesische Daten-Akquisition wie SENSE oder GRAPPA machen von dem sogenannten Fourier-Shift-Theorem Gebrauch, indem durch Kombination der Einzelspulen-Signale dem Kernresonanzsignal entlang der Phasenkodierrichtung eine zusätzliche Phase Δk_y aufgeprägt wird. Hierdurch entstehen im Frequenzraum neue k_y -Zeilen, die nicht mehr explizit gemessen werden müssen, wodurch sich die Messzeit reduziert.

[0010] Bei allen PPA-Verfahren werden notwendigerweise auch zusätzliche Kalibrierungs-Datenpunkte akquiriert (zusätzlich gemessene zentrale Referenzzeilen), die den eigentlichen Messdaten hinzugefügt werden und auf deren Basis ein reduzierter Datensatz überhaupt erst wieder vervollständigt werden kann.

[0011] In jüngster Zeit wurden auch Sender-seitige PPA-Bildgebungsverfahren vorgeschlagen die zusätzlich eine beschleunigte Volumen-selektive Anregung ermöglichen. Voraussetzung dafür sind mehrere, gleichzeitig betriebene Sende-Spulen die in ihrer Anordnung um das zu untersuchende Objekt ein PPA-Sendespulen-Array bilden. Sendespulen-seitige Beschleunigung wird dadurch erreicht, dass (analog zur beschleunigten Empfänger-seitigen PPA-Datenakquisition entlang einer unterabgetasteten Empfangs-Trajektorie im Empfangs-k-Raum) die Anregung des zu untersuchenden Bereiches im Sende-k-Raum entlang unterabgetasteter Sende-Trajektorien erfolgt, welche jedoch ein Anregungsprofil erzeugen, das dem der vollständigen Sende-Trajektorie entspricht. Dazu müssen in den einzelnen Elementen des Sendespulen-Arrays individuell bestimmte HF-Pulsformen verwendet werden. Eine Möglichkeit dieser Bestimmung ist unter dem Namen "Transmit-SENSE" veröffentlicht worden (U.Katsscher, P.Bornert, C.Leussler, JS.van den Brink, Transmit SENSE, Magnetic Resonance in Medicine, 2003 Jan; 49(1): 144-50) und weist Parallelen zum Empfänger-seitigen SENSE-Verfahren auf. Es hat den Nachteil, dass die Empfindlichkeitsprofile aller beteiligten Sendespulen (Sendespulen-Sensitivitäten) bekannt sein müssen. Die messtechnische Bestimmung dieser Sende-Sensitivitäten stellt ein zentrales Problem dar, da diese nicht unabhängig von

den Empfangs-Sensitivitäten gemessen werden können. Selbst bei Verwendung derselben Hochfrequenz-Spulen zur Anregung und zum Empfang, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Sendespulen-Empfindlichkeiten und die Empfängerspulen-Sensitivitäten identisch sind, da insbesondere bei hohen Feldstärken sich Sende-Feld und Empfangsfelder signifikant unterscheiden.

[0012] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, ein Verfahren und ein Gerät zur Durchführung des Verfahrens bereitzustellen um die Leistungsfähigkeit der beschleunigten Volumen-selektiven Anregung zu verbessern und zwar ohne Kenntnis der Spulensensitivitäten, bzw. ohne diese explizit bestimmen zu müssen, insbesondere bei Verwendung verschiedener Spulenarrays im Sende- und Empfangsfall.

[0013] Diese Aufgabe wird gemäß der Erfindung durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche gelöst. Die abhängigen Ansprüche bilden den zentralen Gedanken der Erfindung in besonders vorteilhafter Weise weiter.

[0014] Erfindungsgemäß wird also ein Verfahren beansprucht zur Bestimmung Sendespulen-spezifischer HF-Anregungspulse für ein Sendespulen-Array zur beschleunigten PPA-basierten Volumenselektiven Anregung eines Gewebebereiches eines zu untersuchenden Patienten mit einem Kernspintomographie-Gerät, aufweisend einen Grundfeldmagneten, ein Gradientenspulensystem, ein Sendespulen-Array und ein Empfangsspulen-Array,

aufweisend die folgenden Schritte:

- Einstrahlen einer ersten Folge Volumen-selektiver HF-Anregungspulse entlang einer ersten auf Basis eines Beschleunigungsfaktors AF reduzierten Sende-Trajektorie im Sende-k-Raum durch eine erste Spule des Sendespulen-Arrays
- Empfangen der von dieser ersten HF-Anregung erzeugten Kernspinresonanz-Antwortsignale aus dem angeregten Gewebebereich entlang einer vollständigen Empfangs-Trajektorie im Empfangs-k-Raum mit allen Spulen des Empfangsspulen-Arrays gleichzeitig
- Wiederholen der Schritte a) und b) nacheinander mit allen weiteren Spulen des Sendespulen-Arrays
- gleichzeitiges Einstrahlen einer zweiten Folge Volumenselektiver HF-Anregungspulse entlang einer weiteren reduzierten Sende-Trajektorie im Sende-k-Raum durch alle Spulen des Sendespulen-Arrays, und wiederum
- Empfangen der von dieser zweiten HF-Anregung erzeugten Kernspinresonanz-Antwortsignale aus dem angeregten Gewebebereich entlang derselben vollständigen Empfangs-Trajektorie im Empfangs-k-Raum mit allen Spulen des Empfangsspulen-Arrays gleichzeitig

- f) im Falle AF > 2 Wiederholen der Schritte d) und e) bis die Gesamtheit aller reduzierten Sende-Trajektorien eine vollständige Sende-Trajektorie bildet
- g) Ermitteln von Kombinations-Koeffizienten auf Basis aller gemessenen Antwortsignale
- h) Berechnen von Sendespulen-spezifischen HF-Anregungspulsen auf Basis der ermittelten Kombinations-Koeffizienten die bei gleichzeitigem Einstrahlen entlang der ersten reduzierten Sende-Trajektorie durch mehrere oder alle Spulen des Sendespulen-Arrays ein gewünschtes Anregungsprofil erzeugen.

[0015] Dabei kann es vorteilhaft sein, wenn die vollständige Sende-Trajektorie und die vollständige Empfangs-Trajektorie erfindungsgemäß gleich sind.

[0016] Es kann aber auch vorteilhaft sein, wenn Sende-Trajektorie und Empfangs-Trajektorie unterschiedlich sind, erfindungsgemäß jedoch in ihren k-Raum-Koordinaten eine geometrische Beziehung aufweisen, die eine Berechnung von Kombinations-Koeffizienten auf Basis der Empfangs-Trajektorie und eine Anwendung dieser Kombinations-Koeffizienten auf Basis der ersten Sende-Trajektorie ermöglicht.

[0017] Vorteilhafterweise haben dabei Sende-Trajektorie und/oder Empfangs-Trajektorie im k-Raum kartesische Form oder aber Sende-Trajektorie und/oder Empfangs-Trajektorie sind im k-Raum radial bzw. spiralförmig ausgebildet.

[0018] Ebenfalls vorteilhaft kann es sein, wenn als Sendespulen-Array und Empfangsspulen-Array ein einziges Spulen-Array verwendet wird, d.h. wenn Sendespulen-Array und Empfangsspulen-Array identisch sind.

[0019] Ferner wird ein Verfahren beansprucht welches zur Bestimmung Sendespulen-spezifischer HF-Anregungspulse für ein Sendespulen-Array zur beschleunigten PPA-basierten Volumenselektiven Anregung eines Gewebebereiches eines zu untersuchenden Patienten mit einem Kernspintomographie-Gerät, aufweisend einen Grundfeldmagneten, ein Gradientenspulensystem, ein Sendespulen-Array und ein Empfangsspulen-Array auf gemessenen oder geschätzten Sendespulen-Sensitivitäten des Sendespulen-Arrays basiert. Dieses Verfahren weist erfindungsgemäß die folgenden Schritte auf:

- a) Messen oder Schätzen der Sende-Sensitivitäten des Sendespulen-Arrays
- b) Erzeugen von virtuellen Kalibrierungs-Messwerten auf Basis der Sendespulen-Sensitivitäten sowohl für jede einzelne Spule des Sendespulen-Arrays entlang einer ersten auf Basis eines Beschleunigungsfaktors AF reduzierten Sende-Trajektorie, als auch für eine Kombination der

Spulen des Sendespulen-Arrays entlang AF-1 weiteren reduzierten Sende-Trajektorien

- c) Ermitteln von Kombinations-Koeffizienten auf Basis der virtuellen Kalibrierungs-Messwerte
- d) Berechnen von Sendespulen-spezifischen HF-Anregungspulsen auf Basis der ermittelten Kombinations-Koeffizienten die bei gleichzeitigem Einstrahlen entlang der ersten reduzierten Sende-Trajektorie durch mehrere oder alle Spulen des Sendespulen-Arrays ein gewünschtes Anregungsprofil erzeugen.

[0020] Im Rahmen dieses eben beschriebenen Verfahrens ist es gegebenenfalls vorteilhaft, wenn die Sende-Trajektorie im k-Raum kartesische Form hat oder aber im k-Raum radial bzw. spiralförmig ausgebildet ist.

[0021] Ferner wird ein Gerät beansprucht, welches zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 9 geeignet ist.

[0022] Weiterhin wird ein Computersoftwareprodukt beansprucht, welches ein Verfahren gemäß den obigen Ansprüchen 1 bis 9 implementiert, wenn es auf einer mit einem Kernspintomographiegerät verbundenen Recheneinrichtung läuft.

[0023] Weitere Vorteile, Merkmale und Eigenschaften der vorliegenden Erfindung werden im Folgenden anhand von Ausführungsbeispielen bezugnehmend auf die begleitenden Zeichnungen näher erläutert.

[0024] [Fig. 1](#) zeigt eine schematische Darstellung eines MRT-Gerätes zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens,

[0025] [Fig. 2A](#) zeigt schematisch eine (eindimensionale) schichtselektive Anregung,

[0026] [Fig. 2B](#) zeigt schematisch eine (zweidimensionale) volumenselektive Anregung,

[0027] [Fig. 3](#) zeigt schematisch das Senden jeweils einer Spule eines PPA-Sendespulen-Arrays entlang einer ersten reduzierten Sende-Trajektorie und das dazugehörige gleichzeitige Empfangen mit allen Empfangsspulen des PPA-Empfangsspulen-Arrays,

[0028] [Fig. 4](#) zeigt schematisch das gleichzeitige Senden aller Spulen eines PPA-Sendespulen-Arrays entlang einer zweiten bzw. einer dritten reduzierten Sende-Trajektorie und das dazugehörige gleichzeitige Empfangen mit allen Empfangsspulen des PPA-Empfangsspulen-Arrays,

[0029] [Fig. 5](#) zeigt schematisch das gleichzeitige Senden aller Spulen eines PPA-Sendespulen-Arrays mit den auf Basis des erfindungsgemäßen Kaliberverfahrens ermittelten HF-Anregungspulsen die zu

einer Anregung entlang der ersten reduzierten Sende-Trajektorie unter Beibehalten des gewünschten Volumen-selektiven Anregungsprofils führt,

[0030] [Fig. 6](#) zeigt den Realteil einer ersten und einer zweiten reduzierten Sendetrajektorie für AF = 2, und

[0031] [Fig. 7](#) zeigt eine Schicht des Objektes mit homogener Anregung (links) und mit beschleunigter selektiver Anregung (rechts).

[0032] [Fig. 1](#) zeigt eine schematische Darstellung eines Magnetresonanzbildgebungs- bzw. Kernspintomographiegerätes mit einer erfundungsgemäßen Sende- und Empfangscharakteristik. Der Aufbau des Kernspintomographiegerätes entspricht dabei zum größten Teil dem Aufbau eines herkömmlichen Tomographiegerätes. Ein Grundfeldmagnet **1** erzeugt ein zeitlich konstantes starkes Magnetfeld zur Polarisierung bzw. Ausrichtung der Kernspins im Untersuchungsbereich eines Objekts, wie z.B. eines zu untersuchenden Teils eines menschlichen Körpers. Die für die Kernspintomographiemessung erforderliche hohe Homogenität des Grundfeldmagnets ist in einem Messvolumen V definiert, in das die zu untersuchenden Teile des menschlichen Körpers eingebracht werden. Zur Unterstützung der Homogenitätsanforderungen und insbesondere zur Eliminierung zeitlich invariabler Einflüsse werden an geeigneter Stelle sogenannte Shim-Bleche aus ferromagnetischem Material angebracht. Zeitlich variable Einflüsse werden durch Shim-Spulen **2** eliminiert, die durch eine Shim-Stromversorgung angesteuert werden.

[0033] In den Grundfeldmagneten **1** ist ein Gradientenspulensystem **3** eingesetzt, das aus mehreren Wicklungen, sogenannten Teilwicklungen besteht. Jede Teilwicklung wird von einem Verstärker mit Strom zur Erzeugung eines linearen Gradientenfeldes in die jeweilige Richtung des kartesischen Koordinatensystems versorgt. Die erste Teilwicklung des Gradientenfeldsystems **3** erzeugt dabei einen Gradienten G_x in x-Richtung, die zweite Teilwicklung einen Gradienten G_y in y-Richtung und die dritte Teilwicklung einen Gradienten G_z in z-Richtung. Jeder Verstärker umfasst einen Digital-Analog-Wandler, der von einer Sequenzsteuerung **18** zum zeitrichtigen Erzeugen von Gradientenpulsen angesteuert wird.

[0034] Innerhalb des Gradientenfeldsystems **3** befindet sich eine Hochfrequenzantenne **4**, die die von einem Hochfrequenzleistungsverstärker abgegebenen Hochfrequenzpulse in ein magnetisches Wechselfeld zu Anregung der Kerne und Ausrichtung der Kernspins des zu untersuchenden Objekts bzw. des zu untersuchenden Bereiches des Objekts umsetzt. Die Hochfrequenzantenne **4** besteht aus mehreren HF-Sendespulen und mehreren HF-Empfangsspulen in Form einer z.B. linearen Anordnung von Kompo-

nentenspulen bei PPA-Bildgebungssystemen. Von den HF-Empfangsspulen der Hochfrequenzantenne **4** wird auch das von den präzidierten Kernspins ausgehende Wechselfeld, d.h. in der Regel die von einer Pulssequenz aus einem oder mehreren Hochfrequenzpulsen und einem oder mehreren Gradientenpulsen hervorgerufenen Kernspinechosignale in eine Spannung umgesetzt, die über einen Verstärker **7** einem Hochfrequenz-Empfangskanal **8** eines Hochfrequenzsystems **22** zugeführt wird. Das Hochfrequenzsystem **22** umfasst weiterhin einen oder mehrere Sendekanäle (diese sind in Bauteil **9** zusammengefaßt), in welchen die Hochfrequenzpulse für die Anregung der magnetischen Kernresonanz erzeugt werden. Zur sendeseitig beschleunigten Anregung müssen mindestens zwei unabhängige Sendekanäle zur Verfügung stehen. Dabei werden die jeweiligen Hochfrequenzpulse aufgrund einer vom Anlagenrechner **20** vorgegebenen Pulssequenz in der Sequenzsteuerung **18** digital als Folge komplexer Zahlen dargestellt. Diese Zahlenfolge wird als Real- und als Imaginäranteil über jeweils einen Eingang **12** einem Digital-Analog-Wandler im Hochfrequenzsystem **22** und von diesem einem Sendekanal **9** zugeführt. Im Sendekanal **9** werden die Pulssequenzen einem Hochfrequenz-Trägersignal aufmoduliert, dessen Basisfrequenz der Resonanzfrequenz der Kernspins im Messvolumen entspricht.

[0035] Die Umschaltung von Sende- auf Empfangsbetrieb erfolgt über eine Sende-Empfangsweiche **6**. Die HF-Sendespulen der Hochfrequenzantenne **4** strahlen die Hochfrequenzpulse zur Anregung der Kernspins in das Messvolumen V ein und die HF-Empfangsspulen tasten das resultierende Echo-Signal ab. Die entsprechend gewonnenen Kernresonanzsignale werden im Empfangskanal **8** des Hochfrequenzsystems **22** phasenempfindlich demoduliert und über einen jeweiligen Analog-Digital-Wandler in Realteil und in Imaginärteil des Messsignals umgesetzt. Durch einen Bildrechner **17** wird aus den derart gewonnenen Messdaten ein Bild rekonstruiert. Die Verwaltung der Messdaten, der Bilddaten und der Steuerprogramme erfolgt über den Anlagenrechner **20**. Aufgrund einer Vorgabe mit Steuerprogrammen kontrolliert die Sequenzsteuerung **18** die Erzeugung der jeweils gewünschten Pulssequenzen und das entsprechende Abtasten des k-Raums. Insbesondere steuert die Sequenzsteuerung **18** dabei das zeitrichtige Schalten der Gradienten, das Aussenden der Hochfrequenzpulse mit definierter Phase und Amplitude sowie den Empfang der Kernresonanzsignale. Die Zeitbasis für das Hochfrequenzsystem **22** und die Sequenzsteuerung **18** wird von einem Synthesizer **19** zur Verfügung gestellt. Die Auswahl entsprechender Steuerprogramme zur Erzeugung eines Kernspinbildes sowie die Darstellung des erzeugten Kernspinbildes erfolgt über ein Terminal **21**, das eine Tastatur sowie einen oder mehrere Bildschirme umfasst.

[0036] Um mit einem MRT-Gerät sendeseitig und empfangsseitig PPA-basierte Messungen durchführen zu können, ist es notwendig, insbesondere in Phasenkodierrichtung (y-Richtung) nicht eine einzelne Spule zu verwenden, sondern eine Anordnung aus mehreren Sende- und Empfangs-Spulen. Diese sogenannten Komponentenspulen werden jeweils zu einem Sende-Spulenarray und einem Empfangs-Spulenarray verbunden, wobei die Spulen beider Arrays gegenseitig benachbart bzw. überlappend und verschachtelt angeordnet sind. Die räumliche Anordnung der Komponentenspulen ist äußerst komplex. Damit die Spulen eines Spulenarrays individuell anregen können benötigt jede Sende-Spule Hardware-seitig eine Vorrichtung zur Modulation, z.B. ein eigenes in Echtzeit verstellbares Dämpfungsglied oder einen eigenen Transmitter, bestehend aus Digital-Analog-Wandler, Frequenzmodulator und HF-Verstärker. Für individuelles Empfangen benötigt jede Empfangs-Spule ihren eigenen Empfänger, jeweils bestehend aus Vorverstärker, Mischer und Analog-Digital-Wandler.

[0037] Das erfindungsgemäße Verfahren besteht nun darin, bei sendeseitig beschleunigten PPA-Verfahren ein Autokalibrierverfahren wie GRAPPA einzusetzen, um die Leistungsfähigkeit insbesondere beschleunigter Volumenselektiver Anregungen zu verbessern ohne die Sende-Spulen-Sensitivitäten explizit bestimmen bzw. abschätzen zu müssen.

[0038] Volumen-selektive Anregung wird im einfachsten Fall dadurch erreicht, dass während des Einstrahlens eines beispielsweise sinc-förmigen HF-Anregungspulses ein konstanter Schichtselektions-Gradient geschaltet wird. Der konstante Gradient übersetzt den sinc-förmigen HF-Puls in den k-Raum. Die Anregung produziert so ein näherungsweise rechteckiges Schichtprofil im Ortsraum ([Fig. 2A](#)), welches beispielsweise der interessierenden Schicht eines zu untersuchenden Patienten entspricht. Im allgemeinen Fall wird ein beliebig geformtes Anregungsprofil gewünscht, welches dadurch erhalten wird, dass ein oder mehrere HF-Anregungspulse entlang einer mehrdimensionalen Sende-Trajektorie im k-Raum verwendet werden. Die dadurch bestimmte k-Raum-Funktion entspricht wieder näherungsweise der Fouriertransformierten des gewünschten Anregungsprofils. Die k-Raum-Trajektorie kann analog zu Bildgebungssequenzen (beispielsweise Echo-Planar-Imaging, EPI) durch geeignete Gradientenschaltung vorgegeben werden. (Die Verwendung einer 2D-sinc-Funktion ergäbe so beispielsweise ein in der Projektion Rechteck-förmiges Anregungsprofil im Ortsraum – [Fig. 2B](#)).

[0039] Die Intention einer solchen Volumen-selektiven Anregung kann unterschiedlicher Art sein und beispielsweise darin liegen in spektroskopischen MR-Experimenten nur ausgewählte Bereiche anzu-

regen oder aber in der konventionellen MRT-Bildgebung die Stärke der Anregung örtlich durch Variation des Flipwinkels zu variieren, um beispielsweise bei höheren Flussdichten (z.B. > 3Tesla) die Homogenität der HF-Anregung zu verbessern.

[0040] Genauso wie eine im allgemeinen Fall 3-dimensionale k-Raum-Trajektorie im Empfangsfall sehr viel Zeit in Anspruch nimmt, benötigt eine solche Volumen-selektive Anregung auch im Sende-k-Raum entsprechend viel Zeit zur Anregung des gewünschten Schichtprofils. Ziel bekannter Verfahren (z.B. Transmit-SENSE) ist es die empfangsseitige PPA-Bildgebung auf den Sendefall zu übertragen wie im Folgenden kurz dargestellt wird:
Generell erreichen sendeseitige PPA-Bildgebungs-techniken Beschleunigungen dadurch, dass unterabgetastete Anregungs-Trajektorien verwendet werden und zwar mit einem Sende-Spulen-Array während einer entsprechenden Modulation der HF-Signale in den einzelnen Sende-Elementen, um das gleiche Anregungsprofil zu erhalten.

[0041] Ausgegangen wird von einem Kernspintomographie-Gerät, welches außer dem Grundfeldmagneten und dem Gradientenspulensystem unter anderem auch ein aus C Spulen bestehendes PPA-Sendespulen-Array sowie ein aus D Spulen bestehendes PPA-Empfangsspulen-Array aufweist. Um eine sendeseitig beschleunigte PPA-basierte Volumen-selektive Anregung des Gewebebereiches eines zu untersuchenden Patienten zu realisieren werden derzeit die folgenden Schritte unternommen:

- gleichzeitiges Einstrahlen einer Anzahl C Volumenselektiver HF-Anregungspulse entlang einer Sende-Trajektorie im Sende-k-Raum durch die jeweiligen Spulen des PPA-Sendespulen-Arrays,
- gleichzeitiges Empfangen des Kernspinresonanz-Antwortsignals aus dem angeregten GeWEBEBEREICH entlang einer Auslese-Trajektorie im Empfangs-k-Raum durch die jeweiligen Spulen des PPA-Empfangsspulen-Arrays,
- Erzeugen von Bildern des GeWEBEBEREICHES im Ortsraum durch Transformation der Messdaten vom Empfangs-k-Raum in den Ortsraum,

wobei die Volumen-selektiven HF-Anregungspulse in allen Sendespulen unterschiedlich sind und eine Sende-Trajektorie verwenden, welche einen unterabgetasteten Teil jener Trajektorie darstellt, die bei einer konventionellen volumenselektiven Anregung verwendet würde. Bei Transmit-SENSE müssen die spulenspezifischen HF-Anregungspulse auf Basis der Sendespulen-Empfindlichkeiten algebraisch bestimmt werden, wobei das Ermitteln der Empfindlichkeitsprofile der Sendespulen problematisch ist.

[0042] Aus diesem Grunde besteht der erfindungsgemäße Ansatz darin, die fehlenden Segmente unterabgetasteter (reduzierter) Anregungs-Trajektorien

(Sende-Trajektorien) algebraisch in Form von Linear-kombinationen der HF-Anregungspulse entlang eines einzelnen Segmentes zu bilden ohne die Sende-spulen-Sensitivitäten explizit verwenden zu müssen, in Anlehnung an GRAPPA bei dem die algebraische Rekonstruktion nicht gemessener k-Raum-Zeilen auf Basis einer ermittelten Kombinations-Koeffizientenmatrix erfolgt. Das erfindungsgemäße Verfahren wird daher als "Transmit-GRAPPA" bezeichnet. In dem erfindungsgemäßen Verfahren Transmit-GRAPPA werden auf Basis von Kalibrierungsdaten fehlende k-Raum-Segmente in Form von Linear-kombinationen eines einzelnen k-Raum-Segmentes ausgedrückt. Der HF-Anregungspuls jeder Spule ist dann wiederum gegeben durch eine Linearkombination der Segmente eines konventionellen Volumen-selektiven HF-Pulses gemäß der folgenden Gleichung (5).

[0043] Um dies zu veranschaulichen soll im folgenden das konventionelle GRAPPA-Verfahren kurz erläutert werden:

Um die Qualität der Rekonstruktion einer unterabgetasteten k-Raumtrajektorie und das SNR zu optimieren, erzeugt eine Rekonstruktion nach GRAPPA aus beispielsweise einer Anzahl N unvollständig gemessener Datensätze (bis auf die zusätzlich gemessenen zentralen Referenzzeilen unterabgetastete Spulenbilder; Spule 1 bis Spule N) wieder eine Anzahl N Datensätze (Spulenbilder) die – immer noch im k-Raum – jeweils für sich wieder vollständig sind. Eine Fouriertransformation der einzelnen Spulenbilder führt somit zu N einfaltungsfreien Einzelspulenbildern, deren Kombination im Ortsraum (z.B. mittels Quadratsummen-Rekonstruktion) zu einem hinsichtlich SNR und Signalauslöschung optimierten Bild führt.

[0044] Die GRAPPA-Rekonstruktion, die bei N Komponentenspulen wieder zu N vollständigen Einzelspulendatensätzen führt, beruht auf einer Linear-kombination der gemessenen Zeilen eines unvollständigen Datensatzes, wobei dabei die Ermittlung der dazu notwendigen (Linear-)Koeffizienten im Vordergrund steht. Dazu wird versucht, die regulär gemessenen (also die nicht ausgelassenen) Zeilen eines unvollständigen Datensatzes linear so zu kombinieren, dass mit ihnen die zusätzlich gemessenen Referenzzeilen (also die Kalibrierungs-Datenpunkte) möglichst gut angefittet werden. Die Referenzzeilen dienen somit als Zielfunktionen, die umso besser angepasst werden können, je mehr regulär gemessene Zeilen – möglicherweise auf unvollständige Datensätze unterschiedlicher Komponentenspulen verteilt – vorliegen.

[0045] Dies bedeutet, dass im Rahmen einer GRAPPA-Rekonstruktion die unvollständigen Datensätze von N-Komponentenspulen zur Vervollständigung dieser Datensätze wiederum auf die N-Kompo-

nentenspulen abgebildet werden müssen. Diese "Abbildung" erfolgt algebraisch durch eine Vektor-Matrix-Multiplikation, wobei die Vektoren die regulär gemessenen k-Raum-Zeilen repräsentieren und die Matrix die ermittelte Kombinations-Koeffizientenmatrix darstellt. Das heißt mit anderen Worten: Ergibt eine Linearkombination von gemessenen Zeilen auf Basis einer Koeffizientenmatrix eine gute Annäherung an die Referenzzeilen (Kalibrierungs-Datenpunkte), so lassen sich mit dieser Matrix ebenso gut ranggleiche ausgelassene (und damit nichtgemessene) Zeilen rekonstruieren. Die Koeffizienten werden oft auch als Gewichtungsfaktoren bezeichnet, die Referenzzeilen tragen Information über die Spulen-sensitivitäten.

[0046] Im folgenden wird gezeigt, dass Autokalibrierverfahren wie GRAPPA eingesetzt werden können um die Leistungsfähigkeit von beschleunigten Volumen-selektiven Anregungen zu verbessern ohne die Sende-Sensitivitäten explizit bestimmen zu müssen.

[0047] Sei $T_c(\vec{x})$ die Modulation einer Objekt-Magnetisierung $M(\vec{x})$ verursacht durch einen HF-Anregungspuls $\sigma(\vec{k})$ in der Spule c mit $c = 1 \dots C$, wobei \vec{x} die räumliche Koordinate und \vec{k} die Ortsfrequenz-Koordinate der räumlichen Anregung im Sende-k-Raum ist. Die Ortsfrequenzdarstellungen dieser Felder seien jeweils mit Kleinbuchstaben bezeichnet, $m(\vec{k})$ sowie $t_c(\vec{k})$, wobei \vec{k} die Koordinate der Ortsfrequenz im Empfangs-k-Raum darstellt.

[0048] Ferner sei ein Komponentenspulen-Array angenommen bestehend aus D Empfängerspulen mit Spulensensitivitätsprofilen $R_d(\vec{x})$ bzw. $r_d(\vec{k})$ mit $d = 1 \dots D$, und einem Beschleunigungsfaktor AF (engl.: Acceleration Factor AF). Somit erfolgt eine Aufteilung der Sende-k-Raum-Trajektorie von $\sigma(\vec{k})$ in eine Anzahl von AF Segmenten $\sigma^n(\vec{k})$ der HF-Anregung mit $n = 1 \dots AF$ – im Wesentlichen analog zu dem Fall der parallelen Bildgebung im Empfangsfall, beispielsweise dem Auslassen von AF-1 k-Raum-Zeilen für jede transmittierte Zeile in einem kartesischen Experiment. Die Modulation der Magnetisierung des Objektes verursacht durch $\sigma^n(\vec{k})$ in der Spule c kann dann folgendermaßen geschrieben werden: $T_c^n(\vec{x})$ bzw. $t_c^n(\vec{k})$.

[0049] Weiter sei angenommen, dass $\sigma(\vec{k})$ – wenn es gleichzeitig für alle Sende-Elemente verwendet wird – eine homogene kombinierte Anregung verursacht oder eine entsprechende Modulation $T^n(\vec{x})$ für ein einzelnes Segment und $T(\vec{x})$ für alle Segmente (in der k-Raum-Darstellung mit $t^n(\vec{k})$ und mit $t(\vec{k})$ bezeichnet), jeweils gegeben durch

$$T^n(\vec{x}) = \sum_{c=1}^C T_c^n(\vec{x}), \quad (1a)$$

$$T(\vec{x}) = \sum_{n=1}^{AF} T^n(\vec{x}) \quad (1b)$$

[0050] Das nach Einstrahlung von $\sigma^n(\vec{k})$ durch die Sende-Spule c in der Empfängerspule d empfangene Signal $s_{c,d}^n(\vec{k})$ (ohne Berücksichtigung der Relaxation) kann dann folgendermaßen geschrieben werden:

$$s_{c,d}^n(\vec{k}) = m(\vec{k}) \otimes t_c^n(\vec{k}) \otimes r_d(\vec{k}) \quad (2)$$

wobei \otimes den Faltungsoperator im k-Raum darstellt.

[0051] Um den gewünschten Signalverlauf desjenigen HF-Anregungspulses zu ermitteln, der gleichzeitig in den C Sendespulen entlang der $n = 1$ k-Raum-Anregungs-Trajektorie gesendet zur vollständigen gewünschten Anregung führt, wird folgendes erfindungsgemäßes Vorgehen beispielhaft für eine 2D-Anregung vorgeschlagen:

- einzelnes Senden von $\sigma^n(\vec{k})$ mit jeder Spule entlang des Segmentes $n = 1$ und gleichzeitiges Empfangen der Daten $s_{c,d}^1(\vec{k})$ mit allen Empfänger-spulen entlang der gleichen k-/k-Raum-Trajektorie der Anregung
- gleichzeitiges Senden von $\sigma^n(\vec{k})$ mit allen Sendespulen einzeln entlang der anderen Segmente der HF-Trajektorie $n = 2 \dots AF$ und gleichzeitiges Empfangen der Daten $s_d^n(\vec{k})$ mit allen Empfänger-spulen gemäß

$$s_d^n(\vec{k}) = m(\vec{k}) \otimes t(\vec{k}) \otimes r_d(\vec{k}) \quad (3)$$

- Ermitteln der Skalar-Koeffizienten (Kombinations-Koeffizienten) $f_c^{1 \rightarrow n}(p,q)$, $n = 2 \dots AF$ so dass folgende Bedingung erfüllt ist

$$\sum_{c=1}^C \sum_{p,q} f_c^{1 \rightarrow n}(p,q) \cdot s_{c,d}^1(\vec{k} - p \cdot AF \cdot \Delta \vec{k}_y - q \cdot \Delta \vec{k}_x) = s_d^n(\vec{k}) \quad (4)$$

beispielsweise für $p \in [-1 \dots 1]$ und $q \in [-2 \dots 2]$.

[0052] Während der beschleunigten Anregung erfolgt das Senden mit allen Spulen $c = 1 \dots C$ gleichzeitig entlang der Trajektorie $n = 1$, wobei gilt

$$\sigma_c^1(\vec{k}) = \sum_{n=1}^{AF} \sum_{p,q} f_c^{1 \rightarrow n}(p,q) \cdot \sigma^1(\vec{k} - p \cdot AF \cdot \Delta \vec{k}_y - q \cdot \Delta \vec{k}_x) \quad (5)$$

unter Verwendung derselben Bereiche für p und q wie für Gleichung (4). Es sei darauf hingewiesen, dass in diesem Beispiel ohne Beschränkung der Allgemeinheit für Senden und Empfangen dieselbe Trajektorie verwendet wurde. Ebenfalls ohne Beschränkung der Allgemeinheit sind auch andere Ausprägungen der Linearkombinationen in Gleichung (4) bzw. (5) möglich.

[0053] Das erfindungsgemäß Vorgehen wird anhand der [Fig. 3](#) bis [Fig. 5](#) veranschaulicht:

In [Fig. 3](#) ist oben links ein Sendespulen-Array dargestellt bestehend aus vier um ein kreisförmig zu untersuchendes Objekt gleichmäßig angeordneten Sendespulen. Die nach innen auf das Objekt gerichteten Pfeile symbolisieren die Fähigkeit zum Senden bzw.

zum Einstrahlen von HF-Anregungspulsen in das Objekt. Auf der rechten Seite von [Fig. 3](#) ist ein Empfangsspulen-Array dargestellt bestehend aus zwei um das gleiche Objekt angeordneten Empfangsspulen. Die nach außen gerichteten Pfeile symbolisieren die Fähigkeit zum Empfangen von Kernresonanz-Antwortsignalen die nach einer HF-Anregung durch die Sendespulen aus dem Objekt austreten.

[0054] Der erste Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht vorerst aus zwei Teilschritten und zwar zunächst im Senden einer HF-Pulsfolge $\sigma(\vec{k})$ durch die erste der Sendespulen die dadurch eine HF-Anregung entlang einer ersten reduzierten Sendetrajektorie ($n = 1$) im Sende-k-Raum bewirkt. Die sendende Spule ist schwarz dargestellt und durch einen Kreis markiert; das Senden ist durch einen weißen Pfeil symbolisiert. Die reduzierte Sendetrajektorie ist rechts von dem Sendespulen-Array zweidimensional in einem Koordinatensystem im Sende-k-Raum dargestellt, wobei bei der HF-Anregung ein Beschleunigungsfaktor von $AF = 3$ gewählt wurde, wie aus den jeweils zwei in k_y -Richtung ausgelassenen gestrichelten k-Raumzeilen ersichtlich ist. Diese erste reduzierte Sendetrajektorie ist mit $n = 1$ bezeichnet.

[0055] Der zweite Teilschritt besteht im Messen bzw. Empfangen des durch die HF-Anregung im Objekt initiierten Antwortsignals im Empfangs-k-Raum durch alle Spulen des Empfangsspulen-Arrays. Das Empfangen erfolgt in allen Empfangsspulen simultan (d.h. gleichzeitig; symbolisiert durch die nach außen zeigenden weißen Pfeile) entlang einer vollständigen (nichtreduzierten) Empfangstrajektorie die auf der rechten Seite in [Fig. 3](#) zweidimensional in einem Koordinatensystem im Empfangs-k-Raum dargestellt ist. Dieser durch die HF-Anregung der Sendespule $c = 1$ entlang der reduzierten Sendetrajektorie $n = 1$ in der Empfangsspule $d = 1$ bewirkte bzw. initiierte Empfangsdatensatz ist mit $s_{c=1,d=1}^{n=1}(\vec{k})$ bezeichnet. Der Empfangsdatensatz der Empfangsspule $d = 2$ ist mit $s_{1,2}^1(\vec{k})$ bezeichnet.

[0056] Beide Teilschritte werden nun entsprechend der Anzahl der Sendespulen wiederholt (siehe z.B. untere Hälfte der [Fig. 3](#): Senden der zweiten Sendespule), bis für jede Sendespule entsprechende Empfangsdatensätze erhalten worden sind, wobei die (reduzierte) Sendetrajektorie sowie die Empfangstrajektorie stets gleich bleibt. Bei vier Sendespulen und zwei Empfangsspulen werden also in vier Sende-Empfangs-Zyklen insgesamt acht Empfangsdatensätze erhalten: $s_{1,1}^1(\vec{k})$, $s_{1,2}^1(\vec{k})$, $s_{2,1}^1(\vec{k})$, $s_{2,2}^1(\vec{k})$, $s_{3,1}^1(\vec{k})$, $s_{3,2}^1(\vec{k})$, $s_{4,1}^1(\vec{k})$ und $s_{4,2}^1(\vec{k})$.

[0057] Der zweite Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens ist in [Fig. 4](#) dargestellt, bei dem in einem ersten Teilschritt alle Sendespulen gleichzeitig eine HF-Anregung bewirken und zwar entlang einer zwei-

ten reduzierten Sendetrajektorie ($n = 2$) die sich vorteilhaft mit der ersten reduzierten Sendetrajektorie ($n = 1$) aus Schritt 1 nicht überlappt. Diese zweite Sendetrajektorie ist im oberen Teil der [Fig. 4](#) rechts von dem Sendespulen-Array in einem Kreis dargestellt. Wiederum werden für diese Anregung in allen Empfangsspulen gleichzeitig entsprechende Empfangsdatensätze akquiriert. Dieser zweite Schritt wird so lange wiederholt, bis alle reduzierten Sendetrajektorien $n = 1$ bis AF zusammengekommen eine vollständige Sendetrajektorie ergeben. Für AF = 3 und einem Empfangsspulen-Array mit zwei Spulen liefert dies in zwei weiteren Sende-Empfangs-Zyklen insgesamt vier weitere Empfangsdatensätze: $s_{d=1}^{n=2}(\vec{k})$, $s_2^2(\vec{k})$, $s_1^3(\vec{k})$ und $s_2^3(\vec{k})$ (die c-Indizierung wurde weggelassen, da bei diesem Schritt alle C Sendespulen gleichzeitig beteiligt sind).

[0058] Schließlich wird aus den Empfangsdatensätzen der Schritte 1 und 2 ein Gleichungssystem analog zu GRAPPA aufgestellt, welches die Ermittlung von Kombinationskoeffizienten $f_c^{1 \rightarrow n}(p,q)$ ermöglicht, welche die Messdaten aus Schritt 1 auf die Messdaten aus Schritt 1 und Schritt 2 abbilden. Mit Hilfe dieser Kombinationskoeffizienten – die in gewisser Hinsicht mit den Koeffizienten einer GRAPPA-Rekonstruktionsmatrix vergleichbar sind – werden wiederum jene Sendespulen-spezifischen HF-Anregungs-Pulse berechnet die – von allen Spulen gleichzeitig gesendet – einerseits die reduzierte Sendetrajektorie $n = 1$ ergeben, andererseits eine Anregung gemäß dem gewünschten Anregungsprofil bewirken. In [Fig. 5](#) sind diese algebraisch ermittelten HF-Anregungs-Pulse gegeben als $\sigma_1^1(\vec{k})$, $\sigma_2^1(\vec{k})$, $\sigma_3^1(\vec{k})$ und $\sigma_4^1(\vec{k})$.

[0059] Bei Anwendung des GRAPPA-Autokalibrierungs-Ansatzes müssen in der Kalibrierphase nur wenige k-Raum-Zeilen empfängerseitig akquiriert werden. Eine Simulation hierzu ist in [Fig. 6](#) dargestellt, in der die für Kalibrierzwecke mit einem Beschleunigungsfaktor AF = 2 bei Verwendung eines 8-Element-Birdcage-Arrays zum Senden Bilder mit niedriger Auflösung gezeigt sind (linkes Bild $n = 1$, rechtes Bild $n = 2$). In diesem Fall werden Datenmatrizen der Größe 32×32 verwendet um die Linear-Kombinations-Koeffizienten zu bestimmen. Wie anhand [Fig. 7](#) gesehen werden kann (linkes Bild nichtselektiv) entspricht das resultierende Profil bei beschleunigter selektiver Anregung sehr gut dem gewünschten (selektierten) kreisförmigen Profil (rechtes Bild).

[0060] Obwohl der eben beschriebene Autokalibrierungsansatz gegenüber Methoden, die mit explizit bzw. näherungsweise bestimmten Sende-Sensitivitäten arbeiten, deutliche Vorteile bietet, so ist die Bestimmung und Anwendung der verwendeten Kombinationskoeffizienten durchaus auch auf der Basis von explizit bestimmten bzw. geeignet geschätzten Sen-

de-Sensitivitäten möglich. Aus den Sende-Sensitivitäten können nämlich jederzeit und leicht die äquivalenten Größen zu $s_{c,d}^n(\vec{k})$ bzw. zu $s_c^1(\vec{k})$ und $s_d^n(\vec{k})$ berechnet werden.

[0061] Dies ist z.B. möglich, indem die Fourier-Transformierte der Sendespulen-Sensitivitäten einzelner Sende-Spulen, ausgewertet auf der ersten reduzierten Sende-Trajektorie, mit $s_c^1(\vec{k})$ (ohne den Einfluss des Empfangsspulen-Arrays) identifiziert wird, und die Fourier-Transformierte einer Kombination aller Sendespulen-Sensitivitäten, ausgewertet auf den restlichen reduzierten Sende-Trajektorien, mit $s^1(\vec{k})$ identifiziert wird. Man kann diese Größen dann als virtuelle Kalibrierungs-Messwerte verstehen.

[0062] Gleichermaßen ist es möglich, auf Basis der Empfangsspulen-Sensitivitäten des verwendeten oder eines beliebig angenommenen Empfangsspulen-Arrays ein Kalibrierungsexperiment wie oben beschrieben zu simulieren um so virtuelle Messwerte $s_{c,d}^n(\vec{k})$ und $s_d^n(\vec{k})$ zu erhalten.

[0063] Die Bestimmung und Anwendung der Kombinationskoeffizienten geschieht dann völlig analog zu dem eingangs beschriebenen Verfahren.

[0064] Zusammengefasst kann gesagt werden: Es wurde eine auf dem GRAPPA-Formalismus basierende einfache Vorschrift zur Bestimmung von paralleler Transmission verwendenden mehrdimensionalen HF-Pulsen entwickelt. Auf der Basis dieses Konzeptes ist es möglich die HF-Pulse für die einzelnen Spulen abzuleiten (unter Verwendung eines Autokalibrier-Ansatzes), so dass keine absolute Quantifizierung der Sende-Profile der einzelnen Spulen – wie sie derzeitige Verfahren erfordern – mehr notwendig ist. Alles was für einen Spulenaufbau von C Sende-Spulen notwendig ist, sind lediglich C Akquisitionen in denen eine reduzierte Sende-Trajektorie mit einer einzigen Spule gesendet wird, gefolgt von AF-1 weiteren Akquisitionen in welchen die restlichen reduzierten Trajektorien gesendet werden. Empfangen wird jeweils mit allen Empfangs-Spulen. Da alle dieser Akquisitionen niedrig-aufgelöste Experimente sein können, sollte dieser Prozess schnell sein und kann daher für unterschiedliche Schichtpositionen oder HF-Pulsverläufe einfach wiederholt werden. Dies sollte insbesondere bei hohen Feldstärken hilfreich sein bei denen die Profile der Sende-Felder sich signifikant von denen der Empfangs-Felder unterscheiden und empfindlicher bezüglich Ladungs-Veränderungen während des Experimentes sind.

[0065] Falls dennoch eine Messung bzw. Abschätzung der Sendespulen-Sensitivitäten gelingt, lässt sich der beschriebene Ansatz zur Berechnung der Sendespulen-spezifischen HF-Pulse auch auf der Basis dieser Sendespulen-Sensitivitäten verwenden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung Sendespulen-spezifischer HF-Anregungspulse für ein Sendespulen-Array zur beschleunigten PPA-basierten Volumen-selektiven Anregung eines Gewebebereiches eines zu untersuchenden Patienten mit einem Kernspintomographie-Gerät, aufweisend einen Grundfeldmagneten, ein Gradientenspulensystem, ein Sendespulen-Array und ein Empfangsspulen-Array, aufweisend die folgenden Schritte:

- a) Einstrahlen einer ersten Folge Volumen-selektiver HF-Anregungspulse entlang einer ersten auf Basis eines Beschleunigungsfaktors AF reduzierten Sende-Trajektorie im Sende-k-Raum durch eine erste Spule des Sendespulen-Arrays
- b) Empfangen der von dieser ersten HF-Anregung erzeugten Kernspinresonanz-Antwortsignale aus dem angeregten Gewebebereich entlang einer vollständigen Empfangs-Trajektorie im Empfangs-k-Raum mit allen Spulen des Empfangsspulen-Arrays gleichzeitig
- c) Wiederholen der Schritte a) und b) nacheinander mit allen weiteren Spulen des Sendespulen-Arrays
- d) gleichzeitiges Einstrahlen einer zweiten Folge Volumenselektiver HF-Anregungspulse entlang einer weiteren reduzierten Sende-Trajektorie im Sende-k-Raum durch alle Spulen des Sendespulen-Arrays; und wiederum
- e) Empfangen der von dieser zweiten HF-Anregung erzeugten Kernspinresonanz-Antwortsignale aus dem angeregten Gewebebereich entlang derselben vollständigen Empfangs-Trajektorie im Empfangs-k-Raum mit allen Spulen des Empfangsspulen-Arrays gleichzeitig
- f) im Falle $AF > 2$ Wiederholen der Schritte d) und e), bis die Gesamtheit aller reduzierten Sende-Trajektorien eine vollständige Sende-Trajektorie bildet
- g) Ermitteln von Kombinations-Koeffizienten auf Basis aller gemessenen Antwortsignale
- h) Berechnen von Sendespulen-spezifischen HF-Anregungspulsen auf Basis der ermittelten Kombinations-Koeffizienten die bei gleichzeitigem Einstrahlen entlang der ersten reduzierten Sende-Trajektorie durch mehrere oder alle Spulen des Sendespulen-Arrays ein gewünschtes Anregungsprofil erzeugen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die vollständige Sende-Trajektorie und die vollständige Empfangs-Trajektorie gleich sind.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass Sende-Trajektorie und Empfangs-Trajektorie unterschiedlich sind, jedoch in ihren k-Raum-Koordinaten eine geometrische Beziehung aufweisen, die eine Berechnung von Kombinations-Koeffizienten auf Basis der Empfangs-Trajektorie und eine Anwendung dieser Kombinations-Koeffi-

zienten auf Basis der ersten Sende-Trajektorie ermöglicht.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass Sende-Trajektorie und/oder Empfangs-Trajektorie im k-Raum kartesische Form haben.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass Sende-Trajektorie und/oder Empfangs-Trajektorie im k-Raum radial bzw. spiralförmig ausgebildet sind.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass Sendespulen-Array und Empfangsspulen-Array identisch sind.

7. Verfahren zur Bestimmung Sendespulen-spezifischer HF-Anregungspulse für ein Sendespulen-Array zur beschleunigten PPA-basierten Volumen-selektiven Anregung eines Gewebebereiches eines zu untersuchenden Patienten mit einem Kernspintomographie-Gerät, aufweisend einen Grundfeldmagneten, ein Gradientenspulensystem, ein Sendespulen-Array und ein Empfangsspulen-Array, aufweisend die folgenden Schritte:

- a) Messen oder Schätzen der Sende-Sensitivitäten des Sendespulen-Arrays
- b) Erzeugen von virtuellen Kalibrierungs-Messwerten auf Basis der Sendespulen-Sensitivitäten sowohl für jede einzelne Spule des Sendespulen-Arrays entlang einer ersten auf Basis eines Beschleunigungsfaktors AF reduzierten Sende-Trajektorie, als auch für eine Kombination der Spulen des Sendespulen-Arrays entlang AF-1 weiteren reduzierten Sende-Trajektorien
- c) Ermitteln von Kombinations-Koeffizienten auf Basis der virtuellen Kalibrierungs-Messwerte
- d) Berechnen von Sendespulen-spezifischen HF-Anregungspulsen auf Basis der ermittelten Kombinations-Koeffizienten, die bei gleichzeitigem Einstrahlen entlang der ersten reduzierten Sende-Trajektorie durch mehrere oder alle Spulen des Sendespulen-Arrays ein gewünschtes Anregungsprofil erzeugen.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Sende-Trajektorie im k-Raum kartesische Form hat.

9. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Sende-Trajektorie im k-Raum radial bzw. spiralförmig ausgebildet ist.

10. Kernspintomographiegerät, dessen Steuer- oder Programmmittel derart ausgebildet sind, dass sie ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9 umsetzen.

11. Computersoftwareprodukt, dadurch gekennzeichnet, dass es ein Verfahren gemäß den obigen

Ansprüchen 1 bis 9 implementiert, wenn es auf einer mit einem Kernspintomographiegerät verbundenen Recheneinrichtung läuft.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

Stand der Technik

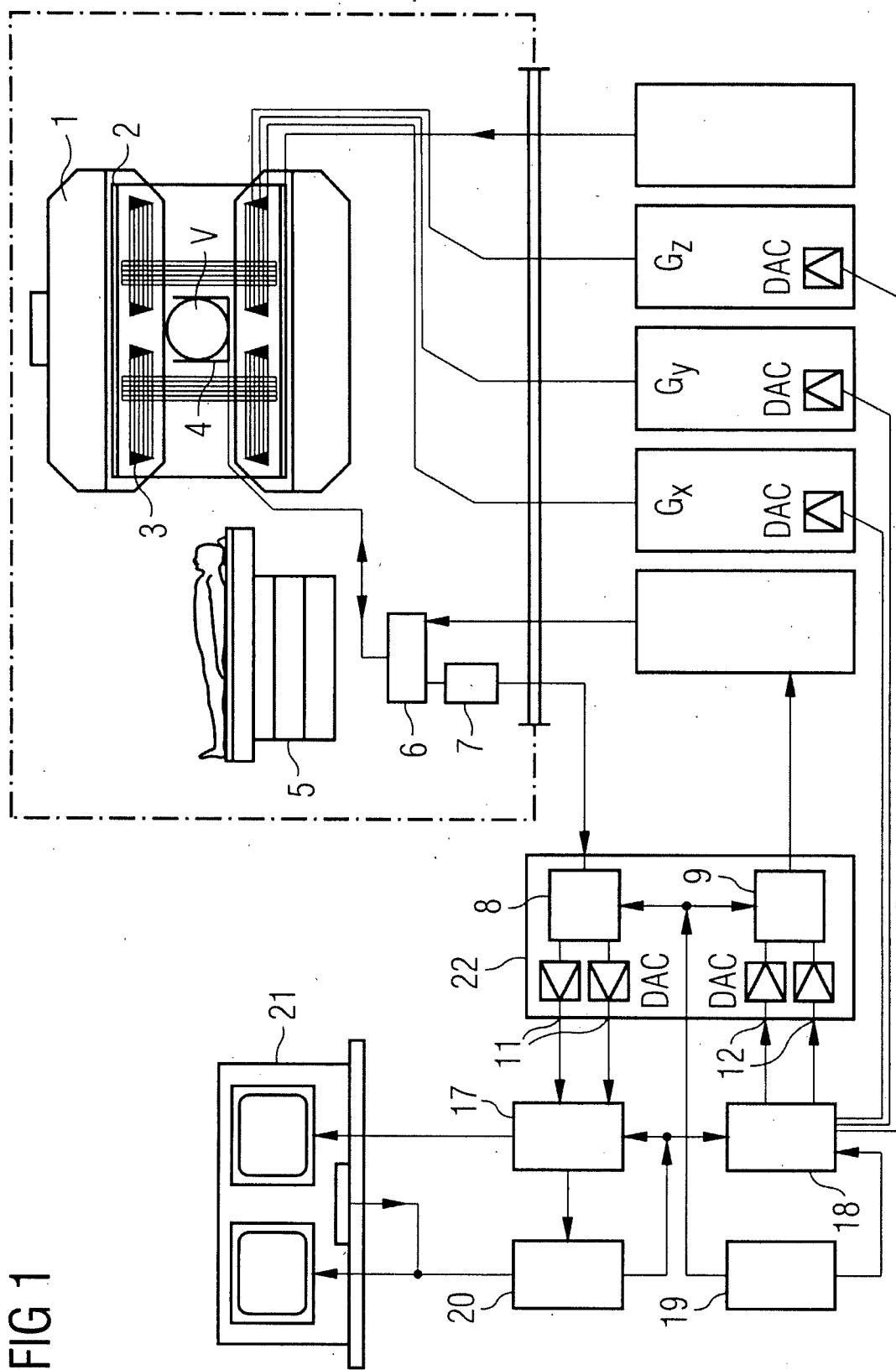


FIG 1

FIG 2A

Schicht-Selektive Anregung

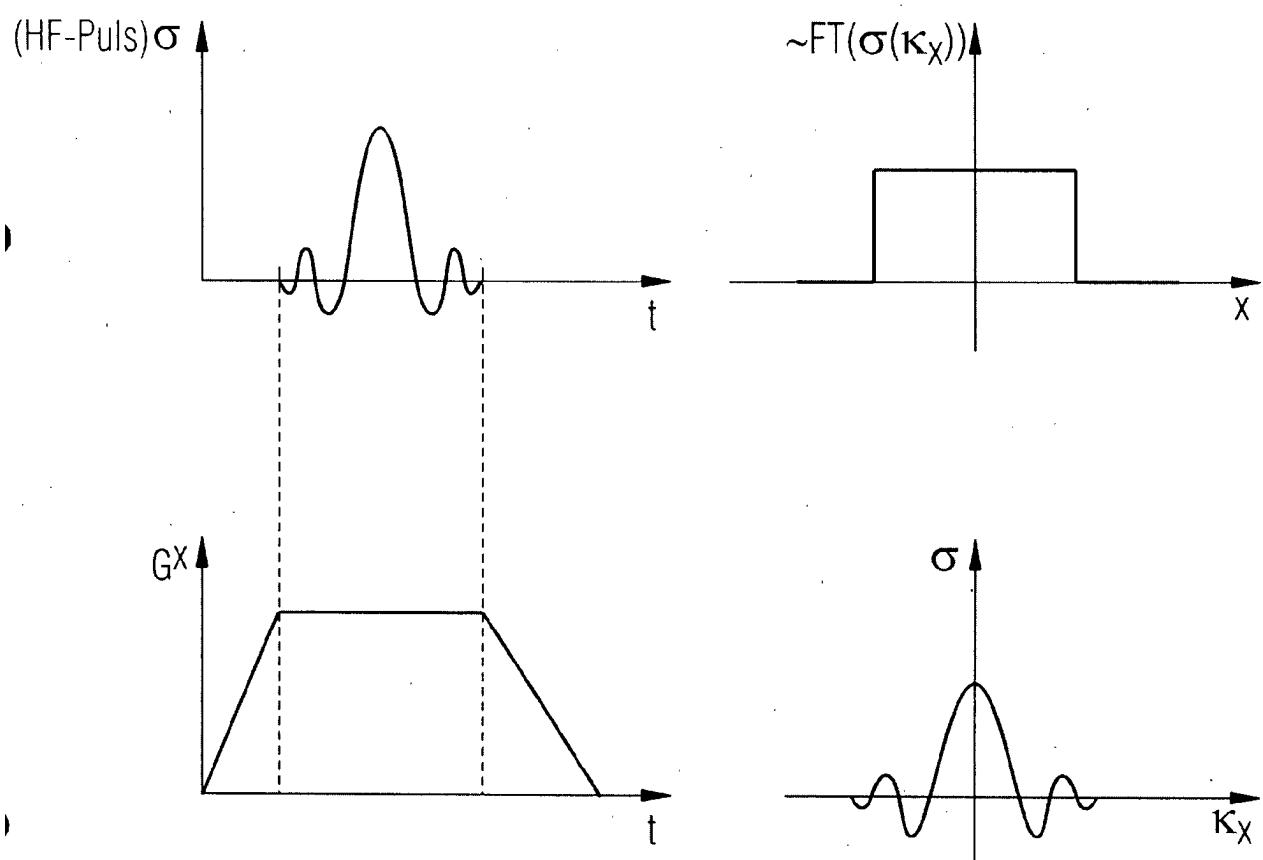
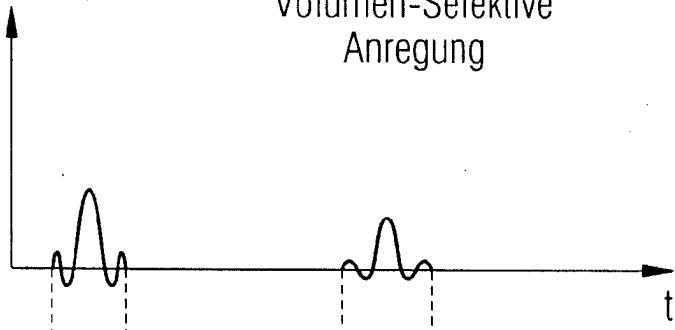
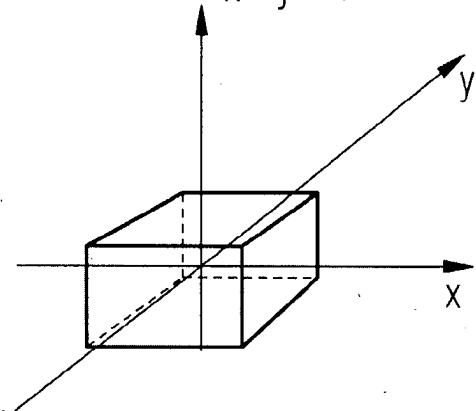


FIG 2B

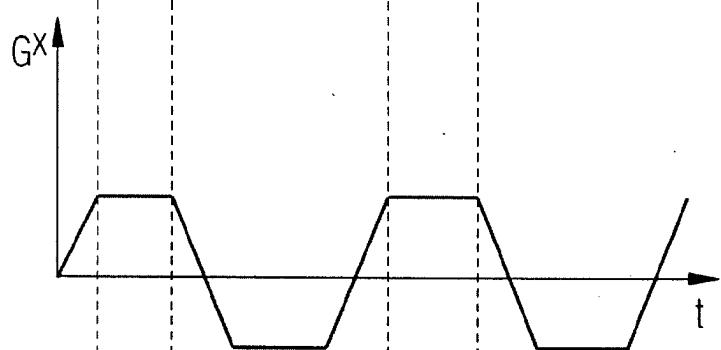
(HF-Puls) σ



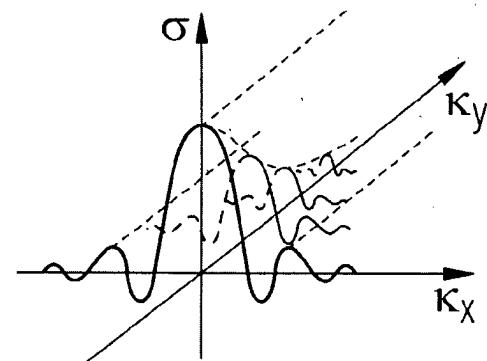
$\sim \text{FT}(\sigma(\kappa_x, \kappa_y))$



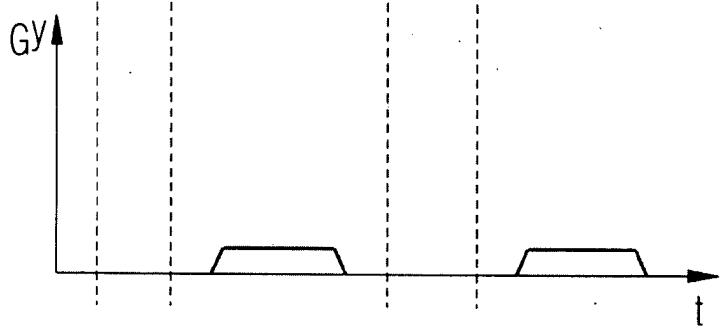
G_x



σ



G_y



κ_y

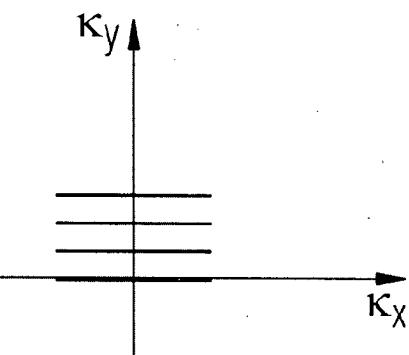


FIG 3

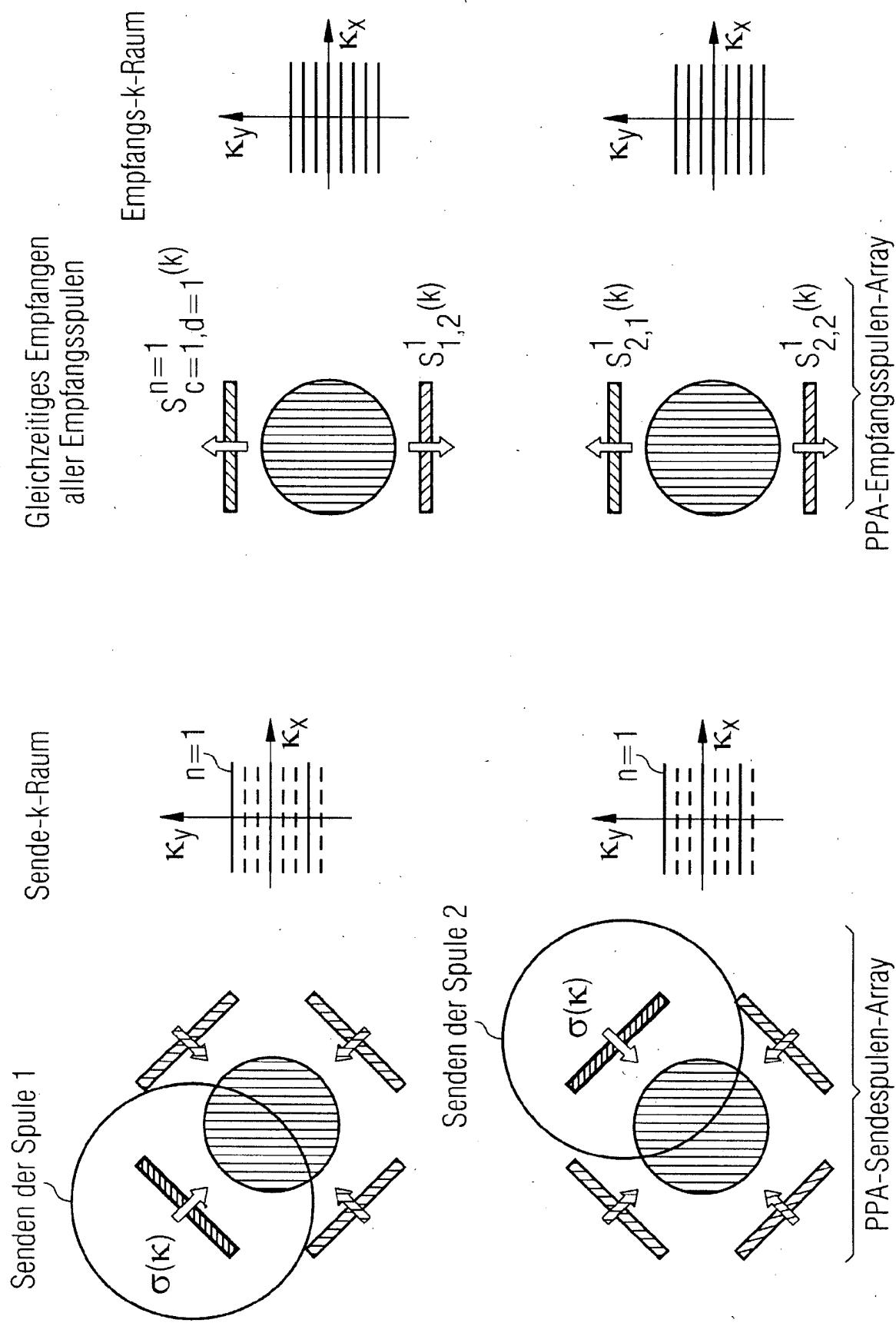
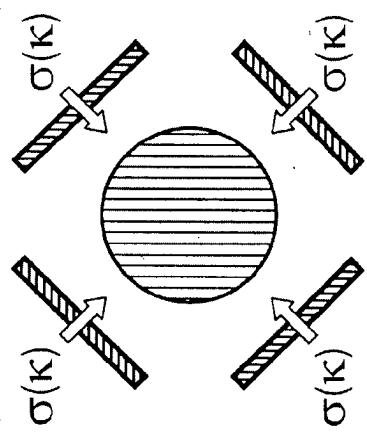


FIG 4

Gleichzeitiges Senden
aller Sendespulen



Gleichzeitiges Empfangen
aller Empfangsspulen

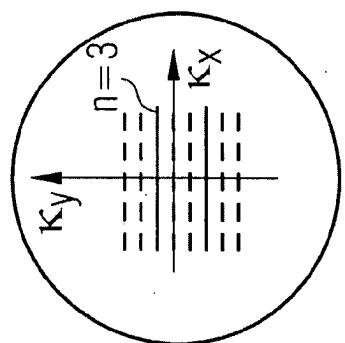
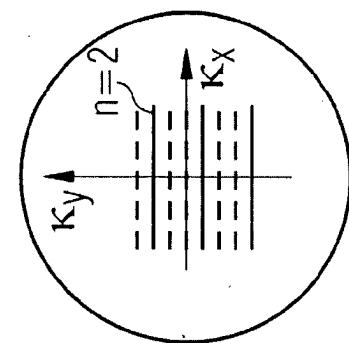
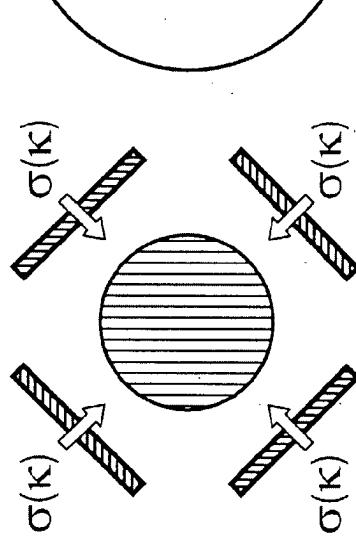
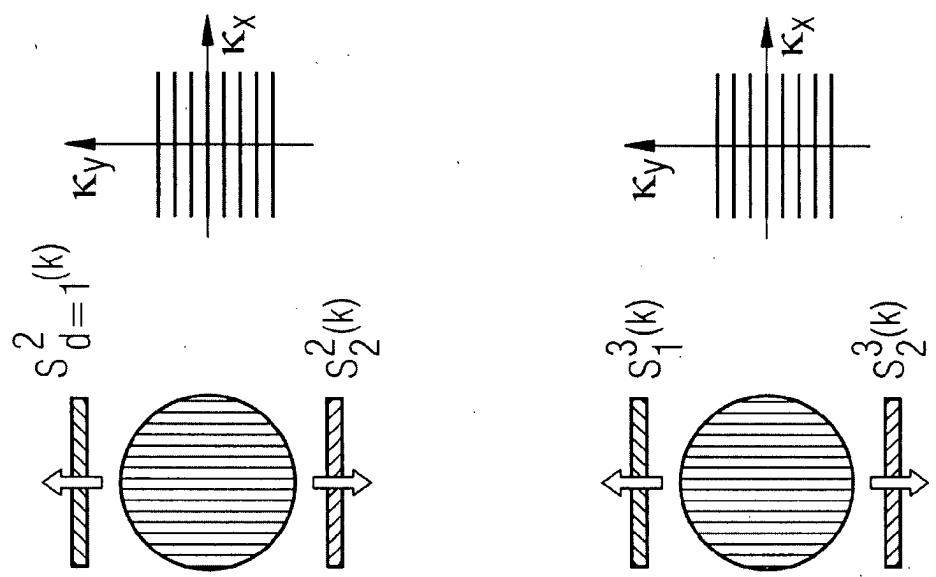


FIG 5

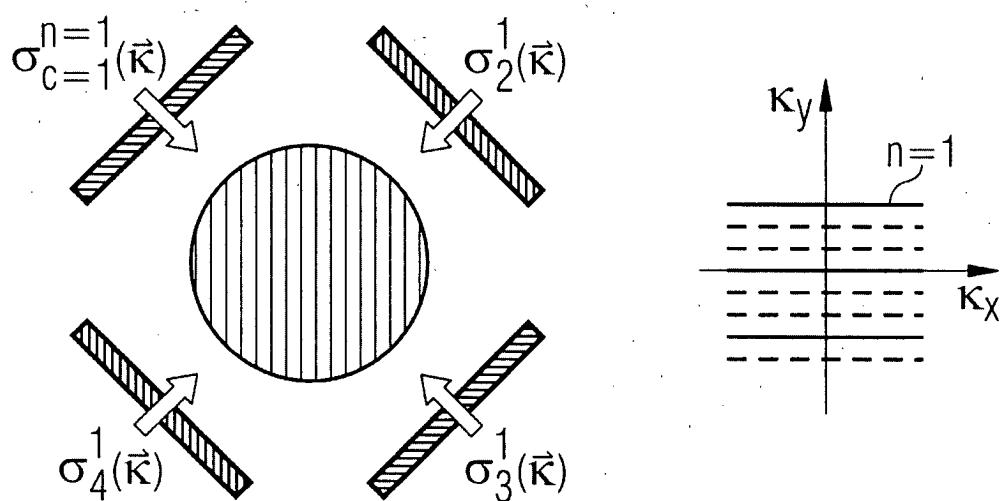


FIG 6

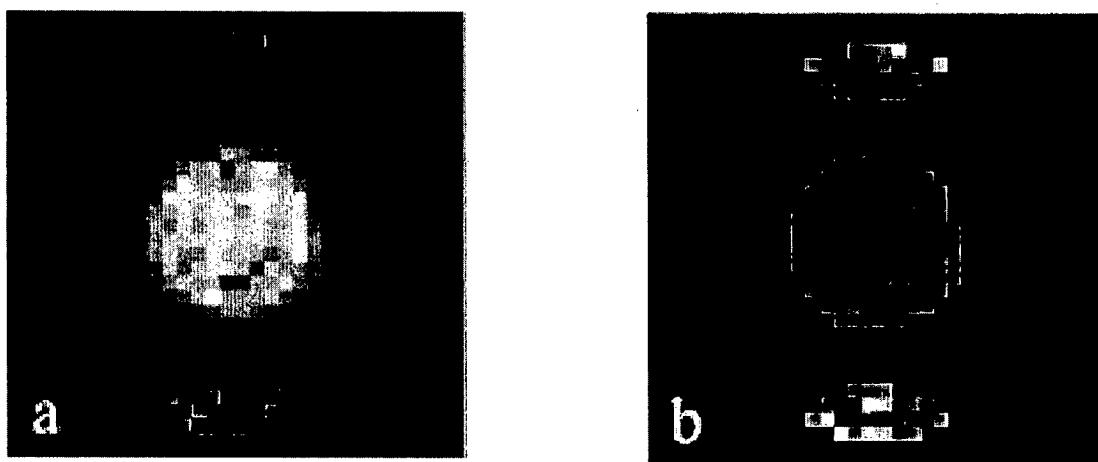


FIG 7

