

SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH

708 759 A2

(51) Int. Cl.: G01R 33/3875 (2006.01)

Patentanmeldung für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) PATENTANMELDUNG

(21) Anmeldenummer: 01552/14

(22) Anmeldedatum: 13.10.2014

(43) Anmeldung veröffentlicht: 30.04.2015

(30) Priorität: 16.10.2013
DE 10 2013 220 933.9

(71) Anmelder:
Bruker BioSpin AG, Industriestrasse 26
8117 Fällanden (CH)

(72) Erfinder:
Jacco Douwe Van Beek, 8604 Volketswil (CH)
Thomas Speck, 8800 Thalwil (CH)

(74) Vertreter:
Riederer Hasler & Partner Patentanwälte AG,
Elestastrasse 8
7310 Bad Ragaz (CH)

(54) Shim-Verfahren mit Festlegung der Zielfeldverteilung durch Optimierung in einem Parameterraum reduzierter Dimension.

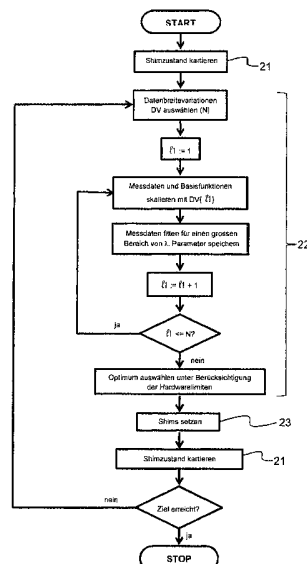
(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Homogenisieren des statischen Magnetfeldes mit einer Verteilung $B_0(r)$ in dem Arbeitsvolumen einer Magnetresonanz-Vorrichtung mit N Shim-Spulen mit folgenden Schritten:

- (a) Kartierung (21) der Magnetfeldverteilung $B_0(r)$,
- (b) Festlegen (22) einer Zielfeldverteilung $BOT(r)$,
- (c) Erzeugen (23) der Zielfeldverteilung $BOT(r)$ im Arbeitsvolumen durch Einstellen der Shimströme,

wobei im Schritt (b) ein Optimierungsverfahren zur Optimierung eines numerischen Qualitätskriteriums für die Zielfeldverteilung $BOT(r)$ verwendet wird, welches als Resultat Werte für die N Shimströme liefert, und wobei eine räumliche Gewichtungsfunktion verwendet wird, ist dadurch gekennzeichnet, dass ein Filterverfahren verwendet wird, bei dem mittels Filterfaktoren eine Norm der Shimströme beeinflusst wird, und dass das Optimierungsverfahren in einem Parameterraum mit M Kontrollparametern arbeitet, wobei $2 \leq M < N$, wobei einer der Kontrollparameter als Gewichtungsparameter zur Modifikation einer räumlichen Gewichtungsfunktion und ein weiterer Kontrollparameter zur Kontrolle der Filterfaktoren verwendet wird.

Damit können bei der Ermittlung der Zielfeldverteilung (22) die Hardware-Limitierungen berücksichtigt werden, ohne dass dabei der Rechenaufwand bei der Optimierung zur Ermittlung der Zielfeldverteilung (22) deutlich grösser wird.

Ebenfalls betrifft die Erfindung einen elektronisch lesbaren Datenträger, auf welchem ein Computerprogramm zur Durchführung des erfindungsgemässen Verfahrens gespeichert ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Homogenisieren des statischen Magnetfeldes mit einer Verteilung $B_0(r)$ in dem Arbeitsvolumen einer Magnetresonanz-Vorrichtung mit einer Anzahl N Shim-Spulen, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:

- (a) Kartierung der Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ des statischen Magnetfeldes,
 - (b) Festlegen einer Zielfeldverteilung $BOT(r)$,
 - (c) Erzeugen der Zielfeldverteilung $BOT(r)$ im Arbeitsvolumen, indem Ströme in den Shim-Spulen eingestellt werden, wobei im Schritt (b) ein Optimierungsverfahren zur Optimierung eines numerischen Qualitätskriteriums für die Zielfeldverteilung $BOT(r)$ verwendet wird,
- wobei das Optimierungsverfahren als Resultat Werte für die Ströme durch die N Shim-Spulen liefert, und wobei beim Optimierungsverfahren eine räumliche Gewichtungsfunktion verwendet wird.

[0002] Ein solches Verfahren ist bekannt aus Markus Weiger, Thomas Speck, Michael Fey, «Gradient shimming with spectrum optimization»; Journal of Magnetic Resonance 182 (2006) 38–48 (=Referenz [5]).

Hintergrund der Erfindung

[0003] Viele Magnetresonanzmethoden erfordern möglichst homogene statische Magnetfelder, beispielsweise, um im Fall einer spektroskopischen Methode eine hohe spektrale Auflösung oder, um im Fall einer bildgebenden Methode eine möglichst verzerrungsfreie und scharfe Abbildung zu erzielen. Ein bekanntes Mittel zur Einstellung der Homogenität des statischen Magnetfeldes sind sogenannte Shim-Spulen (siehe z.B. Referenz [2]), welche zusätzlich zum Hauptmagnetfeld im Arbeitsvolumen einstellbare Magnetfelder zur Verfügung stellen. Jede dieser Shim-Spulen wird von einer eigenen, einstellbaren Stromquelle mit Strom versorgt. Mittels unterschiedlicher von den verschiedenen Shim-Spulen erzeugter Feldverteilungen kann eine breite Palette von Feldverteilungen homogenisiert werden. Shimsysteme mit bis zu 38 unabhängigen Shim-Spulen beziehungsweise Stromquellen sind schon bekannt.

[0004] Neben der Vorrichtung zur Erzeugung der Magnetfelder wird ein Verfahren zum Auffinden der geeigneten Stromeinstellung benötigt. Ein solches Verfahren, welches im konkreten Anwendungsfall zur gewünschten homogenen Magnetfeldverteilung im Arbeitsvolumen führt, wird Shim-Verfahren genannt. Eine besondere Schwierigkeit solcher Verfahren besteht im Umgang mit der grossen Anzahl Freiheitsgrade bei der Wahl der Stromeinstellung. Insbesondere schon lange bekannte Shim-Verfahren (siehe etwa Referenz [1]), welche eine, die globale Homogenität erfassende, Messgrösse, wie die Amplitude, die Signalenergie oder das zweite Moment einer Resonanzlinie, schrittweise verbessern, indem sie kleine Änderungen an jedem Stromfreiheitsgrad vornehmen, leiden unter der mit zunehmender Anzahl Freiheitsgrade enorm ansteigenden Anzahl benötigter Verfahrensschritte.

[0005] Eine entscheidende Verbesserung gegenüber einem solchen Verfahren wird erreicht, indem das Shim-Verfahren Information über die räumliche Verteilung des statischen Magnetfeldes im Arbeitsvolumen berücksichtigt. Die Information über die räumliche Verteilung des statischen Magnetfeldes wird in einem Verfahrensschritt gewonnen, bei dem die Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ des statischen Magnetfeldes mit Hilfe eines geeigneten Messverfahrens kartiert wird.

Weiterer Stand der Technik

[0006] Besonders effiziente bekannte Verfahren zur Einstellung der Ströme in den Shim-Spulen weisen folgende Schritte auf:

- (a) Kartierung der Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ des statischen Magnetfeldes
- (b) Festlegen einer Zielfeldverteilung $BOT(r)$
- (c) Erzeugen der Zielfeldverteilung $BOT(r)$ im Arbeitsvolumen, indem Ströme durch die Shim-Spulen eingestellt werden.

[0007] Ein solches Verfahren wird in Referenz [4] beschrieben: Die Kartierung der Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ im Arbeitsvolumen des statischen Magnetfeldes erfolgt mittels eines Verfahrens, das auf phasensensitiver Magnetresonanz-Bildgebung beruht, und bei dessen Durchführung für die Ermittlung der räumlichen Herkunft der Signale schaltbare Gradienten-Spulen eingesetzt werden. Beispiele für solche Verfahren sind das Gradienten-Echo-Verfahren oder das Spin-Echo-Verfahren.

[0008] Beim Festlegen der Zielfeldverteilung $BOT(r)$ wird ein Qualitätskriterium verwendet, dessen optimaler Wert (Minimum oder Maximum) die Zielfeldverteilung $BOT(r)$ festlegt. Im Verfahren gemäss Referenz [4] wird ein Qualitätskriterium verwendet, das von einem simulierten Spektrum abgeleitet wird. An diesem vorhergesagten Spektrum werden Eigenschaften wie die Halbwertsbreite von Spektrallinien und von Umhüllenden um Spektrallinien ermittelt und zu einer Grösse kombiniert, welche als Zielgrösse für einen Optimierungsalgorithmus dient. Nachdem der Optimierungsalgorithmus ein Optimum für diese Zielgrösse gefunden hat, wird die zu diesem Optimum gehörende Magnetfeldverteilung als Zielfeldverteilung festgelegt. Anschliessend werden bei diesem Verfahren iterativ die Ströme in den Shim-Spulen eingestellt und der erzielte Effekt durch erneutes Kartieren der Magnetfeldverteilung im Arbeitsvolumen überprüft, bis die Zielfeldverteilung erreicht wird.

[0009] Zum Auffinden der Zielfeldverteilung geeignete Optimierungsalgorithmen sind viele bekannt. Namentlich das Gauss-Newton-Verfahren, die Methode der konjugierten Gradienten, das Simplex-Verfahren und das Simulated Annealing kommen in Frage. Generell steigt bei allen diesen Methoden der Rechenaufwand zum Auffinden eines Optimums

mit höherer Dimensionalität des Parameterraums, in diesem Fall mit der Anzahl von Shim-Spulen beziehungsweise der entsprechenden Anzahl an Strömen.

[0010] Der dem Gegenstand der vorliegenden Erfindung am nächsten kommende Stand der Technik ist in der eingangs zitierten Referenz [5] beschrieben:

[0011] Auch hier wird zum Festlegen der Zielfeldverteilung eine Optimierung eines Qualitätskriteriums durchgeführt, wobei beim Optimierungsverfahren eine räumliche Gewichtungsfunktion verwendet wird. Eine effiziente Optimierung wird erzielt, indem eine Reduktion des Parameterraums auf eine Dimension gemacht wird. Die Optimierung in einem eindimensionalen Parameterraum wird hier so umgesetzt, dass die gemessene Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ jeweils einem gewichteten Fit mit räumlicher Gewichtungsfunktion $W(r, k) = (B_1(r))^k$ unterzogen wird, wobei die Potenz k variiert wird. Die Fitfunktionen sind dabei die Feldverteilungen der Shim-Spulen. Die Rolle des einzigen Parameters wird von k übernommen. Jede Wahl des Parameters k führt dabei zu einer Liste von einzustellenden Strömen für die Shim-Spulen und zu einer Feldverteilung, die nahe an einer homogenen Verteilung liegt.

[0012] Eine kleine Anzahl Analysen (d.h. eine kleine Anzahl von Werten für k) reicht oftmals um eine sehr gute Lösung zu finden, auch wenn nicht garantiert werden kann, dass es sich dabei um die optimale Lösung handelt. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass eine Optimierung in einem hochdimensionalen Parameterraum mit so vielen Dimensionen, wie Shim-Spulen vorhanden sind, vermieden werden kann.

Weitere Probleme und Nachteile des Standes der Technik

[0013] Eine weitere Problematik von Shim-Verfahren ergibt sich aus der Tatsache, dass die Approximation einer Magnetfeldverteilung, wie sie aus der Kartierung der Feldverteilung im Arbeitsvolumen entsteht, durch einen Satz von Feldverteilungen, wie sie von den Shim-Spulen erzeugt werden können, im Allgemeinen zu einem mathematisch schlecht gestellten Problem führt. Der bekannte Ansatz mit mathematisch schlecht gestellten Problemen umzugehen ist die Regularisierung des Problems (siehe zum Beispiel Referenz [6]).

[0014] Mittels Regularisierung, wo mit kleinstmöglicher Filterwirkung versucht wird, hochfrequente Oszillationen zu verhindern, können diese Probleme weitgehend behoben werden. Eine Anwendung von Regularisierung auf das Shimmen von MRI Experimenten ist beschrieben in Referenz [3]. Das dort beschriebene Shim-Verfahren zielt darauf ab, die numerischen Instabilitäten zu beheben, die entstehen, wenn mit Shim-Spulen, welche so konstruiert sind, dass die von ihnen erzeugten Magnetfelder in einem kugelförmiges Volumen um einen Mittelpunkt herum einen orthogonale Funktionensatz bilden, ein Arbeitsvolumen geshimmt werden soll, welches nicht kugelförmig ist, und dessen Zentrum gegenüber dem Mittelpunkt der Shimspulen verschoben ist (siehe Referenz [3], Spalte 1, Zeilen 56–63).

[0015] Wird in diesem Fall bis zu hohen Ordnungen geshimmt (d.h. eine grosse Anzahl von Stromfreiheitsgraden bestimmt), so wirken sich bereits kleine, beispielsweise aufgrund von Messrauschen entstandene Fehler in den kartierten Magnetfeldern so aus, dass riesige Shimströme mit entgegengesetzten Vorzeichen als unbrauchbare Lösung resultieren, falls nicht regularisiert wird. Mit der Anwendung eines Regularisierungsverfahrens kann das Divergieren der Ströme vermieden werden.

[0016] Auch wenn in einem konkreten Anwendungsfall die im letzten Abschnitt beschriebenen Probleme mit divergierenden Strömen nicht auftreten, ist es generell von hohem Interesse, Shimstrom-Einstellungen zu finden, die bezüglich Shimleistung sparsam sind. Gründe dafür sind die Vermeidung der Erwärmung des Messsystems und des Probenvolumens durch die benachbarten Shim-Spulen. Weiter ist es von Vorteil, die Stromquellen mit Strömen ausreichend weit von Limitierungen der Hardware entfernt zu betreiben. Neben Maximalwerten für die einzelnen Ströme sind auch die Gesamtleistung des Netzteils, welches die Stromquellen versorgt, sowie die Temperatur von elektronischen Elementen relevante Limitierungen.

[0017] Eine Einschränkung der Optimierung auf eine Dimension im Parameterraum, wie in Referenz [5] beschrieben, ist zu restriktiv, um derartige Hardware-Limitierungen im Strom oder der Leistung zu berücksichtigen. Eine explizite Berücksichtigung dieser Limitierungen führt aber wieder dazu, dass der Parameterraum in voller Grösse berücksichtigt werden muss, was zu zeitlich lange dauernder Optimierung führt.

[0018] Eine sehr primitive Art der Berücksichtigung von Stromlimitierungen besteht einfach darin, zuerst eine Optimierung des Qualitätskriteriums ohne Berücksichtigung der Limitierung zu berechnen und dann die Einzelströme für die Shim-Spulen auf den jeweils maximal zulässigen Wert zu kappen. Wie in Referenz [7] gezeigt wird, kann im Allgemeinen bei denselben Minimierungen ein besseres Resultat erreicht werden. Die in Referenz [7] vorgeschlagene Verbesserung wendet einen Minimierungsalgorithmus an, der auf den Spezialfall von je einer positiven und negativen Limite für jeden einzelnen Shimstrom und einer quadratischen Abhängigkeit des Qualitätskriteriums von den Shimströmen zugeschnitten ist. Wie oben diskutiert spielen in der Praxis auch komplexere Limitierungen, wie etwa die Shimleistung, eine Rolle. Es sind auch Qualitätskriterien wünschbar, welche eine andere als eine quadratische Abhängigkeit von den Shimströmen aufweisen. In diesen beiden Fällen ist der Algorithmus nicht mehr anwendbar. Darüber hinaus wird in dem in Referenz [7] vorgeschlagenen Minimierungsalgorithmus der Parameterraum der Shimströme in voller Grösse berücksichtigt werden.

[0019] Im Gegensatz dazu lässt die Anwendung eines Regularisierungsverfahrens zumindest eine indirekte Beeinflussung der Shimleistung zu. Die optimal-regularisierten Lösungen geben aber keine Auskunft über die Qualität des Shimzustandes

als Funktion der Shimstromleistung. Es gibt oftmals viele andere Lösungen von vergleichbarer Shimqualität, welche aber deutlich weniger Leistung brauchen.

Aufgabe der Erfindung

[0020] Der vorliegenden Erfindung liegt demgegenüber die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der eingangs definierten Art vorzustellen, in welchem bei der Ermittlung der Zielfeldverteilung die Hardware-Limitierungen berücksichtigt werden, ohne dass dabei der Rechenaufwand bei der Optimierung zur Ermittlung der Zielfeldverteilung deutlich grösser wird.

[0021] Des Weiteren soll die Erfindung bewirken, dass mehr Punkte im Parameterraum getestet werden um damit die Wahrscheinlichkeit zu reduzieren, dass die Nähe zur optimalen Lösung verpasst wird. Mittels der Erhöhung der Anzahl Punkte im Parameterraum soll eine unabhängige Richtung ausgetestet werden.

Kurze Beschreibung der Erfindung

[0022] Diese Aufgabe wird auf überraschend einfache Art und Weise sowie mit ohne Weiteres zur Verfügung stehenden technischen Mitteln gelöst durch eine Modifikation eines Verfahrens mit den eingangs genannten Merkmalen, die dadurch gekennzeichnet ist, dass als Optimierungsverfahren ein Filterverfahren verwendet, bei dem mittels Filterfaktoren eine Norm der Shimströme beeinflusst wird, und dass das Optimierungsverfahren in einem Parameterraum mit M Kontrollparametern arbeitet, wobei $2sM < N$, wobei einer der Kontrollparameter als Gewichtungsfaktor zur Modifikation einer räumlichen Gewichtungsfunktion verwendet wird, und wobei ein weiterer Kontrollparameter die Filterfaktoren kontrolliert.

[0023] Das oben genannte Ziel der Erfindung wird dadurch erreicht, dass der Kontrollparameter, welcher die Norm der Shimströme kontrolliert, Lösungen im vollen Parameterraum definiert, welche sehr schnell berechnet werden können. Die letztendliche Lösung wird aus einer kleinen Zahl von Versuchslösungen gewählt, welche von den wenigen (M) Kontrollparametern aufgespannt werden. Damit wird mit sehr wenig zusätzlichem Aufwand erreicht, dass eine besonders gute Lösung gefunden wird, welche die Norm der Shimströme minimiert.

Wirkungsweise der Erfindung und weitere Vorteile gegenüber dem Stand der Technik

[0024] Mit Hilfe des erfindungsgemäss modifizierten Verfahrens kann insbesondere im Vergleich zum nächstkommenden Stand der Technik der Abstand der resultierenden Lösungen zu den Hardware-Limitierungen beeinflusst werden. Die Hardware-Limitierungen können in Form einer Norm der Ströme ausgedrückt werden. Diese Norm kann durch die Wahl des Kontrollparameters, der die Filterfaktoren im Filterverfahren kontrolliert, gezielt in Richtung kleinerer Werte der Norm der Ströme beeinflusst werden. Diese Möglichkeit der gezielten Beeinflussung der Norm der Ströme fehlt im nächsten Stand der Technik gänzlich.

[0025] Gegenüber dem älteren Stand der Technik, z.B. gemäss Referenz [4], bei dem im Optimierungsschritt zur Festlegung der Zielfeldverteilung die volle Dimensionalität N (nämlich die Anzahl der Shimströme) der Aufgabe berücksichtigt wird, kann im erfindungsgemässen Verfahren die Anzahl Kontrollparameter M deutlich kleiner als N gewählt werden, und damit der Rechenaufwand deutlich reduziert werden. Das erfindungsgemässe Verfahren ermöglicht eine Reduktion der Anzahl Kontrollparameter bis $M=2$.

Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung

[0026] In der Praxis wird das erfindungsgemässe Verfahren bei Apparaturen Anwendung finden, bei welchen die Magnetresonanz-Vorrichtung ein NMR-Spektrometer, ein MRI-Scanner, ein EPR-Gerät oder ein Ionen-Zyklotron-Resonanz-Gerät ist. Diese Vorrichtungen werden alle auf eine Weise verwendet, bei der ein sehr homogenes Magnetfeld in einem Arbeitsvolumen Voraussetzung für ein optimales Messresultat ist. Weiter sind bei diesen Vorrichtungen immer auch die Einstellmöglichkeiten der Magnetfeldhomogenität mittels Shim-Strömen durch die verfügbare Hardware limitiert. Beim Betrieb dieser Vorrichtungen profitiert man in besonderem Masse vom erfindungsgemässen Verfahren, welches bestmögliche Homogenität des Magnetfeldes unter Berücksichtigung dieser Hardware-Limiten erreicht. Ganz besonders vorteilhaft sind Weiterbildungen des erfindungsgemässen Verfahrens, bei welchen die Magnetresonanz-Vorrichtung ein NMR-Spektrometer ist, bei dem eine Probe um eine oder mehrere Achsen rotiert wird, wobei die Achsen in Bezug auf die Richtung des statischen Magnetfeldes geneigt sein können. Shim-Systeme für NMR-Spektrometer sind meist so konstruiert, dass ein aktives Volumen mit einer Rotationsachse parallel zum statischen Magnetfeld besonders effizient geshimmt werden kann. Weicht man von dieser Probengeometrie ab, so werden möglicherweise Ströme in Shim-Spulen auf eine ineffiziente Weise zur Beeinflussung der Feldhomogenität eingesetzt. Das erfindungsgemässe Verfahren berücksichtigt die Norm der Shimströme und ist damit in der Lage, Shim-Spulen welche eigentlich für eine andere Probengeometrie - insbesondere eine Probengeometrie mit anderer Rotationsachse - konstruiert wurden, effizient einzusetzen.

[0027] Bei weiteren vorteilhaften Ausführungsformen des erfindungsgemässen Verfahrens wird im Schritt (a) zur Kartierung der Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ des statischen Magnetfeldes ein Gradienten-Echo-Verfahren oder ein Spin-Echo-Verfahren verwendet. Diese bekannten bildgebenden Verfahren zur Abbildung einer Magnetfeldverteilung ermöglichen die Kartierung des Magnetfeldes mit der Verwendung von Mitteln wie sie in der Magnetresonanzapparatur sowieso schon vorhanden sind, d.h. Sende-/Empfangsspulen und Gradienten-Spulen. In dieser Ausführungsform des erfindungsgemässen Verfahrens sind also keine zusätzlichen Messmittel notwendig, um das Verfahren durchzuführen. Besonders bevorzugt

sind auch Ausführungsformen der Erfindung, bei welchen beim Festlegen der Zielfeldverteilung im Schritt (b) der Einstellbereich der Shimströme und die aufgenommene Leistung aller Shim-Spulen berücksichtigt werden. Bei der aufgenommenen Leistung aller Shim-Spulen handelt es sich um einen Spezialfall einer Norm der Shim-Ströme, welche konkrete technische Bedeutungen für den Betrieb der Messapparatur hat. Einerseits beschreibt es die Heizleistung, welche in den Shim-Spulen und damit in der Nähe zum Arbeitsvolumen abgegeben wird. Viele Magnetresonanz-Messungen hängen von der Temperatur der Probe ab, wobei sich ein Übermass an abgegebener Heizleistung in der Nähe des Arbeitsvolumens ungünstig auf die Messung auswirken kann. Eine Berücksichtigung dieses Effekts bereits bei der Auswahl der Zielfeldverteilung vermeidet diese negativen Auswirkungen. Andererseits ist die aufgenommene Leistung aller Shim-Spulen ein wichtiges Mass für die Belastung der Stromversorgung und üblicherweise hat diese Leistung eine definierte Obergrenze, welche bei gegebenen Mitteln zur Stromversorgung nicht überschritten werden kann.

[0028] Ganz besonders bevorzugt sind auch Ausführungsformen des erfindungsgemässen Verfahrens, bei denen im Schritt (b) verwendete Filterverfahren eines der folgenden Verfahren ist:

Tikhonov-Regularisierung oder

Tikhonov-Phillips-Regularisierung oder

Truncated-Singular-Value-Decomposition oder

Damped-Singular-Value-Decomposition.

Diese genannten Verfahren gehören zu den geeignetsten bekannten Methoden, mathematisch schlecht gestellte Probleme (sogenannte ill-posed Problems) zu bearbeiten. Die Methoden benutzen einen einzigen Regularisierungsparameter, welcher die Filterwirkung festlegt. Stetiges Erhöhen des Werts des Regularisierungsparameters erlaubt es, Lösungen im vollen Parameterraum zu finden, welche einer immer kleineren Norm der Shimströme entsprechen. Regularisierungsmethoden, bei welchen der Wert des Regularisierungsparameters kontinuierlich variiert werden kann, sind dabei besonders vorteilhaft.

[0029] Vorteilhafte Weiterbildungen dieser Ausführungsformen sind dadurch gekennzeichnet, dass das Optimierungsverfahren im Schritt (b) ein numerisches Qualitätskriterium optimiert, und dass ein Berechnungsverfahren zur Berechnung des Qualitätskriteriums verwendet wird, wobei das Berechnungsverfahren als Eingabe das statische Magnetfeld $B_0(r)$, den Einfluss der Ströme in den Shimspulen auf das Magnetfeld sowie einen Gewichtungssparameter und einen Regularisierungsparameter entgegennimmt, wobei das Berechnungsverfahren als Ausgabe das Qualitätskriterium und eine Liste von Stromeinstellungen produziert, und wobei im Optimierungsverfahren die folgenden Schritte durchgeführt werden:

(i) Wahl einer Liste von Werten für einen ersten Kontrollparameter, den Gewichtungssparameter;

(ii) Wahl einer Liste von Werten für einen zweiten Kontrollparameter, den Regularisierungsparameter,

(iii) Bildung von Paaren von Gewichtungssparameter und Regularisierungsparameter aus der Liste von Werten aus (i) und der Liste von Werten aus (ii) und Berechnung des Qualitätskriteriums mit Eingabe dieses Paares von Gewichtungssparameter und Regularisierungsparameter,

(iv) Beurteilen, ob die Liste der Stromeinstellungen eine realisierbare Stromeinstellung ist,

(v) Auswählen des optimalen Paares von Gewichtungssparameter und Regularisierungsparameter anhand des Qualitätskriteriums und unter Ausschluss der nicht realisierbaren Stromeinstellungen.

[0030] Diese vorteilhaften Weiterbildungen des erfindungsgemässen Verfahrens arbeiten mit der minimalen Anzahl von Kontrollparametern, mit der die erfinderischen Idee verwirklicht werden kann, nämlich mit $M=2$. Dadurch wird der Rechenaufwand bei der Optimierung zur Ermittlung der Zielfeldverteilung, insoweit er von der Anzahl Kontrollparametern abhängt, so stark wie möglich reduziert. Ausserdem wird im Schritt (iv) eine explizite Überprüfung der Einstellbarkeit der Ströme für jedes aus der Eingabe eines Paares von Gewichtungssparameter und Regularisierungsparameter resultierenden Ergebnis ausgeführt. Auf diese Weise kann auch eine Liste von auf komplexer Weise von den einzelnen Shim-Strömen abhängigen Bedingungen bei der Wahl der anzustrebenden Zielfeldverteilung berücksichtigt werden.

[0031] Besonders bevorzugte Varianten dieser Weiterbildungen zeichnen sich dadurch aus, dass in der Berechnung des Qualitätskriteriums ein simuliertes Magnetresonanz-Spektrum verwendet wird. Bei der Anwendung des Verfahrens auf eine spektroskopische Methode steht die Qualität des resultierenden Spektrums im Vordergrund. Die Verbindung zwischen der Magnetfeldverteilung im Raum, welche durch das erfindungsgemässe Verfahren eingestellt wird, und dem resultierenden Spektrum wird durch die Simulation des Spektrums hergestellt. Diese Vorgehensweise erlaubt es, das Qualitätskriterium in der Sprache des Spektroskopikers zu formulieren, sowie die für das geplante Experiment relevanten Eigenschaften der Probe, die verwendete Messmethode und deren spezifische Abhängigkeit von der Homogenität des Magnetfeldes explizit zu berücksichtigen. In den Rahmen der vorliegenden Erfindung fällt auch ein elektronisch lesbarer Datenträger, auf dem ein Computerprogramm gespeichert ist, welches bei seiner Durchführung ein Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche ausführt. Ein solcher elektronisch lesbarer Datenträger ist ein besonders günstiges Mittel, um einem Benutzer einer modernen, computergesteuerten Magnetresonanz-Vorrichtung die Ausführung des erfindungsgemässen Verfahrens zu ermöglichen.

[0032] Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter ausgeführten Merkmale erfindungsgemäss jeweils einzeln für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen sind nicht als abschliessende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter für die Schilderung der Erfindung.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung und Zeichnung

[0033] Die Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen:

- Fig. 1 ein Flussdiagramm mit Optimierung in einem Parameterraum mit $M=2$ Kontrollparametern;
- Fig. 2 ein Flussdiagramm mit Shim-Verfahren gemäss Stand der Technik;
- Fig. 3 ein Flussdiagramm mit möglichem Ablauf einer erfindungsgemässen Verfahrensvariante;
- Fig. 4a, b die Konstruktion eines Satzes von räumlichen Gewichtungsfunktionen für den Fit mit variierender Datenbreite mit
 (a) Funktionen zur Variation der Datenbreite, wobei durch Skalierung des gemessenen Anregungsprofils mit diesen Funktionen die Gewichtungsfunktionen in Fig. 4b entstehen;
 (b) in jeder Zeile das mit der korrespondierenden Funktionen aus Fig. 4a skalierte Anregungsprofil, welches als Gewichtungsfunktion im Fit verwendet wird;
- Fig. 5a, b die Illustration der Optimierung des Qualitätskriteriums in einem zweidimensionalen Parameterraum mit
 (a) 2D-Plot Qualitätskriterium für Shimzustand vs. Log Regularisierungsparameter (horizontal) und Datenbreite (vertikal);
 (b) 2D-Plot Qualitätskriterium für Shimzustand vs. Log der 2-Norm der Shimströme (horizontal) und Datenbreite (vertikal);
- Fig. 6 das Qualitätskriterium (Q) für Shimzustand in Funktion der Datenbreite für durch optimale Regularisierung («discrepancy principle» oder L-Plot) gewonnene Lösungen;
- Fig. 7a–d die Erzeugung von räumlichen Gewichtungsfunktionen für den Fit, abgeleitet aus einem MRI-Bild mit
 (a) vorbereitend für den Shimvorgang aufgenommenem MRI-Bild, worin ein vom Benutzer ausgewähltes Gebiet (71), in welchem höchste Homogenitätsanforderungen gestellt werden, weitere Gebiete (72) mit unterschiedlicher, durch verschiedene Schraffur symbolisierte, Signalstärke und Gebiete (73), wo kein Signal empfangen wurde;
 (b) eine räumliche Gewichtungsfunktion mit Werten 0 bis 1 entlang der W-Achse für den Fit beim Shimvorgang, wobei ein gleichmässiger Übergang von vollem Gewicht 1 im Gebiet 71 auf Gewicht 0 im Gebiet 73 vorhanden ist;
 (c) eine räumliche Gewichtungsfunktion mit Werten 0 bis 1 entlang der W-Achse für den Fit beim Shimvorgang, wobei die Gewichtungsfunktion aus Fig. 7b mit k potenziert wurde, und wobei $0 < k < 1$, sodass Gebiete nahe an (71) ein erhöhtes Gewicht erhalten;
 (d) eine räumliche Gewichtungsfunktion mit Werten 0 bis 1 entlang der W-Achse für den Fit beim Shimvorgang, wobei die Gewichtungsfunktion aus Fig. 7b mit k potenziert wurde, und wobei $k > 1$, sodass das Gewicht für Gebiete ausserhalb von (71) schnell abfällt;
- Fig. 8a, b weitere Möglichkeiten, die räumlichen Gewichtungsfunktionen mit einem Parameter zu variieren, nämlich
 (a) Variation der räumlichen Gewichtungsfunktion für den Fit, in Form von $(B1(r))^k$, wobei k von unten nach oben folgende Werte annimmt: 0.01, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20; und
 (b) Variation der räumlichen Gewichtungsfunktion für den Fit, wobei die z-Position einer Stelle mit reduziertem Gewicht variiert wird.

[0034] Bei der Durchführung des erfindungsgemässen Verfahrens werden die Schritte

(a) Kartierung der Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ des statischen Magnetfeldes

(b) Festlegen einer Zielfeldverteilung $B_{OT}(r)$

(c) Erzeugen der Zielfeldverteilung $B_{OT}(r)$ im Arbeitsvolumen, indem Ströme durch die Shim-Spulen eingestellt werden, passend zur Aufgabe in einen Gesamtablauf eingebaut, welcher Wiederholungen der Schritte und Entscheidungen über die Erreichung eines Ziels beinhalten kann.

[0035] Ein möglicher Ablauf ist in Fig. 3 der Referenz [5], dargestellt (hier in Fig. 2 reproduziert). Dieser Ablauf enthält einen bisher nicht besprochenen inneren «Fit-Loop», bei dem nur die Differenz zwischen aktueller Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ und der Zielfeldverteilung $B_{OT}(r)$ gefittet wird, ohne eine neue Zielfeldverteilung festzulegen. Ein solcher Loop macht das Verfahren robuster für den Fall, dass die berechnete Stromänderung nicht exakt zur vorausberechneten Änderung in der Magnetfeldverteilung führt. Iteratives Nachjustieren, ohne den Aufwand zu betreiben, der mit der Festlegung einer neuen Zielfeldverteilung und der dazu benötigten Optimierung verbunden ist, kann das gesamte Verfahren deutlich beschleunigen. Letztlich ist aber bei genauer Kenntnis der Reaktion der gesamten Messanordnung auf Stromänderungen im Shimsystem diese Schleife nicht mehr nötig und somit nicht zwingender Bestandteil des erfindungsgemässen Verfahrens.

[0036] Zur Kartierung der Magnetfeldverteilung im Arbeitsvolumen kommen verschiedene Methoden in Frage. Phasen-sensitive Magnetresonanz-Bildgebungs-Verfahren, welche schaltbare Gradienten-Spulen verwenden, wie das Gradienten-Echo-Verfahren oder das Spin-Echo-Verfahren, sind besonders geeignet, die Kartierung der Magnetfeldverteilung im Arbeitsvolumen durchzuführen. Die Information über das lokale Magnetfeld wird dabei aus der Phasendifferenz der Signale in zwei Bildern gewonnen, die mit unterschiedlicher Evolutionszeit für die Spins aufgenommen werden.

[0037] Der Vorteil dieser Methoden besteht darin, dass die Kartierung des Magnetfeldes mit derselben Apparatur (d.h. Sende-/Empfangsspulen, Gradienten-Spulen) durchgeführt werden kann, mit der auch das Experiment durchgeführt wird, für das die Homogenisierung des Magnetfeldes Voraussetzung ist. Auch die schliesslich verwendete Probe oder das abzubildende Objekt, respektive der zu untersuchende Patient, kann sich bereits in der Messposition befinden, sodass deren Einfluss auf die Homogenität des Magnetfeldes bereits mitberücksichtigt und korrigiert werden kann.

[0038] Andere bekannte Methoden zur Messung magnetischer Felder mit räumlicher Auflösung verwenden einen verschiebbaren Magnetfeldsensor, mit dem das Magnetfeld an unterschiedlichen Positionen gemessen werden kann oder einen Array von Magnetfeldsensoren. Hier sind Hallensoren oder kleine NMR-Proben geeignet. Eine solche Methode kann z.B. bei der Installation eines Hauptfeldmagneten zur Erzeugung einer Grundhomogenität des Magnetfeldes verwendet werden. Nach der Homogenisierung des Magnetfeldes muss der verschiebbare Magnetfeldsensor allerdings durch eine andere Messvorrichtung ersetzt werden und auch die zu untersuchende Probe darf sich während der Kartierung des Magnetfeldes nicht im Arbeitsvolumen befinden.

[0039] Beim Festlegen der Zielfeldverteilung $BOT(r)$ werden ein oder mehrere Qualitätskriterien verwendet, von denen sich eine Zielgrösse ableiten lässt, deren optimaler Wert (Minimum oder Maximum) die Zielfeldverteilung $BOT(r)$ festlegt. Eine Zielgrösse, welche zur Festlegung der Zielfeldverteilung herangezogen werden kann, ist die Wurzel aus dem Mittelwert der quadrierten Abweichungen vom konstanten Sollfeld (root mean squared deviation, RMSD).

[0040] Nicht immer ist diese Grösse geeignet, um die Qualität des Zielfeldes zu garantieren. Dies ist zum Beispiel der Fall bei Spektren, wo möglichst hohe Auflösung der Spektrallinien erreicht werden und gleichzeitig eine Aufspaltung in nahe benachbarte Linien, die mit Multipletts verwechselt werden könnten, vermieden werden muss. In einem solchen Fall ist ein Verfahren gemäss Referenz [4] geeignet, wobei die Zielfunktion berechnet wird, in dem eine Vorhersage des resultierenden Spektrums ausgewertet wird. An diesem vorhergesagten Spektrum werden Eigenschaften wie die Halbwertsbreite von Spektrallinien und von Umhüllenden um Spektrallinien ermittelt und zu einer Grösse kombiniert, welche als Zielgrösse für einen Optimierungsalgorithmus dient.

[0041] Diese Vorgehensweise der Verwendung eines simulierten Spektrums erlaubt es, das Qualitätskriterium in der Sprache des Spektroskopikers zu formulieren, sowie die für das geplante Experiment relevanten Eigenschaften der Probe, die verwendete Messmethode und deren spezifische Abhängigkeit von der Homogenität des Magnetfeldes explizit zu berücksichtigen. Mögliche Qualitätskriterien können zum Beispiel die Halbwertsbreite, die Breite auf einer anderen Höhe oder die Halbwertsbreite einer Umhüllenden (wie in Referenz [4] beschrieben) einer Spektrallinie sein. Die natürliche Linienbreite der zu untersuchenden Probe ist ein wichtiger experimenteller Parameter, der, richtig gesetzt, ein ineffizientes Homogenisieren auf zu feiner Skala vermeidet. Auf derselben Apparatur können verschiedenen Pulssequenzen verwendet werden, die unterschiedlich empfindlich auf Inhomogenitäten des Magnetfeldes sind. Auch dieser Effekt kann bei der Simulation des Spektrums mitberücksichtigt werden.

[0042] Ein anderes Qualitätskriterium, das für die Beurteilung der Homogenität bei MRI-Bildern besonders nützlich ist, entsteht, indem der lokale Gradient des Magnetfeldes (Gradienten aller drei Raumrichtungen) quadriert und über alle Voxel aufsummiert wird. Durch Minimierung des so entstehenden Wertes wird das gesamte Signal, soweit es von der Homogenität des Magnetfeldes abhängt, maximiert, indem die durch lokale Gradienten verursachte Intra-Voxel-Dephasierung minimiert wird.

[0043] Das entscheidende Merkmal der vorliegenden Erfindung ist die Optimierung in einem Parameterraum mit M Kontrollparametern, wobei $2 \leq M < N$ ist, beim Ermitteln der Zielfeldverteilung $BOT(r)$. Mindestens einer der Kontrollparameter, der Gewichtungparameter, wird zur Modifikation einer räumlichen Gewichtungsfunktion verwendet. Dieser Parameter dient dazu, mögliche Lösungen im hochdimensionalen Parameterraum der Shimströme zu finden, indem die relative Gewichtung von Teilbereichen in den Messdaten variiert wird.

[0044] Eine mögliche Realisierung eines solchen Gewichtungsparmeters ist in Referenz [5] mit dem Parameter k gegeben:

[0045] Eine von k abhängige Gewichtungsfunktion $W(r, k) = (B_1(r))^k$ wird basierend auf dem normierten RF-Anregungsprofil $B_1(r)$ konstruiert. Die Wirkung der Wahl von k ist so, dass mit $k=1$ die Gewichtung des Anregungsprofils unverändert übernommen wird, dass mit $0 < k < 1$ der Rand des Anregungsprofils stärker gewichtet wird, und dass mit $k > 1$ der Rand des Anregungsprofils im Fit schwächer gewichtet wird.

[0046] Die lokale Wirkung von k hängt dabei vom Wert des Anregungsprofils an der jeweiligen Stelle ab. Die Wahl einer räumlichen Gewichtungsfunktion, welche sich ihrer Form stark an das Anregungsprofil der RF-Spule anlehnt, eignet sich besonders im Fall einer spektroskopischen Methode, bei der eine homogene Probe untersucht wird. In diesem Fall ist die unterschiedliche Behandlung der Regionen in der Probe, welche stark zum empfangenen Signal beitragen, und Regionen

in der Probe, welche am Rand des Anregungsprofils liegen und nur schwaches und allenfalls durch Messartefakte beeinträchtigte Beiträge liefern, wichtig.

[0047] Eine Palette solcher Gewichtungsfunktionen, welche mit Variation der Potenz k aus dem gemessenen Anregungsprofil $B_1(z)$ erzeugt wurde, ist in Fig. 8a dargestellt.

[0048] Eine weitere Möglichkeit, über die Gewichtungsfunktion beim Fitten eine Variation der Lösungen zu erhalten, wird erzielt, wenn ein gemessenes Anregungsprofil mit einer Funktion skaliert wird, welche die effektive Breite des Signals moduliert. Zudem wird diese Funktion auch berücksichtigt bei der Analyse der skalierten Daten.

[0049] In Fig. 4b ist gezeigt, wie aus einem gemessenen Anregungsprofil, mittels der in Fig. 4a dargestellten 14 verschiedenen Funktionen, welche dazu dienen, die Datenbreite zu variieren, ein Satz von Gewichtungsfunktionen erzeugt werden kann. Mittels einer effizienten linearen Analyse wird dann ein Ergebnis erzielt, wie in den Fig. 5a und 5b gezeigt wird, aus dem dann die beste Lösung gewählt wird. Die Achsenrichtung $\hat{t}_1$ bezeichnet in diesen Figuren die Richtung, in der die Datenbreite variiert wird.

[0050] Eine dritte Möglichkeit, die räumliche Gewichtungsfunktion zu variieren ist nützlich in Fällen, wo das Fitresultat stark von einer lokalisierten Verzerrung der Magnetfeldverteilung beeinflusst wird. Anstatt wie oben die Breite der Verteilung zu variieren, wird die räumliche Position einer Zone variiert, in der die Gewichtungsfunktion lokal reduziert werden soll. Ein Satz von solchen Funktionen ist in Fig. 8b gezeigt.

[0051] Im Fall von bildgebenden Anwendungen ist die Wahl einer räumlichen Gewichtungsfunktion erforderlich, welche die räumliche Anordnung des abzubildenden Objekts berücksichtigt. Eine geeigneten Gewichtungsfunktion lässt sich beispielsweise basierend auf einem vorbereitend aufgenommenen Bild und einer darin vom Anwender markierten Region, in der die höchsten Homogenitätsanforderungen gestellt werden, ableiten. So eine Region kann beispielsweise ein Organ eines zu untersuchenden Patienten sein.

[0052] Ein Kompromiss zwischen globaler Homogenität im ganzen Bild und lokaler Homogenität im ausgewählten Bereich lässt sich durch einen Parameter finden, der die Gewichtungsfunktion kontinuierlich beeinflusst. Ein solcher Parameter lässt sich als erste Dimension in der Optimierung im Schritt (b) des Shim-Verfahrens verwenden. Ein Satz von so konstruierten Gewichtungsfunktionen, die zum schematisch dargestellten MRI-Bild aus Fig. 7a passen, ist in den Fig. 7b, 7c und 7d gezeigt.

[0053] Ein weiterer Kontrollparameter kontrolliert die Filterfaktoren des Filterverfahrens, bei welchem mittels dieser Filterfaktoren eine Norm der Shimströme beeinflusst wird. Die so beeinflusste Norm der Shimströme kann z.B. die gesamte Leistung aller Shim-Spulen sein.

[0054] Die Norm der Shimströme wird dabei auf indirektem Weg beeinflusst. Mit «indirekter Beeinflussung» ist gemeint, dass der genaue Wert der Norm der Shimströme zwar nicht direkt vorgegeben werden kann, aber dass, ausgehend von einer Lösung zu einem Parameterwert, mit der Wahl eines grösseren oder kleineren Wertes für den Kontrollparameter, der die Filterfaktoren kontrolliert, gezielt eine Lösung gefunden werden kann, deren Norm kleiner oder grösser als der Ausgangswert ist.

[0055] Ein geeigneter Parameter ist der Regularisierungsparameter eines Regularisierungsverfahrens, wobei als Regularisierungsverfahren z.B. Diskretisierung, truncated Singular value decomposition (TSVD), damped Singular value decomposition (DSVD), Tikhonov Regularisierung, Tikhonov-Phillips Regularisierung (siehe Referenz [6]) in Frage kommen. Mit einer Norm der Shimströme wird die gesamte Liste von Strömen in den N Shim-Spulen zu einer einzigen Kennzahl kombiniert.

[0056] Falls vor allem die Leistung von Interesse ist, wird die Norm als Wurzel aus der Summe von Quadraten der Shimströme gebildet (die «2-Norm»), allenfalls mit einer Gewichtung, die den unterschiedlichen Widerständen der Shim-Spulen entspricht.

[0057] Ist als limitierende Grösse die Summe der Ströme wichtig, kann alternativ auch die Summe der Beträge der Ströme (die «1-Norm») berücksichtigt werden.

[0058] Möchte man extreme Belastungen einzelner Shim-Spulen vermeiden, so ist die Maximum-Norm die geeignete Grösse.

[0059] Eine sehr effiziente Implementierung des Verfahrens wird erreicht, indem der Regularisierungsparameter λ aus dem Tikhonov-Verfahren ausgenutzt wird, um Lösungen zu erzeugen welche mit steigendem Wert von λ eine stetig sinkende Shimleistung aufweisen.

[0060] Sei

$$K = U W V^T$$

die Singulärwertzerlegung des Satzes von Shimfunktionen K , dann kann die Lösung g der linearen Analyse von den kartierten Daten s nach Methode der kleinsten Quadrate geschrieben werden als

$$g = \sum_{i_2} \frac{1}{w_{i_2}} v_{i_2} u_{i_2}^T s$$

[0061] Dabei sind die Singulärwerte w_i , nach absteigender Grösse sortiert, sodass w_1 der grösste und w_N der kleinste Singulärwert ist, wobei N die Anzahl verfügbarer Shimfunktionen ist. Die typischerweise mit steigendem Index i sehr schnell abfallenden Singulärwerte w_i , sorgen für die numerische Probleme, welche regularisiert werden müssen.

[0062] Bei der Tikhonov-Regularisierung hat der Parameter λ eine Filterwirkung, welche beschrieben wird durch die Gleichung

$$g = \sum_{i_2} \frac{w_{i_2}}{(w_{i_2}^2 + \lambda)} v_{i_2} u_{i_2}^T s$$

[0063] Diese Gleichung kann aber auch ausgenützt werden um auf effiziente Weise Lösungen in den hochkomplexen Parameterraum zu finden, indem Analysen mit unterschiedlichen Werten für λ durchgeführt werden. Von grossem Vorteil ist dabei auch, dass λ mit beliebiger Genauigkeit variiert werden kann, was nicht bei allen Regularisierungsverfahren möglich ist.

[0064] Eine zwei-dimensionalen Darstellung der Shimqualität als Funktion der Datenbreite und des Parameters λ , erzielt aus einer kartierten Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ im Arbeitsvolumen des statischen Magnetfeldes, ist in Fig. 5a anhand eines Praxisbeispiels von einem NMR Probenkopf gezeigt.

[0065] Gängige Verfahren bei Regularisierungsmethoden um den optimalen Wert von λ zu bestimmen, wie z.B. «discrepancy principle» oder L-Plot, geben ein Ergebnis wie in Fig. 6 beziehungsweise auch in Fig. 5a und Fig. 5b mittels hexagonaler Symbole angezeigt. Diese Stellen sind optimiert um mit kleinst-möglichem Anstieg der Abweichung, d.h. mit minimaler Filterwirkung, die numerischen Probleme zu beheben.

[0066] Beim optimalen Wert des Parameters λ wird aber nicht die Lösung gefunden, bei der mit kleinst-möglicher Shimleistung ein beinahe optimales Ergebnis erzielt wird.

[0067] In Fig. 5b ist aufgezeigt, was bei denselben Daten gefunden wird, wenn zu jedem Parameter λ die benötigte Shimleistung ausgewertet wird und der entsprechende Datenpunkt in einem Diagramm mit Shimleistung als horizontaler Achse eingetragen wird. Der zwei-dimensionalen Raum erlaubt es oftmals bei deutlich tieferen Shimleistungen Lösungen von ähnlicher Qualität zu finden, wie sie zum Beispiel mit dem «discrepancy-principle» gefunden wird. Im gezeigten Beispiel ergeben sich Lösungen, die im Vergleich zur regularisierten Lösung bis zu 2 Grössenordnungen an Shimleistung einsparen.

[0068] Eine relativ kleine Auswahl von Punkten im zweidimensionalen Raum reicht oftmals aus um ein lokales Optimum zu bestimmen, und die Anforderungen zu erreichen. Ein wichtiger Punkt bei dieser Auswahl ist es, bekannte Hardwarelimiten zu berücksichtigen, bevor die Shims gesetzt werden und experimentell getestet wird, ob der erwartete Shimzustand damit erreicht wird.

[0069] Dies kann sehr viel Zeit einsparen. Insbesondere bei kompliziertere Problemstellungen, wo der Algorithmus Lösungen ausgibt, welche die Hardwarelimiten überschreiten, ist dieser Mechanismus von grossem Vorteil. Insbesondere gibt der zweite Parameter, der Regularisierungsparameter, die Richtung vor, in welcher eine Lösung gesucht werden muss, die die Hardwarelimiten nicht mehr überschreitet.

[0070] Problemstellungen, in denen ein erhöhtes Risiko besteht, die Hardwarelimiten zu überschreiten sind zum Beispiel stark inhomogene Proben oder Proben in kurzen Behälter (zum Beispiel MAS Rotoren).

[0071] Eine konkrete Implementation des erfindungsgemässen Verfahrens ist in Fig. 3 als Flussdiagramm dargestellt. Als Gewichtungssparameter wurde in diesem Fall die Datenbreite gewählt. Ein zweiter Kontrollparameter für die Optimierung ist hier der Regularisierungsparameter λ der Tikhonov-Regularisierung. Der Ablauf beinhaltet die folgenden Schritte:

- (a) Kartierung der Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ im Arbeitsvolumen des statischen Magnetfeldes
- (b) Treffen der Auswahl von Datenbreitevariationen welche in Betracht gezogen werden zur Skalierung der theoretischen Shimfunktionen
- (c) Fitten der Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ mit den skalierten Shimfunktionen, für sämtliche Datenbreitevariationen und für mehrere Werte von λ
- (d) Festlegen einer Zielfeldverteilung $B_{OT}(r)$ im Arbeitsvolumen, welcher die Forderung nach einem guten Shimzustand bei kleiner Shimleistung entspricht.
- (e) Erzeugen der Zielfeldverteilung $B_{OT}(r)$ im Arbeitsvolumen, indem Ströme durch die Shim-Spulen eingestellt werden
- (f) Kartierung der Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ im Arbeitsvolumen des statischen Magnetfeldes
- (g) Wiederholen der Schritte (b)–(f) solange, bis die Zielfeldverteilung $B_{OT}(r)$ im Arbeitsvolumen annähernd erreicht wird

Haupt-Anwendungsgebiete

[0072] Das erfindungsgemässe Verfahren kann bei sämtlichen bekannten Magnetresonanz-Vorrichtungen angewendet werden, wie zum Beispiel MRI Scanner, NMR Spektrometer oder EPR Geräten, ist aber besonders vorteilhaft bei der hochauflösenden Spektroskopie, wo das Ziel, nämlich eine möglichst schmale, zackenfreie Linienform, oftmals nicht mit der Minimierung der Norm der Zielfeldverteilung $B_{OT}(r)$ erreicht wird.

[0073] Besonders bevorzugt kann das erfindungsgemässe Verfahren zum Homogenisieren des statischen Magnetfeldes in dem Arbeitsvolumen einer Magnetresonanz-Vorrichtung eingesetzt werden, wobei die Magnetresonanz-Vorrichtung ein NMR-Spektrometer, ein MRI-Scanner, ein EPR-Gerät oder ein Ionen-Zyklotron-Resonanz-Gerät sein kann.

Geneigte Rotationsachse

[0074] Verfahren der NMR-Spektroskopie, bei denen eine Probe um eine Achse rotiert wird, die in Bezug auf die Richtung des statischen Magnetfeldes geneigt ist, benötigen vor allem entlang dieser geneigten Rotationsachse(n) eine hohe Homogenität des Magnetfeldes. Magic-Angle-Spinning (MAS), Variable-Angle-Spinning (VAS) und Double Rotation (DOR) sind Beispiele solcher Verfahren. Diese Verfahren können darunter leiden, dass die Shim-Spulen auf die effiziente Beeinflussung der Feldverteilung auf einer Achse parallel zum statischen Magnetfeld ausgelegt sind. Solche Verfahren profitieren besonders von einem erfindungsgemässen Shim-Verfahren, das die Shimqualität und die dazu benötigte Shimleistung berücksichtigt.

[0075] Ebenfalls bevorzugt wird das erfindungsgemässe Verfahren zum Homogenisieren des statischen Magnetfeldes in dem Arbeitsvolumen einer Magnetresonanz-Vorrichtung eingesetzt, wobei die Magnetresonanz-Vorrichtung ein NMR-Spektrometer sein wird, bei dem eine Probe um eine oder mehrere Achsen rotiert wird, die in Bezug auf die Richtung des statischen Magnetfeldes auch geneigt sein können.

Computerprogramm

[0076] Alle Vorgänge beim Betrieb moderner Magnetresonanz-Spektrometer und MRI-Scanner, wie das Senden von RF-Pulsen, das Schalten von Strömen in Gradienten, das Verstellen von Shimströmen und das Empfangen und Digitalisieren von Signalen, werden heutzutage computergesteuert ausgelöst. Daher wird das erfindungsgemässe Shimverfahren idealerweise als Computerprogramm implementiert, welches bei seiner Durchführung auf dem Steuerrechner des Magnetresonanz-Spektrometers oder des MRI-Scanners direkt die notwendigen Vorgänge in der Hardware auslöst. An Benutzer des Spektrometers übermittelt wird ein solches Computerprogramm ganz einfach als elektronisch lesbarer Datenträger enthaltend ein Computerprogramm, welches bei seiner Durchführung das erfindungsgemässe Verfahren ausführt.

Bezugszeichenliste:

[0077]

- 10 Zwei verschachtelte Loops mit Zählvariablen ℓ_1 und ℓ_2
- 11 Schritt (i): Wahl einer Liste von Werten für einen ersten Kontrollparameter, den Gewichtungsparemeter; wähle eine Liste $\{k(1), \dots, k(\ell_{1\max})\}$ von Gewichtungsparemetern
- 12 Schritt (ii): Wahl einer Liste von Werten für einen zweiten Kontrollparameter, den Regularisierungsparemeter; wähle eine Liste $\{\lambda(1), \dots, \lambda(\ell_{2\max})\}$ von Regularisierungsparemetern
- 13 Schritt (iii): Bildung von Paaren von Gewichtungsparemeter und Regularisierungsparemeter aus der Liste von Werten aus (i) und der Liste von Werten aus (ii) und Berechnung des Qualitätskriteriums mit Eingabe dieses Paares von Gewichtungsparemeter und Regularisierungsparemeter; aktuelles Parameterpaar ist $\{k(\ell_1), \lambda(\ell_2)\}$, berechne Qualitätskriterium $Q(\ell_1, \ell_2)$ und dazugehörige Stromeinstellung $J(\ell_1, \ell_2)$
- 14 Schritt (iv): Beurteilen, ob die Liste der Stromeinstellungen eine realisierbare Stromeinstellung ist; Entscheidung ist J einstellbar? Falls ja setze $F(\ell_1, \ell_2)=1$, sonst $F(\ell_1, \ell_2)=0$.
- 15 Schritt (v): Auswählen des optimalen Paares von Gewichtungsparemeter und Regularisierungsparemeter anhand des Qualitätskriteriums und unter Ausschluss der nicht realisierbaren Stromeinstellungen; $\ell_{1\text{opt}}, \ell_{2\text{opt}}$, sodass $Q(\ell_{1\text{opt}}, \ell_{2\text{opt}})$ minimal unter der Nebenbedingung, dass $F(\ell_{1\text{opt}}, \ell_{2\text{opt}}) = 1$. Das aus $B_0(r)$ und $J(\ell_{1\text{opt}}, \ell_{2\text{opt}})$ berechnete Magnetfeld ist die Zielfeldverteilung $B_0T(r)$.
- 16 Eingabe von $B_0(r)$
- 17 Ausgabe von $B_0T(r)$

[0078]

- 21 Schritt im Shimverfahren: Kartierung der Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ des statischen Magnetfeldes
- 22 Schritt im Shimverfahren: Festlegen einer Zielfeldverteilung $B_0T(r)$
- 23 Schritt im Shimverfahren: Erzeugen der Zielfeldverteilung $B_0T(r)$ im Arbeitsvolumen, indem Ströme durch die Shim-Spulen eingestellt werden

- 51 Kurve im 2D-Plot, auf der durch optimale Regularisierung („discrepancy principle“ oder L-Plot) gewonnene Lösungen liegen
- 52 Region von optimalen Werten für das Qualitätskriterium, welche bei der Suche entlang (51) gefunden wird
- 53 Weitere Lösungen mit ähnlichen Werten für das Qualitätskriterium und tieferer Shimleistung, als in (52)

- 71 Region im MRI-Bild, welche nach dem Shimmen möglichst hohe Homogenität erreichen soll
- 72 Übrige Region im MRI-Bild, mit Signalstärke größer als Null
- 73 Region im MRI-Bild, welche kein Signal enthält und beim Shimmen nicht berücksichtigt werden muss

- ℓ_1 Achsenrichtung der Datenbreite im 2D-Plot
- Q Achsenrichtung des Qualitätskriteriums
- W Achsenrichtung des Funktionswerts für Gewichtungsfunktion
- w_1 Datenbreite der 1'ten Gewichtungsfunktion
- w_{14} Datenbreite der 14'ten Gewichtungsfunktion
- x räumliche x-Richtung (im MRI-Bild)
- y räumliche y-Richtung (im MRI-Bild)
- z räumliche z-Richtung (bei Gewichtungsfunktionen)
- λ Regularisierungsparameter (Lambda)

Referenzliste

- [0079] [1] Richard R. Ernst:
«Measurement and Control of Magnetic Field Homogeneity»; The Review of Scientific Instruments 39 (1968) 998–1012
- [0080] [2] R. E. Gang:
US-A 3,287,630
- [0081] [3] Dong-Hyun Kim, Daniel M. Spielman, Gary H. Glover, Elfar Adalsteinsson:
US-A 6,529,002
- [0082] [4] Markus Weiger, Michael Fey, Thomas Speck:

EP 1 662 270 B1

[0083] [5] Markus Weiger, Thomas Speck, Michael Fey:

«Gradient shimming with spectrum optimization»; Journal of Magnetic Resonance 182 (2006) 38–48

[0084] [6] P.C. Hansen:

«Rank-Deficient and Discrete Ill-Posed Problems»; SIAM, Philadelphia, 1998

[0085] [7] Han Wen, Farouc A. Jaffer:

«An in vivo Automated Shimming Method Taking into Account Shim Current Constraints»; Magnetic Resonance in Medicine 34 (1995) 898–904

Patentansprüche

1. Verfahren zum Homogenisieren des statischen Magnetfeldes mit einer Verteilung $B_0(r)$ in dem Arbeitsvolumen einer Magnetresonanz-Vorrichtung mit einer Anzahl N Shim-Spulen, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:
 - (a) Kartierung der Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ des statischen Magnetfeldes,
 - (b) Festlegen einer Zielfeldverteilung $B_{OT}(r)$,
 - (c) Erzeugen der Zielfeldverteilung $B_{OT}(r)$ im Arbeitsvolumen, indem Ströme in den Shim-Spulen eingestellt werden, wobei im Schritt (b) ein Optimierungsverfahren zur Optimierung eines numerischen Qualitätskriteriums für die Zielfeldverteilung $B_{OT}(r)$ verwendet wird, wobei das Optimierungsverfahren als Resultat Werte für die Ströme durch die N Shim-Spulen liefert, und wobei beim Optimierungsverfahren eine räumliche Gewichtungsfunktion verwendet wird, dadurch gekennzeichnet, dass als Optimierungsverfahren ein Filterverfahren verwendet, bei dem mittels Filterfaktoren eine Norm der Ströme in den Shimspulen beeinflusst wird, und dass das Optimierungsverfahren in einem Parameterraum mit M Kontrollparametern arbeitet, wobei $2 \leq M < N$, wobei einer der Kontrollparameter als Gewichtungsparmeter zur Modifikation einer räumlichen Gewichtungsfunktion verwendet wird, und wobei ein weiterer Kontrollparameter die Filterfaktoren kontrolliert.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Magnetresonanz-Vorrichtung ein NMR-Spektrometer, ein MRI-Scanner, ein EPR-Gerät oder ein Ionen-Zyklotron-Resonanz-Gerät verwendet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Magnetresonanz-Vorrichtung ein NMR-Spektrometer ist, bei dem eine Probe um eine oder mehrere Achsen rotiert wird, wobei die Achsen in Bezug auf die Richtung des statischen Magnetfeldes geneigt sein können.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass im Schritt (a) zur Kartierung der Magnetfeldverteilung $B_0(r)$ des statischen Magnetfeldes ein Gradienten-Echo-Verfahren oder ein Spin-Echo-Verfahren verwendet wird.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass beim Festlegen der Zielfeldverteilung im Schritt (b) der Einstellbereich der Ströme in den Shimspulen und die aufgenommene Leistung aller Shim-Spulen berücksichtigt werden.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das im Schritt (b) verwendete Filterverfahren eines der folgenden Verfahren umfasst:
 - Tikhonov-Regularisierung oder
 - Tikhonov-Phillips-Regularisierung oder
 - Truncated-Singular-Value-Decomposition oder
 - Damped-Singular-Value-Decomposition.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Optimierungsverfahren im Schritt (b) ein numerisches Qualitätskriterium optimiert, und dass ein Berechnungsverfahren zur Berechnung des Qualitätskriteriums verwendet wird, wobei das Berechnungsverfahren als Eingabe das statische Magnetfeld $B_0(r)$, den Einfluss der Ströme in den Shimspulen auf das Magnetfeld sowie einen Gewichtungsparmeter und einen Regularisierungsparameter entgegennimmt, wobei das Berechnungsverfahren als Ausgabe das Qualitätskriterium und eine Liste von Stromeinstellungen produziert, und wobei im Optimierungsverfahren die folgenden Schritte durchgeführt werden:
 - (i) Wahl einer Liste von Werten für einen ersten Kontrollparameter, den Gewichtungsparmeter;
 - (ii) Wahl einer Liste von Werten für einen zweiten Kontrollparameter, den Regularisierungsparameter,
 - (iii) Bildung von Paaren von Gewichtungsparmeter und Regularisierungsparameter aus der Liste von Werten aus (i) und der Liste von Werten aus (ii) und Berechnung des Qualitätskriteriums mit Eingabe dieses Paares von Gewichtungsparmeter und Regularisierungsparameter,
 - (iv) Beurteilen, ob die Liste der Stromeinstellungen eine realisierbare Stromeinstellung ist,
 - (v) Auswählen des optimalen Paares von Gewichtungsparmeter und Regularisierungsparameter anhand des Qualitätskriteriums und unter Ausschluss der nicht realisierbaren Stromeinstellungen.

CH 708 759 A2

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass in der Berechnung des Qualitätskriteriums ein simuliertes Magnetresonanz-Spektrum verwendet wird.
9. Elektronisch lesbarer Datenträger, auf dem ein Computerprogramm gespeichert ist, welches bei seiner Durchführung ein Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche ausführt.

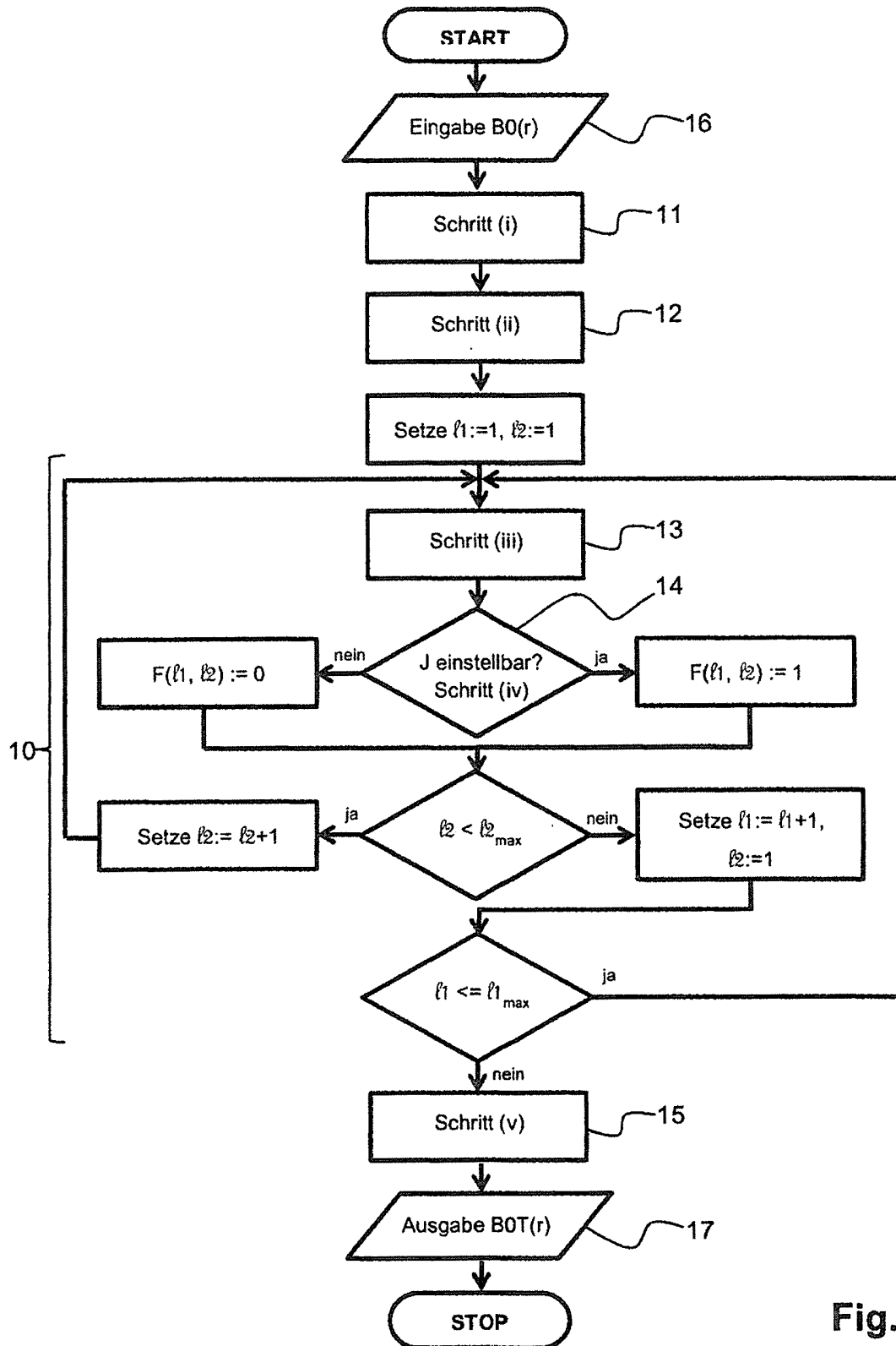
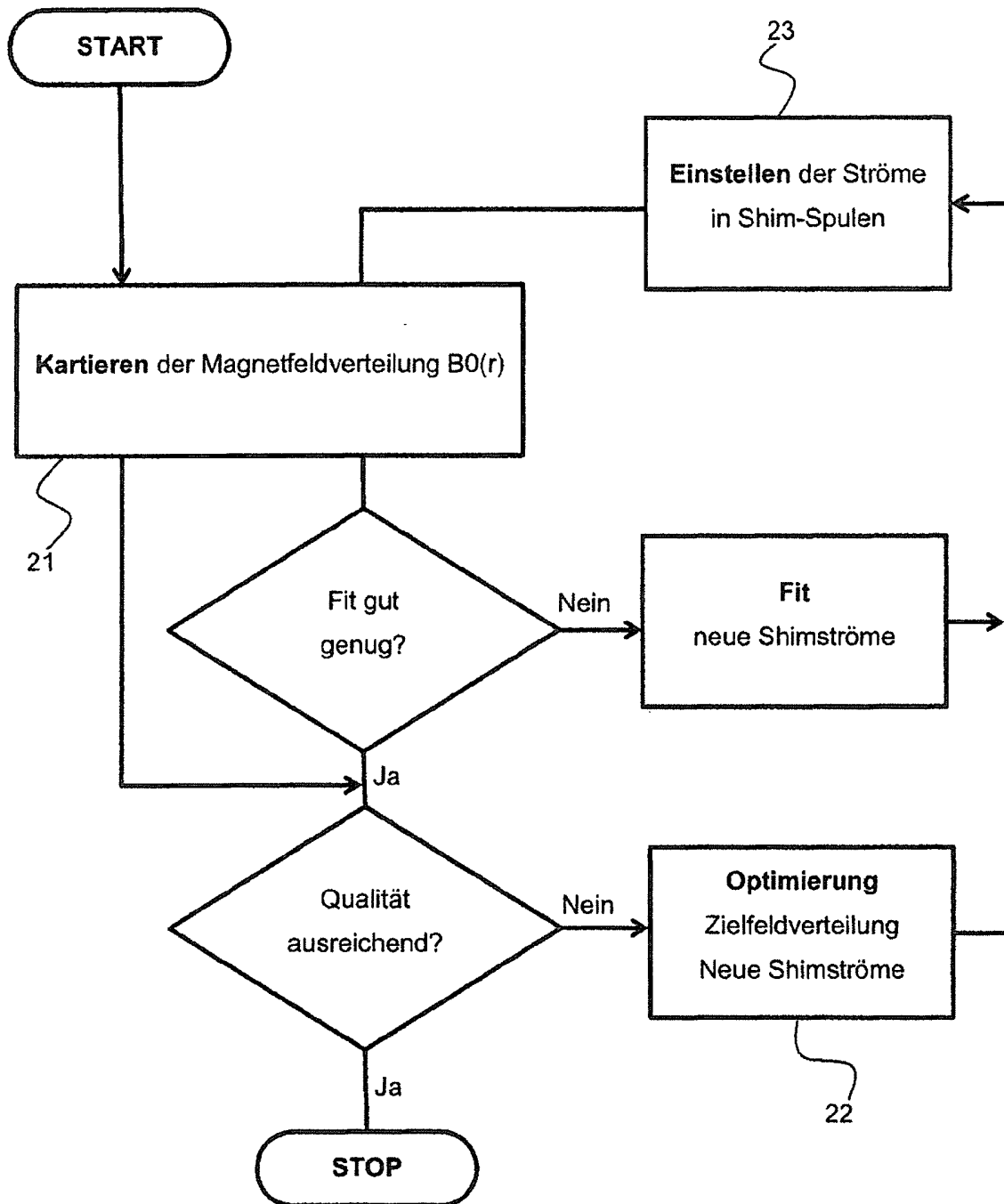


Fig. 1



Stand der Technik

Fig. 2

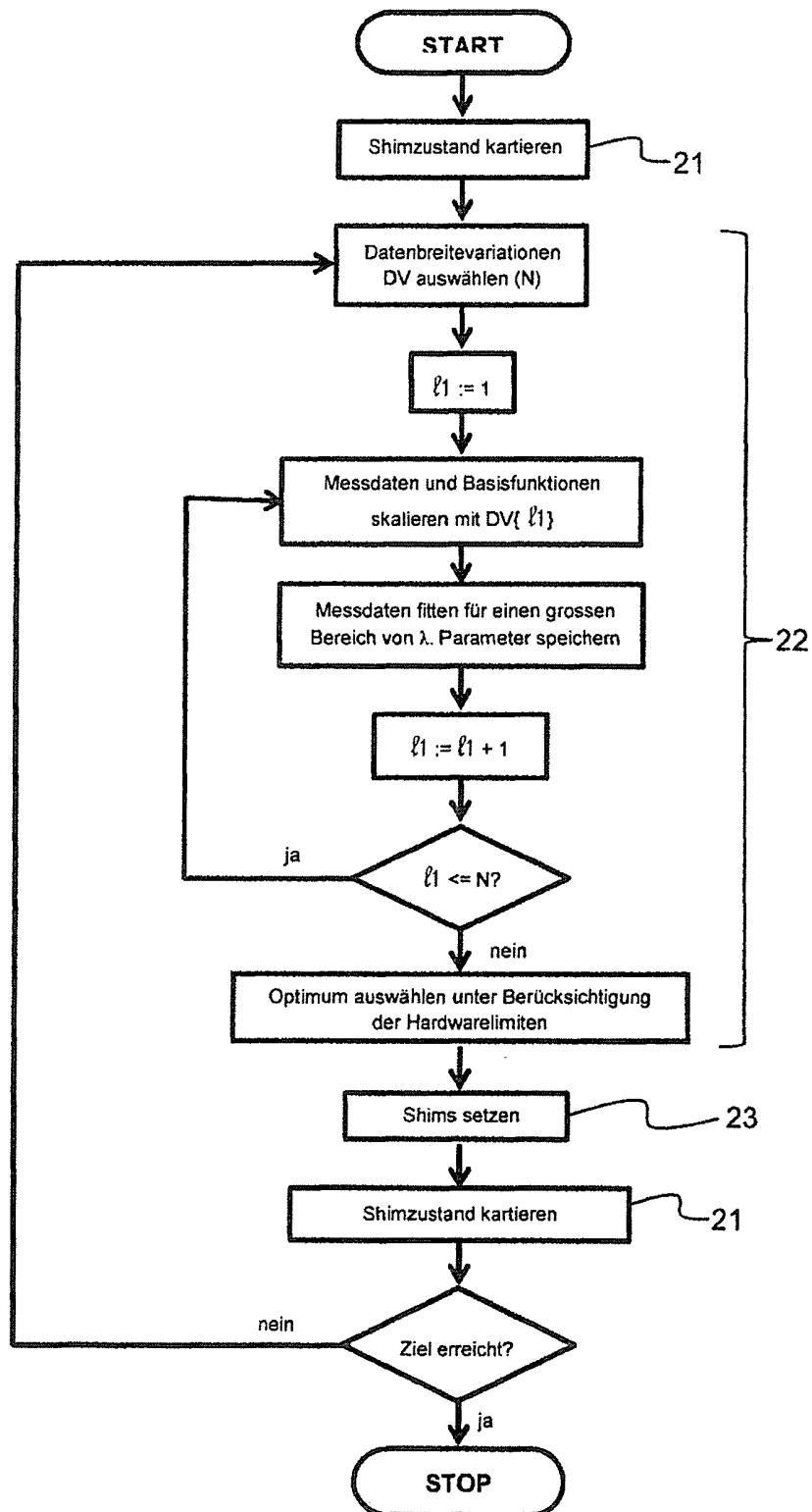


Fig. 3

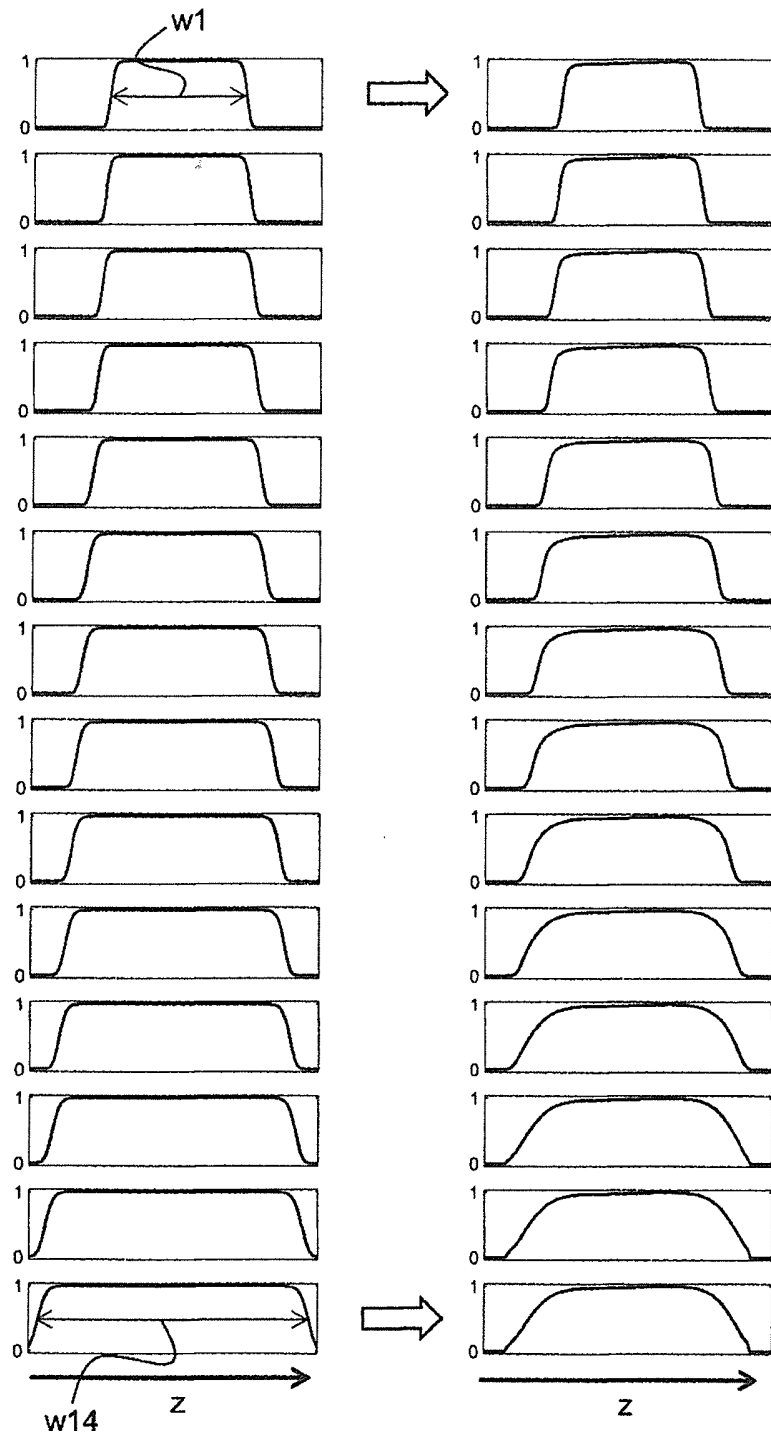
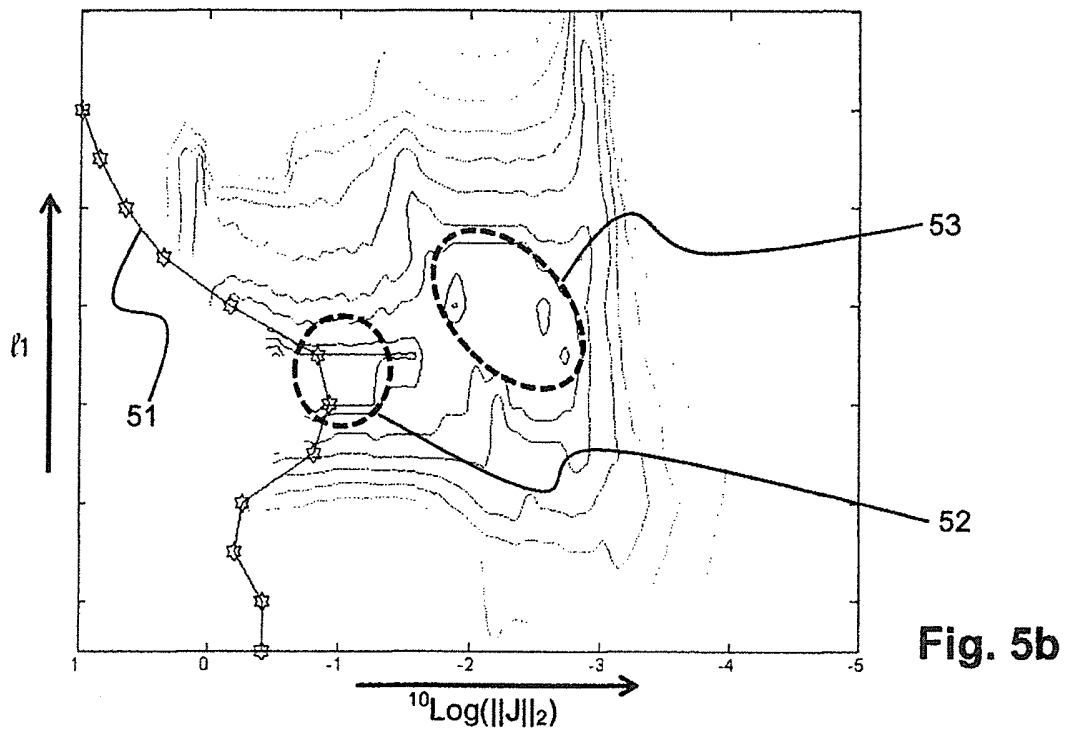
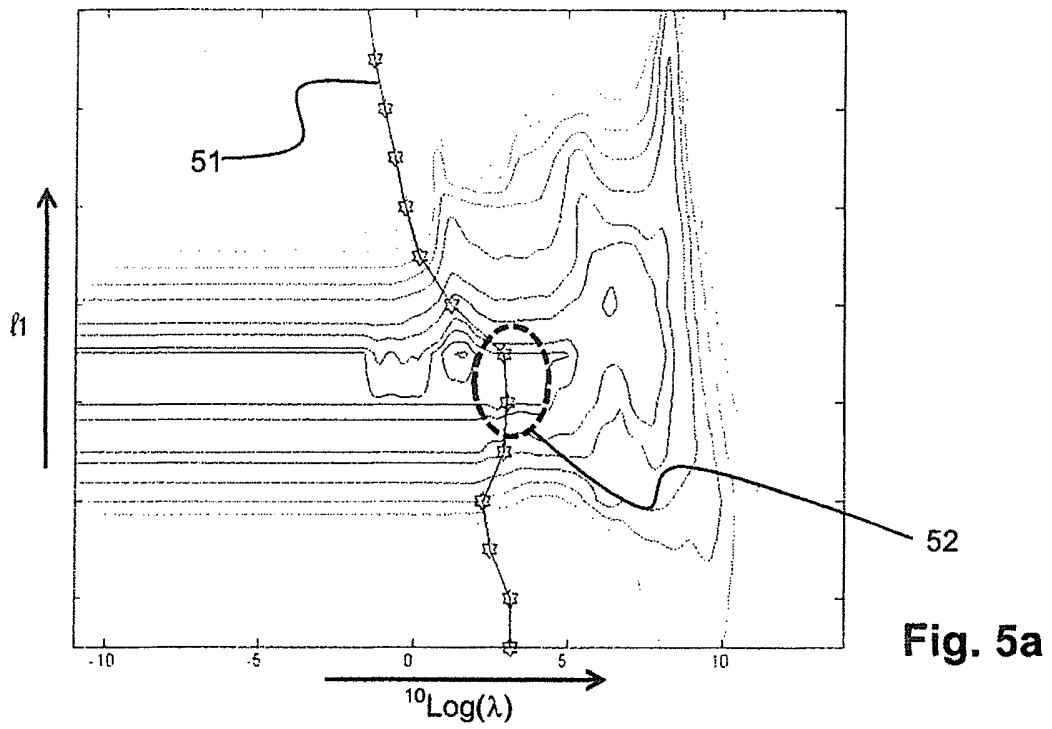
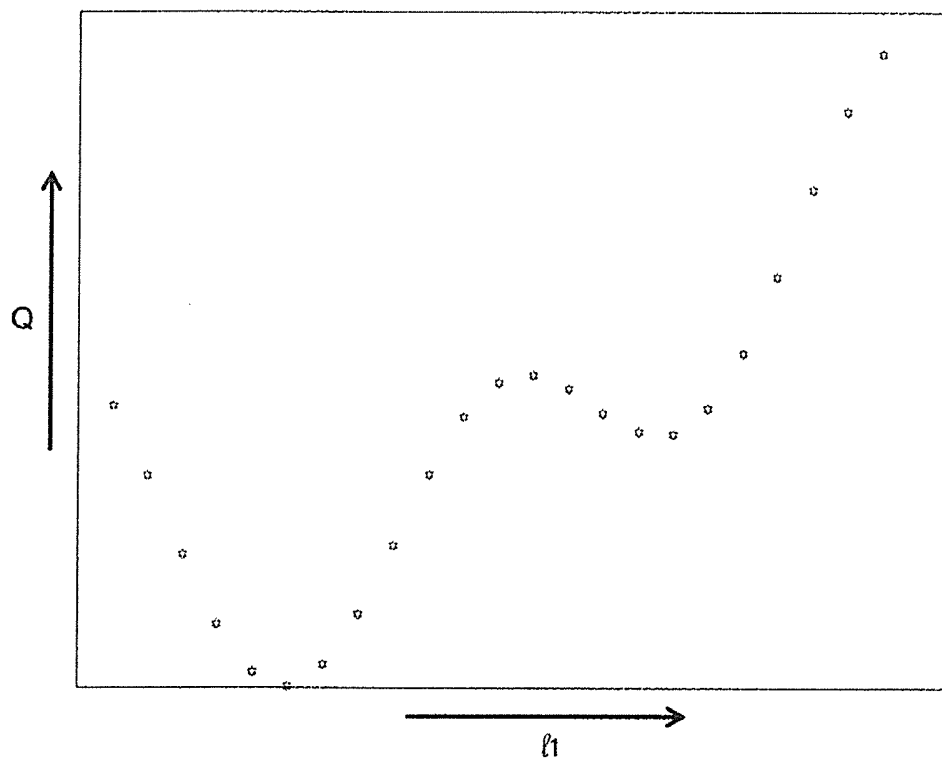
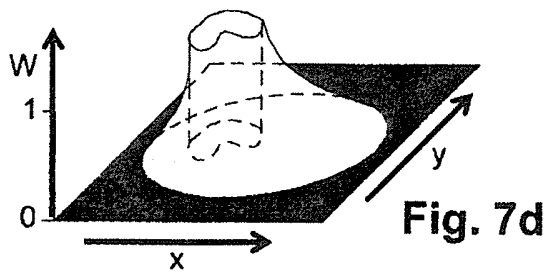
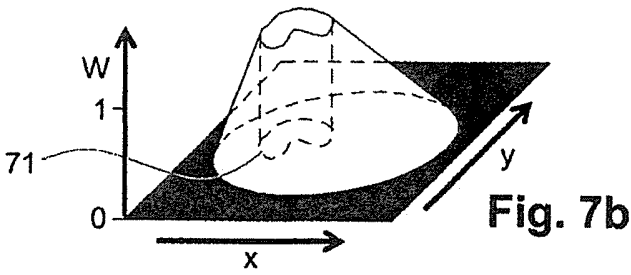
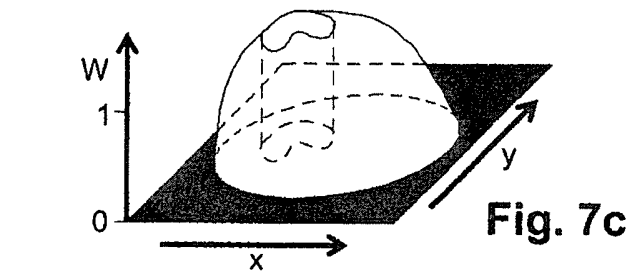
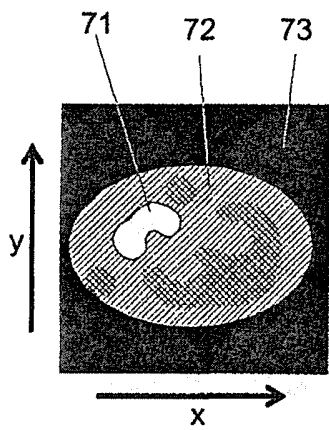


Fig. 4a

Fig. 4b



**Fig. 6**



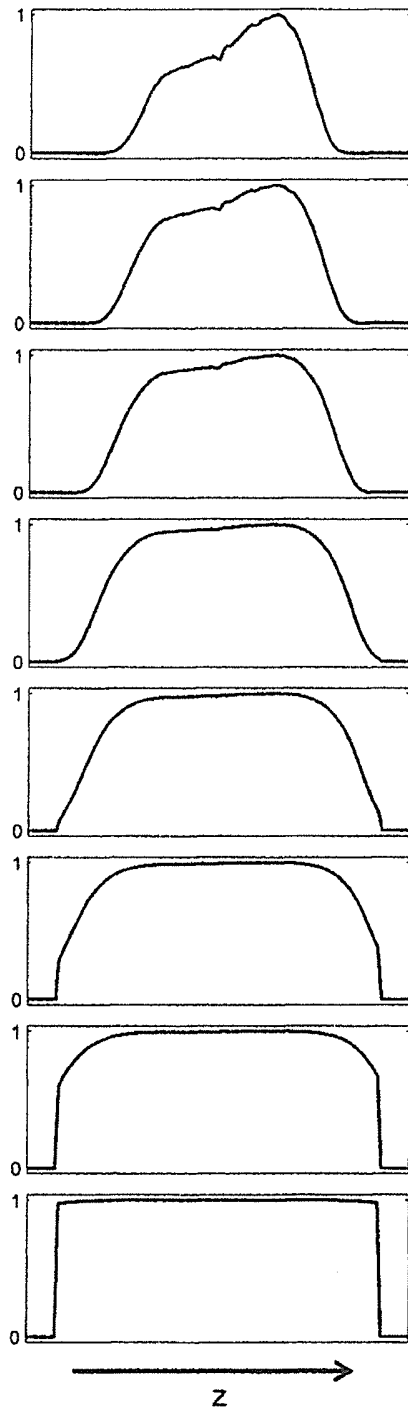


Fig. 8a

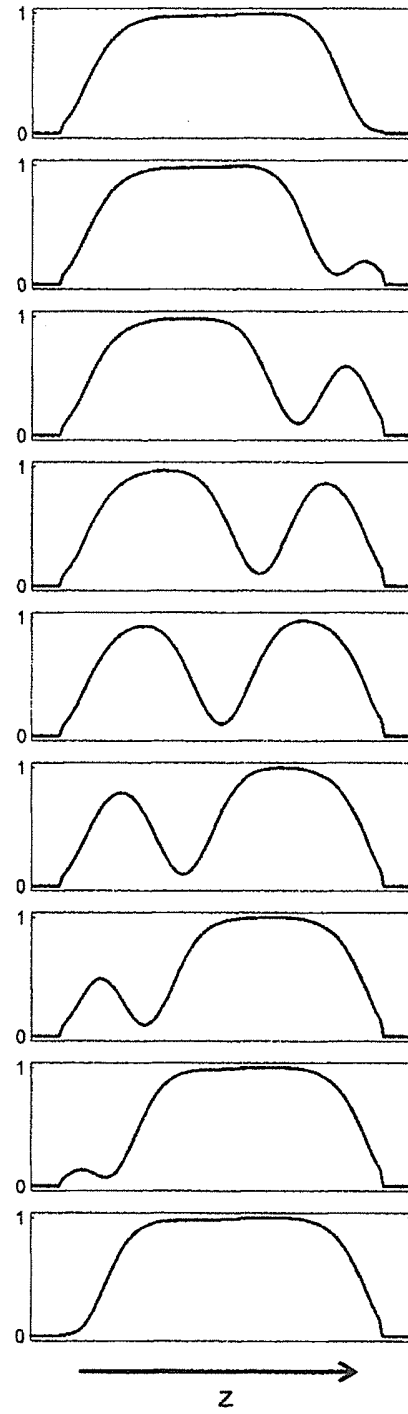


Fig. 8b