



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 695 32 480 T2** 2004.11.25

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 0 801 748 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **695 32 480.2**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US95/09454**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **95 927 474.7**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 96/03665**

(86) PCT-Anmeldetag: **26.07.1995**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **08.02.1996**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **22.10.1997**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **21.01.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **25.11.2004**

(51) Int Cl.7: **G01V 3/14**
G01R 33/48

(30) Unionspriorität:
282220 28.07.1994 US

(73) Patentinhaber:
**Trustees of the University of Pennsylvania,
Philadelphia, Pa., US**

(74) Vertreter:
**Müller-Boré & Partner, Patentanwälte, European
Patent Attorneys, 81671 München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LI, LU,
MC, NL, PT, SE**

(72) Erfinder:
Shinnar, Meir, Teaneck, US

(54) Bezeichnung: **SELEKTIVE RF-PULSERREGUNG MIT REDUZIERTEM LEISTUNGSVERBRAUCH**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

Gebiet der Erfindung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf neuartige Verfahren zum selektiven Erregen von spezifizierten Frequenzen von Magnetresonanz-Abbildungssystemen. Genauer gesagt, bezieht sich die vorliegende Erfindung auf Verfahren zum Synthetisieren von eine Frequenz auswählenden Radio- bzw. Hochfrequenz-(RF)-Pulssequenzen reduzierter Leistung, welche erwünschte, frequenzabhängige Erregungen, wenn sie auf Gegenstände angewandt werden, in Kernmagnetresonanz(NMR)-Abbildungssystemen erzeugen, jedoch noch nicht die Spitzenleistung und Gesamtenergiebegrenzungen der Eingangs-RF-Pulse überschreiten.

Hintergrund der Erfindung

[0002] Bei der Magnetresonanz und optischen Spektroskopie ist es notwendig, Pulse zu entwerfen, welche selektiv nur einen Teil des Spektrums erregen. Es gibt verschiedene Techniken für eine derartige selektive Erregung, beinhaltend die Technik, welche von dem vorliegenden Erfinder in dem U.S. Patent Nr. 5,153,515 beschrieben wurde. In diesem Patent offenbarte der vorliegende Erfinder ein Verfahren zum Konstruieren von selektiven Erregungen, wie z.B. $\pi/2$, π und rückfokussierender Pulssequenzen zum Stören der Drehung bzw. des Spins eines Magnetresonanz-Abbildungssystems. Insbesondere stellte der vorliegende Erfinder dar, daß die erwünschte z-Magnetisierung, M_z , für ein System, welches im Gleichgewicht ($M_z(\omega)=1$) startet, geschrieben werden kann als eine Fourier-Reihe der (N-1)-ten Ordnung ωt , wobei ω die Aus-Resonanzfrequenz ist. Zusätzlich ist, wenn alle Pulse dieselbe Phase haben, die z-Magnetisierung symmetrisch in der Frequenz ($M_z(\omega) = M_z(-\omega)$) und kann geschrieben werden als eine Fourier-Cosinus-Reihe N-ter Ordnung in ωt . Dann stellte der vorliegende Erfinder dar bzw. illustrierte, daß bei einer gegebenen Fourier-Reihe oder Fourier-Cosinus-Reihe (in ωt), welche die erwünschte z-Magnetisierung repräsentiert, es möglich ist, eine Inversion bzw. Umkehrung des nicht linearen Problems durchzuführen, um eine harte Pulssequenz zu ermitteln, welche tatsächlich die erwünschte Antwort ergibt. Die erwünschte z-Magnetisierung war als eine Fourier-Reihe in ωt geschrieben, welche die endliche Impulsantwortfilter-Theorie einsetzte, so daß harte Pulssequenzen erzeugt werden konnten, welche eine optimale Frequenzantwort ergeben würden, wenn sie auf das System angewendet wurde. Es wurde also dargestellt, daß ein weicher Puls aus der harten Pulssequenz erzeugt werden konnte, welche dieselbe Frequenzantwort ergeben würde, wie die harte Pulssequenz bzw. Sequenz eines harten Pulses.

[0003] In der direkten Syntheseannäherung, welche in dem US-Patent Nr. 5,153,515 beschrieben ist, spezifiziert man das erwünschte Frequenzspektrum und synthetisiert dann einen Hochfrequenzpuls- bzw. RF- bzw. HF-Puls, welcher die erwünschte Antwort ergibt. Unglücklicherweise hat man wenig Kontrolle über die Gestalt des HF-Pulses, welcher tatsächlich an das System angewendet bzw. angelegt wird. In der Praxis ist es jedoch notwendig, die Gestalt bzw. die Form des Pulses zu begrenzen. Beispielsweise ist die Spitzenleistung (Momentanleistung) des angewendeten bzw. angelegten Pulses durch die Übertragerleistung begrenzt. Auch ist die Gesamtenergie, welche durch den Puls verwendet wird (beispielsweise das Integral der Momentanleistung über die Pulsdauer) begrenzt im Hinblick auf die Proben- oder die Gewebe- bzw. Materialerwärmung. In der Praxis ist die gesamte durch den HF-Puls eingesetzte bzw. abgegebene Energie bezogen auf die spezifische Absorptionsrate (SAR), welche durch FDA Richtlinien begrenzt wird. Diese Begrenzung stellt ernste Beschränkungen für einige schnelle Abbildungs- bzw. Bildgebungsschemata dar. Als ein Ergebnis davon ist es erwünscht, eine Technik für die Synthese von Pulsen reduzierter Leistung mit einem spezifizierten Frequenzprofil innerhalb der FDA Richtlinien zu entwickeln, welche jedoch auch eingesetzt werden können, um die erwünschten Frequenzantwortcharakteristika zu erzeugen bzw. zu generieren.

[0004] Wie in dem US-Patent Nr. 5,153,515 erwähnt wird, ist die Beziehung zwischen einem Radio- bzw. Hochfrequenzpuls und der Frequenzantwort seiner Auswirkungen sogar auf ein einfaches Spinsystem komplex und nicht linear. Die Nichtlinearität dieser Beziehung bzw. dieses Zusammenhangs hat zu Schwierigkeiten in der Analyse und Inversion bzw. Umkehrung dieser Beziehung geführt. Jedoch wurden im Lauf der vergangenen Jahre viele dieser Schwierigkeiten überwunden. Beispielsweise hat der vorliegende Erfinder, bei einem gegebenen erwünschten Frequenzprofil, in dem U.S. Patent Nr. 5,153,515 einen Algorithmus vorgeschlagen, welcher die Erzeugung von Pulsen gestattet, welche die erwünschte Antwort ergeben werden. Andere Systeme zur Erzeugung eines erwünschten Frequenzprofils wurden ebenso vorgeschlagen durch Pauly et. al. in einem Artikel mit dem Titel "Parameter Relations for the Shinnar-Le Roux Selective Excitation Pulse Design Algorithm", IEEE Trans. Med. Imag., Band 10, Nr. 1, Seiten 53–65 (1991); Carlson in einem Artikel mit dem Titel "Exact Solutions for Selective-Excitation Pulses", J. Magn. Reson., Band 94, Seiten 376–386 (1991); und Yagle in einem Artikel mit dem Titel "Inversion of the Bloch Transform in Magnetic Resonance Imaging Using Asymmetric Two-Component Inverse Scattering", Inverse Problems, Band 6, Seiten 133–151 (1990). Jedoch bieten

derartige Algorithmen nur eine teilweise Lösung, in welcher noch keine Darstellung der Beziehung zwischen den Details der Pulsform und der Frequenzantwort enthalten ist. Beispielsweise waren, wenn der Puls so eingeschränkt ist, daß entweder die Gesamtenergie oder die Spitzenleistung durch ein voreingestelltes Maximum begrenzt wird, die Begrenzungen, welche dies auf die mögliche Frequenzantwort ausübt, bisher unbekannt. Darüber hinaus gibt es außerhalb eines Einsatzes bzw. einer Verwendung eines Suchalgorithmus, wie jenes, wie er von Conolly et al. in einem Artikel mit dem Titel "Optimal Control Solutions to the Magnetic Resonance Selective Excitation Problem," IEEE Trans. Med. Imaging, Band 5, Nr. 2, Seiten 106–115 (1986) beschrieben ist, keinen bekannten Algorithmus, um Energiebegrenzungen in die direkten Synthesealgorithmen bzw. Algorithmus einer direkten Synthese einzubauen bzw. aufzunehmen.

[0005] Kürzlich erreichte der vorliegende Erfinder eine teilweise Lösung der Beziehung zwischen einem Puls und seiner Frequenzantwort. Insbesondere wurde dargestellt durch Shinnar et al. in einem Artikel mit dem Titel "Inversion of the Bloch Equation", J. Chem. Phys., Band 98, Seiten 6121–6128 (1993), daß, wenn Pulse darauf begrenzt sind, von unendlicher Zeitdauer T zu sein, dann die Fourier-Transformierte der Frequenzantwortfunktion nicht Null nur über eine endliche Periode in dem Zeitbereich ist. Mit anderen Worten ist, wenn die z-Magnetisierung als eine Funktion der Frequenz ω in den Zeitbereich s zurück Fourier-transformiert wird, sie null für alle $|s| > T$. Ähnliche Ergebnisse wurden für alle anderen Funktionen erzielt, welche eingesetzt bzw. verwendet werden können, um die Frequenzantwort zu beschreiben. Der vorliegende Erfinder zeigte weiters, daß man nicht eine Frequenzantwort haben konnte, welche eine schärfere Übergangszone zwischen erregten und unerregten Frequenzen hatte, als die Grenze der Fourier-Transformierten $1/T$. Dies löste das offene Problem über die Begrenzungen, welche durch HF-Pulse erzielbar sind, welche durch McDonald et al. in einem Artikel mit dem Titel "Testing the Limits of Shape Optimization by Large-Flip-Angle Pulses," J. Magn. Reson., Band 99, Seiten 282–291 (1992) beschrieben sind.

[0006] Somit charakterisiert, wenn Pulse auf eine endliche Zeitdauer T beschränkt bzw. begrenzt werden, die Fourier-Transformierte der Frequenzantwort des HF-Pulses vollständig den Raum von mit einem HF-Puls mit endlicher Dauer erreichbaren Magnetisierungen. Mit anderen Worten muß nicht nur jedes Magnetisierungsprofil, welches durch einen HF-Puls endlicher Dauer erreichbar ist, diese Einschränkung erfüllen, sondern es kann auch für jede Magnetisierungsfunktion, welche diese Einschränkung erfüllt, ein Puls endlicher Dauer synthetisiert werden, welcher die erwünschte Magnetisierung erzielt bzw. ergibt.

[0007] In der Praxis sind viele andere Begrenzungen der Pulsform nützlich. Beispielsweise sind die Gesamtenergie und die Spitzenleistung, welche von einem Puls eingesetzt werden, eindeutig von größerer Bedeutung wegen Probenerhitzung und wegen Hardwarebegrenzungen bzw. -beschränkungen. Wie weiter oben angemerkt wurde, begrenzt bei der klinischen Bildgebung bzw. Abbildung, die spezifische Absorptionsrate (SAR) bedeutend einige schnelle Abbildungsschemata. Unglücklicherweise existiert bis heute keine Theorie oder kein Verfahren, welches dem Erfinder bekannt ist, um direkt die Energie eines Pulses mit der Frequenzantwortfunktion in Verbindung zu setzen. Gegenwärtig hat man die Bloch-Gleichung zu invertieren und dann die Energie zu berechnen. Nach dem Wissen des Erfinders hat niemand vorgeschlagen, den Energiebedarf direkt aus der Frequenzantwortfunktion zu berechnen.

[0008] Es ist somit erwünscht, eine Technik zu entwickeln, welche den Energiebedarf bzw. die Energieanforderung mit der Frequenzantwortfunktion in Beziehung setzt, so daß die Spitzenleistung des synthetisierten "optimalen" HF-Pulses ohne jegliche Veränderung des Erregungsprofils, der Zeit des Pulses oder der Gesamtenergie des Pulses reduziert werden kann. Es ist auch erwünscht, eine Technik zu entwickeln, in welcher die Gesamtenergie des Pulses ebenfalls reduziert wird. Das Verfahren der vorliegenden Erfindung wurde für diese Zwecke entwickelt.

[0009] In dem oben angeführten Artikel von John Pauly et al. ("Parameter Relations for the Spinnar-Le Roux Selective Excitation Pulse Design Algorithm", IEEE Trans. Med. Im., Band 10, Seiten 53 bis 65, 1991) wird ein Verfahren zum Durchführen einer Magnetresonanzbilddarstellung bzw. -abbildung beschrieben, umfassend die Verfahrensschritte, welche den Oberbegriff des Anspruchs 1 bilden.

Zusammenfassung der Erfindung

[0010] Die oben angeführten Bedürfnisse des Standes der Technik wurden durch die vorliegende Erfindung als ein Ergebnis der Entdeckung des vorliegenden Erfinders erfüllt, wie die Leistungserfordernisse des HF-Pulses in der Frequenzantwort des HF-Pulses codiert sind. Als ein Ergebnis dieser Erfindung bzw. Entdeckung braucht man nur in dem Synthesealgorithmus, welcher in dem US-Patent Nr. 5,153,515 beschrieben ist, die Gesamtmenge der Leistung zu spezifizieren, so daß ein Puls mit der erwünschten Leistung synthetisiert wer-

den kann.

[0011] Der vorliegende Erfinder hat entdeckt, daß die Gesamtenergie des Pulses in den Fourier-Koeffizienten der niedrigsten Ordnung der Frequenzantwort codiert ist und daß diese Kenntnis eingesetzt werden kann, um die Bloch-Gleichung zu invertieren, um selektive HF-Pulse mit reduzierter Gesamtenergie zu erhalten. Reduktionen der Gesamtenergie im Bereich von 10–20 % wurden schon erzielt, indem die Techniken der Erfindung eingesetzt wurden. Zusätzlich führten Modifikationen der Techniken, welche in dem US-Patent Nr. 5,135,515 offenbart wurden, zu Reduktionen der Spitzenleistung im Bereich von 60–70 %, ohne die Frequenzantwort zu verändern.

[0012] Somit wird in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung ein Verfahren zum Erzeugen einer erwünschten physikalisch wahrnehmbaren, frequenzabhängigen Erregung eines Systems zur Verfügung gestellt, welches vorbestimmte Beschränkungen an seiner Frequenzantwort hat, wie dies in Anspruch 1 definiert wird.

[0013] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird ein Verfahren zum Erzeugen einer erwünschten physikalisch wahrnehmbaren, frequenzabhängigen Erregung eines Systems, welches vorbestimmte Beschränkungen an bzw. in seiner Frequenzantwort hat, beschrieben.

[0014] In der bevorzugten Ausführungsform ist das System ein Kernmagnetresonanz-Abbildungssystem und die harte Pulssequenz von N Pulsen wird eingesetzt bzw. verwendet, um eine Abbildungs- bzw. Bildgebungsschicht für eine Anzeige zu bilden. Bei NMR ist die erwünschte frequenzabhängige Erregung eine Magnetisierung, welche an das System angelegt wird, wenn das System in einem externen B_0 -Magnetfeld ist, und die erwünschte frequenzabhängige Erregung beinhaltet einen Rotationsoperator, welcher angewendet wird, um das System zu stören. Die synthetisierte harte Pulssequenz von N Pulsen wird dann eingesetzt, um die Bildgebungsschicht bzw. Abbildungslage für die Anzeige zu refokussieren.

[0015] Typischerweise beinhalten die vorbestimmten Beschränkungen der Frequenzantwort des Systems eine maximale akzeptierbare Gesamtenergie und eine Reduktion in der maximalen Spitzenleistung der harten Pulssequenz. Um solche Beschränkungen aufzunehmen, umfaßt der Synthetisierungsschritt (c) den Schritt eines Bestimmens der Beschränkungen des Pulsprofils der Annäherung, welche die erwünschte frequenzabhängige Erregung erzielt, jedoch die vorbestimmten Beschränkungen an den Eingabe- bzw. Eingangspulsen in das System erfüllt.

[0016] In der bevorzugten Ausführungsform umfaßt Schritt (a) den Schritt eines Bestimmens, als einer Funktion der Frequenz ω , einer Annäherung an eine erwünschte physikalisch wahrnehmbare Magnetisierung M_z einer Richtung z parallel zu einem externen Magnetfeld B für die erwünschte, frequenzabhängige Erregung des Systems. Vorzugsweise wird die erwünschte, frequenzabhängige Erregung durch einen Spinor, der Form $(\alpha(\omega), \beta(\omega))$ beschrieben, wo $M_z(\omega) = |\alpha(\omega)|^2 - |\beta(\omega)|^2$, wo

$$\alpha(\omega) = \sum_{j=0}^N a_{N-2j} e^{\frac{i\pi(N-2j)\omega T}{N}}$$

und wo

$$\beta(\omega) = \sum_{j=0}^N b_{N-2j} e^{\frac{i\pi(N-2j)\omega T}{N}}$$

wobei a und b die Koeffizienten der harten Pulssequenz und T die Zeitdauer der harten Pulssequenz ist.

[0017] Der vorliegende Erfinder hat entdeckt, daß die Gesamtenergie

$$E \propto \int_0^T |\omega_1^2| dt$$

für die harte Pulssequenz, welche an das System angewendet bzw. angelegt wird, proportional ist zu einem Fourier-Koeffizienten für α , wo der Fourier-Koeffizient definiert ist als:

$$\frac{2N(1-a_N)}{\pi^2 T}$$

[0018] In dem Synthetisierungsschritt (c) wird $\alpha(\omega)$ synthetisiert, indem eine minimale Phasenaufösung ver-

wendet wird, so daß sie nahe der erwünschten frequenzabhängigen Erregung ist, unter der Voraussetzung der Beschränkung, daß $1 - a_N < (\pi^2 T \cdot E) / 2N$, wo E die maximale akzeptable Gesamtenergie ist, welche für die harte Pulssequenz gestattet bzw. erlaubt ist.

[0019] Andererseits kann die Spitzenleistung während des Synthetisierungsschritts (c) reduziert werden durch Auflösen nach den Wurzeln von $\beta(\omega)^2$, wo $|\beta(\omega)|^2 = 1 - |\alpha(\omega)|^2 = (1 - M_z(\omega))/2$, Setzen der Wurzeln von $|\beta(\omega)|^2$ in geordnete Paare $(z, 1/z^*)$, wo $|z| \geq 1$, und dann entweder Auswählen von z als eine Lösung für $\beta(\omega)$, wenn $z_{\text{imaginär}} \geq 0$, Auswählen von $1/z^*$ als eine Lösung für $\beta(\omega)$, wenn $z_{\text{imaginär}} < 0$, Auswählen von z als eine Lösung $\beta(\omega)$, wenn $z_{\text{imaginär}} = < 0$, oder Auswählen von $1/z^*$ als eine Lösung für $\beta(\omega)$, wenn $z_{\text{imaginär}} > 0$. Diese Näherung bzw. dieser Zugang führt zu HF-Pulsen mit variabler Phase, aber weniger Spitzenleistung. Da diese Berechnung unabhängig von der Bestimmung von $\alpha(\omega)$ ist, ergibt sich die gleiche Gesamtenergie.

[0020] Selbstverständlich wird die Technik der Erfindung vorzugsweise zur Erzeugung von "optimalen" weichen Pulsen reduzierter Leistung eingesetzt bzw. verwendet. In einem derartigen Fall wird der weiche Puls von der harten Pulssequenz synthetisiert, wobei die Technik eingesetzt wird, welche in dem US-Patent Nr. 5,153,515 beschrieben ist, so daß die frequenzabhängige Erregung des Systems im wesentlichen mit der frequenzabhängigen Erregung des Systems übereinstimmt, wenn die harte Pulssequenz angewendet wird.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0021] Die oben angeführten und andere Gegenstände und Vorteile der Erfindung werden für einen Fachmann in der Technik unter Berücksichtigung der beigefügten Zeichnungen besser ersichtlich, von denen:

[0022] Fig. 1 einen typischen HF-Puls darstellt bzw. illustriert, welcher in Übereinstimmung mit der Erfindung synthetisiert wurde.

[0023] Fig. 2 die Frequenzantwort des HF-Pulses von Fig. 1 illustriert, wobei die z-Magnetisierung normalisiert ist, um im Gleichgewicht eins zu sein.

[0024] Fig. 3 die Amplitude eines Inversionspulses konstanter Phasen und eines Pulses und variabler Phase illustriert, welche in Übereinstimmung mit der Erfindung erzeugt wurden. Wie illustriert, ist die Energie B_1 des Pulses variabler Phase um 40 % reduziert und die Spitzenleistung um 64 % im Vergleich mit dem Puls konstanter Phase.

[0025] Fig. 4 die Phase des Pulses variabler Phase von Fig. 3 illustriert.

[0026] Fig. 5 einen Vergleich der Konversionsprofile in Antwort auf den Puls konstanter Phase und den Puls variabler Phase illustriert. Wie illustriert, sind die Inversionsprofile im wesentlichen identisch.

Detaillierte Beschreibung der bevorzugten Ausführungsform

[0027] Ein Verfahren in Übereinstimmung mit einer gegenwärtig bevorzugten beispielhaften Ausführungsform der Erfindung wird unten unter Bezugnahme auf Fig. 1 bis 5 beschrieben werden. Es wird von Fachleuten geschätzt werden, daß die hierin unter Bezugnahme auf die Figuren gegebene Beschreibung nur für beispielhafte Zwecke dient und es nicht beabsichtigt ist, den Bereich der Erfindung auf irgendeine Art zu begrenzen bzw. zu beschränken. Alle Fragen bezüglich des Bereichs bzw. Umfangs der Erfindung können unter Bezugnahme auf die beigeschlossenen Ansprüche geklärt werden.

[0028] In dem US-Patent Nr. 5,153,515 beschrieb der vorliegende Erfinder, wie man ein B_1 -Profil erzeugt, welches das erwünschte Erregungsprofil für eine NMR-Bildgebung und dgl. ergibt. Insbesondere wurde eine Technik beschrieben, welche es gestattet, einen idealen Puls so nahe wie möglich anzunähern. Zugeschchnittene bzw. abgestimmte, harte Pulssequenzen oder weiche Pulssequenzen wurden entworfen, welche eine enge Bandbreite von resonanten bzw. Resonanzfrequenzen für eine Klarheit bzw. Deutlichkeit einer Bildgebung bzw. Abbildung für eine bessere klinische Diagnose erregen. Die in diesem Patent beschriebenen Techniken beschreiben, wie man harte Pulssequenzen oder weiche Pulse erzeugt, welche Frequenzantworten so nahe wie möglich an dem idealen oder optimalen Puls erzielen.

[0029] In Übereinstimmung mit dem Verfahren, welches in dem US-Patent Nr. 5,153,515 beschrieben wurde, startet man mit einer physikalisch wahrnehmbaren z-Magnetisierung, welche durch eine harte Pulssequenz bzw. Sequenz eines harten Pulses erzielt werden kann, und bestimmt dann eine harte Pulssequenz, welche

tatsächlich diese z-Magnetisierung ergibt. Insbesondere hat eine Sequenz von N harten Pulsen zur Anwendung rund um die X-Achse innerhalb einer Gesamtdauer von T eine Magnetisierungsantwort M_z , welche als eine Fourier-Cosinus-Reihe geschrieben wird, in welcher $|M_z(\omega)|$ immer kleiner oder gleich eins ist. Dann reduziert sich, wenn ein erwünschtes $M_z(\omega)$ gegeben ist, die Gleichung für eine Berechnung $M_z(\omega)$ auf ein Phasenabfrage- oder Entfaltungsproblem, bei welchem $M_z(\omega)$ in ein komplexes Polynom in $s = \exp(i\omega T/(N-1))$ konvertiert bzw. umgewandelt und dann für die Wurzeln des Polynoms $1 - MZ_z^2(\omega)$ oder äquivalent für die beiden Polynome $1 - M_z(\omega)$ und $1 + M_z(\omega)$ gelöst werden kann. Dann gruppiert man die Wurzeln der Polynome mit Hilfe von Symmetriebetrachtungen und wählt die Hälfte davon. Es gibt auch Techniken, wie beispielsweise Cepstral-Entfaltung, welche die Auflösung von $M_{xy}(\omega)$ als ein Polynom des Grades (N-1) in s erlaubt. Dies ist eine Darstellung von $M_{xy}(\omega)$ als eine komplexe Fourier-Reihe (N-1)-ten Grades. Wie weiter unten detaillierter erwähnt werden wird, können durch eine Darstellen dieser Magnetisierungsvektoren als Spinoren und ein Auswählen unterschiedlicher Wurzeln für die Polynome Beschränkungen, wie z.B. die Spitzenleistung und die Gesamtenergie über den Puls, auf den Eingangspulsen angeordnet werden, welche zur Erzeugung der erwünschten frequenzabhängigen Erregung benützt werden.

[0030] Der nächste Schritt in dem Verfahren bzw. Prozeß ist es, eine Pulssequenz zu finden, welche die Fourier-Reihe ergeben wird, welche die erwünschte Magnetisierung zur Verfügung stellen wird. Im allgemeinen ist M_z eine komplexe Fourier-Reihe. Wie dies in dem US-Patent Nr. 5,153,515 erwähnt wird, ist das sich ergebende Problem ähnlich einem Problem bei dem Entwurf digitaler Filter, nämlich dem Entwurf von Filtern mit endlicher Impulsantwort. Durch Einsatz der Theorie über Filter mit endlicher Impulsantwort kann eine erwünschte harte Pulssequenz geschaffen bzw. erzeugt werden, indem die erwünschte z-Magnetisierung, die Anzahl der Pulse und die Dauer der Pulssequenz spezifiziert wird. Man sieht dann M_z als eine Fourier-Reihe in $\omega T/(N-1)$ und verwendet eine Entwurfstechnik für Filter mit endlicher Impulsantwort, um eine Fourier-Reihe zu erhalten, welche M_z spezifiziert, daß sie bestimmte erwünschte Werte über bestimmte spezifizierte Bereiche aufweist. Man normalisiert dann die für M_z erhaltene Fourier-Reihe, so daß sie immer weniger oder gleich eins im Absolutwert ist, und verwendet dann die Technik, welche in dem US-Patent Nr. 5,153,515 beschrieben wurde zum Synthetisieren des konsistenten bzw. resultierenden M_{xy} und einer Pulssequenz zum tatsächlichen Erzeugen dieser Magnetisierung B_1 .

[0031] Die vorliegende Erfindung ist eine Erweiterung der Technik, welche in dem US-Patent Nr. 5,153,515 beschrieben wurde, dahingehend, daß man nun weitere Beschränkungen an den Eingangspulsen spezifizieren kann, wie beispielsweise die maximale Gesamtenergie über die Pulsdauer und/oder daß die Spitzenleistung reduziert sein sollte. Um zu erklären, wie dies in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung erreicht werden kann, wird das Magnetisierungssystem beschrieben werden, indem die Spinorformulierung der Bloch-Gleichung ohne Relaxation verwendet wird. In dieser Version der Formulierung wird eine klassische Beschreibung von Kernmagnetresonanz benützt, in welcher der Effekt, außerhalb der Resonanz oder eines Radio- bzw. Hochfrequenzpulses zu sein, ist eine Rotation zu induzieren.

[0032] Eine Rotation entgegen dem Uhrzeigersinn von θ Radiant um eine Achse, welche gerichtete Cosinuse (c_x, c_y, c_z) hat, kann als die folgende komplexe Einheitsmatrix geschrieben werden:

Gleichung 1

$$\begin{array}{cc} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - ic_z \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & (-c_x + ic_y) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ (c_x + ic_y) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + ic_z \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{array}$$

[0033] Diese Matrix kann durch ihre erste Spalte (α, β) dargestellt werden. Somit wird eine freie Präzession bzw. Kreisbewegung bei einer Frequenz ω Hz um die z-Achse für die Zeit T durch den Spinor ($e^{-i\omega T}, 0$) dargestellt.

[0034] Der Effekt eines Hochfrequenzpulses auf einen Spin bei einer Frequenz ω kann geschrieben werden durch einen Spinor $[\alpha(\omega), \beta(\omega)]$. Bei Anwendung an ein System im Gleichgewicht ($M_z = 1$) kann dann die resultierende Magnetisierung geschrieben werden als:

Gleichung 2

$$M_z(\omega) = |\alpha(\omega)|^2 - |\beta(\omega)|^2 = 2|\alpha(\omega)|^2 - 1$$

Gleichung 3

$$M_{xy}(\omega) = M_x(\omega) + iM_y(\omega) = 2i\alpha^*(\omega) \beta(\omega)$$

[0035] Somit besteht die Frequenzspezifikation aus einem Spezifizieren von entweder $M_z(\omega)$, $M_{xy}(\omega)$, $\alpha(\omega)$ oder $\beta(\omega)/\alpha(\omega)$. Die direkte Inversionsmethode, welche in dem US-Patent Nr. 5,153,515 beschrieben wurde, setzt fort durch ein Spezifizieren eines dieser Parameter, wobei $\alpha(\omega)$ oder $\beta(\omega)$ unter Verwendung eines Konsistenzkriteriums und eines Phasenabfragealgorithmus und dann ein HF-Puls erzeugt werden.

[0036] Wie in dem US-Patent Nr. 5,153,515 erwähnt, kann jeder harte Puls als eine Rotation um eine Achse in der xy-Ebene betrachtet werden, welche für eine unendliche Zeit andauert. Die Sequenz besteht aus (N+1) harten Pulsen, getrennt durch die Zeit T/N, wenn das System frei um die z-Achse präzessiert. Die Gesamtdauer der Sequenz ist T. Es wurde auch gezeigt, daß der Spinor, welcher einer solchen Pulssequenz entspricht, geschrieben werden kann als:

Gleichung 4

$$\alpha(\omega) = \sum_{j=0}^N a_{N-2j} e^{\frac{i\pi(N-2j)\omega T}{N}}$$

Gleichung 5

$$\beta(\omega) = \sum_{j=0}^N b_{N-2j} e^{\frac{i\pi(N-2j)\omega T}{N}}$$

[0037] Bei Verwendung einer derartigen Notation bzw. Schreibweise ist der Spinor, welcher einer Rotation um einen Winkel θ um eine Achse in der xy-Ebene mit einer Phase ϕ entspricht, $[\cos(\theta/2), e^{i\phi}\sin(\theta/2)]$.

[0038] Über jeden begrenzten Frequenzbereich kann die Frequenzantwort eines jeden geformten Pulses auf eine beliebige Genauigkeit durch eine Sequenz von N harten Pulsen für große N angenähert werden. Darüber hinaus können die Kipp- bzw. Drehwinkel und Phasen der harten Pulse aus der Amplitude des geformten Pulses abgeleitet werden. Mit anderen Worten hat, wenn der geformte Puls beschrieben wird durch $\omega_1(t)$, wo $\omega_1(t)$ in Radiant angegeben ist, dann der j-te harte Puls die Amplitude

Gleichung 6

$$\frac{|\omega_1(jT/N)|\pi T}{N}$$

und die Phase

Gleichung 7

$$\frac{\omega_1(jT/N)}{|\omega_1(jT/N)|}$$

Minimierung der gesamten Pulsenergie

[0039] Der vorliegende Erfinder hat entdeckt, daß die Gesamtenergie des geformten Pulses in einem der Fourier-Koeffizienten von $\alpha(\omega)$ codiert ist. Wenn die Gesamtenergie E des geformten Pulses, welchen von einer Zeit 0 bis zu einer Zeit T andauert, definiert ist als:

Gleichung 8

$$E = \int_0^T |\omega_1^2| dt$$

wobei $|\omega_1(t)|$ die Amplitude (in Hz) des Hochfrequenzpulses ist, dann kann bei Benützung der Notation von Gleichung 4 gezeigt werden, daß:

Gleichung 9

$$E \approx \frac{2N \log(a_N)}{\pi^2 T} \approx \frac{2N(1 - a_N)}{\pi^2 T}$$

[0040] Der Beweis dafür ist relativ einfach. Bei der harten Pulssequenz bzw. Sequenz eines harten Pulses:

Gleichung 10

$$a_N = \sum_{j=1}^N \cos\left(\frac{\theta_j}{2}\right)$$

[0041] Für große N hat eine harte Pulssequenz, welche von einer geformten Pulssequenz abgeleitet wurde, ein kleines θ_j , welches unter Benützung von Landau's O-Notation als $O(1/N)$ geschrieben werden kann. Als Ergebnis erhält man

Gleichung 11

$$\cos\left(\frac{\theta_j}{2}\right) = 1 - \frac{\theta_j^2}{8} + o(1/N^4)$$

[0042] Nimmt man den Logarithmus von beiden Seiten von Gleichung 10, bekommt man Gleichung 12

$$\begin{aligned} \log(a_N) &= \sum_{j=1}^N \log\left(\cos\left(\frac{\theta_j}{2}\right)\right) = \sum_{j=1}^N \log\left(1 - \frac{\theta_j^2}{8} + o(1/N^4)\right) = \\ &\left(-\sum_{j=1}^N \frac{\theta_j^2}{8}\right) + o(1/N^3) \end{aligned}$$

[0043] Da der letzte Term vernachlässigt werden kann, erhält man bei Substituieren für θ :

Gleichung 13

$$\begin{aligned} \log(a_N) &= -\frac{1}{8} \sum_{j=1}^N \left(\frac{\omega_1\left(\frac{jT}{N}\right) 2\pi T}{N}\right)^2 = \\ &-\sum_{j=1}^N \frac{\omega_1\left(\frac{jT}{N}\right)^2 \pi^2 T^2}{2N^2} \end{aligned}$$

[0044] Jedoch erhält man bei Benützung einer Riemann-Summenannäherung für das Integral, welches die Energie E definiert:

Gleichung 14

$$E = \sum_{j=1}^N \frac{\omega_1\left(\frac{jT}{N}\right)^2 T}{N}$$

[0045] Daher:

$$E = -\frac{2N \log(a_N)}{\pi^2 T} \approx \frac{2N(1 - a_N)}{\pi^2 T}$$

welche dasselbe ist wie Gleichung 9.

[0046] Die Beziehung von Gleichung 15 hat eine Anzahl von unmittelbaren Konsequenzen. Erstens wird begründet, daß die gesamte Pulsenergie proportional zu dem Fourier-Koeffizienten 9 ist und daß sich alles andere auf die Gestalt bzw. Form des Pulsprofils bezieht. Zweitens begründet es, für eine harte Pulssequenz, welche von einem geformten Puls abgeleitet ist, daß $1 - a_N$ ist $0(1/N)$. Dies kann als eine grobe Überprüfung dienen, um zu sehen, ob N groß genug ist, was ebenfalls impliziert, daß die Proportionalität für große N gültig ist. Drittens wurde, wenn $\alpha(\omega)$ geschlossen spezifiziert ist, auch die Gesamtenergie spezifiziert. Daher werden alle HF-Pulse, welche mit demselben $\alpha(\omega)$, aber unterschiedlichen $\beta(\omega)$ erzeugt werden können, dieselbe Energie haben.

[0047] In Übereinstimmung mit der Erfindung hat man, wenn nur $M_z(\omega)$ spezifiziert ist, dann nur $|\alpha(\omega)|^2$ spezifiziert. Im allgemeinen wird $\alpha(\omega)$ erzeugt, indem ein Phasenabfragealgorithmus verwendet wird. Bei einer gegebenen erwünschten Frequenzantwort ist es bekannt, daß man die minimale Phasenlösung für $\alpha(\omega)$ auswählen sollte in Übereinstimmung mit allen Wurzeln außerhalb des Einheitskreises, um den Puls mit der geringsten Energie zu erhalten. Beispielsweise lehren Pauly et al. in dem zuvor erwähnten Artikel mit dem Titel "Parameter Relations for the Shinnar-Le Roux Selective Excitation Pulse Design Algorithm", IEEE Trans. Med. Imaging, Band 10, Nr. 1, März 1991, daß die minimale Phasenlösung bzw. Lösung minimaler Phase den Leistungsbedarf minimiert. Jedoch illustrieren Pauly et. al nicht, daß die Frequenzantwort durch Auswählen eines unterschiedlichen $\alpha(\omega)$ modifiziert werden könnte. Mit anderen Worten demonstrierten bei gegebenem $\alpha(\omega)$ mit demselben $|\alpha(\omega)|^2$ Pauly et al., daß die minimale Phase $\alpha(\omega)$ die minimale Energie war. Jedoch wurde der Vergleich von zwei unterschiedlichen $\alpha(\omega)$ von Pauly et al. nicht gemacht und Pauly et al. schlugen nicht vor, daß eine solche Betrachtung in das Protokoll für den Pulsentwurf eingeführt werden sollte.

[0048] Wenn $M_z(\omega)$ symmetrisch ist (d.h. $M_z(\omega) = M_z(-\omega)$), dann hat die minimale Phasenlösung alle reellen Koeffizienten. Daher kann ein Puls mit konstanter HF-Phase synthetisiert werden, welcher eine minimale Energie hat. Mit anderen Worten kann man für ein symmetrisches $|\alpha(\omega)|^2$ die Energieanforderungen nicht reduzieren, indem man Pulse variabler Phase benützt. Damit jedoch diese Beziehung gültig ist, ist es notwendig, daß N ausreichend groß ist, damit Näherungen für den Cosinus des Kippwinkels gültig sind.

[0049] Um dies zu illustrieren, wurde eine Serie von Pulsen mit unterschiedlichen Frequenzantworten synthetisiert. Die Energie dieser Pulse variiert um einen Faktor von fast 40. **Fig. 1** zeigt das Profil des typischen Pulses und **Fig. 2** zeigt die Frequenzantwort, welche durch den Puls aus **Fig. 1** verursacht wird, wenn er an ein MR-Abbildungsgerät angewendet bzw. angelegt wird. In **Fig. 2** ist die z-Magnetisierung normalisiert, um im Gleichgewicht 1 zu sein. Tabelle 1 unten listet die Frequenzcharakteristika auf, welche aus der Anwendung dieser Pulse resultieren. In Tabelle 1 wurden geformte Pulse, welche für 5 Millisekunden andauerten, zu gewünschten Frequenzanforderungen unter Benützung von N (Spalte 1) harten Pulsen synthetisiert. Aus Tabelle 1 kann ersehen werden, daß, wenn N größer wird und die individuellen Kipp- bzw. Drehwinkel kleiner werden, die Näherung sogar noch genauer wird.

Tabelle 1

Anzahl der Pulse	Erregungswinkel	Breite (\pm Hz)	Energie (von Puls)	Energie (von Gleichung 15)	% Fehler
40	90	500	96,1462	96,3247	,186
40	90	1000	165,537	166,572	,625
40	90	2000	301,328	307,025	1,891
80	90	500	96,3913	96,4867	,099
80	90	1000	166,401	166,725	,195
80	90	2000	305,921	307,148	,401
80	180	500	988,438	999,140	1,083
80	180	1000	1822,55	1866,4	2,406
80	180	2000	3377,18	3636,91	7,691
120	180	2000	3515,5	3622,96	3,057

[0050] Zusammengefaßt hat der vorliegende Erfinder gezeigt, daß, wenn man einen geformten Puls in eine Sequenz von $N + 1$ harten Pulsen konvertiert, wobei N ausreichend groß ist, so daß jeder Drehwinkel der Sequenz harter Pulse klein ist, dann a_N oder der Koeffizient $e^{-i\omega T}$ in der Fourier-Entwicklung von $\alpha(\omega)$ proportional zu der Leistung ist (Gleichung 15). Daher spezifiziert man bei dem Entwurf einer harten Pulssequenz in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung $\alpha(\omega)$ so, daß es nahe zu der erwünschten Frequenzantwort ist, unter der Beschränkung, daß $\log(a_N)$ oder $1 - a_N$ weniger als $(\pi^2 T \cdot E)/2N$ ist, wo E die maximale Gesamtenergie ist, welche für den Puls gestattet ist. Wenn ein derartiges $\alpha(\omega)$ gegeben ist, kann ein entsprechendes $\beta(\omega)$ synthetisiert werden und eine harte Pulssequenz konstruiert werden, welche als die Basis für einen geformten (weichen) Puls benützt werden kann. Jedoch wird in Übereinstimmung mit der Erfindung der geformte Puls die vorgesehene bzw. bestimmte maximale Gesamtenergie und, wie dies nachfolgend genauer beschrieben werden wird, eine reduzierte Spitzenleistung haben.

[0051] Somit ist die Beziehung zwischen der Fourier-Transformierten der Frequenzantwort des Pulses und der Gesamtenergie des Pulses in den niedrigsten Fourier-Koeffizienten der Frequenzantwort codiert. Insbesondere ist die Gesamtenergie des geformten Pulses in einem der Fourier-Koeffizienten von $\alpha(\omega)$ codiert. Diese Beobachtung gestattet es dem Pulssynthesealgorithmus, welcher in dem US-Patent Nr. 5,153,515 beschrieben ist, die Gesamtenergie des Pulses als einen Design- bzw. Entwurfparameter zu benützen, wobei dies weiters die komplexe Beziehung zwischen einem HF-Puls und seiner Frequenzantwort beleuchtet bzw. erläutert. Mit anderen Worten wird das Problem eines Synthetisierens von Pulsen reduzierter Energie auf das Problem reduziert, eine Fourier-Reihe zu synthetisieren, deren Frequenzprofil nahe an einem erwünschten Profil ist unter der Einschränkung an einem Fourier-Koeffizienten. Durch Einsatz der Technik der Erfindung wurden Energiereduktionen von Inversionspulsen in der Größenordnung von 10–20 % erzielt mit minimalen Effekten auf das Inversionsprofil. Weitere Reduktionen sind mit entsprechendem Mehreffekt auf das Inversionsprofil erzielbar. Für viele schnelle Abbildungsschemata kann diese Reduktion in SAR pro Puls höchst bedeutsam sein.

Reduktion der Spitzenleistung

[0052] Der oben angeführte Zugang stellt dar, wie man die für den Puls erforderliche Gesamtenergie reduziert. Jedoch ist es aufgrund der Leistungsbegrenzung eines Transmitters oft wünschenswert, die maximale bzw. Maximalleistung, welche durch den HF-Puls benötigt wird, ebenso zu reduzieren. Die folgende Beschreibung illustriert, wie dies durchgeführt werden kann.

[0053] Wie dies oben erwähnt wurde, hat man, um den HF-Puls mit der erwünschten Frequenzantwort zu synthetisieren, die Frequenzantwort als eine endliche Fourier-Reihe zu spezifizieren. Typischerweise spezifiziert man entweder $M_z(\omega)$ oder äquivalent $|\alpha(\omega)|^2$ oder $|\beta(\omega)|^2$. Man konstruiert dann $\alpha(\omega)$ und $\beta(\omega)$, indem man einen Phasenabfrage- bzw. -gewinnungsalgorithmus benützt und dann den erwünschten Puls konstruiert. Da

Algorithmen, welche die Cepstral-Transformierte benützen, für ein schnelles Erzielen der Lösungen der minimalen und maximalen Phasen existieren, können derartige Techniken leicht zur Berechnung von $\beta(\omega)$ wie auch von $\alpha(\omega)$ eingesetzt werden. Diese Annäherung bzw. dieser Zugang hat den zusätzlichen Vorteil, daß man, wenn man ein symmetrisches $M_z(\omega) M_z(-\omega) = M_z(\omega)$ spezifiziert hat, einen konstanten Phasenpuls bzw. Puls konstanter Phase erhält.

[0054] In Übereinstimmung mit dem Verfahren der Erfindung ist andererseits die Basis für ein Reduzieren der Spitzenleistung des Pulses die Idee, daß eine Verwendung von Pulsen variabler Phase weniger Spitzenleistung erfordern kann als Pulse konstanter Phase, da jede Frequenz durch einen Hochfrequenzpuls nahe zu dieser erregt werden kann. Der Pulssynthesealgorithmus des US-Patents Nr. 5,153,515 wird somit durch Konstruieren eines Filters für $M_z(\omega)$ oder äquivalent für $|\alpha(\omega)|^2$ modifiziert. Die Lösung minimaler Phase für $\alpha(\omega)$ wird dann so bestimmt, daß die Gesamtenergie des Pulses unverändert ist.

[0055] Wo sich das vorliegende Verfahren unterscheidet, ist in der Auswahl von $\beta(\omega)$. In Übereinstimmung mit dem Verfahren der Erfindung wird, wenn ein $\alpha(\omega)$ spezifiziert wurde, welches automatisch die Gesamtenergie spezifiziert, dann ein $\beta(\omega)$ synthetisiert, welches kompatibel ist. Wenn $\beta(\omega)$ so ausgewählt wird, daß es nicht symmetrisch in ω ist, wird der synthetisierte Puls ein Puls variabler Phase sein. Da die Anforderungen maximaler Leistung eines Pulses variabler Phase im allgemeinen weniger als jene eines Pulses konstanter Phase sind (da er ein Frequenzdurchlaufen bewirken kann), kann die Spitzenleistung minimiert werden, indem man ein $\beta(\omega)$ auswählt, welches am besten ein Frequenzdurchlaufen annähert. Dies wird am besten durchgeführt, indem man die Wurzeln für $\beta(\omega)$ passend auswählt.

[0056] Wie in dem US-Patent Nr. 5,153,515 erwähnt, kann ein Phasenabfragealgorithmus benützt werden, um für die Wurzeln von $|\beta(\omega)|^2$ aufzulösen. Diese Wurzeln kommen im allgemeinen in Paaren ($z, 1/z^*$). Wie in diesem Patent beschrieben wurde, wird jedem Paar befohlen, daß $|z| \geq 1$ gilt. Für jedes Paar wählt man ein Element des Paares z_j aus und:

Gleichung 16

$$\beta(\omega) = c e^{-i\omega T / 2} \prod_{j=1}^N (e^{i\omega T / N - z_j})$$

wo c eine passende bzw. geeignete Normalisierungskonstante ist. Das Ergebnis ist eine Lösung für $\beta(\omega)$.

[0057] Wenn $M_z(\omega)$ symmetrisch ist (d.h. $M_z(\omega) = M_z(-\omega)$), dann ist, wenn z eine Wurzel ist, auch z^* eine. Um einen Puls konstanter Phase zu erhalten, wird, wann immer eine Wurzel ausgewählt ist, auch ihre Konjugierte ausgewählt. Dies wird zu einem $\beta(\omega)$ mit reellen Koeffizienten in der Entwicklung und einem Puls konstanter Phase führen. Der Cepstral-Entfaltungsalgorithmus ergibt solche Pulse konstanter Phase. Um jedoch Pulse mit reduzierter Spitzenleistung in Übereinstimmung mit der Erfindung zu erhalten, wird ein unterschiedliches Wurzelauswahlschema für $\beta(\omega)$ ausgewählt. Für jedes befohlene Paar wird z als die Lösung für $\beta(\omega)$ ausgewählt, wenn die imaginäre Komponente von z größer oder gleich 0 ist; andernfalls wird $1/z^*$ ausgewählt. Andererseits kann z als eine Lösung für $\beta(\omega)$ ausgewählt werden, wenn die imaginäre Komponente von z kleiner oder gleich 0 ist; andernfalls wird $1/z^*$ ausgewählt. Derartige Auswahlen der Wurzeln von $\beta(\omega)$ führen zu Pulsen mit variabler Phase. Da dasselbe $\alpha(\omega)$ benützt wird, wird annähernd dieselbe Gesamtenergie benützt. Ebenfalls gilt, daß, je größer die Anzahl der benützten Pulse ist, umso geringer die Änderung in der Gesamtenergie ist.

[0058] Fachleute werden erkennen bzw. schätzen, daß im Gegensatz zu der Lösung minimaler Phase die Wurzeln nicht immer außerhalb des Einheitskreises $|z| > 1$ liegen. Fachleute werden auch schätzen, daß kleinere Modifikationen an dem Prozeß gemacht werden können, wo einige Wurzeln durch unterschiedliche Kriterien ausgewählt werden, solange als im wesentlichen ähnliche Ergebnisse erzielt werden.

[0059] Der hierin beschriebene modifizierte Algorithmus wurde auf die Synthese von Umkehr- und Erregungspulsen reduzierter Leistung angewendet. Wie dies in **Fig. 3** gezeigt wird, wird die B_1 -Amplitude (in Hz) für einen Puls konstanter Phase durch das Benützen eines Pulses reduzierter Leistung und variabler Phase in Übereinstimmung mit der Erfindung reduziert. Beispielsweise wird in **Fig. 3** die Spitze von B_1 von 2301 Hz für einen Umkehrpuls konstanter Phase auf 1374 Hz für einen Puls reduzierter Leistung und variabler Phase reduziert. **Fig. 4** illustriert die Phase des Pulses variabler Phase von **Fig. 3**, wo die Spitze B_1 um 40 % und die Gesamtenergie um 64 % reduziert wird. **Fig. 5** illustriert einen Vergleich der Umkehr- bzw. Inversionsprofile der resultierenden z -Magnetisierungen. Wie dies dargestellt bzw. illustriert wird, sind die beiden Kurven überein-

ander legbar, da sie im wesentlichen identisch sind.

[0060] Somit ist es möglich, die Spitzenleistungsanforderungen eines Pulses zu reduzieren, indem die Wurzeln für $\beta(\omega)$ richtig ausgewählt werden, ohne jeden Effekt auf das Erregungs- oder Umkehr- bzw. Inversionsprofil, die Zeit des Pulses oder die Gesamtenergie der Pulssequenz. Tatsächlich können zahlreiche Beschränkungen an der erwünschten Frequenzantwort für die Fourier-Transformierte in einer derartigen Antwort in Übereinstimmung mit der Erfindung eingeführt werden, um beispielsweise die Gesamtenergie des Pulses zu minimieren oder um reduzierte Spitzenleistungen zur Verfügung zu stellen. Spitzenleistungsreduktionen in dem Bereich bzw. der Größenordnung von 60–70% wurden erzielt, indem die Techniken der vorliegenden Erfindung eingesetzt bzw. verwendet wurden.

Weiche Pulse

[0061] Wie in dem US-Patent Nr. 5,153,515 erwähnt wurde, kann die Frequenzantwort eines jeden weichen Pulses einheitlich bzw. gleichmäßig auf jeden begrenzten Frequenzbereich durch harte Pulssequenzen bzw. Sequenzen harter Pulse angenähert werden. Mit anderen Worten kann, wenn ein weicher Puls gegeben ist, der für eine Zeit T andauert, für ein gegebenes N der j-te Puls einer N harten Sequenz, welche für eine Zeit T andauert, konstruiert werden. Wie hierin beschrieben, kann man die Prozedur umkehren, indem man den weichen Puls von einer gegebenen harten Pulssequenz konstruiert. D.h., wenn eine Sequenz von N harten Pulsen gegeben ist, welche für eine Zeit T andauert, kann man einen weichen Puls konstruieren, welcher für $T \cdot N / (N-1)$ andauert. Der weiche Puls würde N Segmente haben, welche jeweils für eine Zeit $T / (N-1)$ andauern. Während jedem Segment wendet man ein konstantes B_z -Feld an, welches den Effekt hat, die 0-Frequenzspins um denselben Betrag zu drehen, wie dies die harten Pulse taten.

[0062] Wenn die Kippwinkel der harten Pulse relativ klein sind, sind die Frequenzantworten der Sequenz der harten Pulse und der weiche Puls über einen begrenzten Frequenzbereich ähnlich. Wie dies in dem US-Patent Nr. 5,153,515 beschrieben wurde, kann der weiche Puls mit einer ähnlichen Frequenzantwort zu einer harten Pulssequenz aus einer harten Pulssequenz geformt werden, indem eine große Anzahl von Pulsen N für die harte Pulssequenz bzw. Sequenz harter Pulse ausgewählt wird und dann eine harte Pulssequenz ausgewählt wird, welche relativ kleine Kipp- bzw. Drehwinkel hat. Die Wurzeln von $1 - MZ_z^2$ werden dann in Übereinstimmung mit den Techniken ausgewählt, die in dem US-Patent Nr. 5,153,515 beschrieben sind. Die Wurzelwahl für M_{xy} wird auch vorgenommen.

[0063] In Übereinstimmung mit der Erfindung wird ein weicher Puls reduzierter Leistung erzeugt, indem die Spinorkomponenten eines Pulses, $\alpha(\omega)$ und $\beta(\omega)$, definiert werden, und angenommen wird, daß der Puls für eine Zeit T andauert. Dann kann für einen weichen Puls gezeigt werden, daß die Fourier-Transformierte von $e^{-\pi i \omega T \alpha(\omega)} = g(s)$ 0 ist für s (die Fourier-Transformierten-Variable), wenn sich s 0 nähert. Mit anderen Worten ist, die Grenze, wenn sich s an 0 annähert, für g(s) gleich mit $E \cdot \pi^2$, wo E die Gesamtenergie des weichen Pulses ist. Auch ist a(s) gleich null für $s < 0$ oder $s > T$. Somit:

Gleichung 17

$$E = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{a(S)}{\pi^2}$$

[0064] Auf der anderen Seite kann für einen Puls unendlicher Dauer der Puls definiert werden als das Limit bzw. die Grenze des Pulses, welcher von $-T$ bis T andauert, wenn sich T unendlich annähert. Die Leistung des Pulses ist das Limit bzw. die Grenze der Leistung des Pulses mit endlicher Dauer. Daher ist bei gegebener Frequenzantwort des Pulses die Leistung in dem Wert der Fourier-Transformierte von $\alpha(\omega)$ an einem bestimmten Punkt codiert.

[0065] Bestimmte Ausführungsformen der Erfindung wurden oben detailliert beschrieben, welche Verfahren zur Pulserzeugung für ein optimales Erregen spezifizierter Frequenzbänder mit bestimmten Beschränkungen auf dem Eingabe- bzw. Eingangspuls zur Verfügung stellen werden. Während bevorzugte Ausführungsformen gezeigt und beschrieben wurden, werden Modifikationen von jenen mit gewöhnlicher Erfahrung in der Technik erkannt werden. Beispielsweise muß die Erfindung nicht durch eine Verwendung von Spinoren implementiert werden, sondern kann durch eine Benützung konventioneller Nomenklatur dargestellt werden. Dementsprechend ist für alle derartigen Modifikationen beabsichtigt, innerhalb des Bereichs bzw. Rahmens der Erfindung eingeschlossen zu sein, wie sie durch die folgenden Ansprüche definiert ist.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Erzeugen einer physikalisch wahrnehmbaren, frequenzabhängigen Erregung eines Systems, umfassend die Schritte:

(a) Bestimmen als eine Funktion der Frequenz einer Annäherung an die gewünschte, frequenzabhängige Erregung;

(b) Synthetisieren einer harten Pulssequenz von N Pulsen bzw. einer Sequenz harter Pulse von N Pulsen, welche die Annäherung erzeugt; und entweder:

(A) (c) Anlegen der harten Pulssequenz von N Pulsen, welche in Schritt (b) synthetisiert wurden, an das System; oder

(B) (d) Synthetisieren aus der harten Pulssequenz von N Pulsen einen weichen Puls, welcher eine frequenzabhängige Erregung des Systems im wesentlichen entsprechend der frequenzabhängigen Erregung des Systems erzeugt, wenn die harte Pulssequenz von N Pulsen angelegt wird, und

Anlegen des weichen, so synthetisierten Pulses an das System;

dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren vorbestimmte Beschränkungen betreffend seine Frequenzantwort aufweist und weiters den Schritt umfaßt:

(e) Spezifizieren der vorbestimmten Beschränkungen an Eingabe- bzw. Eingangspulse an das System, welche die gewünschte, frequenzabhängige Erregung ergeben werden, wobei die vorbestimmten Beschränkungen an die Frequenzantwort des Systems wenigstens eine aus einer maximalen, annehmbaren Gesamtenergie für jeden der Eingangspulse und eine Reduktion in der maximalen Spitzenleistung von jedem der Eingangspulse beinhalten, welche dennoch die gewünschte, frequenzabhängige Erregung ergeben werden; und daß jede der harten Pulssequenzen die vorbestimmten Beschränkungen an die Eingangspulse erfüllt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, worin das System ein Kernmagnetresonanz-Abbildungssystem ist und entweder (a) die harte Pulssequenz von N Pulsen oder (B) der weiche Puls zum Ausbilden eines Bildschnitts für eine Anzeige verwendet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, worin die gewünschte, frequenzabhängige Erregung eine Magnetisierung ist, welche an das System angelegt wird, wenn sich das System in einem externen Magnetfeld befindet.

4. Verfahren nach Anspruch 3, worin die gewünschte Frequenzerregung eine Rotationsbetätigungseinrichtung beinhaltet, welche an das System angelegt wird bzw. an dieses angebracht wird, wenn sich das System in dem externen Magnetfeld befindet, und entweder (A) die Synthetisierung der harten Pulssequenz von N Pulsen oder (B) der synthetisierte, weiche Puls verwendet wird, um den Bildschnitt für eine Anzeige neu zu fokussieren.

5. Verfahren nach Anspruch 1, worin der Synthetisierungsschritt (c) den Schritt eines Bestimmens von Beschränkungen eines Pulsprofils der Annäherung umfaßt, welche die gewünschte, frequenzabhängige Erregung ergeben, jedoch den vorbestimmten Beschränkungen an die Eingabepulse des Systems genügen.

6. Verfahren nach Anspruch 1, worin der Bestimmungsschritt (a) den Schritt eines Bestimmens, als eine Funktion der Frequenz ω , einer Annäherung an eine gewünschte, physikalisch realisierbare Magnetisierung M_z in einer Richtung z parallel zu einem externen Magnetfeld B für die gewünschte, frequenzabhängige Erregung des Systems umfaßt.

7. Verfahren nach Anspruch 1, worin die gewünschte, frequenzabhängige Erregung durch einen Spinor bzw. Spinvektor der Form $(\alpha(\omega), \beta(\omega))$ beschrieben wird, worin $M_z(\omega) = |\alpha(\omega)|^2 - |\beta(\omega)|^2$ und worin

$$\alpha(\omega) = \sum_{j=0}^N a_{N-2j} e^{\frac{i\pi(N-2j)\omega T}{N}}$$

und worin

$$\beta(\omega) = \sum_{j=0}^N b_{N-2j} e^{\frac{i\pi(N-2j)\omega T}{N}}$$

worin a und b Koeffizienten der harten Pulssequenz von N Pulsen und T eine Zeitdauer der harten Pulssequenz von N Pulsen ist.

8. Verfahren nach Anspruch 1, worin:

(a) die harte Pulssequenz eine vorbestimmte, maximale Gesamtenergie während einer Dauer T der harten

Pulssequenz aufweist und die harte Pulssequenz eine Peak- bzw. Spitzenleistung aufweist, welche von der Spitzenleistung reduziert wird, welche resultiert, wenn eine minimale Phasenauflösung zu einer Bestimmung der Wurzeln von $\beta(\omega)$ in der Berechnung einer gewünschten, frequenzabhängigen Magnetisierung M_z verwendet wird;

(b) der Schritt eines Bestimmens ein Bestimmen, als eine Funktion der Frequenz ω , einer Annäherung an die gewünschte, frequenzabhängige Magnetisierung M_z in einer Richtung z parallel zu einem externen Magnetfeld B für die gewünschte, frequenzabhängige Erregung des Systems umfaßt, worin $|M_z|^2 = |\alpha|^2 - |\beta|^2$;

(c) der Schritt eines Spezifizierens von vorbestimmten Beschränkungen den Schritt eines Auswählens von Wurzeln von α , welche die Gesamtenergie der harten Pulssequenz während der Dauer T minimieren, und von Wurzeln von β umfaßt, welche die Spitzenleistung von jedem Puls der harten Pulssequenz während der Dauer T minimieren; und

(d) der Schritt eines Synthetisierens ein Synthetisieren der harten Pulssequenz von N Pulsen umfaßt, welcher die Annäherung für M_z erzeugt, welche die Wurzeln für α und β in dem Auswahlsschritt aufweist.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder Anspruch 8, worin die maximal akzeptable bzw. annehmbare Gesamtenergie

$$E \propto \int_0^T |\omega_1^2| dt$$

für die harte Pulssequenz von N Pulsen, welche an das System angelegt wird, proportional zu einem Fourier-Koeffizienten für \bullet ist, worin der Fourier-Koeffizient definiert ist als:

$$\frac{2N(1 - a_N)}{\pi^2 T}$$

10. Verfahren nach Anspruch 9, worin der Synthetisierungsschritt (c) den Schritt eines Synthetisierens von $\alpha(\omega)$ unter Verwendung einer minimalen Phasenauflösung umfaßt, so daß er die gewünschte, frequenzabhängige Erregung annähert, wobei der Schritt eines Synthetisierens von $\alpha(\omega)$ der Beschränkung unterworfen ist, daß $1 - a_N < (\pi T^2 \cdot E) / 2N$, worin E die maximale, annehmbare Gesamtenergie ist, welche für die harte Pulssequenz von N Pulsen erlaubt ist.

11. Verfahren nach Anspruch 1, worin

(a) die harte Pulssequenz eine vorbestimmte, maximale Gesamtenergie während einer Dauer T der harten Pulssequenz aufweist und die harte Pulssequenz eine Spitzenleistung aufweist, welche von der Spitzenleistung reduziert wird, welche resultiert, wenn eine minimale Phasenauflösung an einer Bestimmung der Wurzeln von $\beta(\omega)$ in einer Berechnung einer gewünschten, frequenzabhängigen Magnetisierung M_z verwendet wird;

(b) der Schritt eines Bestimmens ein Bestimmen, als eine Funktion einer Frequenz ω , einer Annäherung an die gewünschte, frequenzabhängige Magnetisierung M_z in einer Richtung z parallel zu einem externen Magnetfeld B für die gewünschte, frequenzabhängige Erregung des Systems umfaßt;

(c) der Schritt eines Spezifizierens von vorbestimmten Beschränkungen den Schritt eines Spezifizierens bzw. Bestimmens der vorbestimmten, maximalen Gesamtenergie und eine gewünschte Reduktion in der Spitzenleistung für die gewünschte, frequenzabhängige Erregung umfaßt;

(d) der Schritt eines Synthetisierens ein Synthetisieren von $M_z(\omega)$, der vorbestimmten, maximalen Gesamtenergie und der gewünschten Reduktion der Spitzenleistung der harten Pulssequenz von N Pulsen umfaßt, welche die Annäherung von M_z erzeugt, welche in Schritt (b) bestimmt wird, wobei die harte Pulssequenz eine Gesamtenergie von nicht größer als die vorbestimmte, maximale Gesamtenergie aufweist und jeder Puls der Pulssequenz eine Spitzenleistung aufweist, welche von der Spitzenleistung reduziert wird, welche resultiert, wenn die minimale Phasenpulsauflösung für die Bestimmung der Wurzeln von $\beta(\omega)$ bei einer Berechnung der gewünschten, frequenzabhängigen Magnetisierung M_z verwendet wird.

12. Verfahren nach Anspruch 10 oder Anspruch 11, worin der Synthetisierungsschritt (c) den Schritt eines Lösens für die Wurzeln von $\beta(\omega)^2$, worin $|\beta(\omega)|^2 = 1 - |\alpha(\omega)|^2 = (1 - M_z(\omega)) / 2$, wobei die Wurzeln von $|\beta(\omega)|^2$ in geordneten Paaren $(z, 1/z^*)$ angeordnet werden, worin $|z| \geq 1$, und dann entweder Selektieren von z als eine Lösung für $\beta(\omega)$, wenn $Z_{\text{imaginär}} \geq 0$ umfaßt, wobei $1/z^*$ als eine Lösung für $\beta(\omega)$ ausgewählt wird, wenn $Z_{\text{imaginär}} < 0$, wobei z als eine Lösung für $\beta(\omega)$ ausgewählt wird, wenn $Z_{\text{imaginär}} = < 0$, oder $1/z^*$ als eine Lösung für $\beta(\omega)$ ausgewählt wird, wenn $Z_{\text{imaginär}} > 0$.

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

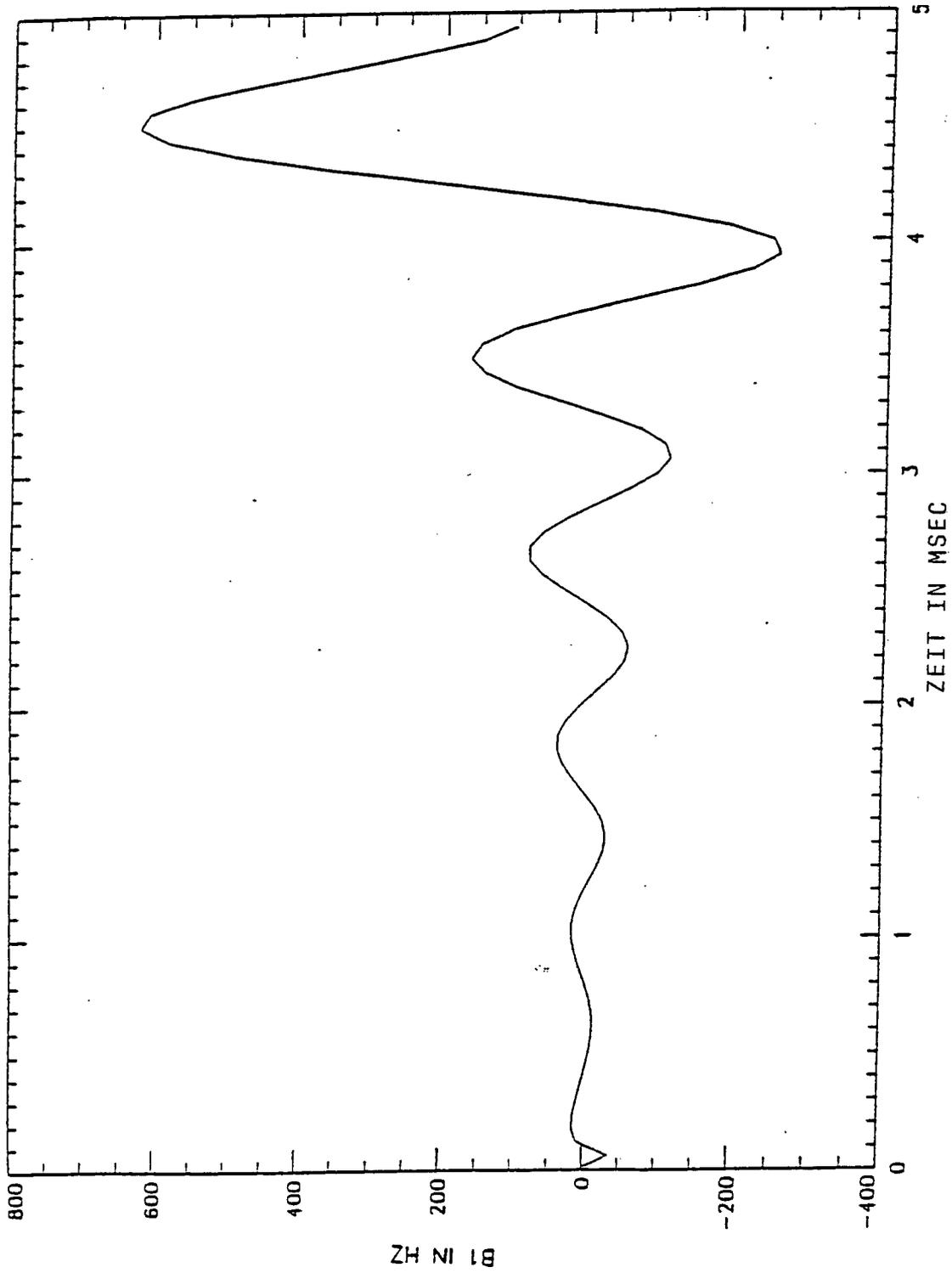


FIG. 1

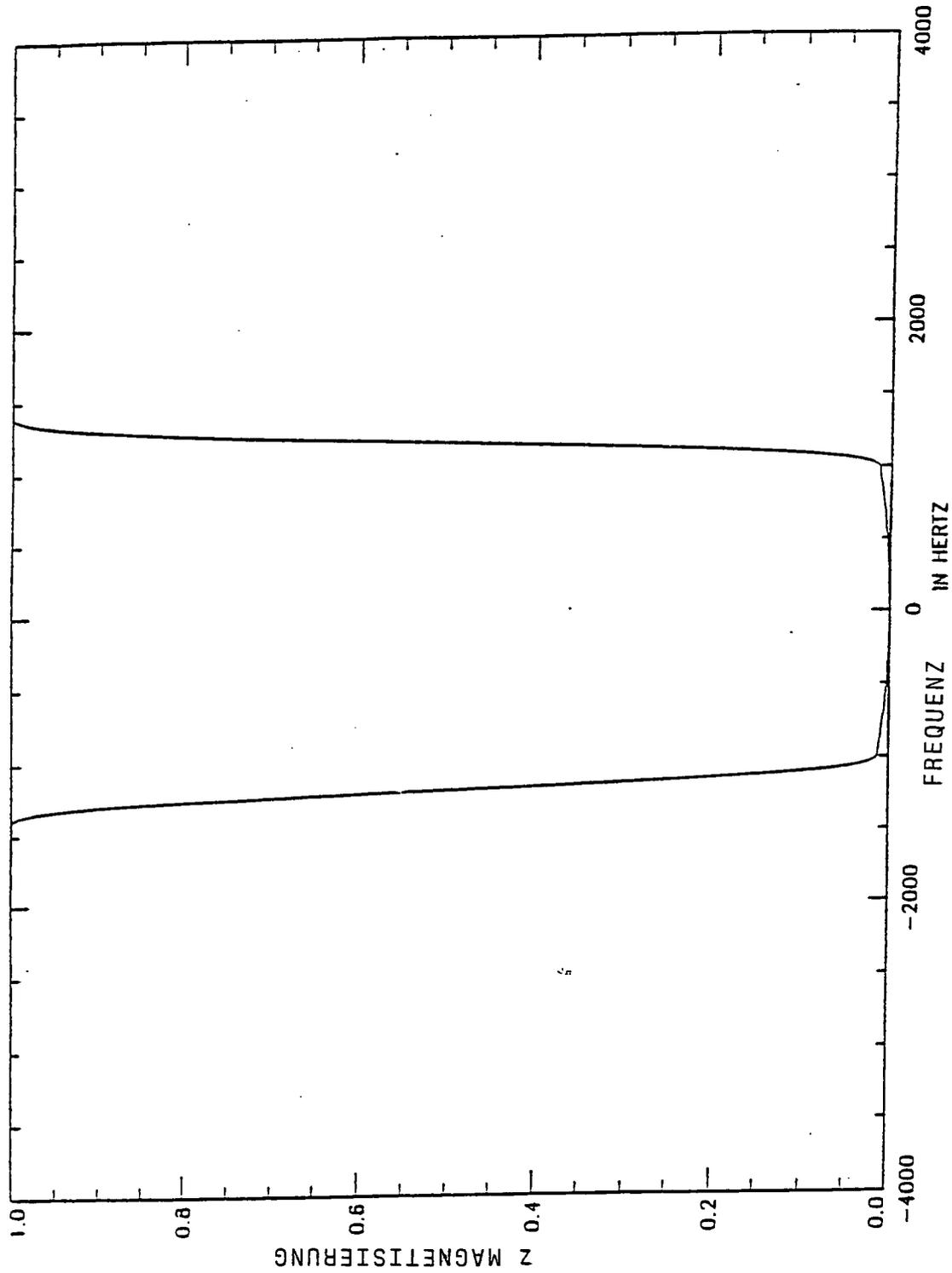


FIG. 2

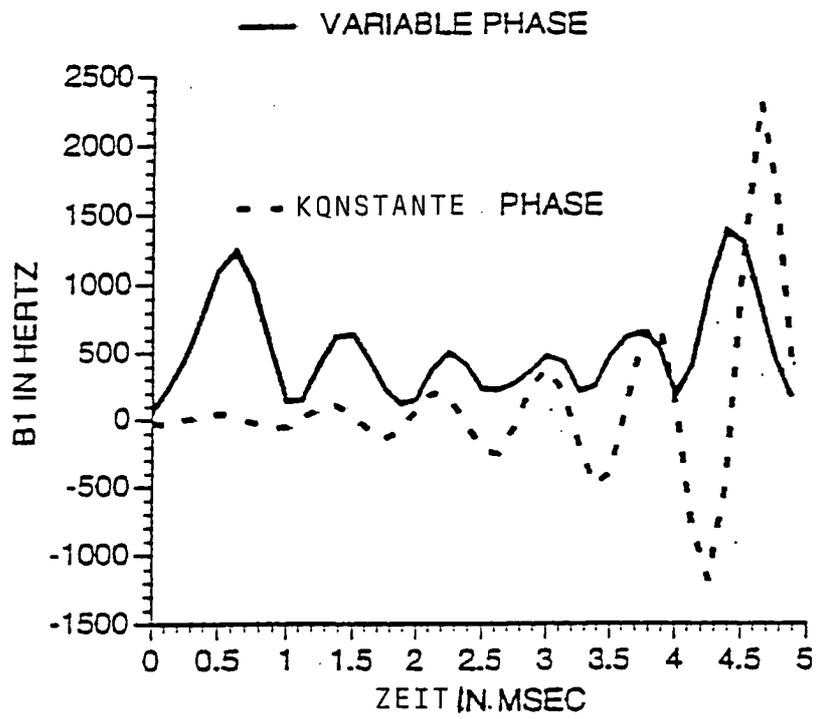


FIG. 3

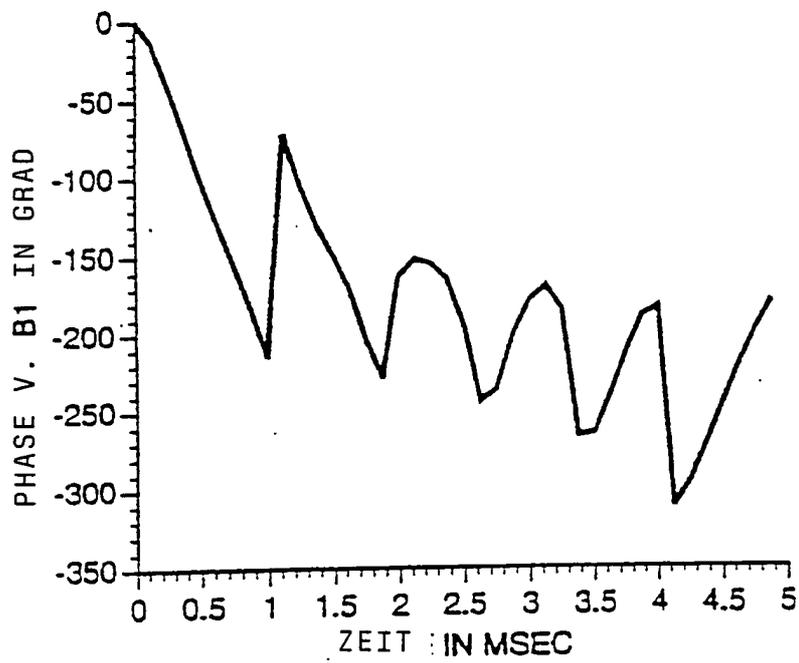


FIG. 4

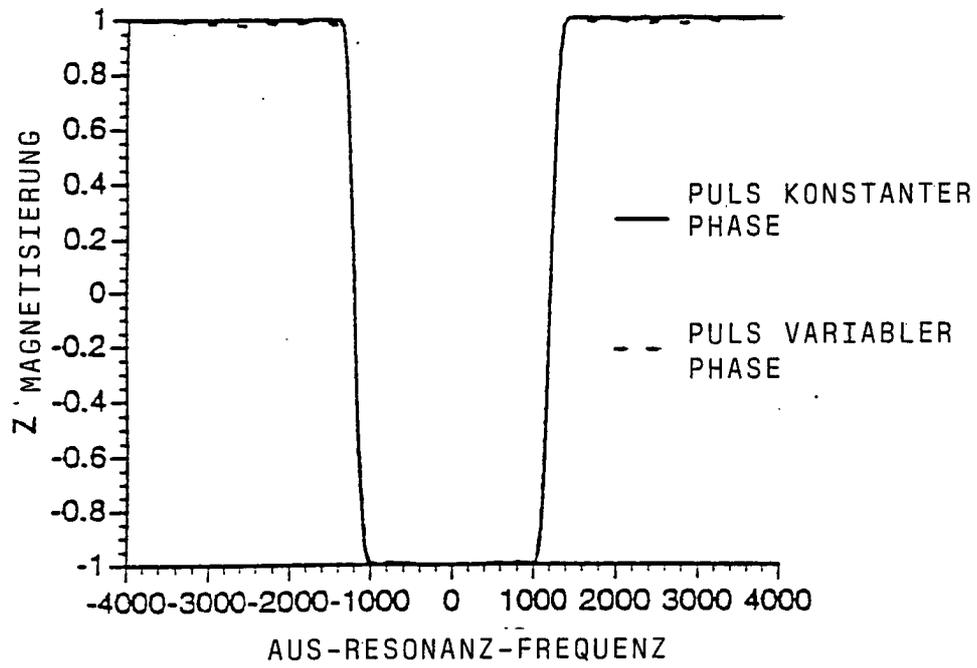


FIG. 5