



(10) **DE 10 2012 201 770 B3** 2013.04.11

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2012 201 770.4**
(22) Anmeldetag: **07.02.2012**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **11.04.2013**

(51) Int Cl.: **G01R 33/32 (2012.01)**
G01R 33/36 (2012.01)
A61B 5/055 (2012.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

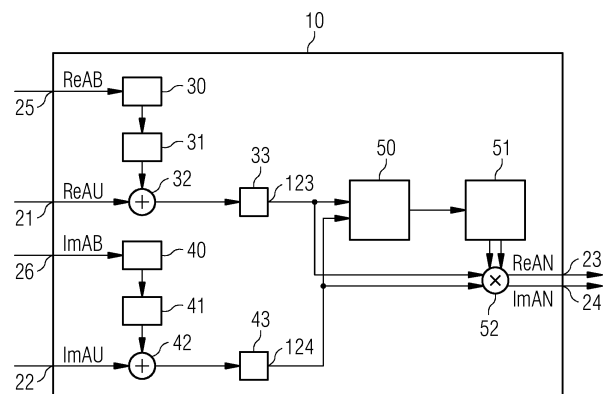
(73) Patentinhaber:
Siemens AG, 80333, München, DE

(72) Erfinder:
Demharter, Nikolaus, 91077, Dormitz, DE;
Baumgartl, Rudi, 91056, Erlangen, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:
DE 10 2007 058 872 A1

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur digitalen Amplituden- und Phasenregelung eines Hochfrequenzsignals, Schaltungsanordnung und Magnetresonanztomographiesystem**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren zur digitalen Amplituden- und Phasenregelung eines Hochfrequenzsignals beschrieben. Hierzu wird ein digitales Auftragssignals bereitgestellt, das eine Amplitude und eine Phase des zu regelnden Hochfrequenzsignals in komplexer Form mit einer Realteilkomponente (ReAU) und einer Imaginärteilkomponente (ImAU) vorgibt. Ein digitales Ansteuersignals wird an eine Hochfrequenzeinheit (11, 12) zur Erzeugung des Hochfrequenzsignals ausgegeben. Ein digitaler Signalabweichungswert wird in komplexer Form mit Realteilkomponente (ReAB) und Imaginärteilkomponente (ImAB) empfangen. Der Signalabweichungswert drückt eine Abweichung des Hochfrequenzsignals vom Auftragssignal bezüglich der Amplitude und der Phase aus. Das digitale Ansteuersignal wird dann aus dem Auftragssignal unter Berücksichtigung des Signalabweichungswerts bestimmt. Die Bestimmung der Realteilkomponente (ReAN) und der Imaginärteilkomponente (ImAN) erfolgt jeweils getrennt. Darüber hinaus werden eine Schaltungsanordnung (105), mit der eine digitale Amplituden- und Phasenregelung eines Hochfrequenzsignals möglich ist, und ein Magnetresonanztomographiesystem (100) mit einer solchen Schaltungsanordnung (105) beschrieben.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur digitalen Amplituden- und Phasenregelung eines Hochfrequenzsignals, vorzugsweise zur Ansteuerung einer Antennenanordnung eines Magnetresonanztomographiesystems. Weiterhin betrifft die Erfindung eine Schaltungsanordnung, in der mit einem solchen Verfahren sowohl die Amplitude als auch die Phase eines Hochfrequenzsignals digital geregelt werden kann. Darüber hinaus betrifft die Erfindung ein Magnetresonanztomographiesystem mit einer solchen Schaltungsanordnung.

[0002] In einer Vielzahl von technischen Systemen werden geregelte Hochfrequenzsignale benötigt. Typische Anwendungsbeispiele finden sich u. a. in der Nachrichtenübertragungstechnik und in der Medizintechnik. Im medizintechnischen Bereich werden beispielsweise modulierte Hochfrequenzsignale innerhalb von Magnetresonanztomographiesystemen benötigt. Um mit Hilfe eines Magnetresonanztomographieverfahrens ein Bild zu erzeugen, müssen nämlich definierte Hochfrequenzpulse in den Körper bzw. den zu untersuchenden Körperteil des Patienten eingestrahlt werden, der sich in einem genau definierten Magnetfeld befindet. Dadurch werden die Kerne der Atome im Untersuchungsobjekt angeregt, d. h. um einen sogenannten Flipwinkel definiert gekippt. Die in Folge ausgesandten Signale der Kerne werden erfasst und als Rohdaten akquiriert, aus denen die gewünschten Magnetresonanzbilder erzeugt werden können. In der Regel werden für verschiedene Untersuchungen verschiedenste Sequenzen von Hochfrequenzpulsen ausgesendet, wobei jeder einzelne Hochfrequenzpuls eine genau definierte zeitliche Länge, Amplitude und Form aufweisen sollte, um eine bestimmte Wirkung zu erreichen. Üblicherweise werden die hierzu notwendigen Parameter in Form eines digitalen Datenstroms vorgegeben, welcher mit einer Mischfrequenz MF gemischt wird, so dass sich insgesamt das in der gewünschten Weise modulierte Hochfrequenzsignal, z. B. die erforderliche Serie von benötigten Hochfrequenzpulsen, ergibt. Ein volldigitaler Modulator für ein Magnetresonanztomographiesystem wird beispielsweise in der DE 10 2007 058 872 A1 beschrieben. Dieser Modulator weist zwei hintereinander geschaltete Mischerstufen auf. Die erste Mischerstufe führt mit einer relativ niedrigen ersten Abtastrate eine Frequenzmischung mit einer hochgenau einstellbaren ersten Oszillatorfrequenz, die zweite Mischerstufe mit einer erheblich höheren zweiten Abtastrate eine Frequenzmischung mit einer relativ grob einstellbaren zweiten Oszillatorfrequenz durch.

[0003] Hochfrequenzsignale ändern sich in Abhängigkeit von der Last. In der Regel erzeugt die Last einen komplexen Reflexionsfaktor, das heißt ein Teil der vom Verstärker abgegebenen Leistung wird reflektiert und in der Phase gedreht. Daher sollten für

eine Regelung sowohl das vom Verstärker zur Last laufende Signal als auch das reflektierte Signal berücksichtigt werden.

[0004] Die Last in einem Magnetresonanztomographiesystem ist abhängig von dem jeweils untersuchten Patienten und von dem jeweils untersuchten Körperteil. Es werden daher vor Beginn einer Untersuchung sogenannte Adjustmentpulse ausgesandt, mit denen die für die jeweilige Untersuchungssituation zur Erreichung einer bestimmten Flipwinkelverteilung erforderliche Leistung im Voraus bestimmt wird.

[0005] Durch Bewegung des Patienten während der Untersuchung kann sich jedoch die Lastsituation ändern. Zudem kann sich das Verhalten einiger Komponenten während der Untersuchungsdauer auf Grund von Temperatureffekten verändern.

[0006] Damit ist eine Regelung der Amplitude und der Phase des Hochfrequenzsignals auch während der Untersuchung wünschenswert.

[0007] In der DE 102 54 660 B4 wird ein Verfahren beschrieben, bei dem ein Rückführsignal demoduliert wird, um ein Gleichspannungssignal zu erhalten, mit dem die Amplitude des Hochfrequenzsignals geregelt wird. Über einen Phasenvergleicher wird ein Differenzsignal gewonnen, mit dem ein Phasenschieber angesteuert wird, um die Phase des Hochfrequenzsignals zu regeln. Ungünstigerweise ist eine Digitalisierung eines derartigen Verfahrens problematisch, da es im Bereich der Phasenregelung zu Sprüngen kommen kann, die das Regelsignal ernsthaft verfälschen.

[0008] Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren bzw. eine Schaltungsanordnung der eingangs genannten Art zu schaffen, mit der eine digitale Regelung eines Hochfrequenzsignals möglich ist, ohne dass es zu Sprüngen in der Phase kommt.

[0009] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Patentanspruch 1 und durch eine Schaltungsanordnung gemäß Patentanspruch 14 gelöst.

[0010] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird zunächst ein digitales Auftragssignal bereitgestellt, das eine Amplitude und eine Phase des zu regelnden Hochfrequenzsignals in komplexer Form mit einer Realteilkomponente und einer Imaginärteilkomponente vorgibt. Das Auftragssignal beschreibt, welches Hochfrequenzsignal gewünscht ist.

[0011] Es ist bekannt, sinus- bzw. cosinusförmige Wellen oder Signale in komplexer Form als Zeiger oder Phasoren darzustellen. Dabei steht die Zeigerlänge für die Amplitude des Signals und der Winkel, den der Zeiger mit einer Nullachse einschließt,

bezeichnet die Phase. Eine sinusförmige Welle konstanter Amplitude lässt sich dann durch einen gleichförmig kreisenden Zeiger darstellen. Jede komplexe Zahl lässt sich statt in Amplitude und Phase auch durch ihre Realteilkomponente und ihre Imaginärteilkomponente ausdrücken.

[0012] Ein digitales Ansteuersignal wird an eine Hochfrequenzeinheit zur Erzeugung des Hochfrequenzsignals ausgegeben. Im einfachsten Fall, d. h. ohne eine digitale Regelung, sind Ansteuersignal und Auftragssignal identisch. Im erfindungsgemäßen Verfahren wird jedoch ein digitaler Signalabweichungswert in komplexer Form mit Realteilkomponente und Imaginärteilkomponente empfangen. Der Signalabweichungswert drückt eine Abweichung des Hochfrequenzsignals vom Auftragssignal bezüglich der Amplitude und der Phase aus.

[0013] Das digitale Ansteuersignal wird aus dem Auftragssignal unter Berücksichtigung des empfangenen Signalabweichungswerts bestimmt. Die Bestimmung der Realteilkomponente des digitalen Ansteuersignals erfolgt aus der Realteilkomponente des Auftragssignals und der Realteilkomponente des Signalabweichungswertes. Die Bestimmung der Imaginärteilkomponente des digitalen Ansteuersignals erfolgt aus der Imaginärteilkomponente des Auftragssignals und der Imaginärteilkomponente des Signalabweichungswertes. Die Bestimmung erfolgt also für die beiden Komponenten getrennt.

[0014] Im Stand der Technik bekannte analoge Regelungen für ein Hochfrequenzsignal berücksichtigen häufig nur die Amplitude. Es sind schon Regelungen bekannt, die über einen Phasenschieber auch die Phase berücksichtigen. Überträgt man diese analoge Regelung auf eine digitale Regelung, so ist der Sprung von einem Phasenwinkel von 360° auf 0° , bzw. von 359° auf 0° problematisch und kann zu groben Fehlern oder Instabilitäten führen. Mit der erfindungsgemäßen Berücksichtigung von Realteilkomponente und Imaginärteilkomponente tritt diese Problematik nicht auf. Eine digitale Regelung eines Hochfrequenzsignals wird möglich, ohne dass es zu Sprüngen in der Phase kommt.

[0015] Eine entsprechende Schaltungsanordnung benötigt einen Auftragseingang zum Empfang eines digitalen Auftragssignals, das Amplitude und Phase des zu regelnden Hochfrequenzsignals in einer Realteilkomponente und einer Imaginärteilkomponente vorgibt. Der Auftragseingang muss also zwei getrennte Signale empfangen können.

[0016] Ferner benötigt die Schaltungsanordnung einen Signalausgang zur Ausgabe eines Ansteuersignals für eine Hochfrequenzeinheit zur Erzeugung des Hochfrequenzsignals, einen Signalabweichungseingang zum Empfang eines digitalen Signalabwei-

chungswertes, der in einer Realteilkomponente und einer Imaginärteilkomponente übergeben wird, und eine Bestimmungseinheit zum Bestimmen des Ansteuersignals aus dem Auftragssignal unter Berücksichtigung des Signalabweichungswertes.

[0017] Der Signalabweichungswert wird durch einen Vergleich zwischen dem tatsächlich von der Hochfrequenzeinheit ausgegebenen Signal und dem Auftragssignal bestimmt. Auch hier erfolgt in vorteilhafter Weise der Vergleich getrennt nach Realteilkomponente und Imaginärteilkomponente.

[0018] Die Bestimmungseinheit ist so ausgeführt, dass eine Bestimmung der Realteilkomponente des Ansteuersignals getrennt von der Bestimmung der Imaginärteilkomponente des Ansteuersignals erfolgt.

[0019] Weitere, besonders vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen sowie der nachfolgenden Beschreibung, wobei die unabhängigen Ansprüche einer Anspruchskategorie auch analog zu den abhängigen Ansprüchen einer anderen Anspruchskategorie weitergebildet sein können.

[0020] Vorzugsweise erfolgt vor der Ausgabe des digitalen Ansteuersignals eine Kennlinienkorrektur. Hierfür wird aus der Realteilkomponente und der Imaginärteilkomponente des digitalen Ansteuersignals die Amplitude des Ansteuersignals berechnet. Wie bereits ausgeführt, ist die Amplitude im Zeigermodell durch die Länge des Zeigers gegeben, sie berechnet sich also als Quadratwurzel aus der Summe der Realteilkomponente zum Quadrat und der Imaginärteilkomponente zum Quadrat. In Abhängigkeit von der so bestimmten Amplitude wird das Ansteuersignal komplex mit einem bestimmten Korrekturfaktor aus mehreren komplexen Korrekturfaktoren multipliziert. Die auszuregelnde Signalabweichung kann damit schon im Vorfeld geringer gehalten werden.

[0021] Die vorteilhafte Kennlinienkorrektur kann dadurch weitergebildet werden, dass die mehreren komplexen Korrekturfaktoren in einer Tabelle abgelegt sind und eine nichtlineare Kennlinie eines nachgeordneten Hochfrequenzverstärkers berücksichtigen. Die angesteuerte Hochfrequenzeinheit kann nach einer Digital-Analog-Wandlung einen Oszillator, einen Mischer und einen Hochfrequenzleistungsverstärker (RFPA – radio frequency power amplifier) enthalten. Bekannterweise haben Verstärker zunächst einen annähernd linearen Aussteuerbereich und zu ihrer Leistungsgrenze hin eine nichtlineare Kennlinie. Mit der Kennlinienkorrektur wird es möglich, den Hochfrequenzleistungsverstärker bis an seine Leistungsgrenze zu betreiben. Das ist vorteilhaft, da Hochfrequenzverstärker häufig in Hochfrequenzstrecken die limitierenden Komponenten darstellen.

[0022] Besonders bevorzugt wird die Amplitude des Auftragssignals so auf einen Wert von „1“ normiert, dass der Wert „1“ der höchsten zu erwartenden Auftragsamplitude entspricht.

[0023] Die digitale Regelung eines hochfrequenten Signals erfordert eine sehr schnelle Signalverarbeitung. Eine schnelle Verarbeitung kann zunächst durch die Wahl einer geeigneten Hardware erreicht werden. Bevorzugt wird daher die Schaltung in einem frei programmierbaren Logikschaltkreis (FPGA) implementiert.

[0024] Eine weitere Beschleunigung kann durch Verwendung einer Festkommaarithmetik erreicht werden. Damit ist der Wertebereich begrenzt. Mit einer Normierung des Eingangswerts der digitalen Regelung, d. h. der Amplitude des Auftragssignals, wird der Wertebereich bestmöglich ausgenutzt. Ist die Amplitude einer komplexen Zahl, d. h. die Zeigerlänge auf „1“ begrenzt, so können auch die Realteilkomponente und die Imaginärteilkomponente jeweils nicht über „1“ steigen.

[0025] Vorzugsweise entspricht dem normierten Auftragssignal mit dem Wert „1“ ein Ansteuersignal, dessen Amplitude ebenfalls auf den Wert „1“ normiert ist. Ein das Ansteuersignal empfangender Digital-Analog-Wandler kann dann ebenfalls in seinem optimalen Bereich genutzt werden.

[0026] In einer Weiterbildung entspricht dem normierten Ansteuersignal mit dem Wert „1“ ein Ausgangssignal eines nachgeordneten Hochfrequenzverstärkers mit maximaler Amplitude. Damit wird der Hochfrequenzverstärker bei der höchsten zu erwartenden Steueramplitude an seiner Leistungsgrenze betrieben, der Leistungsbereich des Hochfrequenzverstärkers wird voll ausgenutzt.

[0027] In einer bevorzugten Ausführungsform handelt es sich bei dem Hochfrequenzsignal um eine Pulsfolge vorzugsweise zur Ansteuerung einer Antennenanordnung eines Magnetresonanztomographiesystems. Bei der Antennenanordnung kann es sich beispielsweise um eine Bodycoil handeln oder auch um eine lokale Sendespulenordnung oder um eine Kombination aus beiden. Es erfolgt eine Normierung der Amplitude des Ansteuersignals auf einen Wert „1“, der einem Ausgangssignal eines nachgeordneten Hochfrequenzverstärkers mit maximaler Amplitude entspricht. Die Bestimmung des digitalen Ansteuersignals aus dem Auftragssignal erfolgt unter zusätzlicher Berücksichtigung der höchsten zu erwartenden Auftragsamplitude innerhalb eines Pulses. Durch die Berücksichtigung kann vermieden werden, dass ein zu hoher Puls in der Sequenz zu einem Sequenzabbruch führt.

[0028] In einer Weiterbildung der bevorzugten Ausführungsform wird die Realteilkomponente des Signalabweichungswerts in Abhängigkeit von der höchsten zu erwartenden Realteilkomponente des Auftragssignals für den jeweils aktuellen Puls so verändert, dass die Addition der Realteilkomponente des Auftragssignals und der Realteilkomponente des Signalabweichungswertes den Wert „1“ nicht überschreitet. Ebenso wird die Imaginärteilkomponente des Signalabweichungswerts in Abhängigkeit von der höchsten zu erwartenden Imaginärteilkomponente des Auftragssignals für den jeweils aktuellen Puls so verändert, dass die Addition der Imaginärteilkomponente des Auftragssignals und der Imaginärteilkomponente des Signalabweichungswertes den Wert „1“ nicht überschreitet. Der Regelbereich wird damit an der Leistungsgrenze des nachgeschalteten Hochfrequenzverstärkers bewusst verringert, um eine Übersteuerung zu vermeiden. Eine derartige Übersteuerung könnte zu einem Sequenzabbruch oder einer Schädigung des Verstärkers führen.

[0029] Bevorzugterweise erfolgt die Veränderung der Realteilkomponente und der Imaginärteilkomponente des Signalabweichungswerts so, dass die Amplitude des digitalen Ansteuersignals den Wert „1“ nicht überschreitet. Wie oben ausgeführt, berechnet sich die Amplitude als Quadratwurzel aus der Summe der Realteilkomponente zum Quadrat und der Imaginärteilkomponente zum Quadrat. Werden beide „1“, so ergibt sich ein Wert größer „1“ für die Amplitude, so dass noch immer eine Überlastsituation gegeben ist. Für diese in der Praxis selteneren Fälle kann prinzipiell eine harte Begrenzung auf „1“ vorgenommen werden. In der bevorzugten Ausführungsform wird durch die Berücksichtigung bereits bei der Veränderung des Signalabweichungswertes die harte Begrenzung vermieden.

[0030] Die Realteilkomponente und/oder die Imaginärteilkomponente des Signalabweichungswertes kann dabei jeweils mit einem Faktor multipliziert werden, so dass eine kontinuierliche Änderung in Abhängigkeit von der höchsten zu erwartenden Realteilkomponente bzw. Imaginärteilkomponente des Auftragssignals erfolgt. Der Faktor wird so bestimmt, dass die Realteilkomponente und/oder die Imaginärteilkomponente des Signalabweichungswertes einen Wert von $(1 - \text{maximale Realteilkomponente bzw. Imaginärteilkomponente des Auftragssignals}) / (\text{Quadratwurzel aus } 2)$ nicht überschreitet.

[0031] Es ist vorteilhaft, wenn die Realteilkomponente und/oder die Imaginärteilkomponente des Signalabweichungswertes jeweils vor der Multiplikation über eine Regeleinheit geführt werden, und der Ausgangswert der Regeleinheiten so skaliert ist, dass ein Wert von „1“ nicht überschritten wird.

[0032] Alternativ kann die Veränderung der Realteilkomponente und/oder der Imaginärteilkomponente des Signalabweichungswertes auch nur dann erfolgen, wenn anderenfalls der Wert „1“ für die Summe aus der Imaginärteilkomponente des Auftragssignals und der Imaginärteilkomponente des Signalabweichungswertes, bzw. die Summe aus der Realteilkomponente des Auftragssignals und der Realteilkomponente des Signalabweichungswertes und/oder der Wert „1“ für die Amplitude des digitalen Ansteuersignals überschritten würde. Es erfolgt also keine kontinuierliche Änderung des Signalabweichungswertes durch einen Faktor, sondern eine harte Begrenzung. Das hat den Vorteil, dass die Regelung in Bereichen abseits der Leistungsgrenze des Hochfrequenzverstärkers nicht beeinflusst wird. Bei Pulsfolgen mit Amplituden dicht an der Leistungsgrenze wird die Regelung jedoch abrupt verändert.

[0033] Die Realteilkomponente und die Imaginärteilkomponente des Signalabweichungswertes können jeweils vor der möglichen Veränderung über eine Regeleinheit geführt werden. Hierbei kann es sich beispielsweise um einen Proportional-Integral Regler handeln. Die Verwendung eines Reglers für den Signalabweichungswert führt zu einer Stabilisierung des Regelverhaltens der erfindungsgemäßen digitalen Regelung.

[0034] Bevorzugt findet sich die erfindungsgemäße Schaltungsanordnung in einem Magnetresonanztomographiesystem. Hier können Laständerungen während einer Untersuchung, beispielsweise durch eine Bewegung des Patienten oder durch Temperatureffekte in der Hochfrequenzeinheit oder allgemeiner in der gesamten Hochfrequenzstrecke zu einem Sequenzabbruch führen. Der Patient muss dann eine komplette neue Untersuchung mitmachen.

[0035] Durch die erfindungsgemäße digitale Regelung wird ein Sequenzabbruch vermieden.

[0036] Die Erfindung wird im Folgenden unter Hinweis auf die beigefügten Figuren anhand von Ausführungsbeispielen noch einmal näher erläutert. Dabei sind in den verschiedenen Figuren gleiche Komponenten mit identischen Bezugsziffern versehen. Es zeigen:

[0037] [Fig. 1](#) ein Diagramm zur Erläuterung der Signaldarstellung in komplexer Form,

[0038] [Fig. 2](#) eine schematische Blockdarstellung eines Magnetresonanztomographiesystems,

[0039] [Fig. 3](#) eine schematische Blockdarstellung einer erfindungsgemäßen Schaltungsanordnung,

[0040] [Fig. 4](#) eine Kennlinie eines Blocks einer ersten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Schaltungsanordnung,

[0041] [Fig. 5](#) eine schematische Blockdarstellung einer zweiten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Schaltungsanordnung,

[0042] [Fig. 6](#) eine schematische Blockdarstellung einer dritten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Schaltungsanordnung.

[0043] Da für das Verständnis der Erfindung die Darstellung eines elektrischen Signals in komplexer Form wesentlich ist, soll der Zusammenhang zwischen Betrag, Phase, Realteilkomponente und Imaginärteilkomponente eines Zeigers anhand der [Fig. 1](#) kurz erläutert werden. Diese zeigt eine Gaußsche Ebene mit einer x-Achse, bzw. einer reellen Achse **1**, auf der eine Realteilkomponente aufgetragen wird, und mit einer y-Achse, bzw. einer imaginären Achse **2**, auf der eine Imaginärteilkomponente aufgetragen wird. Es sind beispielhaft zwei Zeiger **3** und **4** eingezeichnet. Dabei steht die Länge der Zeiger **3**, **4** für die Amplitude des Signals, bei dem es sich um den Strom, die Spannung oder die Leistung eines nieder- oder hochfrequenten Signals handeln kann. Winkel **6** bzw. **7**, die die Zeiger jeweils mit der reellen Achse **1** einschließen, geben die Phase des Signals an, sind also ein Ausdruck für den zeitlichen Ablauf. Der Fachmann weiß, dass beispielsweise ein gleichförmiges Sinussignal durch einen gleichförmig kreisenden Zeiger dargestellt werden kann.

[0044] Zeiger **3** hat eine Länge von „1“, seine Spitze liegt auf einem um den Ursprung des Koordinatensystems geschlagenen Einheitskreis **5**. Zeiger **3** hat eine Realteilkomponente a und eine Imaginärteilkomponente b. Dabei ist die Zeigerlänge **1** gleich $\sqrt{a^2 + b^2}$. Bei konstanter Amplitude nehmen Realteilkomponente a und Imaginärteilkomponente b auch bei anderen Winkeln, d. h. im Zeitverlauf, keinen Wert größer als „1“ an. Zeiger **4** hat demgegenüber eine Länge $l > „1“$. Zeiger **4** hat eine Realteilkomponente c und eine Imaginärteilkomponente d. Beide Komponenten c und d sind bei dem dargestellten Winkel **7** kleiner als „1“. Beide Komponenten können bei anderen Winkeln, d. h. im Zeitverlauf, Werte größer „1“ annehmen. Die Beschreibung eines Zeigers in Polarkoordinaten (Länge, Winkel) ist zu der Beschreibung in kartesischen Koordinaten (Realteil und Imaginärteil) gleichwertig. Bei einer kreisenden Bewegung des Zeigers ändern sich Realteil und Imaginärteil jedoch kontinuierlich, Sprünge wie bei der Phase von 360° auf 0°, die bei einer Digitalverarbeitung störend sind, treten nicht auf.

[0045] [Fig. 2](#) zeigt eine schematische Blockdarstellung eines Magnetresonanztomographiesystems

100, in dem eine erfindungsgemäße Schaltungsanordnung **105** verwendet wird.

[0046] Ein zentrales Teil des Magnetresonanztomographiesystems **100** ist ein üblicher Scanner **101**, in dem in einem Messraum **102** (üblicherweise auch „Patiententunnel“ genannt) ein Patient oder Proband (nicht dargestellt) für eine Untersuchung auf einer Liege **103** positionierbar ist. Dieser Scanner weist ein Grundmagnetfeldsystem auf, um im Messraum **102** ein Grundmagnetfeld anzulegen, sowie ein Gradientenspulensystem, über das eine Pulsfolge von Magnetfeldgradientenpulsen gemäß einem vorgegebenen Messprotokoll ausgegeben werden kann. Passend dazu können über eine Antennenanordnung **104** Hochfrequenzpulse zur Anregung von Kernseins in einem zu untersuchenden Bereich des Untersuchungsobjekts ausgesendet werden. Bei der Antennenanordnung **104** kann es sich beispielsweise, wie hier dargestellt, um eine Bodycoil handeln oder um eine lokale Sendespulenordnung. Von der Antennenanordnung können dann auch die Magnetresonanzsignale, welche durch eine Relaxation der angeregten Kernseins entstehen, aufgefangen werden. In der Regel werden verschiedene Antennenanordnungen für eine Untersuchung eingesetzt, zum Beispiel eine Bodycoil zum Aussenden der Hochfrequenzpulse und Lokalspulen zum Auffangen der Magnetresonanzsignale.

[0047] Angesteuert wird der Scanner **101** von einer Steuervorrichtung **106** des Magnetresonanztomographiesystems **100**. Diese weist verschiedene Schnittstellen auf. Hierzu zählt unter anderem eine Hochfrequenzsendeschnittstelle **108**, welche – wie später noch im Detail erläutert wird – über eine Hochfrequenzstrecke mit einer erfindungsgemäßen Schaltungsanordnung **105** dafür sorgt, dass die gewünschten Hochfrequenzpulse in die Antennenanordnung **104** eingespeist werden. Außerdem weist die Steuervorrichtung eine Magnetresonanzsignal-Empfangs-schnittstelle **107** auf, die von der zum Empfang verwendeten Antennenanordnung die Magnetresonanzsignale als Rohdaten übernimmt, verarbeitet und dann an eine Rekonstruktionseinheit **109** übergibt, welche in üblicher Weise auf Basis der Rohdaten die Bilddaten rekonstruiert. An die Steuervorrichtung **106** ist ein Terminal **110** angeschlossen, über welches ein Bediener die Steuervorrichtung **106** und somit das gesamte Magnetresonanztomographiesystem **100** bedienen kann.

[0048] Über weitere Schnittstellen können andere Komponenten des Scanners **101**, beispielsweise das Gradientenspulensystem, das Grundfeldmagnetsystem, die Liege **103** etc. von der Steuereinrichtung **106** angesteuert werden. All diese Komponenten sind dem Fachmann aber bekannt und daher in [Fig. 2](#) nicht näher dargestellt. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass das Magnetresonanztomo-

graphiesystem noch eine Vielzahl weiterer Komponenten, wie zum Beispiel Schnittstellen an bestimmte Netzwerke, aufweisen kann, die dem Fachmann ebenso wie die grundsätzliche Funktionsweise eines Magnetresonanztomographiesystems bekannt sind und daher nicht weiter erläutert werden müssen.

[0049] Die erfindungsgemäße aufgebaute Schaltungsanordnung **105** in der Hochfrequenzstrecke weist eine Bestimmungseinheit **10** auf, die digital arbeitet, und eine Hochfrequenzeinheit, die einen Digital-Analog-Wandler mit Mischer **11**, sowie einen Hochfrequenzleistungsverstärker **12** umfasst. Ein Richtkoppler **13** erlaubt das Auskoppeln eines Teils des zu einer nicht dargestellten Antennenanordnung laufenden Hochfrequenzsignals, sowie die Auskopplung eines Teils des von der Antennenanordnung reflektierten Hochfrequenzsignals. In einer Demodulationseinheit **14** erfolgt die Rückwandlung der ausgekoppelten hochfrequenten Signalanteile zurück in Basisbandsignale. In der Demodulationseinheit **14** erfolgt auch eine Analog-Digital-Wandlung. Ferner sind zwei Vergleicher **15** und ein Verzögerungsglied **16** gezeigt.

[0050] Die Bestimmungseinheit **10** weist in [Fig. 2](#) oben links zwei Eingänge **21** und **22** zum Empfangen eines Auftragssignals auf. Am Eingang **21** wird eine Realteilkomponente ReAU und am Eingang **22** eine Imaginärteilkomponente ImAU des Auftragssignals eingespeist. Das Auftragssignal wird von einer nicht gezeigten Steuereinheit geliefert. Das Auftragssignal umfasst eine niederfrequente Sequenz aus Pulsen unterschiedlicher Länge und Amplitude. Die Sequenz ist auf eine bestimmte Untersuchungsaufgabe angepasst.

[0051] Die Bestimmungseinheit **10** weist in [Fig. 2](#) unten links zwei Eingänge **25** und **26** zum Empfangen eines Signalabweichungswertes auf. Am Eingang **25** wird eine Realteilkomponente ReAB und am Eingang **26** eine Imaginärteilkomponente ImAB des Signalabweichungswertes eingespeist. Die Bestimmungseinheit **10** hat ferner zwei Signalausgänge **23** und **24**, an denen ein Ansteuersignal für die nachfolgende Hochfrequenzeinheit ausgegeben wird. Dabei wird am Signalausgang **23** eine Realteilkomponente ReAN und am Signalausgang **24** eine Imaginärteilkomponente ImAN des Ansteuersignals ausgegeben. Liegt keine Signalabweichung vor, so kann das Ansteuersignal genau dem Auftragssignal entsprechen.

[0052] Im Block **11** findet eine Wandlung des digitalen Signals in ein analoges Signal statt. Ferner wird das Signal mit einem Hochfrequenzsignal gemischt, das durch einen nicht dargestellten Oszillator zur Verfügung gestellt wird. Die Mischung kann vor oder nach der Digital-Analog-Wandlung stattfinden. Die Hochfrequenz liegt bei einem Magnetfeld von 3 Tesla und zur Anregung von H_1 -Atomen üblicher Wei-

se bei 123 MHz. Das Ansteuersignal bildet damit die Hüllkurve eines hochfrequenten Signals. Das hochfrequente Signal wird an den Hochfrequenzleistungsverstärker **12** abgegeben. In Magnetresonanztomographiesystemen werden diese Verstärker abhängig von der Lastsituation häufig bis an ihre Leistungsgrenze betrieben.

[0053] Das verstärkte hochfrequente Signal wird durch den Richtkoppler **13** an eine Antennenanordnung **104** des Magnetresonanztomographiesystems **100** geleitet, hier als Beispiel die Bodycoil. Der Richtkoppler **13** erlaubt ein Auskoppeln des Signals in Hin- und Rückrichtung. In der Regel erzeugt eine Last, d. h. zum Beispiel die Antennenanordnung, einen komplexen Reflexionsfaktor. Ein Teil der vom Verstärker abgegebenen Leistung wird reflektiert und in der Phase gedreht. Ein hochfrequentes Signal umfasst Wechselstrom- und Wechselspannungskomponenten, d. h. Leistungskomponenten. Diese können in komplexer Form beschrieben werden. Die vom Richtkoppler zur Demodulationseinheit **14** ausgekoppelten Signale enthalten also Amplituden- und Phaseninformationen, die auch als Realteil- und Imaginärteilkomponenten dargestellt werden können. In der Demodulationseinheit **14** erfolgt eine Rückwandlung in das Signal des Basisbands, d. h. in die Pulsfolge. Ferner findet eine Analog-Digital-Wandlung statt. Es ist möglich, in der Demodulationseinheit **14** eine Signalverarbeitung vorzunehmen, wonach beispielsweise nur Informationen vom Signal in Hinrichtung, nur vom Signal in Rückrichtung oder von beiden Signalen in unterschiedlichen Richtungen berücksichtigt werden. Beispielsweise mittels Matrizenoperationen kann auch die Genauigkeit des Richtkopplers rechnerisch verbessert werden.

[0054] Von der Demodulationseinheit **14** wird das Signal in einer Realteilkomponente und in einer Imaginärteilkomponente an die zwei Vergleicher **15** geleitet. Die Komponenten werden getrennt voneinander mit den entsprechenden Signalkomponenten des Auftragssignals verglichen. Die Signalkomponenten des Auftragssignals werden vor dem Vergleich über das Verzögerungsglied **16** entsprechend der Signallaufzeit der über den Richtkoppler ausgekoppelten Signale verzögert. Die über die Vergleicher **15** ermittelten Differenzen werden als Signalabweichungswerte der Bestimmungseinheit **10** zugeführt. Am Eingang **25** wird die Realteilkomponente ReAB und am Eingang **26** die Imaginärteilkomponente ImAB des Signalabweichungswertes eingespeist.

[0055] [Fig. 3](#) zeigt Details der Bestimmungseinheit **10** für eine erste Ausführungsform. Es werden für gleiche Elemente gleiche Bezugszeichen wie in [Fig. 2](#) verwendet. Um den Aufbau der Schaltung klarer zu verdeutlichen, sind die Eingänge anders gruppiert dargestellt als in [Fig. 2](#). Auf der linken Seite befindet sich oben der Eingang **25**, an dem die Real-

teilkomponente ReAB des Signalabweichungswertes eingespeist wird. Darunter dargestellt ist der Eingang **21**, an dem die Realteilkomponente ReAU des Auftragssignals eingespeist wird. Weiter unten näher erläuterte Blöcke **30**, **31**, **32** und **33** dienen der Bestimmung der Realteilkomponente ReAN des Ansteuersignals. Am Eingang **26** wird die Imaginärteilkomponente ImAB des Signalabweichungswertes und am Eingang **22** die Imaginärteilkomponente ImAU des Auftragssignals eingespeist. Weiter unten näher erläuterte Blöcke **40**, **41**, **42** und **43** dienen der Bestimmung der Imaginärteilkomponente ImAN des Ansteuersignals.

[0056] Die Schaltungsanordnung gemäß [Fig. 3](#) innerhalb der Bestimmungseinheit **10** umfasst zwei Regler **30**, **40**, zwei Änderungseinheiten **31**, **41** zur Änderung des Signalabweichungswertes, zwei Addierer **32**, **42** sowie zwei Begrenzer **33**, **43**. In einer einfachen Ausführungsform können die Ausgänge **123**, **124** der Begrenzer **33**, **43** direkt mit den Ausgängen **23** bzw. **24** zur Ausgabe des Ansteuersignals verbunden sein. Die weiteren Blöcke **50**, **51** und **52** sind optional. In Block **50** wird aus der Realteilkomponente und der Imaginärteilkomponente der Betrag oder in anderen Worten die Amplitude des Ansteuersignals, d. h. die Länge des Zeigers bestimmt. Block **51** stellt komplexe Korrekturfaktoren bereit, mit denen das an den Ausgängen **123** und **124** bereitgestellte Ansteuersignal im Block **52**, der als Multiplizierer ausgeführt sein kann, multipliziert wird. Das so korrigierte Ansteuersignal wird dann an den Ausgängen **23** und **24** ausgegeben.

[0057] Die Bestimmung der Realteilkomponente ReAN des Ansteuersignals erfolgt analog der Bestimmung der Imaginärteilkomponente ImAN des Ansteuersignals, und Regler **30** entspricht Regler **40**, Änderungseinheit **31** entspricht Änderungseinheit **41**, Addierer **32** entspricht Addierer **42** und Begrenzer **33** entspricht Begrenzer **43**, so dass im weiteren die Funktionsweise nur anhand des oberen Zweiges für die Realteilkomponente erläutert wird.

[0058] Die Bestimmungseinheit **10** ist eine rein digitale Einheit, die sehr schnell arbeiten muss. In der bevorzugten Ausführungsform ist sie als frei programmierbarer Logikschaltkreis (FPGA) implementiert. Eine schnelle Signalverarbeitung wird durch Verwendung einer Festkommaarithmetik erreicht. Der Wertebereich ist auf „1“ begrenzt. Der Eingangswert der digitalen Regelung, d. h. die Amplitude des Auftragssignals, wird auf „1“ normiert, um so den Wertebereich in der Bestimmungseinheit **10** bestmöglich auszunutzen. Dabei kann die Normierung auf die höchste Ansteueramplitude erfolgen, die der nachfolgende Hochfrequenzverstärker zulässt. Auch der Digital-Analog-Wandler, der zwischen der digitalen Regeleinheit und dem Hochfrequenzverstärker sitzt, ist auf einen maximalen Eingangswert von „1“ optimiert.

Normieren in diesem Zusammenhang bedeutet, dass dem höchsten tatsächlichen Wert der Wert „1“ zugewiesen wird. Alle Werte werden also durch den höchsten Wert geteilt. Ist die Amplitude einer komplexe Zahl, d. h. die Zeigerlänge auf „1“ begrenzt, so können auch die Realteilkomponente und die Imaginärteilkomponente jeweils nicht über „1“ steigen, wie anhand der [Fig. 1](#) erläutert wurde. Damit sind die Werte an den Eingängen **21** und **22** kleiner „1“.

[0059] Auch der Signalabweichungswert wird normiert, d. h. alle Signalabweichungsamplitudenwerte werden durch den höchsten Pulsamplitudenwert geteilt. Damit sollten die Realteilkomponente und die Imaginärteilkomponente des Signalabweichungswertes ebenfalls nicht den Wert „1“ überschreiten.

[0060] Die Realteilkomponente ReAB des Signalabweichungswertes wird in den Regler **30** eingespeist. Regler **30** kann ein Proportional-Integral Regler sein. Alternativ ist zum Beispiel auch die Verwendung eines Proportional-Integral-Differential Reglers möglich. Mit dem Regler wird eine gewisse Glättung des Signals erreicht. Das Ausgangssignal des Reglers **30** könnte den Wert „1“ überschreiten. Daher ist der Änderungsblock **31** vorgesehen, der im einfachsten Fall als harter Begrenzer ausgeführt ist. In diesem Fall werden Werte, die über „1“ liegen, abgeschnitten.

[0061] Eine Kennlinie **60** eines derartigen Begrenzers ist in [Fig. 4](#) gezeigt. Die Eingangswerte des Begrenzers sind entlang der x-Achse aufgetragen, während die Ausgangswerte entlang der y-Achse aufgetragen sind. Eingangswerte unter „1“ werden unverändert am Ausgang ausgegeben. Bei Eingangswerten über „1“ bleibt der Ausgangswert auf „1“ begrenzt. Der Begrenzer kann als Addierer mit einer Saturation „1“ realisiert sein.

[0062] Im Addierer **32** wird die Realteilkomponente ReAU des Auftragssignals mit der Realteilkomponente ReAB des Signalabweichungswertes korrigiert. Ist beispielsweise die geforderte Realteilkomponente des Auftragssignals bei 0,8 und hat sich aus dem über den Richtkoppler **13** ausgekoppelten Signal ergeben, dass eine Signalabweichung im Realteil von $-0,1$ vorliegt, so wird die Realteilkomponente des Signalabweichungswertes von 0,1 zu der Realteilkomponente des Auftragssignals von 0,8 hinzuaddiert, so dass sich am Ausgang des Addierers **32** ein Wert von 0,9 einstellt. Die Beeinflussung des Signals auf der Hochfrequenzstrecke wird damit kompensiert, es wird geregelt.

[0063] Es kann passieren, dass der Ausgangswert des Addierers **32** über „1“ liegt, d. h. der Wertebereich der Festkommaarithmetik verlassen wird. Beispielsweise kann die Realteilkomponente ReAU des Auftragssignals bei 0,8 liegen, die Realteilkomponente ReAB des Signalabweichungswertes aber im Gegen-

satz zum obigen Beispiel bei $-0,4$. Dann ergibt sich ein Ausgangswert von 1,2. Die Schaltungsanordnung gemäß [Fig. 3](#) enthält daher einen Begrenzer **33**, der ebenfalls eine Kennlinie **60** aufweist und den Wert wieder auf „1“ begrenzt.

[0064] Im einfachsten Fall kann der Wert am Ausgang **123** des Begrenzers **33**, und analog der Wert am Ausgang **124** des Begrenzers **43**, direkt an die Hochfrequenzeinheit, d. h. an den Block **11** zur Wandlung in ein analoges, hochfrequentes Signal abgegeben werden.

[0065] In einer bevorzugten, in [Fig. 3](#) auch dargestellten Ausführungsform ist die Berücksichtigung der nichtlinearen Kennlinie des nachfolgenden Hochfrequenzverstärkers **12** vorgesehen. Es erfolgt eine Vorverzerrung. Hierfür wird in einem Block **50** zunächst die Amplitude des Ansteuersignals in bekannter Form aus der Realteilkomponente und der Imaginärteilkomponente bestimmt. Mathematisch gesprochen wird der Betrag der über Realteil und Imaginärteil bestimmten komplexen Zahl berechnet. In dem Block **51** sind in tabellarischer Form komplexe Korrekturfaktoren in Abhängigkeit von der Leistungsamplitude abgelegt, die die nichtlineare Kennlinie des Hochfrequenzverstärkers korrigieren. Da Hochfrequenzverstärker einer nicht unwesentlichen Streuung unterliegen, wird vorteilhafter Weise die Tabelle jeweils an die am verwendeten Verstärker gemessene Kennlinie angepasst.

[0066] In einem Multiplizierer **52** werden die Realteilkomponente und die Imaginärteilkomponente des Ansteuersignals komplex mit dem aufgefundenen komplexen Korrekturfaktor multipliziert und als korrigiertes Ansteuersignal an den Ausgängen **23** und **24** ausgegeben.

[0067] Die oben beschriebene Regelung in einer ersten Ausführungsform funktioniert in den meisten Anwendungsfällen gut. Kritisch kann es in den Fällen werden, in denen die getrennte Korrektur der Realteilkomponente und der Imaginärteilkomponente zu einem komplexen Ansteuersignal führt, das beispielsweise dem Zeiger **4** in [Fig. 1](#) entspricht. Obwohl sowohl die Realteil- als auch die Imaginärteilkomponente unter dem Wert „1“ liegen, ist die Zeigerlänge größer „1“, d. h. die Ansteueramplitude liegt über dem zulässigen Wert für den nachfolgenden Hochfrequenzverstärker.

[0068] Für Pulsfolgen, für die die Auftragssignale Amplituden nahe „1“ haben, wird die in [Fig. 5](#) dargestellte Weiterbildung der Schaltungsanordnung nach [Fig. 3](#) vorgeschlagen. Die Schaltungsanordnung gemäß dieser zweiten Ausführungsform unterscheidet sich von der ersten Ausführungsform nur in der Ausbildung der Änderungseinheiten **31** und **41** und dadurch, dass die Begrenzer **33** und **43** entfallen. Auf-

bau und Funktionsweise der Schaltungsanordnung in **Fig. 5** wird daher nicht weiter diskutiert. Auch in dieser Ausführungsform sind die Blöcke **50**, **51** und **52** zur Kennlinienkorrektur optional.

[0069] Die Änderungseinheiten **31** und **41** sind wieder als Begrenzer realisiert. Allerdings erfolgt keine starre Begrenzung auf den Wert „1“, sondern es wird ein flexibler Begrenzungswert eingespeist, was in **Fig. 5** jeweils durch einen Pfeil angedeutet ist. Der Begrenzungswert wird jeweils für einen einzelnen Puls aus der Pulsfolge berechnet und gilt für diesen Puls. Er kann von der Steuereinheit bereitgestellt werden, die die Auftragssignale für die Pulsfolge liefert. Für die Änderungseinheit **31** berücksichtigt die Begrenzung die höchste Realteilkomponente ReAU des Auftragssignals für den aktuellen Puls. Der Begrenzungswert berechnet sich zu $(1 - \text{maximale Realteilkomponente})/\sqrt{2}$. Für die Änderungseinheit **41** berücksichtigt die Begrenzung die höchste Imaginärteilkomponente ImAU des Auftragssignals für den aktuellen Puls. Der Begrenzungswert berechnet sich zu $(1 - \text{maximale Imaginärteilkomponente})/\sqrt{2}$.

[0070] Das hat zur Folge, dass der Ausgangswert der Addierer **32**, **42** nie den Wert „1“ überschreitet, auch dann nicht, wenn am Eingang **21** die maximale Realteilkomponente und am Eingang die maximale Imaginärteilkomponente eingespeist wird. Deshalb kann auch auf die Begrenzer **33** und **43** verzichtet werden. Auch der Betrag des Ansteuersignals kann durch den Faktor $1/\sqrt{2}$ nicht größer als „1“ werden. Praktisch wird dadurch der Einfluss der Regelung bei großen Pulsen zurückgefahren. Das ist sinnvoll, wenn der nachfolgende Verstärker an seiner Leistungsgrenze betrieben wird.

[0071] **Fig. 6** zeigt eine dritte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Schaltungsanordnung. Gegenüber der zweiten Ausführungsform sind nur die Änderungseinheiten **31** und **41** anders realisiert. Es wird wie in der zweiten Ausführungsform die höchste Realteilkomponente, bzw. die höchste Imaginärteilkomponente des Auftragssignals für den aktuellen Puls berücksichtigt. Der Begrenzungswert berechnet sich wieder zu $(1 - \text{maximale Realteil-/Imaginärteilkomponente})/\sqrt{2}$. Im Gegensatz zu der zweiten Ausführungsform sind die Änderungseinheiten **31** und **41** jedoch als Multiplizierer ausgeführt, und die Realteil-/Imaginärteilkomponenten des Signalabweichungswerts werden mit dem Begrenzungswert multipliziert. Da die Realteil-/Imaginärteilkomponenten des Signalabweichungswerts ihrerseits den Wert „1“ nicht überschreiten, ist damit die gleiche Begrenzung des in die Addierer **32**, **42** eingespeisten Wertes erreicht. Diese Begrenzung wird aber über eine Skalierung und nicht durch eine harte Begrenzung erreicht. Der Eingriff in die Regelung erfolgt kontinuierlich, dafür aber auch schon bei kleineren Werten.

[0072] Es wird abschließend noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich bei dem vorhergehenden, detailliert beschriebenen Verfahren sowie bei den dargestellten Schaltungsanordnungen lediglich um Ausführungsbeispiele handelt, welche vom Fachmann in verschiedenster Weise modifiziert werden können, ohne den Bereich der Erfindung zu verlassen. Weiterhin schließt die Verwendung der unbestimmten Artikel „ein“ bzw. „eine“ nicht aus, dass die betreffenden Merkmale auch mehrfach vorhanden sein können. Ebenso schließt der Begriff „Einheit“ nicht aus, dass die betreffenden Komponenten aus mehreren zusammenwirkenden Teil-Komponenten bestehen, die gegebenenfalls auch räumlich verteilt sein können.

Patentansprüche

1. Verfahren zur digitalen Amplituden- und Phasenregelung eines Hochfrequenzsignals mit folgenden Verfahrensschritten:

- Bereitstellen eines digitalen Auftragssignals, das eine Amplitude und eine Phase des zu regelnden Hochfrequenzsignals in komplexer Form mit einer Realteilkomponente (ReAU) und einer Imaginärteilkomponente (ImAU) vorgibt,
- Ausgabe eines digitalen Ansteuersignals mit einer Realteilkomponente (ReAN) und einer Imaginärteilkomponente (ImAN) an eine Hochfrequenzeinheit (**11**, **12**) zur Erzeugung des Hochfrequenzsignals,
- Empfangen eines digitalen Signalabweichungswertes in komplexer Form mit Realteilkomponente (ReAB) und Imaginärteilkomponente (ImAB), wobei der Signalabweichungswert eine Abweichung des Hochfrequenzsignals vom Auftragssignal bezüglich der Amplitude und der Phase ausdrückt,
- Bestimmen des digitalen Ansteuersignals aus dem Auftragssignal unter Berücksichtigung des Signalabweichungswerts, wobei die Bestimmung der Realteilkomponente (ReAN) und der Imaginärteilkomponente (ImAN) jeweils getrennt erfolgt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass vor der Ausgabe des digitalen Ansteuersignals eine Kennlinienkorrektur erfolgt, wobei aus der Realteilkomponente (ReAN) und der Imaginärteilkomponente (ImAN) des digitalen Ansteuersignals die Amplitude des Ansteuersignals berechnet wird und in Abhängigkeit von der Amplitude das Ansteuersignal komplex mit einem bestimmten Korrekturfaktor aus mehreren komplexen Korrekturfaktoren multipliziert wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die mehreren komplexen Korrekturfaktoren in einer Tabelle abgelegt sind und eine nichtlineare Kennlinie eines nachgeordneten Hochfrequenzverstärkers (**12**) berücksichtigt.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Amplitude des Auf-

tragssignals so auf einen Wert von „1“ normiert ist, dass der Wert „1“ der höchsten zu erwartenden Auftragsamplitude entspricht.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass dem normierten Auftragssignal mit dem Wert „1“ ein Ansteuersignal entspricht, dessen Amplitude auf den Wert „1“ normiert ist.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass dem normierten Ansteuersignal mit dem Wert „1“ ein Ausgangssignal eines nachgeordneten Hochfrequenzverstärkers mit maximaler Amplitude entspricht.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass es sich bei dem Hochfrequenzsignal um eine Pulsfolge handelt und eine Normierung der Amplitude des Ansteuersignals auf einen Wert „1“ erfolgt, der einem Ausgangssignal eines nachgeordneten Hochfrequenzverstärkers mit maximaler Amplitude entspricht, wobei das Bestimmen des digitalen Ansteuersignals aus dem Auftragssignal unter Berücksichtigung des Signalabweichungswerts und unter Berücksichtigung der höchsten zu erwartenden Auftragsamplitude innerhalb eines Pulses bestimmt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass es sich bei dem Hochfrequenzsignal um eine Pulsfolge handelt und die Realteilkomponente (ReAB) des Signalabweichungswerts in Abhängigkeit von der höchsten zu erwartenden Realteilkomponente (ReAU) des Auftragssignals für den jeweils aktuellen Puls so verändert wird, dass die Addition der Realteilkomponente (ReAU) des Auftragssignals und der Realteilkomponente (ReAB) des Signalabweichungswerts den Wert „1“ nicht überschreitet, und wobei die Imaginärteilkomponente (ImAB) des Signalabweichungswerts in Abhängigkeit von der höchsten zu erwartenden Imaginärteilkomponente (ImAU) des Auftragssignals für den jeweils aktuellen Puls so verändert wird, dass die Addition der Imaginärteilkomponente (ImAU) des Auftragssignals und der Imaginärteilkomponente (ImAB) des Signalabweichungswerts den Wert „1“ nicht überschreitet.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Veränderung der Realteilkomponente (ReAB) und der Imaginärteilkomponente (ImAB) des Signalabweichungswerts ferner so erfolgt, dass die Amplitude des digitalen Ansteuersignals den Wert „1“ nicht überschreitet.

10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Realteilkomponente (ReAB) und/oder die Imaginärteilkomponente (ImAB) des Signalabweichungswerts jeweils mit einem Faktor multipliziert werden, so dass eine kontinuierliche

Änderung in Abhängigkeit von der höchsten zu erwartenden Realteilkomponente (ReAU) bzw. Imaginärteilkomponente (ImAU) des Auftragssignals erfolgt.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Realteilkomponente (ReAB) und die Imaginärteilkomponente (ImAB) des Signalabweichungswertes jeweils vor der Multiplikation über eine Regeleinheit (**30, 40**) geführt wird, wobei der Ausgangswert der Regeleinheiten so skaliert ist, dass ein Wert von „1“ nicht überschritten wird.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Veränderung der Realteilkomponente (ReAB) und/oder der Imaginärteilkomponente (ImAB) des Signalabweichungswertes nur erfolgt, wenn anderenfalls der Wert „1“ für die Summe aus der Imaginärteilkomponente (ImAU) des Auftragssignals und der Imaginärteilkomponente (ImAB) des Signalabweichungswertes, bzw. die Summe aus der Realteilkomponente des Auftragssignals (ReAU) und der Realteilkomponente (ReAB) des Signalabweichungswertes und/oder der Wert „1“ für die Amplitude des digitalen Ansteuersignals überschritten würde.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Realteilkomponente (ReAB) und die Imaginärteilkomponente (ImAB) des Signalabweichungswertes jeweils vor der möglichen Veränderung über eine Regeleinheit (**30, 40**) geführt wird.

14. Schaltungsanordnung (**105**) zur digitalen Amplituden- und Phasenregelung eines Hochfrequenzsignals, umfassend

- einen Auftragseingang (**21, 22**) zum Empfang eines digitalen Auftragssignals, das Amplitude und Phase des zu regelnden Hochfrequenzsignals in einer Realteilkomponente (ReAU) und einer Imaginärteilkomponente (ImAU) vorgibt,

- einen Signalausgang (**23, 24**) zur Ausgabe eines Ansteuersignals mit einer Realteilkomponente (ReAN) und einer Imaginärteilkomponente (ImAN) für eine Hochfrequenzeinheit (**11, 12**) zur Erzeugung des Hochfrequenzsignals,

- einen Signalabweichungseingang (**25, 26**) zum Empfang eines digitalen Signalabweichungswertes in einer Realteilkomponente (ReAB) und einer Imaginärteilkomponente (ImAB), wobei der Signalabweichungswert eine Abweichung des Hochfrequenzsignals vom Auftragssignal in Amplitude und Phase ausdrückt,

- eine Bestimmungseinheit (**10**) zum Bestimmen des Ansteuersignals aus dem Auftragssignal unter Berücksichtigung des Signalabweichungswerts, wobei die Bestimmung der Realteilkomponente (ReAN) und der Imaginärteilkomponente (ImAN) jeweils getrennt erfolgt.

15. Magnetresonanztomographiesystem (**100**) mit einer Schaltungsanordnung (**105**) nach Anspruch 14 zur digitalen Amplituden- und Phasenregelung eines Hochfrequenzsignals.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

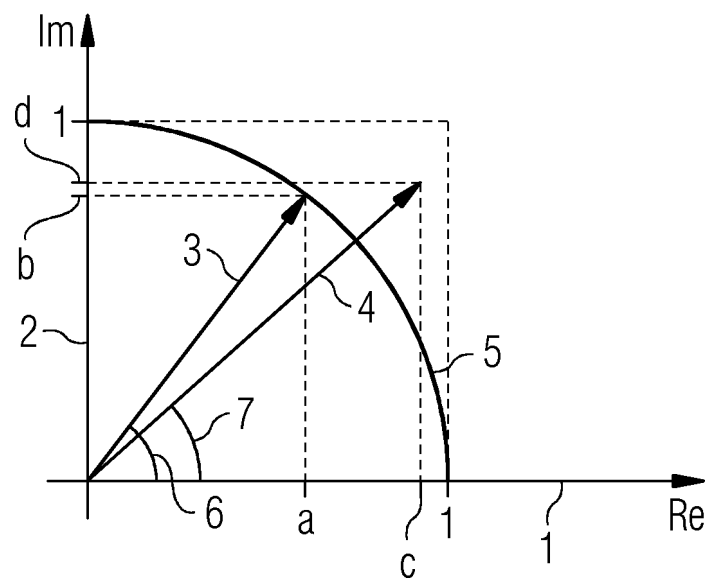


FIG 2

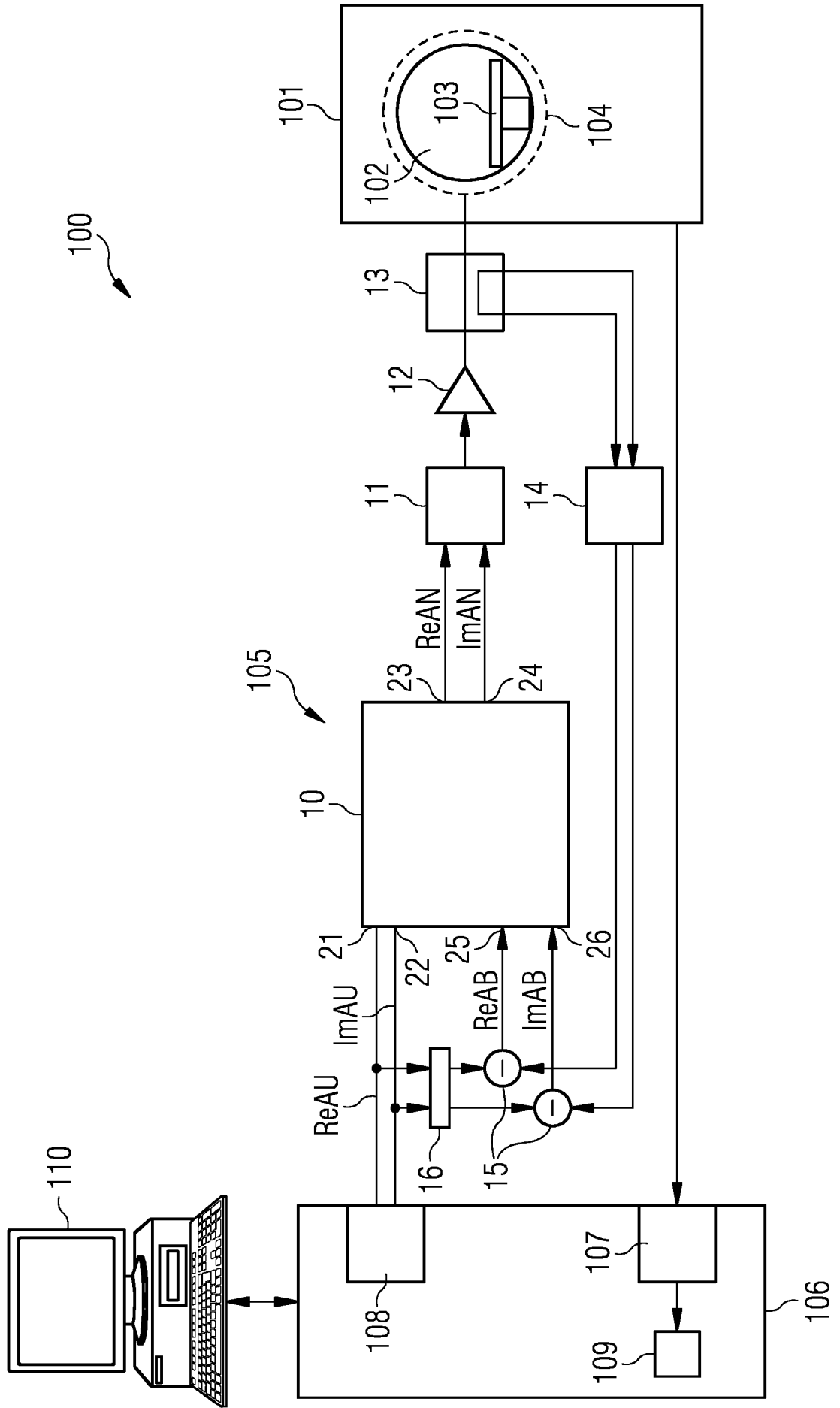


FIG 3

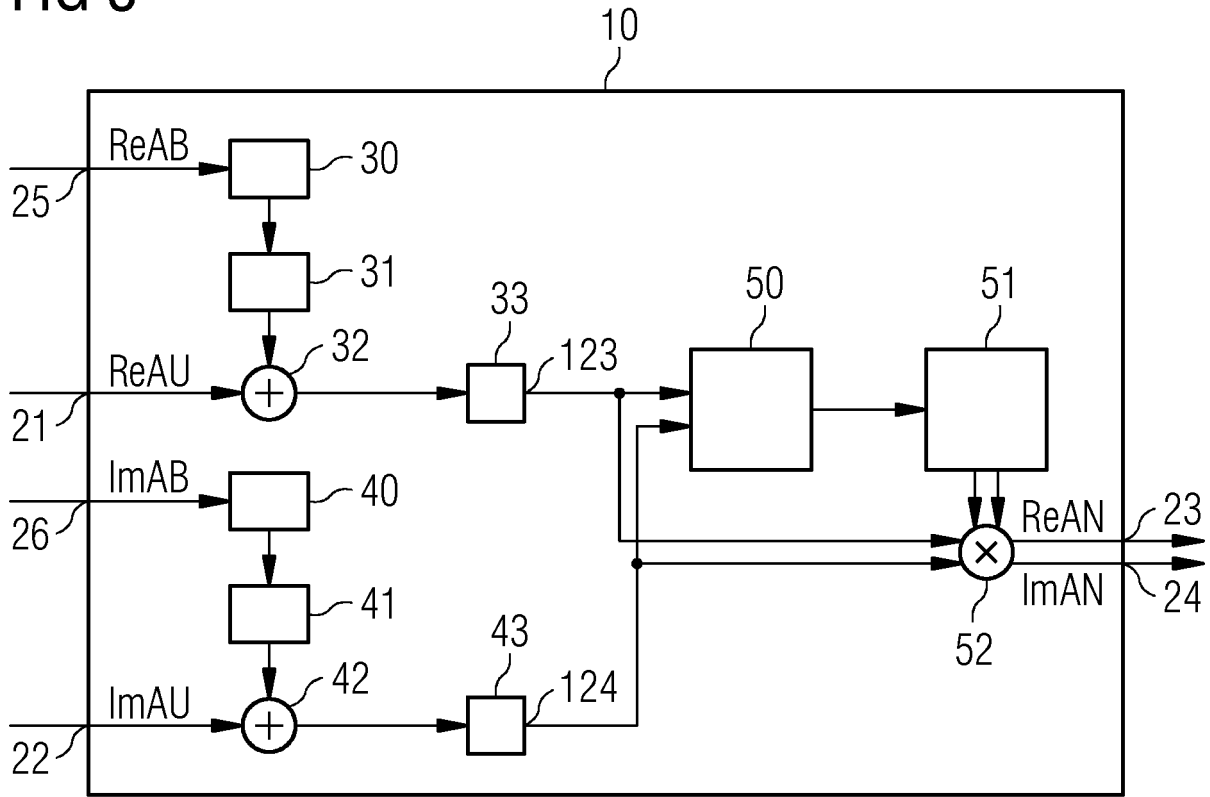


FIG 4

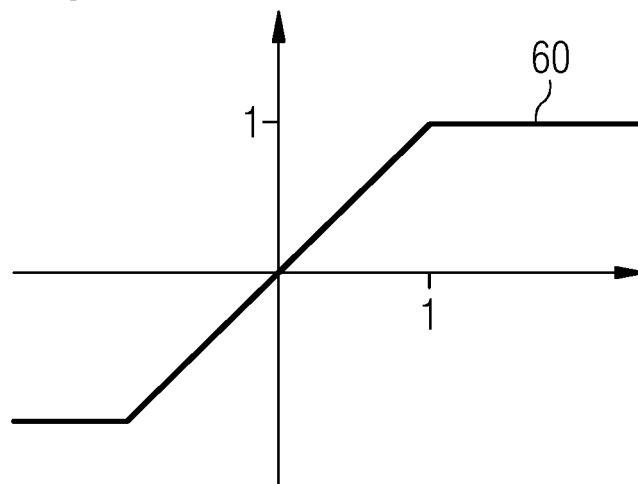


FIG 5

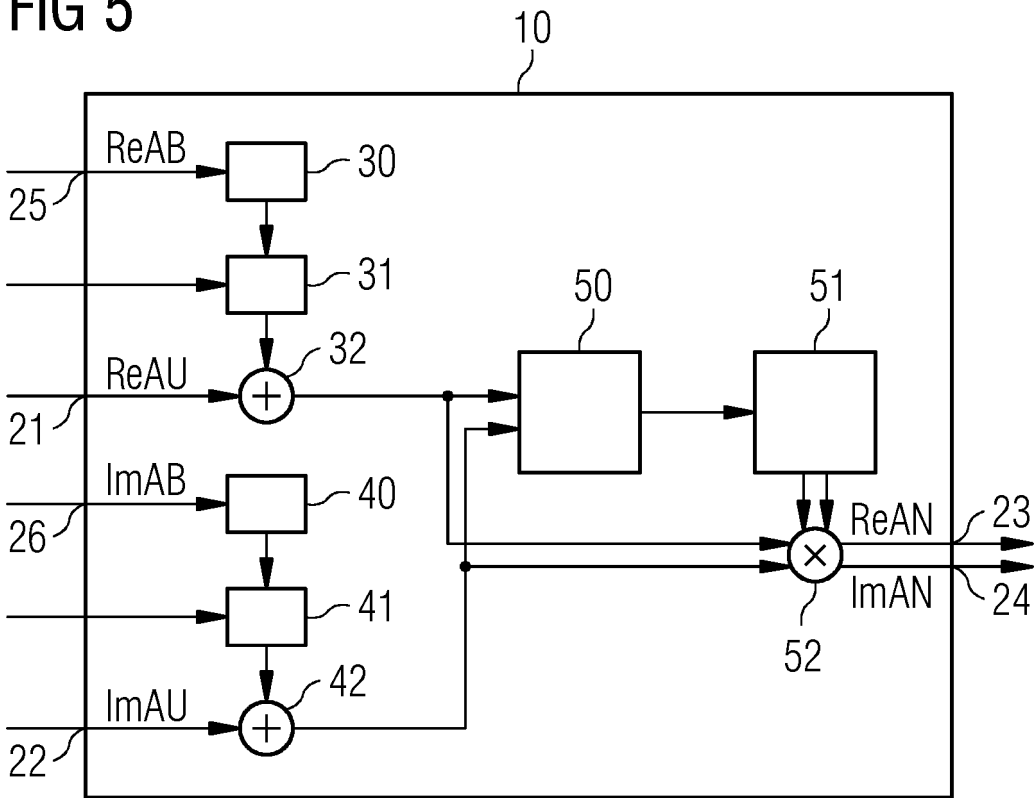


FIG 6

