



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2022 208 705.4**

(22) Anmeldetag: **23.08.2022**

(43) Offenlegungstag: **29.02.2024**

(51) Int Cl.: **G01R 33/54 (2006.01)**

A61B 5/055 (2006.01)

(71) Anmelder:
Siemens Healthcare GmbH, München, DE

(72) Erfinder:
Grodzki, David, Dr., 91058 Erlangen, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:
DE 10 2016 200 549 A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Computerimplementiertes Verfahren zur Einstellung einer Magnetresonanzsequenz, Magnetresonanzeinrichtung, Computerprogramm und elektronisch lesbarer Datenträger**

(57) Zusammenfassung: Computerimplementiertes Verfahren zur Einstellung einer Magnetresonanzsequenz für eine Magnetresonanzeinrichtung (1), wobei

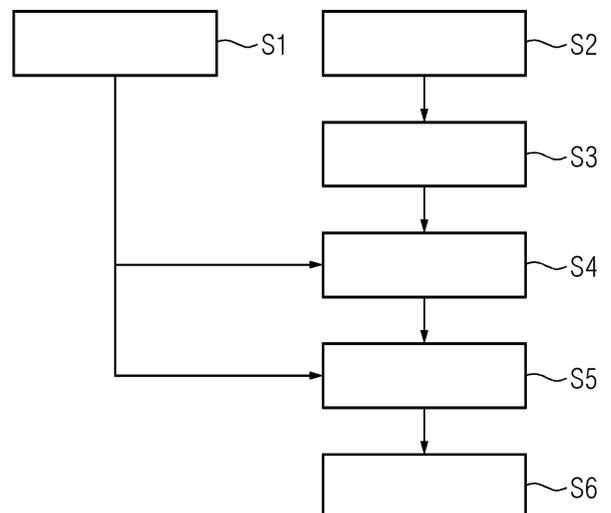
- die Magnetresonanzsequenz durch wenigstens einen Sequenzparameter beschrieben wird und bereitgestellte Parameterwerte der Sequenzparameter zur Ermittlung eines zeitlichen Sequenzverlaufs durch Simulation eines Teilabschnitts der Magnetresonanzsequenz mittels einer Simulationseinheit (19) verwendet werden,

- ein zulässiger Parameterwertebereich für wenigstens einen ausgewählten der Sequenzparameter anhand des Sequenzverlaufs und bereitgestellter Limitationen mittels einer Auswerteeinheit (20) ermittelt wird und

- mittels einer Festlegungseinheit ein neuer Parameterwert des wenigstens einen ausgewählten Parameters innerhalb des zulässigen Parameterwertebereichs festgelegt wird, wobei

- wenigstens eine auf die gesamte Zeitdauer der Magnetresonanzsequenz oder eine vorgegebene Zeitkonstante (25) bezogene Dauer-Limitation bereitgestellt wird und

- mittels der Simulationseinheit (19) durch Wiederholung des Teilabschnitts, bis die gesamte Zeitdauer oder die vorgegebene Zeitkonstante (25) erreicht wird oder ein auf die Dauer-Limitation bezogenes Abbruchkriterium erfüllt ist, der Sequenzverlauf über den Teilabschnitt hinaus erweitert wird.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein computerimplementiertes Verfahren zur Einstellung einer Magnetresonanzsequenz für eine Magnetresonanzeinrichtung, wobei die Magnetresonanzsequenz durch wenigstens einen Sequenzparameter beschrieben wird und bereitgestellte Parameterwerte der Sequenzparameter zur Ermittlung eines zeitlichen Sequenzverlaufs durch Simulation eines Teilabschnitts der Magnetresonanzsequenz mittels einer Simulationseinheit verwendet werden, wobei ein zulässiger Parameterwertebereich für wenigstens einen ausgewählten der Sequenzparameter anhand des Sequenzverlaufs und bereitgestellter Limitationen mittels einer Auswerteeinheit ermittelt wird und mittels einer Festlegungseinheit ein neuer Parameterwert des wenigstens einen ausgewählten Parameters innerhalb des zulässigen Parameterwertebereichs festgelegt wird. Daneben betrifft die Erfindung eine Magnetresonanzeinrichtung, ein Computerprogramm und einen elektronisch lesbaren Datenträger.

[0002] Bessere Bildqualitäten, schnellere Aufnahmezeiten und sonstige Verbesserungen bei der Magnetresonanzbildgebung fordern in zunehmendem Maße höhere Leistungsfähigkeit und Leistungsausnutzung der Komponenten der Magnetresonanzeinrichtung. Daher wurden im Stand der Technik bereits Verfahren vorgeschlagen, die über konservativ bemessene Grenzen hinaus die Leistungsfähigkeiten einzelner Komponenten, beispielsweise des Gradientensystems, ausnutzen.

[0003] Hierbei schlägt DE 10 2016 200 549 A1 ein Verfahren zur Einstellung einer Magnetresonanzsequenz vor, wobei durch eine Limitationsbereitstellungseinheit zumindest eine Limitation bereitgestellt wird und durch eine Parameterbereitstellungseinheit mehrere Sequenzparameter der Magnetresonanzsequenz bereitgestellt werden. Zumindest einem der mehreren Sequenzparameter ist ein voreingestellter Parameterwert zugeordnet. Nachdem einer der mehreren Sequenzparameter mittels einer Auswahlseinheit ausgewählt wurde, ermittelt eine Simulationseinheit zumindest einen Sequenzverlauf anhand von zumindest einem der voreingestellten Parameterwerte. Eine Auswerteeinheit ermittelt anhand des zumindest einen Sequenzverlaufs und anhand der zumindest einen Limitation einen zulässigen Parameterwertebereich des ausgewählten Sequenzparameters, sodass innerhalb des zulässigen Parameterwertebereichs mittels einer Festlegungseinheit ein neuer Parameterwert festgelegt werden kann. Dabei wird zur Ermittlung des zumindest einen Sequenzverlaufs ein zeitliches Ausrollen der Magnetresonanzsequenz vorgenommen, wobei entsprechende Simulationen stattfinden können. Nachdem das Ausrollen von Magnetresonanzsequenzen in der Simulationseinheit einen hohen Zeit-

aufwand mit sich bringt, für die gesamte Magnetresonanzsequenz beispielsweise Zeiten einer Größenordnung des Ablaufs der Magnetresonanzsequenz selbst benötigt, wurde dort konkret vorgeschlagen, den Sequenzverlauf nur für einen Teilabschnitt der Magnetresonanzsequenz zu bestimmen, der repräsentativ für die gesamte Magnetresonanzsequenz sein soll, sodass aus einer Untersuchung dieses Teilabschnitts auf den zulässigen Parameterwertebereich des ausgewählten Parameters für die gesamte Sequenz geschlossen werden kann, beispielsweise durch Extrapolation. Dabei können beispielsweise die Anteile der Magnetresonanzsequenz als Teilabschnitt ausgewählt werden, die besondere Leistungsanforderungen an Komponenten der Magnetresonanzeinrichtung stellen.

[0004] Mit dem in DE 10 2016 200 549 A1 beschriebenen Verfahren ist mithin beispielsweise eine deutlich höhere Ausnutzung des Gradientensystems möglich und es können in Magnetresonanzsequenzen höhere Gradientenstärken zur Verfügung gestellt werden. Es kann auf die üblichen Limitationen von Magnetresonanzsequenzen verzichtet werden, die die maximalen der Sequenz zur Verfügung stehenden Gradientenwerte auf ca. 50 - 70 % der maximal im System möglichen Gradientenstärken reduziert. Der ursprüngliche Zweck solcher konservativer Limitationen war, mögliche Überschreitungen anderer Systemparameter, wie die maximale Erwärmung, die abhängig von der mittleren Gradientenleistung ist, oder das Überschreiten von maximalen Gradientenstärken oder maximalen Anstiegsraten (Slew Rates) im Fall von angulierten Akquisitionen, bei denen Anteile verschiedener logischer Achsen auf einer physikalischen Achse zusammentreffen können, zu verhindern. Daher wird in DE 10 2016 200 549 A1 vorgeschlagen, optimierend Parameterwertebereiche aufzufinden, für die die Limitationen insgesamt aufgehoben werden, wofür entsprechende zusätzliche Berechnungen notwendig sind.

[0005] Die zusätzlichen Berechnungen in der Simulationseinheit werden auch „Checks“ genannt und simulieren, wie bereits erwähnt, einen Teilabschnitt des beispielsweise von einem Benutzer eingestellten Bildgebungsprotokolls der Magnetresonanzsequenz, wobei für Gradientensysteme insbesondere die Verläufe der Gradienten ausgerollt werden können und überprüft werden können. Wird während eines Checks eine Verletzung einer Limitation festgestellt, kann ein Lösungsvorschlag für den Ablauf der Magnetresonanzsequenz ermittelt werden (Solving).

[0006] Die beschriebene Vorgehensweise wurde bislang hauptsächlich genutzt, um bei Magnetresonanzeinrichtungen mit geringeren Hauptmagnetfeldstärken mehr Leistung „herauszuholen“, mithin dort

eine bessere Ausnutzung der Komponenten der Magnetresonanzeleinrichtung, insbesondere des Gradientensystems, zu erreichen. Soll das Vorgehen auf Magnetresonanzeleinrichtungen höherer Leistung und/oder anderer Ausstattung angewendet werden, treten jedoch andere Anforderungen an die genannten Checks auf, insbesondere bei deutlich leistungsfähigeren Gradientensystemen, bei denen Limitation des Gradientensystems und anderer Komponenten an anderen Stellen verletzt werden. Während bei weniger leistungsfähigeren Gradientensystemen beispielsweise hauptsächlich Limitationen bezüglich der maximalen Gradientenstärke und/oder der maximalen Anstiegsrate (Slew Rate) relevant sind, hat sich gezeigt, dass für Magnetresonanzeleinrichtungen mit Gradientensystemen höherer Leistungsfähigkeit auf Dauerleistung bezogene Limitationen, beispielsweise Grenzen für die mittlere Gradientenleistung, an Relevanz gewinnen. Hierfür reicht die Betrachtung von Teilabschnitten der Magnetresonanzsequenz gegebenenfalls nicht aus, um Überlastungen der Magnetresonanzeleinrichtung, beispielsweise eine Überhitzung, zu vermeiden, wobei auf der anderen Seite ein vollständiges Ausrollen der gesamten Magnetresonanzsequenz in der Simulationseinheit eine zu lange Zeit in Anspruch nimmt.

[0007] Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zu Grunde, einen verbesserten Schutz von Komponenten von Magnetresonanzeleinrichtungen, insbesondere im Hinblick auf Dauerbelastungen, bei gleichzeitig hoher Leistungsausnutzung zu erreichen.

[0008] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren, eine Magnetresonanzeleinrichtung, ein Computerprogramm und einen elektronisch lesbaren Datenträger gemäß den unabhängigen Patentansprüchen. Vorteilhafte Weiterbildungen ergeben sich aus den Unteransprüchen.

[0009] Bei einem Verfahren der eingangs genannten Art ist erfindungsgemäß vorgesehen, dass wenigstens eine auf die gesamte Zeitdauer der Magnetresonanzsequenz oder eine vorgegebene Zeitkonstante bezogene Dauer-Limitation bereitgestellt wird und mittels der Simulationseinheit durch Wiederholung des Teilabschnitts, bis die gesamte Zeitdauer oder die vorgegebene Zeitkonstante erreicht wird oder ein auf die Dauer-Limitation bezogenes Abbruchkriterium erfüllt ist, der Sequenzverlauf über den Teilabschnitt hinaus erweitert wird.

[0010] Anders gesagt schlägt die vorliegende Erfindung vor, den Teilabschnitt der Magnetresonanzsequenz in der Simulation so lange zu wiederholen, bis eine hinreichend genaue Vorhersage auch bezüglich der auf längere Zeitintervalle bezogenen Dauer-Limitationen möglich ist. Insbesondere kann sich die Teilsequenz auf einen Anteil der Magnetresonanzsequenz beziehen, der deutlich kürzer als

eine Sekunde ist, insbesondere kürzer als 10 ms. Um eine genauere Auswertung von Dauer-Limitationen zu erlauben, sollten jedoch Sequenzverläufe über längere Zeiträume, insbesondere beschrieben durch die vorgegebene Zeitkonstante, ausgewertet werden, beispielsweise für eine Zeitkonstante von wenigstens 10 ms, bevorzugt wenigstens einer Sekunde, noch bevorzugt wenigstens zehn Sekunden. Während es nun grundsätzlich denkbar wäre, nach Art des Dreisatzes den Teilabschnitt beziehungsweise dessen Ergebnis, das für die Dauer-Limitation relevant ist, zu extrapolieren, ist dieses Vorgehen jedoch nicht hinreichend zweckmäßig und verlässlich, da beispielsweise mögliche Einschwingvorgänge und sonstige Effekte nicht berücksichtigt werden können. Mithin schlägt die vorliegende Erfindung vor, beim Simulieren, insbesondere also Ausrollen, den Teilabschnitt der Magnetresonanzsequenz künstlich zu wiederholen, das bedeutet, der Teilabschnitt wird zumindest für die Auswertung der Dauer-Limitation immer wieder angehängt und die Daten werden weiter simuliert, sodass sich ein gegenüber dem Teilabschnitt erweiterter Sequenzverlauf ergibt, der auf dem vorangegangenen aufbaut. Dabei wird die Simulation spätestens dann abgebrochen, wenn die gesamte Zeitdauer der Magnetresonanzsequenz erreicht ist, bevorzugt jedoch schon früher, beispielsweise mit Erreichen der vorgegebenen Zeitkonstante oder aber bei Erfüllung eines von wenigstens einem Abbruchkriterium. Das Abbruchkriterium kann anzeigen, dass die gewünschte Information bezüglich der Dauer-Limitation erhalten wurde. Durch ein Wiederholen des Teilabschnitts ergeben sich vielfältige Möglichkeiten, trotz des längeren ermittelten Sequenzverlaufs Berechnungszeit einzusparen und somit keine übermäßige Verlängerung bei der Ermittlung des zulässigen Parameterwertebereichs zu erhalten, worauf im Folgenden noch genauer eingegangen werden wird.

[0011] Dabei sei an dieser Stelle noch angemerkt, dass durch Wiederholen des Teilabschnitts die für die Überprüfung der Dauer-Limitation relevanten Rechengrößen gegebenenfalls leicht, aber nicht wesentlich, überschätzt werden, da der Teilabschnitt üblicherweise nach dem Vorliegen von Spitzenbelastungen ausgewählt wird, sodass die Spitzenbelastungen außerhalb des Teilabschnitts als meist niedriger angesetzt werden können. Dies kann gegebenenfalls bei einer Überprüfung der Verletzung der Dauer-Limitation berücksichtigt werden, jedoch hat sich gezeigt, dass dieser Aspekt einen eher geringen Einfluss hat und eine deutliche Verbesserung gegenüber einer einfachen Extrapolation auch ohne diese Korrektur schon vorliegt.

[0012] Zusammenfassend bietet der erfindungsgemäße Ansatz eine Möglichkeit, Dauer-Limitationen in hoher Qualität und Genauigkeit zu berücksichti-

gen, obwohl nicht die gesamte Magnetresonanzsequenz, sondern nur ein Teilabschnitt simuliert wird, der für genaue Berechnungen zu kurz wäre. Daher wird der Teilabschnitt hinreichend lange in der Simulation wiederholt, bis eine verlässliche, genauere Abschätzung der Erfüllung oder Verletzung der Dauer-Limitation aus dem so erweiterten Sequenzverlauf möglich ist. Auf diese Weise wird die Verlässlichkeit und Laufsicherheit von Magnetresonanzeinrichtungen trotz verbesserter Ausnutzung von deren Leistungsfähigkeit, insbesondere bezüglich des Gradientensystems, erhöht. Insbesondere wird es auch ermöglicht, dass in DE 10 2016 200 549 A1 beschriebene Vorgehen nun auch für Hochleistungs-Magnetresonanzeinrichtungen einzusetzen, wo die Dauer-Limitationen eine größere Rolle spielen. Es können mithin auch dort vorteilhafte Messeinstellungen aufgefunden werden und die Bildqualität gesteigert und/oder die gesamte Zeitdauer der Magnetresonanzsequenz reduziert werden. Nachdem die vorliegende Erfindung das Verfahren der DE 10 2016 200 549 A1 vorteilhaft weiterbildet, wird deren gesamte Offenbarung auch als Bestandteil dieser Offenbarung angesehen.

[0013] Entsprechend gilt auch im Rahmen der vorliegenden Erfindung, dass der zulässige Parameterwertebereich insbesondere zusammenhängend oder unterbrochen sein kann, d.h. mehrere nichtzusammenhängende Intervalle umfassen kann. Die Festlegung des neuen Parameterwertes innerhalb des zulässigen Parameterwertebereichs kann automatisch und/oder bedienerseitig erfolgen. Bei einer bedienerseitigen Festlegung kann der Bediener idealerweise komfortabel einen möglichen Parameterwert für den ausgewählten Sequenzparameter einstellen. Dazu wird dem Bediener bevorzugt mit einer Ausgabereinheit, beispielsweise einem Bildschirm, der zulässige Parameterwertebereich angezeigt. Diese Anzeige kann insbesondere farblich und/oder grafisch kodiert erfolgen, um dem Bediener die Festlegung des neuen Parameterwertes zu erleichtern. Vorteilhafterweise kann anhand des neuen Parameterwertes eine Magnetresonanzaufnahme durch die Magnetresonanzeinrichtung erfolgen.

[0014] Unter einer Limitation, somit auch einer Dauer-Limitation, kann eine Bedingung verstanden werden, deren Erfüllung zum Betrieb vorteilhaft, insbesondere notwendig und/oder unumgänglich, ist. Die zumindest eine Limitation kann zumindest eine Gerätelimitation und/oder zumindest eine Applikationslimitation umfassen.

[0015] Unter einer Gerätelimitation kann insbesondere eine Beschränkung verstanden werden, die durch eine Ausgestaltung der Magnetresonanzeinrichtung, mit der die Magnetresonanzbildgebung durchgeführt werden soll, gegeben ist. Beispielfhaft

seien als auf einen Momentanzustand bezogene Limitation eine maximale Gradientenamplitude (Gradientenstärke/Gradientenleistung) und/oder eine maximale Gradientenanstiegsrate (engl. slew rate) genannt, welche durch eine Gradientenspulenordnung der Magnetresonanzeinrichtung erzeugt werden können. Unter einer Gradientenanstiegsrate kann üblicherweise der Betrag der zeitlichen Ableitung der Gradientenamplitude verstanden werden, d.h. es soll darunter vor allem eine vorzeichenunabhängige Änderungsrate der Gradientenamplitude verstanden werden. Eine Dauer-Limitation kann beispielsweise durch eine Schranke für die mittlere quadratische Gradientenamplitude gegeben sein.

[0016] Unter einer Applikationslimitation kann insbesondere eine Beschränkung verstanden werden, die durch eine Beeinflussung der Magnetresonanzeinrichtung und/oder eines Untersuchungsobjekts, insbesondere ein menschlicher oder tierischer Patient, aufgrund einer Durchführung einer Magnetresonanzsequenz gegeben ist. So ist es beispielsweise möglich, dass durch eine Applikation zu hoher Gradientenstärken eine zu starke Erwärmung der Magnetresonanzeinrichtung oder eines Teils der Magnetresonanzeinrichtung verursacht wird. Neben technischen können auch physiologische Grenzen gegeben sein. Beispielsweise können durch einen falschen Betrieb der Magnetresonanzeinrichtung periphere Nerven des Patienten zu stark stimuliert werden.

[0017] Die zumindest eine Limitation kann zumindest einen, vorzugsweise einstellbaren, Sicherheitspuffer umfassen. Beispielsweise wird als Limitation kein physikalischer und/oder physiologisch gerader noch möglicher Grenzwert bereitgestellt, sondern ein Wert, der in einer konservativen Weise von einem maximal möglichen Grenzwert abweicht. Somit kann die Betriebssicherheit der Magnetresonanzeinrichtung erhöht werden.

[0018] Die zumindest eine Limitation kann in einer Datenbank gespeichert sein, worauf die Limitationsbereitstellungseinheit zugreift. Vorteilhafterweise übermittelt die Limitationsbereitstellungseinheit die zumindest eine Limitation zumindest an die Auswertereinheit, insbesondere auch an die Simulationseinheit.

[0019] Vorteilhafterweise sind die mehreren Sequenzparameter geeignet, die Magnetresonanzsequenz zu beschreiben und/oder festzulegen. Beispielfhafte Sequenzparameter sind eine Repetitionszeit (TR) und/oder eine Echozeit (TE) und/oder ein Flipwinkel und/oder eine Auslesebandbreite und/oder eine Schichtorientierung und/oder ein Bildbereich (FoV, engl. field of view).

[0020] Die mehreren Parameter und/oder die den Parametern zugeordneten voreingestellten Parameterwerte können in einer Datenbank gespeichert sein, worauf eine die Sequenzparameter bereitstellende Parameterbereitstellungseinheit zugreift. Vorteilhafterweise übermittelt die Parameterbereitstellungseinheit die mehreren Parameter und/oder die Parameterwerte an die Ausgabereinheit, um diese und/oder davon abgeleitete Parameter und/oder Parameterwerte dem Bediener zumindest teilweise anzuzeigen.

[0021] Die Auswahl kann bedienerseitig und/oder automatisch ausgeführt werden. Bei einer bedienerseitigen Auswahl umfasst die Auswahlereinheit vorteilhafterweise eine Eingabereinheit, die beispielsweise einen Bildschirm aufweist. Die bedienerseitige Auswahl geschieht beispielsweise, indem der Bediener auf dem Bildschirm ein Eingabefeld auswählt, das dem gewünschten Parameter zugeordnet ist. Dieses Eingabefeld kann z.B. bereits einen voreingestellten Parameterwert aufweisen, der in der Folge z.B. durch manuelle Eingabe eines neuen Parameterwertes verändert werden kann. Eine automatische Auswahl kann insbesondere derart ausgebildet sein, dass die Magnetresonanzsequenz z.B. hinsichtlich einer Zeitdauer optimiert wird, ohne dass ein Bediener manuell eingreifen muss.

[0022] Ein Sequenzverlauf bildet üblicherweise einen zeitlichen Ablauf von Sequenzereignissen, wie z.B. Anregungspulsen und/oder Gradientenpulsen und/oder Auslesevorgängen, ab. Die Ermittlung des zumindest einen Sequenzverlaufs kann ein zeitliches Ausrollen des Teilabschnitts der Magnetresonanzsequenz umfassen. Die Ermittlung des zumindest einen Sequenzverlaufs erfolgt insbesondere anhand von einem oder mehreren Parameterwerten, die nicht dem ausgewählten Sequenzparameter zugeordnet sind.

[0023] Die Ermittlung eines Sequenzverlaufs kann eine Berechnung einer Wertetabelle umfassen, wobei die Wertetabelle eine erste Spalte und eine zweite Spalte umfasst, wobei die erste Spalte zumindest einen Zeitwert und die zweite Spalte zumindest einen dem zumindest einen Zeitwert zugeordneten Verlaufswert umfasst. Dabei entspricht üblicherweise ein Zeitwert einem Zeitpunkt des Sequenzverlaufs, so dass aus der Anzahl der Zeitpunkte des Sequenzverlaufs die Anzahl der Zeilen der Wertetabelle resultiert. Die Verlaufswerte sind üblicherweise abhängig von zumindest einem der Parameterwerte.

[0024] Mögliche Verlaufswerte können beispielsweise Gradientenamplituden sein, die auf den physikalischen Gradientenachsen der Gradientenspulenordnung angewendet werden sollen. Ein Gradientenamplituden umfassender Sequenzverlauf berücksichtigt vorzugsweise Korrekturgradienten

und/oder Kompensationsgradienten, insbesondere Wirbelstromkompensationsgradienten, so dass der Sequenzverlauf die tatsächliche Anwendung der Gradientenspulenordnung abbildet. Somit arbeitet ein Verfahren gemäß diesem Aspekt möglicherweise genauer als bei einer etwaigen Betrachtung in abstrahierter Form.

[0025] Die Gradientenspulenordnung umfasst typischerweise Gradientenspulen für drei physikalische Gradientenachsen, die als x-, y- und z-Achse bezeichnet werden können. Bei einer Magnetresonanzeinrichtung mit einer zylinderförmigen Patientenaufnahme entspricht die z-Achse oftmals der Zylinderachse der Patientenaufnahme. Als y-Achse wird oftmals eine zur z-Achse rechtwinklige vertikale Achse definiert und als x-Achse eine zur y-Achse und z-Achse rechtwinklige horizontale Achse.

[0026] Auf jeder der drei physikalischen Gradientenachsen kann üblicherweise nur eine begrenzte Gradientenamplitude, nämlich eine maximale Gradientenamplitude, angewandt werden, welche üblicherweise mit einer begrenzten Gradientenanstiegsrate, nämlich der maximalen Gradientenanstiegsrate, verändert werden kann.

[0027] Von den physikalischen Gradientenachsen können logische Gradientenachsen unterschieden werden. Die logischen Gradientenachsen umfassen üblicherweise eine Schichtselektionsgradientenachse, eine Phasenkodiergradientenachse und eine Frequenzkodiergradientenachse, welche in der Regel ein dreidimensionales rechtwinkliges Koordinatensystem bilden. Die relative Lage der logischen Gradientenachsen zu den physikalischen Gradientenachsen legt üblicherweise die Orientierung des Messbereichs, insbesondere einer zu messenden Schicht, fest.

[0028] Parallel zur Schichtselektionsgradientenachse wird üblicherweise Schichtselektionsgradient appliziert. Mit Hilfe von Schichtselektionsgradientenpulsen, oft auch verkürzend Schichtselektionsgradienten genannt, können gezielt Atomkerne in einer gewünschten Schicht angeregt werden. Ferner werden üblicherweise parallel zur Phasenkodiergradientenachse Phasenkodiergradientenpulse, oft auch verkürzend Phasenkodiergradienten genannt, und parallel zur Frequenzkodiergradientenachse Frequenzkodiergradientenpulse, oft auch verkürzend Frequenzkodiergradienten genannt, appliziert. Phasenkodiergradient und Frequenzkodiergradient ermöglichen in der Regel eine Ortskodierung der Magnetresonanzsignale in der angeregten Schicht. Der Frequenzkodiergradient kann auch als Auslesegradient bezeichnet werden, da er üblicherweise zeitgleich mit dem Auslesen der Magnetresonanzsignale angewandt wird.

[0029] In manchen Fällen weichen je nach Orientierung und/oder Kippung des Messbereichs und/oder der Messschicht die logischen Gradientenachsen also von den physikalischen Gradientenachsen ab, so dass sich die Gradientenpulse der logischen Gradientenachsen abhängig von der Orientierung und/oder Kippung des Messbereichs und/oder der Messschicht auf die physikalischen Gradientenachsen verteilen.

[0030] Vorzugsweise umfasst der zumindest eine Sequenzverlauf mehrere Zeitpunkte. Um festzustellen, ob ein bestimmter Parameterwert des ausgewählten Sequenzparameters zulässig ist, also innerhalb des zulässigen Parameterwertebereichs liegt, wird vorzugsweise jeder der Zeitpunkte hinsichtlich der zumindest einen Limitation untersucht. Dagegen ist es in der Regel ausreichend, nur einen Zeitpunkt zu finden, in dem die zumindest eine Limitierung nicht erfüllt ist, um festzustellen, dass der Parameterwert des Sequenzverlaufs nicht zulässig ist, so dass die Untersuchung des Sequenzverlaufs abgebrochen werden kann, was durch die Abbruchkriterien auch bei der Erweiterung ermöglicht wird.

[0031] Bevorzugt werden zur Ermittlung des zulässigen Parameterwertebereichs des ausgewählten Parameters verschiedene Testparameterwerte für den Parameterwert des angewählten Parameters ermittelt, d.h. der Parameterwert des angewählten Parameters kann variiert werden. Für jeden der Testparameterwerte wird bevorzugt zumindest ein Sequenzverlauf ermittelt, der hinsichtlich der zumindest einen Limitation durch die Auswerteeinheit überprüft wird. Durch Variation eines Parameterwertes, insbesondere des Parameterwertes des ausgewählten Sequenzparameters, können also verschiedene Testsequenzverläufe ermittelt werden. Beispielsweise werden für einen ersten Parameterwert ein erster Testsequenzverlauf, einen zweiten Parameterwert ein zweiter Testsequenzverlauf, usw. ermittelt. Je nachdem, wo Verletzungen der wenigstens einen Limitation vorliegen, kann der zulässige Parameterwertebereich ermittelt werden. Für Details diesbezüglich wird auch die zitierte DE 10 2016 200 549 A1.

[0032] Dabei ist die wenigstens eine Dauer-Limitation zweckmäßigerweise nicht die einzige Limitation, die durch eine entsprechende Limitationsbereitstellungseinheit bereitgestellt wird. Insbesondere kann auch wenigstens eine auf einen Momentanzustand bezogene, insbesondere höher priorisierte, Limitation bereitgestellt werden. Dann kann vorgesehen sein, dass diese wenigstens eine auf einen Momentanzustand bezogene, insbesondere höher priorisierte, Limitation basierend auf einem einzelnen Durchlauf, insbesondere dem ersten Durchlauf, der Simulation des Teilabschnitts ausgewertet wird. Liegt beispielsweise bereits hierfür eine Verletzung

der entsprechenden, auf einen Momentanzustand bezogene Limitation vor, wird beispielsweise ein Schwellwert für einen Momentanwert überschritten, kann es unter Umständen bereits nicht mehr notwendig sein, den Sequenzverlauf für diesen Parameterwert noch zu erweitern, da er ja bereits nicht zulässig ist. Dies spart Rechenzeit und Rechenaufwand ein. Beispiele sind die bereits erwähnte maximale Gradientenamplitude pro physikalischer Gradientenachse und/oder die maximale Gradientenanstiegsrate pro physikalischer Gradientenachse.

[0033] Besonders vorteilhaft ist es, wenn bei der Wiederholung der Simulationsdurchläufe des Teilabschnitts wenigstens ein Zwischenergebnis eines vorherigen Simulationsdurchlaufs, insbesondere des ersten Simulationsdurchlaufs, wiederverwendet wird. Dadurch, dass derselbe Teilabschnitt zur Erweiterung des Sequenzverlaufs in der Simulation wiederholt wird, sind manche Berechnungen, insbesondere ein Großteil der Berechnungen, bereits durchgeführt und können auch für weitere Simulationsdurchläufe des Teilabschnitts erneut eingesetzt werden, sodass Berechnungsaufwand und somit auch Berechnungszeit, insbesondere in großem Umfang, eingespart werden kann. Insofern erweist sich eine Wiederholung des Teilabschnitts bereits als vorteilhaft gegenüber einem Ausrollen größerer Anteile der Magnetresonanzsequenz, insbesondere der gesamten Magnetresonanzsequenz.

[0034] In Ausführungsbeispielen kann ferner vorgesehen sein, dass die Wiederholung der Simulation des Teilabschnitts auf eine bezüglich der Dauer-Limitation besonders relevante Komponente oder Komponentengruppe beschränkt wird, insbesondere auf ein Gradientensystem der Magnetresonanzeinrichtung. Mithin können Komponenten der Magnetresonanzeinrichtung, die im Hinblick auf die Dauer-Limitation nur einen geringen Einfluss haben, zur Einsparung von Rechenaufwand und Rechenzeit aus den Wiederholungen ausgespart werden, wobei insbesondere gegebenenfalls auch auf Zwischenergebnisse des ersten Simulationsdurchlaufs, wie bereits erwähnt, zurückgegriffen werden kann, wenn zumindest eine bestimmte Berücksichtigung stattfinden soll. Bezieht sich beispielsweise die Dauer-Limitation hauptsächlich auf das Gradientensystem, beispielsweise auf eine zulässige mittlere Leistung, kann vorgesehen sein, dass die Simulation der Wiederholung des Teilabschnitts auf das Gradientensystem beschränkt wird, nicht aber beispielsweise das Empfangssystem, das Sendesystem und dergleichen eingeschlossen werden.

[0035] Als ein Abbruchkriterium kann überprüft werden, ob ein aus dem Sequenzverlauf herleitbarer Rechenwert einen durch die Dauer-Limitation definierten Schwellwert überschreitet oder unterschreitet. Das bedeutet, dass Abbruchkriterium kann, all-

gemein formuliert, überwachen, ob die Dauer-Limitation verletzt wird. Nachdem die Wiederholung des Teilabschnitts der Überprüfung der Dauer-Limitation (hauptsächlich) dient, kann, wenn diese verletzt ist, auch auf weitere rechen- und zeitaufwendige Simulation verzichtet werden, da die hauptsächlich gewünschte Information erhalten wurde. Beispielsweise kann bei auf ein Gradientensystem bezogenen Dauer-Limitationen ein solcher Rechenwert die mittlere, gegebenenfalls quadratische, Gradientenamplitude, insbesondere aufgeschlüsselt nach physikalischen Gradientenachsen, sein. Der entsprechende Schwellwert kann dann beispielsweise so gewählt werden, dass er eine Dauerbelastbarkeit des Gradientensystems, insbesondere bezogen auf die entsprechende physikalische Achse, beschreibt. Dabei können auch komplexere, beispielsweise mehrere Schwellwerte nutzende Schwellwertvergleiche zu Überprüfung der Verletzung einer Dauer-Limitation und somit als Abbruchkriterium verwendet werden. Beispielsweise sind Regeln bekannt, die eine Verteilung der Leistungsfähigkeit auf physikalische Gradientenachsen erlauben, beispielsweise die sogenannte 90/70/30-Regel, die auf einer physikalischen Gradientenachse 90 % eines entsprechenden Dauer-Maximums erlaubt, auf einer weiteren 70 % und auf der dritten 30 %. Selbstverständlich ist die Nennung der Gradientenamplitude, insbesondere der Gradientenstärke bzw. Gradientenleistung, hier nur beispielhaft zu verstehen und es können auch andere Größen hinsichtlich der Dauer-Belastung betrachtet werden, beispielsweise Anstiegsraten (Slew Rates), Temperaturen und auch Kontenwerte aus im Stand der Technik bereits hinreichend bekannten Kontenmodellen.

[0036] In diesem Zusammenhang sieht eine zweckmäßige Weiterbildung vor, dass als ein weiteres Abbruchkriterium überprüft wird, ob ein Verlauf des Rechenwerts ein zu erwartendes Nicht-Erreichen des Schwellwerts über die gesamte Zeitdauer oder die vorgegebene Zeitkonstante, insbesondere einen asymptotischen Verlauf, anzeigt. Aus dem Verlauf des Rechenwerts, beispielsweise wenn eine Art Sättigung oder ein anderer asymptotischer Verlauf eintritt, lässt sich auch zu frühen Zeitpunkten während der Erweiterung des Sequenzverlaufs bereits abschätzen, ob überhaupt eine Verletzung der Dauer-Limitation, hier ein Überschreiten wenigstens eines des wenigstens einen Schwellwerts durch den entsprechenden Rechenwert, überhaupt möglich ist beziehungsweise droht. Geht es beispielsweise um die Überschreitung eines Maximums, kann dann, wenn ein asymptotischer oder nur noch extrem langsam anwachsender Verlauf des Rechenwerts bei deutlich niedrigeren Werten als das Maximum aus dem Sequenzverlauf abgeleitet werden, kann bereits zu einem frühen Zeitpunkt geschlossen werden, dass das Maximum, also der Schwellwert, nicht mehr erreicht werden wird und somit die Simulation

Rechenaufwand und Zeit einsparend abgebrochen werden kann.

[0037] Die Dauerlimitation kann, insbesondere als Rechenwert, einen Durchschnittswert und/oder einen Kontowert, insbesondere bezüglich einer Kühleinrichtung der Magnetresonanzeinrichtung und/oder bezüglich einer durch ein Gradientensystem der Magnetresonanzeinrichtung zu verbrauchenden Energie, betreffen. Beispiele für Durchschnittswerte wurden mit der mittleren, insbesondere quadratischen, Gradientenamplitude, insbesondere aufgeschlüsselt nach physikalischen Gradientenachsen, bereits angesprochen, können jedoch auch andere Rechengrößen, beispielsweise Slew-Rates, Temperaturen und dergleichen, betreffen. Hinsichtlich der Gradientenamplitude, welche ja auch eine Gradientenstärke sein kann, wird dabei auch von der sogenannten „nominellen Gradientenstärke“ gesprochen. Im Rahmen der vorliegenden Erfindung können jedoch auch Kontenmodelle, insbesondere für die Kühleinrichtung und/oder das Gradientensystem, eingesetzt werden, wie sie im Stand der Technik schon vielfältig vorgeschlagen wurden.

[0038] Bei der Auswertung des Sequenzverlaufs kann eine die Auswahl des Teilabschnitts berücksichtigende Korrektur angewendet werden. Diesbezüglich wurde bereits erwähnt, dass bei entsprechender Auswahl eines Höchstleistungen beziehungsweise Spitzenanforderungen betreffenden Teilabschnitts eine Überschätzung von Rechengrößen beziehungsweise deren Rechenwerten stattfinden kann, die mit einer solchen Korrektur entsprechend berücksichtigt werden kann. Insbesondere kann bei einem die höchsten Anforderungen enthaltenden Teilabschnitt wenigstens ein Mittelwert und/oder Verbrauchswert (als Rechenwert) reduziert werden. Damit kann eine höhere Genauigkeit erreicht werden.

[0039] Insbesondere ist es denkbar, dass als der Teilabschnitt ein Abschnitt der Magnetresonanzsequenz, in dem äußere k-Raumpunkte kodiert werden, verwendet wird. Hier werden, insbesondere im Hinblick auf das Gradientensystem, meist hohe Momentananforderungen gestellt. Vorzugsweise liegen derartige äußere k-Raumpunkte bezogen auf den gesamten k-Raum vom Zentrum des k-Raums mindestens 70 %, bevorzugt mindestens 80 %, besonders bevorzugt mindestens 90 %, entfernt.

[0040] Neben dem Verfahren betrifft die Erfindung auch eine Magnetresonanzeinrichtung mit einer Steuereinrichtung, welche aufweist:

- eine Limitationsbereitstellungseinheit zur Bereitstellung wenigstens einer Limitation, wobei die wenigstens eine Limitation wenigstens eine auf die gesamte Zeitdauer der Magnetresonanzsequenz oder eine vorgegebene

Zeitkonstante bezogene Dauer-Limitation umfasst,

- eine Sequenzparameterbereitstellungseinheit zur Bereitstellung mehrerer Sequenzparameter einer Magnetresonanzsequenz,
- eine Auswahleinheit zur Auswahl wenigstens eines der mehreren Sequenzparameter,
- eine Simulationseinheit zur Ermittlung eines zeitlichen Sequenzverlaufs durch Simulation eines Teilabschnitts der Magnetresonanzsequenz anhand des wenigstens einen ausgewählten Sequenzparameters und zur Erweiterung des Sequenzverlaufs über den Teilabschnitt hinaus durch Wiederholung des Teilabschnitts, bis die gesamte Zeitdauer oder die vorgegebene Zeitkonstante erreicht wird oder ein auf die Dauer-Limitation bezogenes Abbruchkriterium erfüllt ist,
- eine Auswerteeinheit zur Ermittlung eines zulässigen Parameterwertebereichs für wenigstens einen ausgewählten der Sequenzparameter anhand des Sequenzverlaufs und der wenigstens einen Limitation,
- eine Festlegungseinheit zur Festlegung eines Parameterwertes des wenigstens einen ausgewählten Sequenzparameters innerhalb des zulässigen Parameterwertebereichs, und
- eine Sequenzeinheit zur Aufnahme von Magnetresonanzdaten mittels der Magnetresonanzsequenz mit dem festgelegten Parameterwert.

[0041] Mit anderen Worten kann auch gesagt werden, dass die Steuereinrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens ausgebildet ist. Sämtliche Ausführungen bezüglich des erfindungsgemäßen Verfahrens lassen sich analog auf die erfindungsgemäße Magnetresonanzanlage übertragen, mit welcher mithin ebenso die bereits genannten Vorteile erhalten werden können.

[0042] Die Steuereinrichtung kann dabei wenigstens einen Prozessor und wenigstens ein Speichermittel umfassen, über welche die genannten Funktionseinheiten bereitgestellt werden können, welche jedoch auch wenigstens teilweise durch Hardware implementiert werden können. Dabei dient die Sequenzeinheit, wie grundsätzlich bekannt, der generellen Steuerung des Aufnahmebetriebs der Magnetresonanzanlage.

[0043] Ein erfindungsgemäßes Computerprogramm ist direkt in ein Speichermittel einer Recheneinrichtung, insbesondere einer Steuereinrichtung einer Magnetresonanzanlage, ladbar und weist Programmmittel auf, um die Schritte eines erfindungsgemäßen Verfahrens durchzuführen, wenn das Computerprogramm auf der Recheneinrichtung

ausgeführt wird. Das Computerprogramm kann auf einem elektronisch lesbaren Datenträger gemäß der Erfindung gespeichert sein, welcher mithin darauf gespeicherte Steuerinformationen umfasst, die wenigstens ein erfindungsgemäßes Computerprogramm umfassen und bei Verwendung des Datenträgers in einer Recheneinrichtung, insbesondere einer Steuereinrichtung einer Magnetresonanzanlage, diese ausbilden, ein erfindungsgemäßes Verfahren durchzuführen.

[0044] Weitere Vorteile und Einzelheiten der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus den im Folgenden beschriebenen Ausführungsbeispielen sowie anhand der Zeichnungen. Dabei zeigen:

Fig. 1 eine Prinzipskizze einer erfindungsgemäßen Magnetresonanzanlage,

Fig. 2 einen Ablaufplan eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Verfahrens,

Fig. 3 eine Skizze zur Erweiterung eines Sequenzverlaufs,

Fig. 4 einen ersten Verlauf eines Rechenwerts, und

Fig. 5 einen zweiten Verlauf eines Rechenwerts.

[0045] **Fig. 1** zeigt eine Prinzipskizze einer erfindungsgemäßen Magnetresonanzanlage 1. Die Magnetresonanzanlage 1 umfasst, wie grundsätzlich bekannt, eine Hauptmagneteinheit 2, die einen supraleitenden Hauptmagneten 3 zum Erzeugen eines starken und insbesondere zeitlich konstanten Hauptmagnetfelds 4 aufweist. Die Hauptmagneteinheit 2 definiert eine zylindrische Patientenaufnahme 5, in die ein Patient 6 mittels einer Patientenliege 7 für eine Magnetresonanzuntersuchung eingefahren werden kann.

[0046] Die Patientenaufnahme 5 umgebend weist die Magnetresonanzanlage 1 als Teil eines Gradientensystems eine Gradientenspulenordnung 8 auf, die zur Ortskodierung während der Bildgebung verwendet werden kann und beispielsweise drei Gradientenspulen für drei physikalische Gradientenachsen aufweisen kann. Das Gradientensystem umfasst ferner einen Gradientenverstärker 9. Nach innen hin folgt zu der Patientenaufnahme 5 auch eine Hochfrequenzspulenordnung 10, beispielsweise eine Körperspule. Durch die Hochfrequenzspulenordnung 10 können Hochfrequenzpulse einer Magnetresonanzsequenz erzeugt werden, insbesondere, um in dem Hauptmagnetfeld 4 ausgerichtete Kernspins anzuregen. Zur Ansteuerung der Hochfrequenzspulenordnung 10 ist eine Hochfrequenzantenneneinheit 11 vorgesehen. Mittels des Hochfrequenzspulensystems, welches auch weitere Sendeeinheit und/oder Empfangsspulen umfassen kann, ist sowohl das beschriebene Senden von Hochfre-

quenzpulsen als auch ein Empfang von Magnetresonanzsignalen möglich.

[0047] Der Betrieb der Magnetresonanzeleinrichtung 1 wird durch eine Steuereinrichtung 12 gesteuert, wobei die Steuereinrichtung 12 zunächst eine Sequenzeinheit 13 umfasst, um die Komponenten der Magnetresonanzeleinrichtung 1 zur Ausgabe einer Magnetresonanzsequenz, beispielsweise einer Gradientenechosequenz und/oder einer Spinechosequenz, anzusteuern, sodass Magnetresonanzsignale aufgenommen werden können. Die Steuereinrichtung 12 umfasst in diesem Zusammenhang eine nicht näher gezeigte Rekonstruktionseinheit zur Rekonstruktion von medizinischen Magnetresonanzdaten, insbesondere Magnetresonanzbilddatensätzen.

[0048] Über eine Benutzerschnittstelle 14 können Benutzer mit der Magnetresonanzeleinrichtung 1, insbesondere der Steuereinrichtung 12, interagieren, wozu diese eine Anzeigeeinheit 15, beispielsweise einen Monitor, und eine Eingabeeinheit 16 aufweist, über welche beispielsweise Sequenzparameter von Magnetresonanzsequenzen sowie weitere Informationen eingegeben werden können.

[0049] Die Steuereinrichtung 12 ist zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens ausgebildet. Hierzu weist sie eine Limitationsbereitstellungseinheit 17 auf, die ausgebildet ist, zumindest eine Limitation bereitzustellen. Die wenigstens eine Limitation umfasst dabei vorliegend wenigstens eine auf die gesamte Zeitdauer einer Magnetresonanzsequenz oder eine vorgegebene Zeitkonstante bezogene Dauer-Limitation. Eine Sequenzparameterbereitstellungseinheit 18 kann mehrere Sequenzparameter der Magnetresonanzsequenz bereitstellen. Mittels der Eingabeeinheit 16, die in diesem Ausführungsbeispiel von einer hier nicht näher dargestellten Auswahleinheit umfasst wird, kann einer der mehreren Sequenzparameter ausgewählt werden, wobei mittels der Auswahleinheit auch eine automatische Auswahl denkbar ist.

[0050] Die Steuereinrichtung 12 umfasst ferner eine Simulationseinheit 19, die ausgebildet ist, zumindest einen Sequenzverlauf anhand des wenigstens einen ausgewählten Parameters zu ermitteln. Hierbei wird der Sequenzverlauf mittels der Simulationseinheit 19 zunächst für einen Teilabschnitt der Magnetresonanzsequenz bestimmt, der nicht die gesamte Magnetresonanzsequenz umfasst, insbesondere einen Zeitraum abdeckt, der kürzer als 1s, insbesondere kürzer als 10 ms, ist und besonders hohe Leistungsanforderungen betrifft. Konkret betrifft der Teilabschnitt vorliegend einen Anteil der Magnetresonanzsequenz, durch den äußere k-Raum-Punkte kodiert werden. Die Simulationseinheit 19 ist ferner ausgebildet, den nach erstmaliger Simulation des Teilab-

schnitts resultierenden Sequenzverlauf zeitlich zu erweitern, indem der Teilabschnitt wiederholt wird, bis entweder die gesamte Zeitdauer der Magnetresonanzsequenz oder die vorgegebene Zeitkonstante erreicht sind oder ein auf die Dauer-Limitation bezogenes Abbruchkriterium erfüllt ist.

[0051] Eine Auswerteeinheit 20 ist ausgebildet, anhand des zumindest einen zeitlichen Sequenzverlaufs und der wenigstens einen Limitation einen zulässigen Parameterwertebereich des wenigstens einen ausgewählten Sequenzparameters zu ermitteln. Eine Festlegungseinheit zur Festlegung eines Parameterwertes innerhalb des zulässigen Parameterwertebereichs ist hier ebenso nicht näher gezeigt und kann wiederum die Eingabeeinheit 16 umfassen, wobei auch hier grundsätzlich eine automatische Festlegung durchgeführt werden kann.

[0052] Nach Festlegen aller Parameterwerte der Magnetresonanzsequenz können unter Nutzung dieser Magnetresonanzsequenz mittels der Sequenzeinheit 13 Magnetresonanzsignale aufgenommen werden.

[0053] Zur Speicherung der verschiedenen Daten und Informationen weist die Steuereinrichtung 12 ferner im Übrigen auch ein Speichermittel 21 auf. Neben den dargestellten Komponenten kann die Magnetresonanzeleinrichtung 1 selbstverständlich auch weitere Komponenten aufweisen, wobei auf eine genauere Erläuterung der Funktionsweise hier verzichtet wird, da diese im Stand der Technik hinreichend bekannt ist.

[0054] Ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens wird mittels des Ablaufplans der Fig. 2 erläutert.

[0055] In einem Schritt S1 werden Limitationen durch die Limitationsbereitstellungseinheit 17 bereitgestellt. Diese Limitationen umfassen vorliegend wenigstens eine Dauer-Limitation, wie bereits erläutert, jedoch auch wenigstens eine auf einen Momentanzustand bezogene Limitation. Auf einen Momentanzustand bezogene Limitationen können beispielsweise maximal erlaubte Gradientenamplituden (Gradientenstärken/Gradientenleistungen) und/oder maximal erlaubte Slew Rates (Anstiegsraten) umfassen, während Dauer-Limitationen beispielsweise auf den Verbrauch eines Kontos in einem Kontenmodell und/oder Schwellwerte für Mittelwerte abzielen können. Ein Beispiel ist die nominelle, gegebenenfalls quadratische, Gradientenleistung, die durch den, insbesondere quadratischen, Mittelwert, nicht überschritten werden sollte, insbesondere pro physikalischer Gradientenachse beziehungsweise in einer bestimmten Verteilung über die Gradientenachsen.

[0056] In einem Schritt S2 werden mehrere Parameter einer Magnetresonanzsequenz durch die Parameterbereitstellungseinheit 18 bereitgestellt, wobei jedem der Sequenzparameter ein voreingestellter Parameterwert zugeordnet ist, welche beispielsweise benutzerseitig oder automatisch vorgegeben sein können.

[0057] In einem Schritt S3 wird aus den mehreren Sequenzparametern wenigstens ein Parameter ausgewählt. Dies kann beispielsweise durch einen Bediener mittels der Eingabeeinheit 16 erfolgen, aber auch wenigstens teilweise automatisch. Dem Bediener können dabei Sequenzparameter auf der Anzeigeeinheit 15 zur Auswahl angeboten werden.

[0058] In einem Schritt S4 wird dann seitens der Simulationseinheit 19 ein Sequenzverlauf für die Magnetresonanzsequenz ermittelt, und zwar zunächst für den Teilabschnitt der Magnetresonanzsequenz. Dieser ist, wie bereits erwähnt, definiert als ein kurzer Anteil der Magnetresonanzsequenz, beispielsweise kürzer als 1 s, bevorzugt kürzer als 10 ms, in dem besondere Spitzenanforderungen bestehen, wie es für das Gradientensystem beispielsweise beim Vermessen der äußeren Bereiche des k-Raums gegeben ist. Dabei kann zur Simulation ein zeitliches Ausrollen des Teilabschnitts der Magnetresonanzsequenz erfolgen. Der Teilabschnitt der Magnetresonanzsequenz kann in mehrere Zeitpunkte eingeteilt werden, für die jeweils ein Verlaufswert berechnet werden kann. Dabei werden vorliegend bevorzugt Gradientenverläufe ausgerollt, wobei die Darstellung bevorzugt so erfolgen kann, dass sie von der Hardware der Magnetresonanzeinrichtung 1 tatsächlich ausgeführt werden können, wobei beispielsweise Wirbelstromkompensationen und dergleichen berücksichtigt werden. Der Sequenzverlauf wird zumindest für die voreingestellten Parameterwerte ermittelt, wobei auch Ermittlungen für Testparameterwerte möglich sind.

[0059] In Ausführungsbeispielen kann zunächst nach Ermittlung des zeitlichen Sequenzverlaufs für den Teilabschnitt bereits eine Überprüfung hinsichtlich der auf einen Momentanzustand bezogenen Limitationen erfolgen, da dann, wenn eine dieser Limitationen verletzt ist, eine weitergehende Ermittlung des Sequenzverlaufs unnötig sein kann. In Fällen jedoch, in denen die auf einen Momentanzustand bezogenen Limitationen nicht basierend auf dem ersten Simulationsdurchlauf des Teilabschnitts verletzt sind, erfolgt seitens der Simulationseinheit 19 eine zeitliche Erweiterung des Sequenzverlaufs, in dem der Teilabschnitt wiederholt wird, also nacheinander weiter simuliert wird, bis eine vorgegebene Zeitkonstante, welche beispielsweise wenigstens eine Sekunde, insbesondere wenigstens zehn Sekunden, betragen kann, zur Beurteilung der wenigstens einen Dauer-Limitation oder die gesamte

Zeitdauer der Magnetresonanzsequenz erreicht sind.

[0060] Dies wird durch die Prinzipskizze der **Fig. 3** näher erläutert. Dort steht jeder Kasten 22 für eine Simulation des Teilabschnitts der Magnetresonanzsequenz. Die erste Simulation des Teilabschnitts deckt dabei auf dem Zeitstrahl 23 nur einen kurzen Zeitraum 24, beispielsweise von weniger als einer Sekunde, insbesondere höchstens 10 ms, ab. Zur Beurteilung einer Verletzung der Dauer-Limitation ist jedoch eine längere Betrachtung notwendig, weshalb durch die Wiederholung der Teilsequenz, vergleiche weitere Kästen 22, eine Verlängerung des als Ergebnis erhaltenen zeitlichen Sequenzverlaufs möglich ist, beispielsweise, bis der zeitliche Sequenzverlauf ein Zeitintervall der Länge der vorgegebenen Zeitkonstante 25 abdeckt, sodass zu einem Zeitpunkt 26 abgebrochen wird.

[0061] Anhand der Abbruchkriterien ist jedoch auch ein früherer Abbruch möglich, wenn ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Ein einfaches Abbruchkriterium kann sein, dass ein Rechenwert, der für eine Verletzung einer Dauer-Limitation einen Schwellwert übersteigen muss, diesen Schwellwert auch übersteigt, sodass eine Verletzung der Dauer-Limitation bereits vor Erreichen der vorgegebenen Zeitkonstante 25 beziehungsweise der gesamten Zeitdauer der Magnetresonanzsequenz gegeben ist. Hierzu zeigt **Fig. 4** einen beispielhaften Verlauf 27 eines Rechenwerts R über mehrere der von dem Teilabschnitt abgedeckten Zeiträume 24. Zudem ist der Schwellwert 28 angezeigt.

[0062] Nach drei Zeiträumen 24, zu einem Zeitpunkt 29 überschreitet der Rechenwert bereits den Schwellwert 28, sodass eine Verletzung der Dauer-Limitation gegeben ist. Die Erweiterung des Sequenzverlaufs wird dann abgebrochen. Bei dem Rechenwert kann es sich beispielsweise um den Wert der mittleren Gradientenamplitude oder dessen Quadrat handeln, da mit einer nominellen Gradientenstärke, beispielsweise für eine bestimmte physikalische Gradientenachse, verglichen wird.

[0063] **Fig. 5** zeigt einen weiteren Verlauf 30 eines Rechenwerts R im Vergleich zum Schwellwert 28. Wie zu erkennen ist, ist der Verlauf 30 ein asymptotischer Verlauf, der sich nach einigen Zeiträumen 24 nur noch wenig verändert, sodass bereits zu diesem Zeitpunkt abgeschätzt werden kann, dass der Schwellwert 28 nie erreicht werden wird. Über eine entsprechend formuliertes Abbruchkriterium kann dies festgestellt werden und die Simulation, konkret die Erweiterung, kann entsprechend beendet werden.

[0064] Neben diesen Abbruchkriterien kann die Tatsache, dass immer derselbe Teilabschnitt wiederholt

wird, auch anderweitig zur Reduzierung des Rechenaufwands und der Berechnungszeit ausgenutzt werden. Vorliegend werden Zwischenergebnisse vorheriger Simulationsdurchläufe, soweit möglich, wiederverwertet, was bereits deutliche Vorteile bringt. Ferner werden nur wesentliche Anteile bei Wiederholungen im Simulationsdurchlauf mitsimuliert, beispielsweise bei hauptsächlich auf das Gradientensystem bezogenen Analysen Hochfrequenzaktivitäten und dergleichen vernachlässigt. Es findet also eine Beschränkung auf eine relevante Komponente oder Komponentengruppe statt.

[0065] Zurückkehrend zu **Fig. 2** wird in einem Schritt S5 durch die Auswerteeinheit 20 anhand des wenigstens einen Sequenzverlaufs und der Limitationen ein zulässiger Parameterwertebereich des wenigstens einen ausgewählten Sequenzparameters ermittelt. Hierbei können, wie auch in DE 10 2016 200 549 A1 beschrieben, lückenlose Suchen und/oder Binärsuchen und/oder Optimierungsansätze verwendet werden, wozu auf die entsprechende dortige Beschreibung verwiesen wird.

[0066] Dabei sei jedoch angemerkt, dass die Schritte S4 und S5 vorliegend wenigstens teilweise auch ineinander verschachtelt sind, wenn, beispielsweise um Rechenaufwand und/oder Rechenzeit bei der Erweiterung des Sequenzverlaufs einzusparen, das Einhalten von Limitationen bereits früh überprüft wird und/oder bei der Auswertung die Ermittlung weiterer Sequenzverläufe notwendig wird.

[0067] In einem Schritt S6 kann dann schließlich, beispielsweise mittels eines Bedieners, ein neuer Parameterwert des ausgewählten Sequenzparameters festgelegt werden, der innerhalb des zulässigen Parameterwertebereichs liegt, der im Schritt S5 ermittelt wurde.

[0068] Dabei sei an dieser Stelle noch angemerkt, dass beispielsweise bezüglich Mittelwerten und/oder Verbrauchswerten, beispielsweise Kontowerten, als Rechenwerten auch durch eine Korrektur berücksichtigt werden kann, dass aufgrund der Wahl des Teilabschnitts als die Spitzenanforderungen abdeckend eine Überschätzung bezüglich der Rechenwerte stattfinden kann. Daher kann beispielsweise eine Reduzierung, beispielsweise von mittleren quadratischen Gradientenleistungen/Gradientenstärken und dergleichen, erfolgen.

[0069] Obwohl die Erfindung im Detail durch das bevorzugte Ausführungsbeispiel näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Variationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzbereich der Erfindung zu verlassen.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- DE 102016200549 A1 [0003, 0004, 0012, 0031, 0065]

Patentansprüche

1. Computerimplementiertes Verfahren zur Einstellung einer Magnetresonanzsequenz für eine Magnetresonanzeinrichtung (1), wobei

- die Magnetresonanzsequenz durch wenigstens einen Sequenzparameter beschrieben wird und bereitgestellte Parameterwerte der Sequenzparameter zur Ermittlung eines zeitlichen Sequenzverlaufs durch Simulation eines Teilabschnitts der Magnetresonanzsequenz mittels einer Simulationseinheit (19) verwendet werden,
- ein zulässiger Parameterwertebereich für wenigstens einen ausgewählten der Sequenzparameter anhand des Sequenzverlaufs und bereitgestellter Limitationen mittels einer Auswerteeinheit (20) ermittelt wird und
- mittels einer Festlegungseinheit ein neuer Parameterwert des wenigstens einen ausgewählten Parameters innerhalb des zulässigen Parameterwertebereichs festgelegt wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass
- wenigstens eine auf die gesamte Zeitdauer der Magnetresonanzsequenz oder eine vorgegebene Zeitkonstante (25) bezogene Dauer-Limitation bereitgestellt wird und
- mittels der Simulationseinheit (19) durch Wiederholung des Teilabschnitts, bis die gesamte Zeitdauer oder die vorgegebene Zeitkonstante (25) erreicht wird oder ein auf die Dauer-Limitation bezogenes Abbruchkriterium erfüllt ist, der Sequenzverlauf über den Teilabschnitt hinaus erweitert wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass wenigstens eine auf einen Momentanzustand bezogene Limitation basierend auf einem einzelnen Durchlauf der Simulation des Teilabschnitts ausgewertet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei der Wiederholung der Simulationsdurchläufe des Teilabschnitts wenigstens ein Zwischenergebnis eines vorherigen Simulationsdurchlaufs wiederverwendet wird.

4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Wiederholung der Simulation des Teilabschnitts auf eine bezüglich der Dauer-Limitation besonders relevante Komponente oder Komponentengruppe beschränkt wird, insbesondere auf ein Gradientensystem der Magnetresonanzeinrichtung (1).

5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Abbruchkriterium überprüft wird, ob ein aus dem Sequenzverlauf herleitbarer Rechenwert einen durch die Dauer-Limitation definierten Schwellwert (28) überschreitet oder unterschreitet.

6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass als ein weiteres Abbruchkriterium überprüft wird, ob ein Verlauf (27, 30) des Rechenwerts ein zu erwartendes Nichterreichen des Schwellwerts (28) über die gesamte Zeitdauer oder die vorgegebene Zeitkonstante (25), insbesondere einen asymptotischen Verlauf (30), anzeigt.

7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Dauer-Limitation einen Durchschnittswert und/oder einen Kontowert betrifft, insbesondere bezüglich einer Kühleinrichtung der Magnetresonanzeinrichtung (1) und/oder bezüglich einer durch ein Gradientensystem der Magnetresonanzeinrichtung (1) zu verbrauchenden Energie.

8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei der Auswertung des Sequenzverlaufs eine die Auswahl des Teilabschnitts berücksichtigende Korrektur angewendet wird.

9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als der Teilabschnitt ein Abschnitt der Magnetresonanzsequenz, in dem äußere k-Raumpunkte kodiert werden, verwendet wird.

10. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Teilabschnitt einen Zeitraum (24) von weniger als einer Sekunde, insbesondere weniger als 10 ms, abdeckt und/oder die Zeitkonstante (25) wenigstens 10 ms beträgt.

11. Magnetresonanzeinrichtung (1) mit einer Steuereinrichtung (12), welche aufweist:

- eine Limitationsbereitstellungseinheit (17) zur Bereitstellung wenigstens einer Limitation, wobei die wenigstens eine Limitation wenigstens eine auf die gesamte Zeitdauer der Magnetresonanzsequenz oder eine vorgegebene Zeitkonstante (25) bezogene Dauer-Limitation umfasst,
- eine Sequenzparameterbereitstellungseinheit (18) zur Bereitstellung mehrerer Sequenzparameter einer Magnetresonanzsequenz,
- eine Auswahleinheit zur Auswahl wenigstens eines der mehreren Sequenzparameter,
- eine Simulationseinheit (19) zur Ermittlung eines Sequenzverlaufs durch Simulation eines Teilabschnitts der Magnetresonanzsequenz anhand des wenigstens einen ausgewählten Sequenzparameters und zur Erweiterung des Sequenzverlaufs über den Teilabschnitt hinaus durch Wiederholung des Teilabschnitts, bis die gesamte Zeitdauer oder die vorgegebene Zeitkonstante (25) erreicht wird oder ein auf die Dauer-Limitation bezogenes Abbruchkriterium erfüllt ist,
- eine Auswerteeinheit (20) zur Ermittlung eines

zulässigen Parameterwertebereichs für wenigstens einen ausgewählten der Sequenzparameter anhand des Sequenzverlaufs und der wenigstens einen Limitation,

- eine Festlegungseinheit zur Festlegung eines Parameterwertes des wenigstens einen ausgewählten Sequenzparameters innerhalb des zulässigen Parameterwertebereichs, und
- eine Sequenzeinheit (13) zur Aufnahme von Magnetresonanzdaten mittels der Magnetresonanzsequenz mit dem festgelegten Parameterwert.

12. Computerprogramm, welches die Schritte eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10 durchführt, wenn es auf einer Recheneinrichtung, insbesondere einer Steuereinrichtung einer Magnetresonanzeinrichtung (1), ausgeführt wird.

13. Elektronisch lesbarer Datenträger, auf dem ein Computerprogramm nach Anspruch 12 gespeichert ist.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

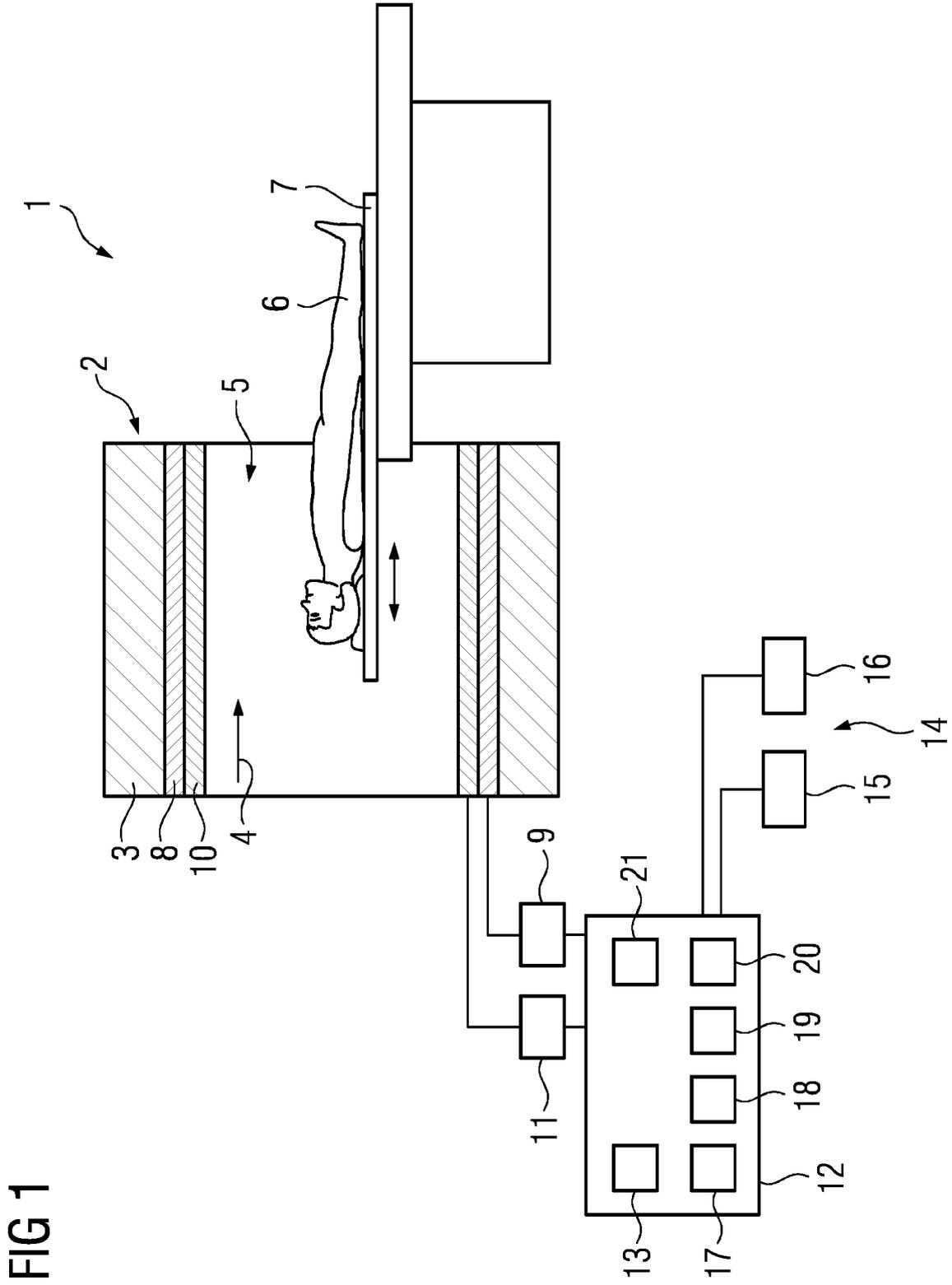


FIG 1

FIG 2

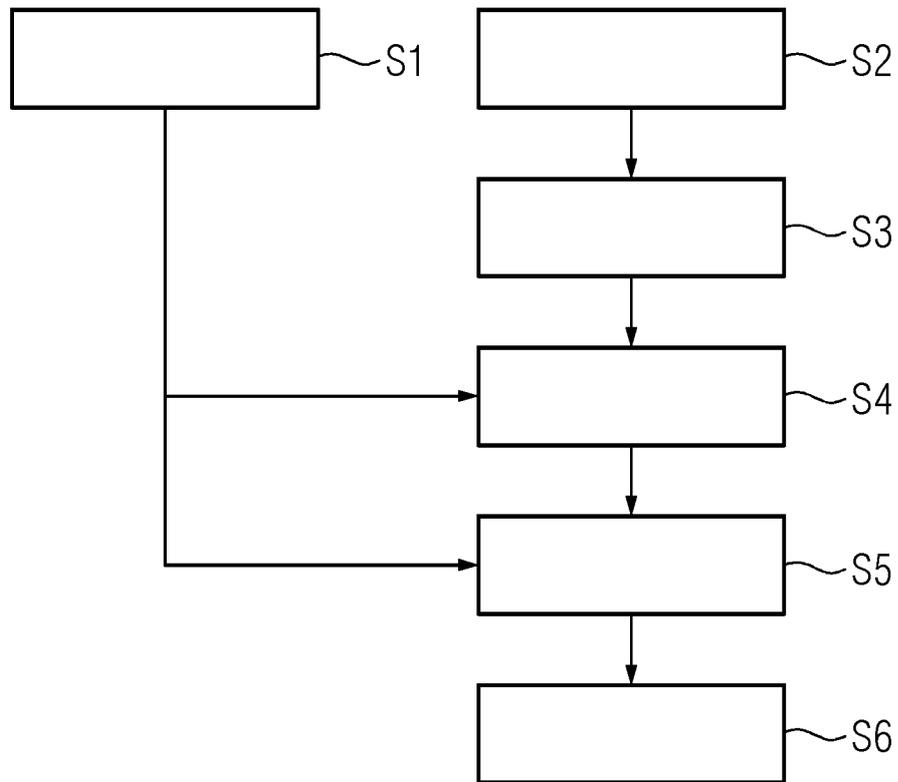


FIG 3

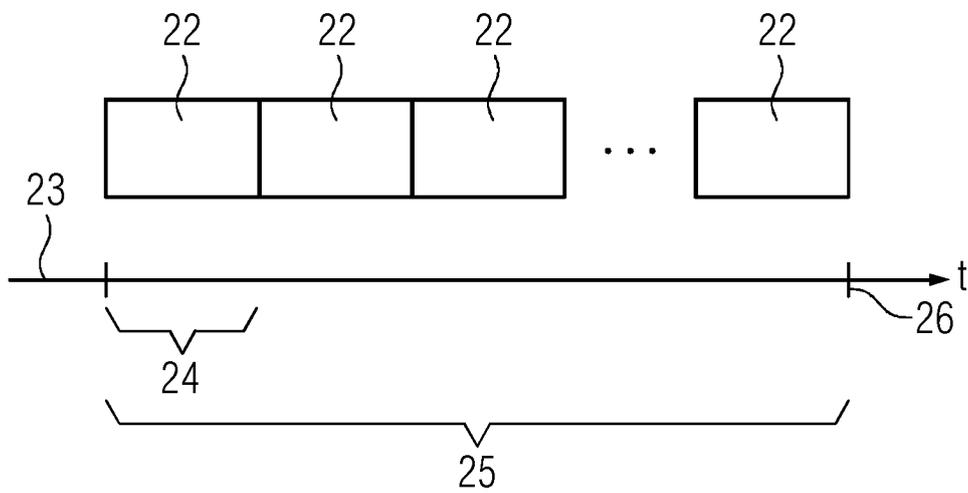


FIG 4

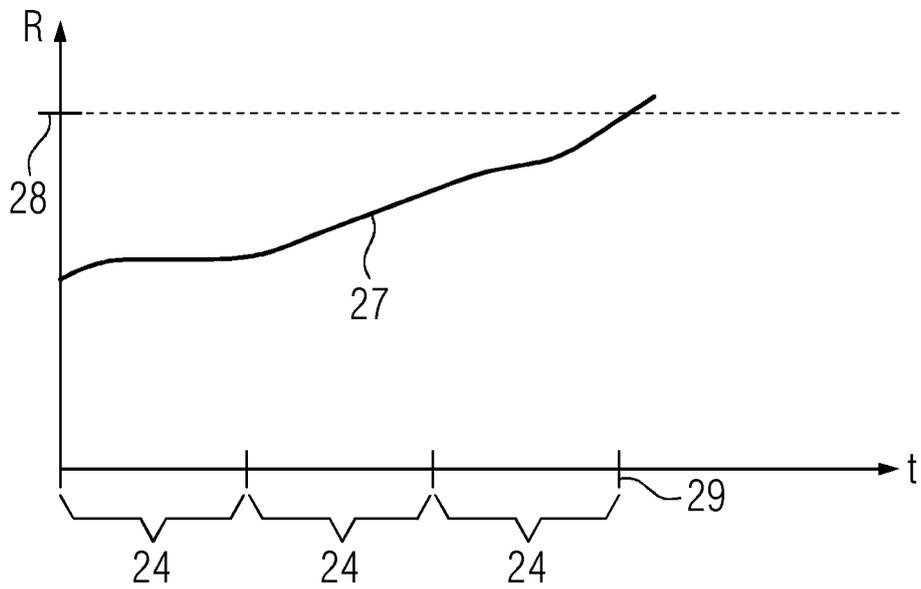


FIG 5

