



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2016 204 709.4**

(22) Anmeldetag: **22.03.2016**

(43) Offenlegungstag: **28.09.2017**

(51) Int Cl.: **A61B 6/03 (2006.01)**

**G01N 23/06 (2006.01)**

(71) Anmelder:  
**Siemens Healthcare GmbH, 91052 Erlangen, DE**

(72) Erfinder:  
**Raupach, Rainer, Dr., 91336 Heroldsbach, DE;**  
**Krauß, Bernhard, Dr., 90559 Burgthann, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

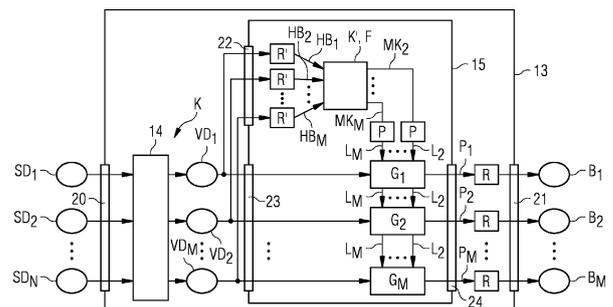
<b>DE</b>	<b>10 2005 028 216</b>	<b>A1</b>
<b>DE</b>	<b>10 2011 083 727</b>	<b>A1</b>

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Bildrekonstruktion**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bildrekonstruktion auf Basis einer ersten Mehrzahl (N) von Spektral-Rohdatensätzen ( $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$ ), die jeweils unterschiedlichen Röntgenspektren zugeordnet sind, das folgende Schritte aufweist: Zunächst erfolgt eine Kombination (K) der Spektral-Rohdatensätze ( $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$ ) zu einer zweiten Mehrzahl (M) von virtuellen Rohdatensätzen ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ). Folgend wird jeweils ein Hilfsbilddatensatz ( $HB_1, HB_2, \dots, HB_M$ ) auf Basis eines virtuellen Rohdatensatzes ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) rekonstruiert ( $R'$ ). Ein erstes Material wird aus einer Materialgruppe ausgewählt, die eine Mehrzahl (M) von Materialien umfasst. Aus den Hilfsbilddatensätzen ( $HB_1, HB_2, \dots, HB_M$ ) werden materialspezifische Karten ( $MK_2, MK_3, \dots, MK_M$ ) für eine Anzahl (M - 1) von zweiten Materialien der Materialgruppe erzeugt ( $K', F$ ). Unter Vorwärtsprojektion der jeweiligen materialspezifischen Karte ( $MK_2, MK_3, \dots, MK_M$ ) erfolgt eine Ermittlung (P) von Materiallinienintegralen ( $L_2, L_3, \dots, L_M$ ) für die zweiten Materialien. Anschließend werden synthetische Projektionsdatensätze ( $P_1, P_2, \dots, P_M$ ) auf Basis der virtuellen Rohdatensätze ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) und der Materiallinienintegrale ( $L_2, L_3, \dots, L_M$ ) für jedes Material ermittelt ( $G_1, G_2, \dots, G_M$ ). Schließlich erfolgt eine Rekonstruktion (R) zumindest eines Bilddatensatzes ( $B_1, B_2, \dots, B_M$ ) auf Basis der synthetischen Projektionsdatensätze ( $P_1, P_2, \dots, P_M$ ) für eine Anzahl der Materialien der Materialgruppe. Der Erfindung umfasst außerdem eine Bildrekonstruktionseinrichtung (13) sowie ein Computertomographiesystem (1).



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bildrekonstruktion, eine Bildrekonstruktionseinrichtung sowie ein Computertomographiesystem.

**[0002]** Bei der Projektion von Röntgenstrahlung durch ein Untersuchungsobjekt kommt es in Abhängigkeit von dem verwendeten Spektrum und von den zu durchdringenden Materialien zu unterschiedlichen Absorptions- bzw. Streuverhalten, wobei der Anteil der niedrigen Energien im Spektrum im Verhältnis zu den hohen Energien schneller absorbiert wird (Strahlauhfärtung). Die hinter dem Untersuchungsobjekt detektierte Röntgenstrahlung enthält dementsprechend Informationen über Materialeigenschaften des Untersuchungsobjekts. Bei Computertomographiesystemen (CT-Systemen) mit simultaner Detektion von mehreren Spektren der Röntgenstrahlung können nach der Akquisition von Projektionsdaten Bilddatensätze rekonstruiert werden, die Informationen über die im Untersuchungsobjekt enthaltenen Materialien darstellen. Unter „unterschiedlichen Röntgenenergien“ ist die Detektion von Röntgenstrahlung mit unterschiedlichen Röntgenenergiespektren zu verstehen. Dies kann einerseits dadurch erreicht werden, dass die Röntgenquelle mit unterschiedlichen Spannungen angesteuert wird. Daher wird üblicherweise eine Röntgenenergie auch einfach mit der eingestellten Röntgenspannung (in kV) bezeichnet. Andererseits können auch in dafür vorgesehenen Abschnitten eines Detektors selektiv einzelne Bereiche des projizierten Röntgenspektrums detektiert werden. Eine für die Darstellung bzw. Auswertung vorgegebene Energie muss dabei nicht notwendigerweise der tatsächlich detektierten Energie des projizierten Röntgenspektrums entsprechen, sondern kann auch mittels einer Interpolation in einem gewissen Rahmen frei bestimmt werden. Dabei sollen die Bilddatensätze möglichst frei von Artefakten, die durch die Strahlauhfärtung verursacht werden, rekonstruiert werden.

**[0003]** Aus der Schrift DE 10 2005 008 767 A1 ist ein rohdatenbasiertes Korrekturverfahren bekannt, wobei aus einer Anzahl von unterschiedlichen detektierten spektralen Bereichen der Röntgenstrahlung ein Bild rekonstruiert werden kann, in dem Strahlauhfärtungsartefakte im Wesentlichen unterdrückt werden. Dafür wird für die Materialkomponenten als Messwert jeweils eine Durchstrahlungsdicke ermittelt, wobei die unterschiedlichen Komponenten verschiedene Energieabhängigkeiten der Absorptionskoeffizienten aufweisen. Die Durchstrahlungsdicken werden folgend gewichtet zu einem pseudomonochromatischen Messwert summiert. Aus diesen pseudomonochromatischen Messwerten wird dann ein Bild rekonstruiert, in dem die Strahlauhfärtungsartefakte im Wesentlichen unterdrückt sind. Zur Vereinfachung der Bildrekonstruktion werden hier also die spektral unterschiedlichen Messwerte für die Materialkompo-

nenten zu einem pseudomonochromatischen Messwert zusammengefasst.

**[0004]** Eine andere aus der Praxis bekannte bilddatenbasierte Herangehensweise ist die separate Strahlauhfärtungskorrektur für jeden gemessenen Bereich des Röntgenspektrums. Dafür wird zunächst eine erste Rekonstruktion vorgenommen und ein Basis-Material ausgewählt. In der ersten Rekonstruktion werden dann mithilfe einer Segmentierung diejenigen Voxel identifiziert, die Beimischungen von anderen Basismaterialien aufweisen. Hierbei gelingt es zwar, die Strahlauhfärtungsartefakte zu reduzieren, jedoch ist die Genauigkeit der quantitativen Darstellung der Materialeigenschaften (Schwächungsbeiträge oder Anteile) begrenzt, so dass die Bilder mit reduzierter Strahlauhfärtung nicht notwendig einem konsistenten monochromatischen Bild entsprechen. Diese Limitation gilt insbesondere für die Trennung von mehr als zwei Materialien. Außerdem können Variationen des Spektrums über das Messfeld, z. B. durch Formfilter praktisch nicht berücksichtigt werden.

**[0005]** Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zur Bildrekonstruktion, eine Bildrekonstruktionseinrichtung sowie ein Computertomographiesystem anzugeben, womit eine verbesserte Bildgebung möglich ist.

**[0006]** Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren zur Bildrekonstruktion nach Anspruch 1, eine Bildrekonstruktionseinrichtung nach Anspruch 11 sowie ein Computertomographiesystem nach Anspruch 12 gelöst.

**[0007]** Das eingangs genannte Verfahren zur Bildrekonstruktion auf Basis einer ersten Mehrzahl von Spektral-Rohdatensätzen, die jeweils unterschiedlichen Röntgenspektren zugeordnet sind, weist zumindest folgende Schritte auf:

Zunächst werden in einem Schritt a) die Spektral-Rohdatensätze zu einer zweiten Mehrzahl von virtuellen Rohdatensätzen kombiniert. Auf Basis eines virtuellen Rohdatensatzes wird in einem Schritt b) jeweils ein Hilfsbilddatensatz rekonstruiert. Folgend wird in einem Schritt c) ein erstes Material aus einer Materialgruppe ausgewählt, die eine Mehrzahl von Materialien umfasst. Für eine Anzahl von zweiten Materialien der Materialgruppe werden in einem Schritt d) aus den Hilfsbilddatensätzen der zweiten Materialien materialspezifische Karten erzeugt. Unter Vorwärtsprojektion der jeweiligen materialspezifischen Karte werden in einem Schritt e) für die zweiten Materialien Materiallinienintegrale ermittelt. In einem Schritt f) werden auf deren Basis und auf Basis der virtuellen Rohdatensätze für jedes Material synthetische Projektionsdatensätze für jedes Material ermittelt. Schließlich wird in einem Schritt g) zumindest ein Bilddatensatz auf Basis der synthetischen Projek-

tionsdatensätze für eine Anzahl der Materialien der Materialgruppe rekonstruiert.

**[0008]** Die Spektral-Rohdatensätze stellen dabei Projektionsdaten eines Untersuchungsobjekts dar, die – vorzugsweise mittels eines CT-Gerätes – aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Projektionswinkeln akquiriert wurden. Die Spektral-Rohdatensätze werden dabei abhängig vom detektierten Röntgenspektrum, d. h. zugeordnet zum Energiespektrum bzw. zum Wellenlängenbereich der projizierten Röntgenstrahlung, jeweils in einem „originären“, d.h. ursprünglichen bzw. realen (im Gegensatz zu den später definierten virtuellen), „spektralen Kanal“ erfasst. Dies kann über diverse Multi-Energie-CT-Ansätze wie beispielsweise Dual-Source, Split-Filter oder kV-Switching und dergleichen erfolgen. Bevorzugt weist das CT-Gerät dafür aber einen quantenzählenden Detektor auf, der die Röntgenstrahlung in Abhängigkeit von seinen Energieschwellen in separaten Bins detektiert, die somit die originären spektralen Kanäle bilden.

**[0009]** Über die Anzahl der unterschiedlichen originären spektralen Kanäle ist also auch die Mehrzahl  $N$  der Spektral-Rohdatensätze definiert. Sie werden zunächst zu einer zweiten, bevorzugt gleichen oder kleineren, Mehrzahl  $M$  vom „virtuellen“ Rohdatensätzen kombiniert. Dies kann beispielsweise durch eine Linearkombination der Spektral-Rohdatensätze erfolgen, also über eine gewichtete Addition mit definierbaren Gewichtungskoeffizienten. Die virtuellen Rohdatensätze werden also mit einem neuen virtuellen Spektrum zusammengesetzt und daher auch bevorzugt einem „virtuellen“ spektralen Kanal zugeordnet, dem bevorzugt wiederum ein Material zugeordnet ist. Dieser Schritt dient dazu, die Daten für die folgenden Schritte in eine möglichst günstige Form zu bringen, wie weiter unten näher erläutert wird.

**[0010]** Aus den virtuellen Rohdatensätzen werden mit Hilfe von einem gängigen Rekonstruktionsverfahren wie beispielsweise der gefilterten Rückprojektion Hilfsbilddatensätze berechnet. Die Hilfsbilddatensätze sind im Wesentlichen schon dreidimensionale Bilder des Untersuchungsobjekts wie sie bei regelmäßiger Rekonstruktion eines Rohdatensatzes erzeugt würden, der bei einer Akquisition unter einem Röntgenspektrum erhalten würde, das wie vorher beschrieben modifiziert worden ist.

**[0011]** Die Anzahl  $M$  der Hilfsbilddatensätze – also auch die Anzahl  $M$  der virtuellen Rohdatensätze – entspricht der Anzahl  $M$  der Materialien der Materialgruppe. Die Materialgruppe beinhaltet die Materialien, die folgend bei der erfindungsgemäßen Rekonstruktion berücksichtigt werden. Ein Material kann dabei ein chemisches Element, wie zum Beispiels Kalzium, oder einen Stoff, wie beispielsweise Wasser, bezeichnen. Im Allgemeinen repräsentiert es

damit komplexere strukturelle Zusammensetzungen im Untersuchungsobjekt wie zum Beispiel Knochen, Weichgewebe etc. Es kann aber auch ein Kontrastmittel wie beispielsweise Gadolinium als zusätzliches Material für die Datenakquisition zugegeben werden, um spezielle Strukturen wie Gefäße etc. hervorzuheben.

**[0012]** Aus der Materialgruppe wird ein erstes Material ausgewählt, für das folgend keine materialspezifische Karte erstellt wird. Die übrigen Materialien sind die zweiten Materialien der Materialengruppe, für die materialspezifische Karten erstellt werden. Die materialspezifischen Karten stellen dabei Materialdichteverteilungen dar, die unter Berücksichtigung von lokalen Schwächungsbeiträgen der materialabhängigen Schwächungskoeffizienten aus den Hilfsbilddatensätzen voxelweise, d. h. Volumenbildpunkt für Volumenbildpunkt, ermittelt werden. Über die vom Spektrum abhängige, orts aufgelöste Abschwächung der Röntgenstrahlung lassen sich also die jeweiligen Materialkonzentrationen im Untersuchungsobjekt lokalisieren. Um die materialspezifischen Karten genauer zu ermitteln, kann der Hilfsbilddatensatz mit Hilfe einer weitergehenden Bildanalyse bearbeitet werden, wie unten näher erläutert wird.

**[0013]** Die Vorwärtsprojektion der materialspezifischen Karten wird bevorzugt unter derselben Geometrie wie die virtuellen Rohdatensätze modelliert. Es werden also virtuelle Projektionen der einzelnen Materialkarten erzeugt, die der Messanordnung bei der ursprünglichen Akquisition entsprechen. Im Gegensatz zum aus der Praxis bekannten Verfahren wird im Rahmen der Erfindung die Projektionsgeometrie also berücksichtigt. Diese virtuelle Vorwärtsprojektion liefert für jedes der zweiten Materialien Linienintegrale als Ergebnis, die sogenannten Materiallinienintegrale. Diese repräsentieren jeweils den integrierten Materialanteil auf dem Projektionsweg.

**[0014]** Mithilfe der Materiallinienintegrale wird eine Abbildungsfunktion zur Ermittlung der optimierten synthetischen Projektionsdatensätzen generiert. In dieser Abbildungsfunktion stellen die virtuellen Rohdatensätze die Argumente der Funktion dar. Die Abbildungsfunktion wirkt somit als Rekonstruktionsmatrix, unter deren Verwendung aus den virtuellen Rohdatensätzen optimierte synthetische Projektionsdatensätze erzeugt werden.

**[0015]** Dem liegt folgende Überlegung zugrunde. Bei einem vorgegebenen Spektrum lässt sich ein Messwert als eine erste Funktion in Form einer (Linear-)Kombination der Materiallinienintegrale für die jeweiligen Materialien bestimmen. Die Materiallinienintegrale sind also Komponenten der ersten Funktion. Wegen ihrer strengen Monotonie kann die erste Funktion beispielsweise in ihrer ersten Komponente invertiert werden (Die erste Komponente ist hierbei

dem ersten Material zugeordnet). Das heißt, das Materiallinienintegral des ersten Materials lässt sich als Inversfunktion aus der ersten Funktion und den übrigen Materiallinienintegralen darstellen. Dabei ist die erste Funktion aber eben der Messwert. Die Inversfunktion (das Materiallinienintegral des ersten Materials) ist also abhängig vom Messwert und den übrigen Materiallinienintegralen.

**[0016]** Die Abbildungsfunktionen erzeugen jeweils einen synthetische Projektionsdatensatz, also synthetische Messwerte. Auch für sie gelten also die oben beschriebenen Konstruktionsvorschriften. Dabei wird die erste Komponente in Form der oben beschriebenen Inversfunktion ausgedrückt, also in Abhängigkeit von den virtuellen Rohdatensätzen als Messwerten und in Abhängigkeit von den übrigen Materiallinienintegralen. Die übrigen Komponenten ergeben sich aus den übrigen Materiallinienintegralen. Als Koeffizienten der einzelnen Komponenten dienen die dem jeweiligen Material zugeordneten Absorptionskoeffizienten.

**[0017]** Aus den derart aufbereiteten synthetischen Projektionsdaten wird abschließend mittels eines gängigen Rekonstruktionsverfahrens wie der gefilterten Rückprojektion zumindest ein Bilddatensatz, bevorzugt jedoch für jedes Material ein Bilddatensatz, rekonstruiert.

**[0018]** Anders als im Stand der Technik werden die Daten erfindungsgemäß also nicht bereits zu Beginn auf einen pseudomonoenergetischen Datensatz reduziert, sondern die Anzahl  $M$  der virtuellen Rohdatensätzen bzw. der synthetischen Projektionsdatensätze bleibt gleich und jeder Satz virtueller Rohdaten wird individuell mittels seiner eigenen Abbildungsfunktion optimiert monochromatisiert.

**[0019]** Eine erfindungsgemäße Bildrekonstruktionseinrichtung umfasst eine Dateneingangsschnittstelle, eine Datenausgangsschnittstelle und ist so ausgebildet, dass sie für eine erste Mehrzahl von über die Dateneingangsschnittstelle empfangenen Spektral-Rohdatensätzen ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Bildrekonstruktion durchführt. Dafür umfasst sie vorzugsweise zusätzlich ein Kombinationsmodul und ein Optimierungsmodul. Bevorzugt weist die Bildrekonstruktionseinrichtung zusätzlich eine Eingabeschnittstelle auf. Die Eingabeschnittstelle empfängt Eingabewerte als Parameter für das erfindungsgemäße Verfahren. Über diese kann beispielsweise das auszuwählende Material, die Art und Weise der Kombination der Spektralen-Rohdatensätze zu virtuellen Rohdatensätzen, die Anzahl der Iterationsschritte oder dergleichen festgelegt werden.

**[0020]** Das erfindungsgemäße Computertomographiesystem umfasst zumindest eine Quelle-Detektor-Anordnung, die eine Röntgenstrahlungsquelle und

einen Detektor aufweist und so ausgebildet ist, dass der Detektor von der Röntgenstrahlungsquelle emittierte Strahlung in unterschiedlichen originären spektralen Kanälen als Spektral-Rohdatensätze erfasst. Außerdem weist das Computertomographiesystem eine erfindungsgemäße Bildrekonstruktionseinrichtung auf. Bevorzugt werden von einer Rohdatenausgangsschnittstelle der Quelle-Detektor-Anordnung die Spektral-Rohdatensätze zur Bildrekonstruktionseinrichtung übertragen, deren Dateneingangsschnittstelle mit der Rohdatenausgangsschnittstelle zum Empfang der Spektral-Rohdatensätze verbunden ist.

**[0021]** Die wesentlichen Komponenten, insbesondere das Kombinationsmodul und das Optimierungsmodul, der erfindungsgemäßen Bildrekonstruktionseinrichtung können zum überwiegenden Teil in Form von Softwarekomponenten ausgebildet sein. Grundsätzlich können diese Komponenten aber auch zum Teil, insbesondere wenn es um besonders schnelle Berechnungen geht, in Form von softwareunterstützter Hardware, beispielsweise FPGAs oder dergleichen, realisiert sein. Ebenso können die benötigten Schnittstellen, beispielsweise wenn es nur um eine Übernahme von Daten aus anderen Softwarekomponenten geht, als Softwareschnittstellen ausgebildet sein. Sie können aber auch als hardwaremäßig aufgebaute Schnittstellen ausgebildet sein, die durch geeignete Software angesteuert werden.

**[0022]** Insbesondere kann die erfindungsgemäße Bildrekonstruktionseinrichtung Teil eines Benutzerterminals bzw. einer Steuereinrichtung eines Computertomographiesystems sein.

**[0023]** Eine weitgehend softwaremäßige Realisierung hat den Vorteil, dass auch schon bisher verwendete Bildrekonstruktionseinrichtungen auf einfache Weise durch ein Software-Update nachgerüstet werden können, um auf die erfindungsgemäße Weise zu arbeiten. Insofern wird die Aufgabe auch durch ein entsprechendes Computerprogrammprodukt mit einem Computerprogramm gelöst, welches direkt in eine Speichereinrichtung einer Bildrekonstruktionseinrichtung eines Computertomographiesystems ladbar ist, mit Programmabschnitten, um alle Schritte des erfindungsgemäßen Verfahrens auszuführen, wenn das Programm in der Bildrekonstruktionseinrichtung ausgeführt wird. Ein solches Computerprogrammprodukt kann neben dem Computerprogramm gegebenenfalls zusätzliche Bestandteile wie z. B. eine Dokumentation und/oder zusätzliche Komponenten auch Hardware-Komponenten, wie z. B. Hardware-Schlüssel (Dongles etc.) zur Nutzung der Software, umfassen.

**[0024]** Zum Transport zur Bildrekonstruktionseinrichtung und/oder zur Speicherung an oder in der Bildrekonstruktionseinrichtung kann ein computerles-

bares Medium, beispielsweise ein Memorystick, eine Festplatte oder ein sonstiger transportabler oder fest eingebauter Datenträger dienen, auf welchem die von einer Rechneinheit der Bildrekonstruktionseinrichtung einlesbaren und ausführbaren Programmabschnitte des Computerprogramms gespeichert sind. Die Rechneinheit kann z. B. hierzu einen oder mehrere zusammenarbeitende Mikroprozessoren oder dergleichen aufweisen.

**[0025]** 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 und insbesondere auch einzelne Merkmale verschiedener Ausführungsbeispiele bzw. Varianten zu neuen Ausführungsbeispielen bzw. Varianten kombiniert werden können.

**[0026]** In einem vorteilhaften Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens werden die Spektral-Rohdatensätze so zu den virtuellen Rohdatensätzen kombiniert, dass die virtuellen Rohdatensätze definierte mittlere Energien aufweisen. Dass die virtuellen Rohdatensätze definierte mittlere Energien aufweisen, bedeutet, dass sie virtuelle Messwerte mit der definierten mittleren Energie umfassen, wie im Folgenden erläutert wird. Allgemein beinhalten Rohdatensätze einen Satz von Projektionsdaten, die sich wiederum pixelweise aus einer Vielzahl von Messwerten zusammensetzen. Die in Abhängigkeit von ihrer Energie detektierten realen Messwerte der Spektral-Rohdatensätze, werden bei der Kombination der Spektral-Rohdatensätze pixelweise so kombiniert, dass die resultierenden virtuellen Messwerte eine definierte mittlere Energie aufweisen. Die definierten mittleren Energien können dabei von einem Benutzer vorgegeben oder in Abhängigkeit von spezifischen Eigenschaften der Materialien wie Absorptionskoeffizienten etc. festgelegt sein.

**[0027]** In einem weiteren vorteilhaften Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens werden die Spektralrohdatensätze so zu den virtuellen Rohdatensätzen kombiniert, dass die virtuellen Rohdatensätze definierte effektive Energien aufweisen. Die Kombination erfolgt dabei wie oben bereits beschrieben, allerdings mit effektiven Energien anstelle von mittleren Energien. Das effektive Spektrum ist insbesondere bei quantenzählenden Detektoren abhängig vom tatsächlich durch den Detektor erfassten Signal. Das heißt, das effektive Spektrum verändert sich signalabhängig explizit auch mit dem in den Strahlengang eingebrachten Untersuchungsobjekt. Diese Änderung wird entsprechend bei der Kombination der Spektral-Rohdatensätze zu virtuellen Rohdatensät-

zen mit definierten effektiven Energien berücksichtigt.

**[0028]** In einem weiteren vorteilhaften Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens werden die Spektralrohdatensätze so zu den virtuellen Rohdatensätzen kombiniert, dass ein virtueller Rohdatensatz identisch einem Spektralrohdatensatz ist und die statistische Korrelation der übrigen virtuellen Rohdatensätze unter einem bestimmten Grenzwert liegt, vorzugsweise minimiert ist. Hierdurch werden die verfügbaren Quanteninformationen der vom Detektor erfassten Spektral-Rohdaten optimiert genutzt, d. h. das in den Daten enthaltene Rauschen wird minimiert.

**[0029]** Dabei ist auch eine Kombination der Verfahren möglich. Bei einer solchen Kombination dieses Ausführungsbeispiels mit den vorhergehenden kann in einem gewissen Bereich abgewogen werden, ob für die virtuellen Rohdatensätze hauptsächlich das Rauschen minimiert oder bestimmte mittlere bzw. effektive Energien bestmöglich erhalten werden sollen. Das Verhältnis zwischen den Optionen kann beispielsweise über eine Eingabe eines Benutzers festgelegt werden.

**[0030]** Bevorzugt wird bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Bildrekonstruktion Wasser als erstes Material gewählt. Dies ist vorteilhaft, da Wasser in den spektralen Daten bei etablierten computertomographischen Akquisitionsverfahren schon im Wesentlichen linear als Funktion seiner durchstrahlten Länge in den Linienintegralen übertragen wird.

**[0031]** Bei einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung werden die materialspezifischen Karten in Schritt d) unter Verwendung einer Schwellenfunktion aus den Hilfsbilddatensätzen erzeugt. Als Funktionsargumente dienen hier die Bildwerte (typischerweise HU-Werte) der Hilfsbilddatensätze. Die Schwellenfunktion ist bevorzugt eine Funktion, die bis zu einem Schwellenwert Funktionswerte identisch null annimmt und darüber einen linearen Verlauf hat. Der Schwellenwert wird dabei auf einen Wert gelegt, der größer ist als die Werte, die typischerweise vom ersten Material in den Hilfsbilddatensätzen eingenommen werden. Dadurch können solche Bereiche der Hilfsbilddatensätze vernachlässigt, d. h. auf null gesetzt, werden, die hauptsächlich das erste Material beinhalten. Demgegenüber werden die übrigen Bereiche wie gewohnt dargestellt.

**[0032]** Bei einer vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bildrekonstruktion werden für die zweiten Materialien als materialspezifische Karte eine Elektronendichtekarte, eine Kernladungszahlkarte und/oder eine Karte von Schwächungskoeffizienten verwendet werden.

**[0033]** Die unterschiedlichen materialspezifischen Karten basieren dabei auf den unterschiedlichen Wechselwirkungseffekten der Röntgenstrahlung mit der Materie. Die Elektronendichtekarte basiert im Wesentlichen auf dem Compton-Effekt, für den die Wechselwirkung in den meisten Materialien proportional zu deren Massendichte ist. Demgegenüber basiert die Kernladungszahlkarte im Wesentlichen auf dem photoelektrischen Effekt, der Aufschluss über die elementare Materialzusammensetzung des Untersuchungsobjekts gibt. Insbesondere ist es für das erfindungsgemäße Verfahren auch möglich, materialspezifische Karten zu erstellen, die sensitiv für Materialien mit besonderen Wechselwerkeigenschaften mit der Röntgenstrahlung sind. Ein Beispiel dafür ist das Kontrastmittel Gadolinium, das eine K-Kante im Bereich der üblicherweise verwendeten Röntgenstrahlung aufweist und dadurch spektral gut von anderen Materialien zu separieren ist.

**[0034]** Der Absorptionskoeffizient ergibt sich aus der Summe der einzelnen Wechselwirkungen (photoelektrischen Effekt, Compton-Effekt und evtl. Paarbildung) und lässt daher eine verallgemeinernde Betrachtung zu. Beispielsweise ist im Bereich einer Läsion der Absorptionskoeffizient regelmäßig erhöht. Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht Unterscheidung zwischen Kernladung bzw. Elektronendichte, d. h. es kann beispielsweise auf Basis der materialspezifischen Karte zwischen einer Kalzifikation oder einem Knoten unterschieden werden.

**[0035]** In einer vorteilhaften iterativen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bildrekonstruktion werden die Schritte b) bis f) eine Anzahl von Durchläufen wiederholt und in zumindest einem der Schritte die synthetischen Projektionsdatensätze eines Durchlaufs im folgenden Durchlauf als virtuelle Rohdatensätze verwendet. Die Anzahl der Durchläufe kann dabei zum Beispiel vordefiniert sein, von einem Benutzer bestimmt werden oder sich nach einem Abbruchkriterium wie einem Mindestwert an Kontrast, Signal-zu-Rausch-Verhältnis oder dergleichen richten. Gegebenenfalls können die synthetischen Projektionsdatensätze analog zum Schritt a) des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bildrekonstruktion vor einem nächsten iterativen Durchlauf neu zu virtuellen Rohdatensätzen kombiniert werden.

**[0036]** Mittels dieses iterativen Verfahrens werden also die im vorherigen Durchlauf aufbereiteten synthetischen Projektionsdaten wieder als Eingangswerte, also als virtuelle Rohdatensätze, für eine weitere Optimierung verwendet. Ein Datensatz eines virtuellen spektralen Kanals wird somit immer weiter monochromatisiert. Dabei geht die jeweilige Abbildungsfunktion mit steigender Anzahl der Durchläufe immer weiter in eine identische Abbildung über, d. h. die Datensätze sind nach einer gewissen Anzahl von Durch-

läufen so monochromatisch, dass sie bei weiteren Durchläufen kaum noch monochromatischer werden.

**[0037]** In einer vorteilhaften Weiterbildung des iterativen Verfahrens werden die synthetischen Projektionsdatensätze eines Durchlaufs im folgenden Durchlauf als virtuelle Rohdatensätze im Schritt b) verwendet und im Schritt f) die ursprünglichen virtuellen Rohdatensätze verwendet. Anders als bei der ersten Variante werden hier als Funktionsargumente der jeweiligen Abbildungsfunktion nicht die synthetischen Projektionsdatensätze des vorigen Durchlaufs verwendet, sondern immer die ursprünglichen virtuellen Rohdatensätze, die zu Beginn des Verfahrens, d. h. im ersten Durchlauf, ermittelt wurden. Bei dieser Variante wird also lediglich die jeweilige Abbildungsfunktion iterativ verbessert. Mit steigender Anzahl der Durchläufe wird die Änderung der jeweiligen Abbildungsfunktion immer geringer, sie konvergiert also gegen eine Grenzfunktion.

**[0038]** Bei einer vorteilhaften Weiterbildung eines iterativen Verfahrens zur Bildrekonstruktion werden die synthetischen Projektionsdatensätze so gewichtet, dass sie statistisch möglichst schwach korreliert sind, bevor sie im folgenden Durchlauf als virtuelle Rohdatensätze verwendet werden. Dies kann, wie anhand der Ausführungsbeispiele des Verfahrens zur Bildrekonstruktion bereits erläutert, über eine Linearkombination der jeweiligen Datensätze erfolgen.

**[0039]** 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. Die Figuren sind in der Regel nicht maßstäblich.

**[0040]** Es zeigen:

**[0041]** Fig. 1 eine grob schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Computertomographiesystems,

**[0042]** Fig. 2 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Bildrekonstruktionseinrichtung mit einem Blockschema eines Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bildrekonstruktion,

**[0043]** Fig. 3 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen ersten iterativen Verfahrens zur Bildrekonstruktion und

**[0044]** Fig. 4 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen zweiten iterativen Verfahrens zur Bildrekonstruktion.

**[0045]** In Fig. 1 ist beispielhaft und grob schematisch ein erfindungsgemäßes Computertomographie-

system **1** gezeigt, welches ein Benutzerterminal **25** und ein Computertomographiegerät **2** umfasst. Das Computertomographiesystem **1** ist zur Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bildrekonstruktion ausgebildet. Das Computertomographiegerät **2** umfasst einen Patiententisch **12** zur Lagerung eines Patienten **1** als Untersuchungsobjekt, welcher entlang einer Systemachse **16** verstellbar ist. Die Systemachse **16** wird im Folgenden auch als z-Achse bezeichnet, die mit dem Patienten **10** in das Messfeld verstellbar ist. Es umfasst ferner eine Gantry **3** mit einer um die Systemachse **16** drehbar gelagerten Quelle-Detektor-Anordnung **4, 5**. Die Quelle-Detektor-Anordnung **4, 5** weist eine Röntgenstrahlungsquelle **5** und einen quantenzählenden Detektor **4** auf, die einander gegenüberliegend so ausgerichtet sind, dass im Betrieb eine von dem Fokus der Röntgenstrahlungsquelle **5** ausgehende Röntgenstrahlung auf den Detektor **4** trifft. Der Detektor **4** ist zur orts aufgelösten Erfassung der Röntgenstrahlung in einzelne Pixel **17** strukturiert, die zu mehreren Detektorzeilen angeordnet sind. Derzeit werden Detektoren **4** eingesetzt, die über insgesamt **64** oder mehr Zeilen verfügen und eine Ortsauflösung im Submillimeterbereich aufweisen. Zu jeder Projektion erzeugt der Detektor **4** einen Satz von Projektionsdaten. Die Projektionsdaten repräsentieren dabei die Schwächungswerte sämtlicher Pixel **17** einer durch den Patienten **1** geschwächten Röntgenstrahlung. Sie werden je nach ihrer Energie in separaten Bins der Pixel **17** des Detektors **4** erfasst. Jeweils die Anteile der Projektionsdaten sämtlicher Projektionen, die mit gleicher Energie in entsprechenden Bins erfasst wurden, sind hier ein Spektral-Rohdatensatz  $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$ . Die Spektral-Rohdatensätze  $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$  werden an das Benutzerterminal **25** mit einer Bildrekonstruktionseinrichtung **13** weitergeleitet und mittels eines erfindungsgemäßen Verfahrens zu einem resultierenden Bild verrechnet, welches z. B. auf einer Anzeigeeinheit **19** darstellbar ist und/oder welches in einem Speicher hinterlegt und/oder an andere Systeme versandt werden kann. Dafür umfasst die Bildrekonstruktionseinrichtung **13** ein Kombinationsmodul **14** und ein Optimierungsmodul **15**. Das Benutzerterminal **25** umfasst des Weiteren eine Tastatur **26** als Eingabegerät, mit dem ein Bediener gegebenenfalls Werte für Parameter bei der Bildrekonstruktion einstellen kann.

**[0046]** Ein solches Computertomographiegerät **2** wird bekanntermaßen zur 3D-Bildrekonstruktion eingesetzt. Zur Aufnahme eines Bildes von einem Untersuchungsgebiet (Region of Interest) werden bei Rotation der Quelle-Detektor-Anordnung **4, 5** Projektionsdaten aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Projektionsrichtungen in energieaufgelöst in Bins als Spektral-Rohdatensätze  $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$  erfasst. Im Fall einer Spiralabtastung erfolgt während einer Rotation der Quelle-Detektor-Anordnung **4, 5** beispielsweise gleichzeitig eine kontinuierliche Verstel-

lung des Patiententisches **12** in Richtung der Systemachse **16**. Die Röntgenstrahlungsquelle **5** und der Detektor **4** bewegen sich bei dieser Art der Abtastung somit auf einer Helixbahn um den Patienten **10**.

**[0047]** Fig. 2 zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Bildrekonstruktionseinrichtung **13** mit einem Blockschema eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bildrekonstruktion. Die Bildrekonstruktionseinrichtung **13** weist ein Kombinationsmodul **14** und ein Optimierungsmodul **15** sowie eine Eingangsschnittstelle **20** und eine Ausgangsschnittstelle **21** auf. Die Eingangsschnittstelle **20** empfängt eine Anzahl von  $N$  vom Computertomographiegerät **2** akquirierten Spektral-Rohdatensätzen  $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$  und leitet sie an das Kombinationsmodul **14** weiter. Das Kombinationsmodul **14** führt eine Linearkombination  $K$  der Spektral-Rohdatensätze  $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$  durch und erzeugt dabei eine Anzahl von  $M$  virtuellen Rohdatensätzen  $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ . Ab der Erzeugung der virtuellen Rohdatensätzen  $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$  bezeichnen die Indices  $1, 2, \dots, M$  virtuelle spektrale Kanäle. Sie sind also dem entsprechend kombinierten Spektrum sowie später auch einem Material zugeordnet.

**[0048]** Bei der Linearkombination  $K$  werden die Spektral-Rohdatensätze  $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$  für jeweils einen virtuellen Rohdatensatz  $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$  mit Koeffizienten, also skalaren Faktoren, multipliziert und folgend addiert, sodass sie nach Wahl des Bedieners definierte mittlere bzw. effektive Energien aufweisen und/oder statistisch möglichst schwach korreliert sind. Die Anzahl  $M$  ist bevorzugt 3, besonders bevorzugt 2, und damit geringer als die Anzahl  $N$  der Spektral-Rohdatensätze  $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$ , da der Detektor **4** das Spektrum der Röntgenstrahlung meist in mehr Energieschwellen auflöst, als derzeit sinnvoll für die folgende materialabhängige Optimierung der Rekonstruktion genutzt werden können.

**[0049]** Das Optimierungsmodul **15** weist eine erste Eingangsschnittstelle **22** und eine zweite Eingangsschnittstelle **23** sowie eine Ausgangsschnittstelle **24** auf. Die virtuellen Rohdatensätze  $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$  werden vom Kombinationsmodul **14** sowohl an die erste Eingangsschnittstelle **22** zur Erstellung von optimierenden Abbildungsfunktionen  $G_1, G_2, \dots, G_M$  als auch an die zweite Eingangsschnittstelle **23** als Argumente für die optimierenden Abbildungsfunktionen  $G_1, G_2, \dots, G_M$  übertragen.

**[0050]** Die von der ersten Eingangsschnittstelle **22** empfangenen virtuellen Rohdatensätze  $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$  werden jeweils mittels einer hilfsweisen gefilterten Rückprojektion  $R'$  zu Hilfsbilddatensätzen  $HB_1, HB_2, \dots, HB_M$  rekonstruiert. Es folgt eine weitere, optionale Linearkombination  $K'$  der Hilfsbilddatensätze  $HB_1, HB_2, \dots, HB_M$  zu neu gewichteten Hilfsbilddatensätzen, die einem Material zugeordnet und beispiels-

weise wieder statisch möglichst schwach korreliert sind. Einer der Hilfsbilddatensätze  $HB_1$  ist dem Material „Wasser“ zugeordnet, das (entsprechend Schritt c) des zuvor beschriebenen Verfahrens) ausgewählt wird. Aus den übrigen  $M - 1$  Hilfsbilddatensätze  $HB_2, HB_3, \dots, HB_M$  werden jeweils voxelweise mittels einer Schwellenfunktion  $F$  materialspezifische Karten  $MK_2, MK_3, \dots, MK_M$  berechnet. Diese bilden im Wesentlichen die lokalen Konzentrationen der jeweiligen Materialien ab, können aber auch eine Elektronendichtekarte oder eine Kernladungskarte darstellen.

**[0051]** Folgend (entsprechend Schritt e) des o.g. Verfahrens) werden mittels einer virtuellen Vorwärtsprojektion  $P$  unter der gleichen Geometrie wie bei der Akquisition der ursprünglichen Daten aus den materialspezifischen Karten  $MK_2, MK_3, \dots, MK_M$  jeweils Materiallinienintegrale  $L_2, \dots, L_M$  für jedes Material gewonnen. Folgend werden  $M$  optimierende Abbildungsfunktionen  $G_1, G_2, \dots, G_M$  im Wesentlichen durch eine Linearkombination aus mit den Absorptionskoeffizienten  $\mu_2, \mu_3, \dots, \mu_M$  gewichteten Materiallinienintegralen  $L_2, \dots, L_M$  erzeugt. Zusätzlich dazu wird die erste Komponente der jeweiligen Abbildungsfunktion  $G_j$  mit  $j = 1, \dots, M$  die dem ausgewählten Material zugeordnet ist, als Funktion  $h_j$  von den Materiallinienintegralen  $L_2, \dots, L_M$ , dem Absorptionskoeffizienten  $\mu_{1j}$  des ausgewählten Materials und dem dem jeweiligen virtuellen spektralen Kanal  $j = 1, \dots, M$  zugeordneten virtuellen Rohdatensatz  $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$  als Argument wie folgt gebildet:

$$G_j(VD_j, L_2, \dots, L_M) = h_j(VD_j; L_2, \dots, L_M)\mu_{1j} + L_2\mu_{2j} + L_3\mu_{3j} + \dots$$

**[0052]** Mit den optimierenden Abbildungsfunktionen  $G_1, G_2, \dots, G_M$  werden (entsprechend Schritt f) des o.g. Verfahrens) aus den virtuellen Rohdatensatz  $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$  als Argumenten jeweils optimierte synthetische Projektionsdaten  $P_1, P_2, \dots, P_M$  erzeugt. Diese verlassen über die Ausgangsschnittstelle **24** das Optimierungsmodul **15**.

**[0053]** Im folgenden Schritt (entsprechend Schritt g) des o.g. Verfahrens) werden die synthetischen Projektionsdaten  $P_1, P_2, \dots, P_M$  jeweils mittels gefilterter Rückprojektion  $R$  zu Bilddatensätzen  $B_1, B_2, \dots, B_M$  rekonstruiert. Diese werden an die Ausgangsschnittstelle **21** übermittelt und könne dann beispielsweise auf der Anzeigeeinheit **19** des Benutzerterminals **25** des Computertomographiesystems **1** angezeigt werden oder auch zu beliebigen anderen Anzeigeeinheiten und/oder Speichereinrichtungen weiterübertragen werden.

**[0054]** In der Regel weisen alle Daten des beschriebenen Verfahrens, also von den Spektral-Rohdaten  $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$  bis zu den Bilddaten  $B_1, B_2, \dots, B_M$  und insbesondere auch die Abbildungsfunktionen  $G_j$ , eine Abhängigkeit von Parametern des Strahls auf.

Parameter des Strahls sind dabei beispielsweise Projektionswinkel, Kanalnummer, Detektorzeile und dergleichen. Dieser Zusammenhang besteht z. B., weil sich das Röntgenspektrum aufgrund eines Formfilters als Funktion des Abstands vom Drehzentrum ändert. Unabhängig von den Parametern des Strahls bleiben selbstverständlich Größen wie die Absorptionskoeffizienten  $\mu$ .

**[0055]** In Fig. 3 ist beispielhaft eine schematische Darstellung eine erste Variante eines iterativen Verfahrens zur Bildrekonstruktion dargestellt. Die virtuellen Rohdatensätze  $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$  sind in einem vorbereitenden Schritt bereits mittels des Kombinationsmoduls **14** aus den Spektral-Rohdatensätzen  $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$  kombiniert worden (hier nicht dargestellt). Aus ihnen werden in einer beliebigen Anzahl von Optimierungsdurchläufen I, II, III, ... optimierte synthetische Projektionsdatensätze  $P_1, P_2, \dots, P_M$  erzeugt. Dafür wird ein Optimierungsmodul, welches besonders bevorzugt als Software-Modul ausgestaltet ist, entsprechend mehrfach durchlaufen. Hier ist anschaulich als alternative Ausführung eine entsprechende Anzahl von Optimierungsmodulen **15** hintereinandergeschaltet dargestellt. Das erste Optimierungsmodul **15** empfängt die virtuellen Rohdatensätze  $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$  an beiden Eingangsschnittstellen **22, 23**. Folgend berechnet es synthetische Projektionsdatensätze  $P_1, P_2, \dots, P_M$  und leitet diese über seine Ausgangsschnittstelle **24** an beide Eingangsschnittstellen **22, 23** des dahinter angeordneten Optimierungsmoduls **15** weiter. Dieser Vorgang wird eine beliebige Anzahl von Durchläufen wiederholt. Schließlich, d. h. sobald der erwünschte Grad an Optimierung erreicht ist, werden die optimierten synthetischen Projektionsdatensätze  $P_1, P_2, \dots, P_M$  ausgegeben und folgend wie bereits geschildert zu Bilddatensätzen  $B_1, B_2, \dots, B_M$  rekonstruiert (hier nicht dargestellt).

**[0056]** Fig. 4 zeigt beispielhaft und schematisch eine zweite Variante eines iterativen Verfahrens zur Bildrekonstruktion. Die Fig. 4 ist dabei ähnlich zu Fig. 3. Der Unterschied besteht darin, dass lediglich die erste Eingangsschnittstelle **22** des jeweiligen Optimierungsmoduls **15** die optimierten synthetischen Projektionsdatensätze  $P_1, P_2, \dots, P_M$  aus dem vorigen Optimierungsdurchlauf I', II', III', ... als virtuelle Rohdatensätze  $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$  empfängt. Die zweite Eingangsschnittstelle **23** empfängt demgegenüber immer, d. h. in jedem Durchlauf, die ursprünglichen virtuellen Rohdatensätze  $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ .

**[0057]** Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht eine flexible Nutzung der Mehrspektren-Information zur Reduktion von Strahlauhfärtungsartefakten bzw. zur Berechnung von monochromatischen Bildern oder Basismaterialbildern. Es vereint also die Vorteile von bild- und rohdatenbasierten Verfahren und vermeidet die jeweiligen Nachteile.

**[0058]** Es wird abschließend noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich bei den vorhergehend detailliert beschriebenen Vorrichtungen und Verfahren lediglich um Ausführungsbeispiele handelt, welche vom Fachmann in verschiedenster Weise modifiziert werden können, ohne den Bereich der Erfindung zu verlassen. So können den Materialien beispielsweise auch synthetische Absorptionskoeffizienten in der Form zugeordnet werden, dass für bestimmte Materialien der Absorptionskoeffizient gleich null gesetzt wird, um dieses Material auszublenden. Weiterhin schließt die Verwendung der unbestimmten Artikel „ein“ bzw. „eine“ nicht aus, dass die betreffenden Merkmale auch mehrfach vorhanden sein können. Ebenso schließen die Begriffe „Einrichtung“, „Modul“ und „Komponente“ nicht aus, dass die betreffende Komponente aus mehreren zusammenwirkenden Teilkomponenten besteht, die gegebenenfalls auch räumlich verteilt sein können.

**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 102005008767 A1 [0003]

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Bildrekonstruktion auf Basis einer ersten Mehrzahl ( $N$ ) von Spektral-Rohdatensätzen ( $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$ ), die jeweils unterschiedlichen Röntgenspektren zugeordnet sind, aufweisend zumindest folgende Schritte:

- a) Kombination ( $K$ ) der Spektral-Rohdatensätze ( $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$ ) zu einer zweiten Mehrzahl ( $M$ ) von virtuellen Rohdatensätzen ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ),
- b) Rekonstruktion ( $R'$ ) jeweils eines Hilfsbilddatensatzes ( $HB_1, HB_2, \dots, HB_M$ ) auf Basis eines virtuellen Rohdatensatzes ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ),
- c) Auswahl eines ersten Materials aus einer Materialgruppe, die eine Mehrzahl ( $M$ ) von Materialien umfasst,
- d) Erzeugung ( $K', F$ ) von materialspezifischen Karten ( $MK_2, MK_3, \dots, MK_M$ ) für eine Anzahl ( $M - 1$ ) von zweiten Materialien der Materialgruppe aus den Hilfsbilddatensätzen ( $HB_1, HB_2, \dots, HB_M$ ),
- e) Ermittlung ( $P$ ) von Materiallinienintegralen ( $L_2, L_3, \dots, L_M$ ) für die zweiten Materialien unter Vorwärtsprojektion der jeweiligen materialspezifischen Karte ( $MK_2, MK_3, \dots, MK_M$ ),
- f) Ermittlung ( $G_1, G_2, \dots, G_M$ ) von synthetischen Projektionsdatensätzen ( $P_1, P_2, \dots, P_M$ ) auf Basis der virtuellen Rohdatensätze ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) und der Materiallinienintegrale ( $L_2, L_3, \dots, L_M$ ) für jedes Material,
- g) Rekonstruktion ( $R$ ) zumindest eines Bilddatensatzes ( $B_1, B_2, \dots, B_M$ ) auf Basis der synthetischen Projektionsdatensätzen ( $P_1, P_2, \dots, P_M$ ) für eine Anzahl der Materialien der Materialgruppe.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Spektral-Rohdatensätze ( $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$ ) so zu den virtuellen Rohdatensätze ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) kombiniert werden, dass die virtuellen Rohdatensätze ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) definierte mittlere Energien aufweisen.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Spektralrohdatensätze ( $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$ ) so zu den virtuellen Rohdatensätze ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) kombiniert werden, dass die virtuellen Rohdatensätze ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) definierte effektive Energien aufweisen.

4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Spektral-Rohdatensätze ( $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$ ) so zu den virtuellen Rohdatensätzen ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) kombiniert werden, dass ein virtueller Rohdatensatz identisch einem Spektral-Rohdatensatz ist und die statistische Korrelation der übrigen virtuellen Rohdatensätze ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) unter einem bestimmten Grenzwert liegt, vorzugsweise minimiert ist.

5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei als erstes Material Wasser gewählt wird.

6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die materialspezifischen Karten unter Verwendung einer Schwellenfunktion aus den Hilfsbilddatensätzen ( $HB_1, HB_2, \dots, HB_M$ ) erzeugt werden.

7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei für die zweiten Materialien als materialspezifische Karte eine Elektronendichtekarte, eine Kernladungszahlkarte und/oder eine Karte von Schwächungskoeffizienten verwendet werden.

8. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Schritte b) bis f) iterativ in mehreren Durchläufen wiederholt werden und in zumindest einem der Schritte die synthetischen Projektionsdatensätze eines Durchlaufs im folgenden Durchlauf als virtuelle Rohdatensätze ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) verwendet werden.

9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei die synthetischen Projektionsdatensätze eines Durchlaufs im folgenden Durchlauf als virtuelle Rohdatensätze ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) im Schritt b) verwendet werden und im Schritt f) die ursprünglichen virtuellen Rohdatensätze ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) verwendet werden.

10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, wobei die synthetischen Projektionsdatensätze so gewichtet werden, dass sie statistisch möglichst schwach korreliert sind, bevor sie im folgenden Durchlauf als virtuelle Rohdatensätze ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) verwendet werden.

11. Bildrekonstruktionseinrichtung (**13**) mit einer Dateneingangsschnittstelle (**20**) sowie einer Datenausgangsschnittstelle (**21**), wobei die Bildrekonstruktionseinrichtung (**13**) so ausgebildet ist, dass sie für eine erste Mehrzahl ( $N$ ) von über die Dateneingangsschnittstelle (**20**) empfangenen Spektral-Rohdatensätzen ( $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$ )

– die Spektral-Rohdatensätze ( $SD_1, SD_2, \dots, SD_N$ ) zu einer zweiten Mehrzahl ( $M$ ) von virtuellen Rohdatensätzen ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) kombiniert,

– jeweils ein Hilfsbilddatensatz ( $HB_1, HB_2, \dots, HB_M$ ) auf Basis eines virtuellen Rohdatensatzes ( $VD_1, VD_2, \dots, VD_M$ ) rekonstruiert, wobei

– ein erstes Material aus einer Materialgruppe ausgewählt wird, die eine Mehrzahl von Materialien umfasst, und die Bildrekonstruktionseinrichtung (**13**)

– materialspezifische Karten ( $MK_2, MK_3, \dots, MK_M$ ) für eine Anzahl von zweiten Materialien der Materialgruppe aus den Hilfsbilddatensätzen ( $HB_1, HB_2, \dots, HB_M$ ) erzeugt,

– Materiallinienintegrale ( $L_2, L_3, \dots, L_M$ ) für die zweiten Materialien unter Vorwärtsprojektion der jeweiligen materialspezifischen Karte ( $MK_2, MK_3, \dots, MK_M$ ) ermittelt,

– synthetische Projektionsdatensätze ( $P_1, P_2, \dots, P_M$ ) auf Basis der virtuellen Rohdatensätze ( $VD_1, VD_2, \dots,$

$VD_M$ ) und der Materiallinienintegrale ( $L_2, L_3, \dots, L_M$ ) für jedes Material ermittelt,

– zumindest einen Bilddatensatz ( $B_1, B_2, \dots, B_M$ ) synthetischen Projektionsdatensätzen ( $P_1, P_2, \dots, P_M$ ) für eine Anzahl der Materialien der Materialgruppe rekonstruiert.

12. Computertomographiesystem (2) mit

– einer Quelle-Detektor-Anordnung (4, 5), die eine Röntgenstrahlungsquelle (5) und einen Detektor (4) umfasst und so ausgebildet ist, dass der Detektor (4) von der Röntgenstrahlungsquelle (5) emittierte Strahlung in unterschiedlichen originären spektralen Kanälen als Spektral-Rohdatensätze erfasst,

– einer Bildrekonstruktionseinrichtung nach Anspruch 11.

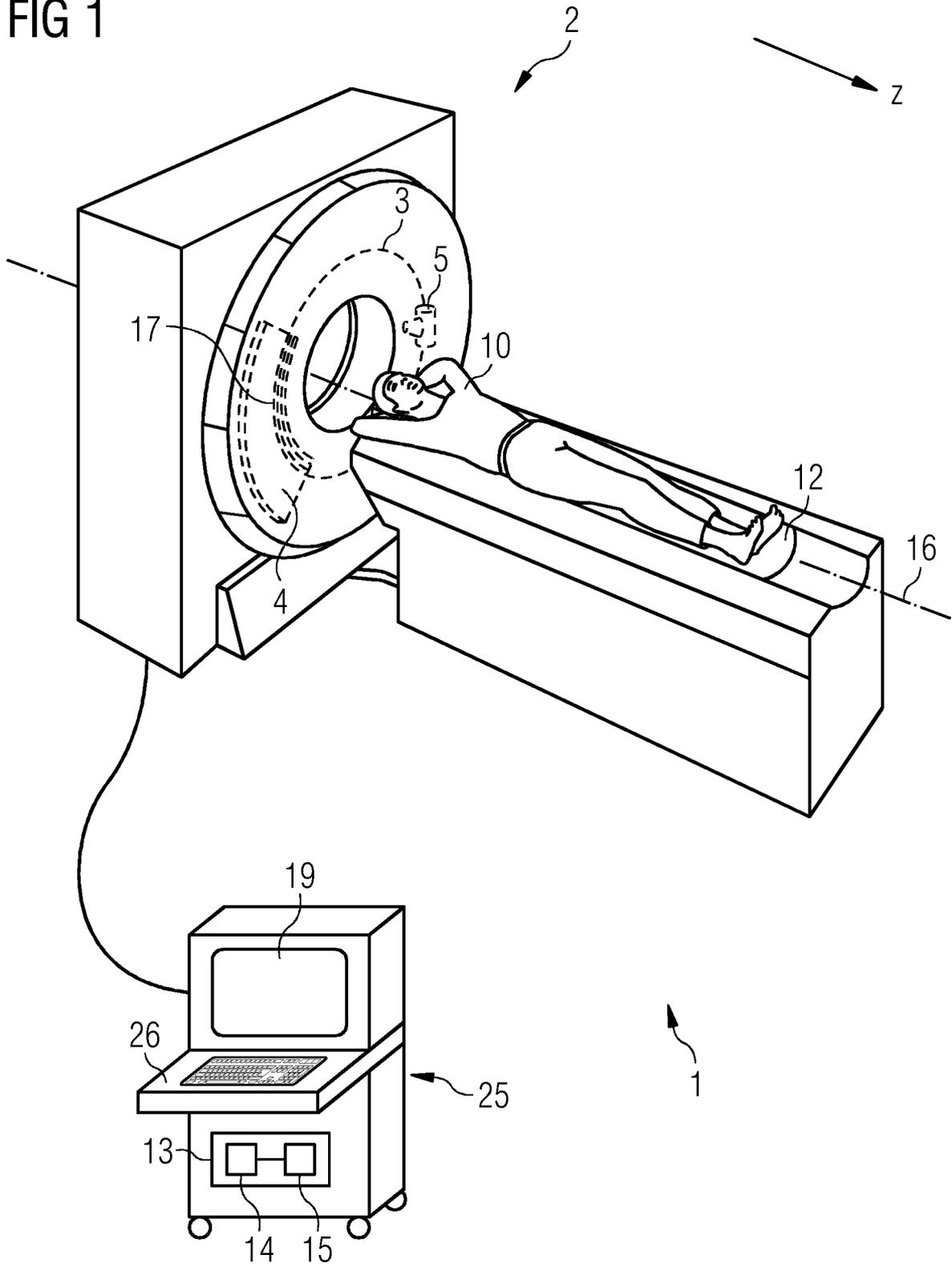
13. Computerprogrammprodukt mit einem Computerprogramm, welches direkt in eine Speichereinrichtung einer Bildrekonstruktionseinrichtung (13) ladbar ist, mit Programmabschnitten, um alle Schritte eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10 auszuführen, wenn das Computerprogramm in der Bildrekonstruktionseinrichtung (13) ausgeführt wird.

14. Computerlesbares Medium, auf welchem von einer Rechneinheit einlesbare und ausführbare Programmabschnitte gespeichert sind, um alle Schritte eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10 auszuführen, wenn die Programmabschnitte von der Rechneinheit ausgeführt werden.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1



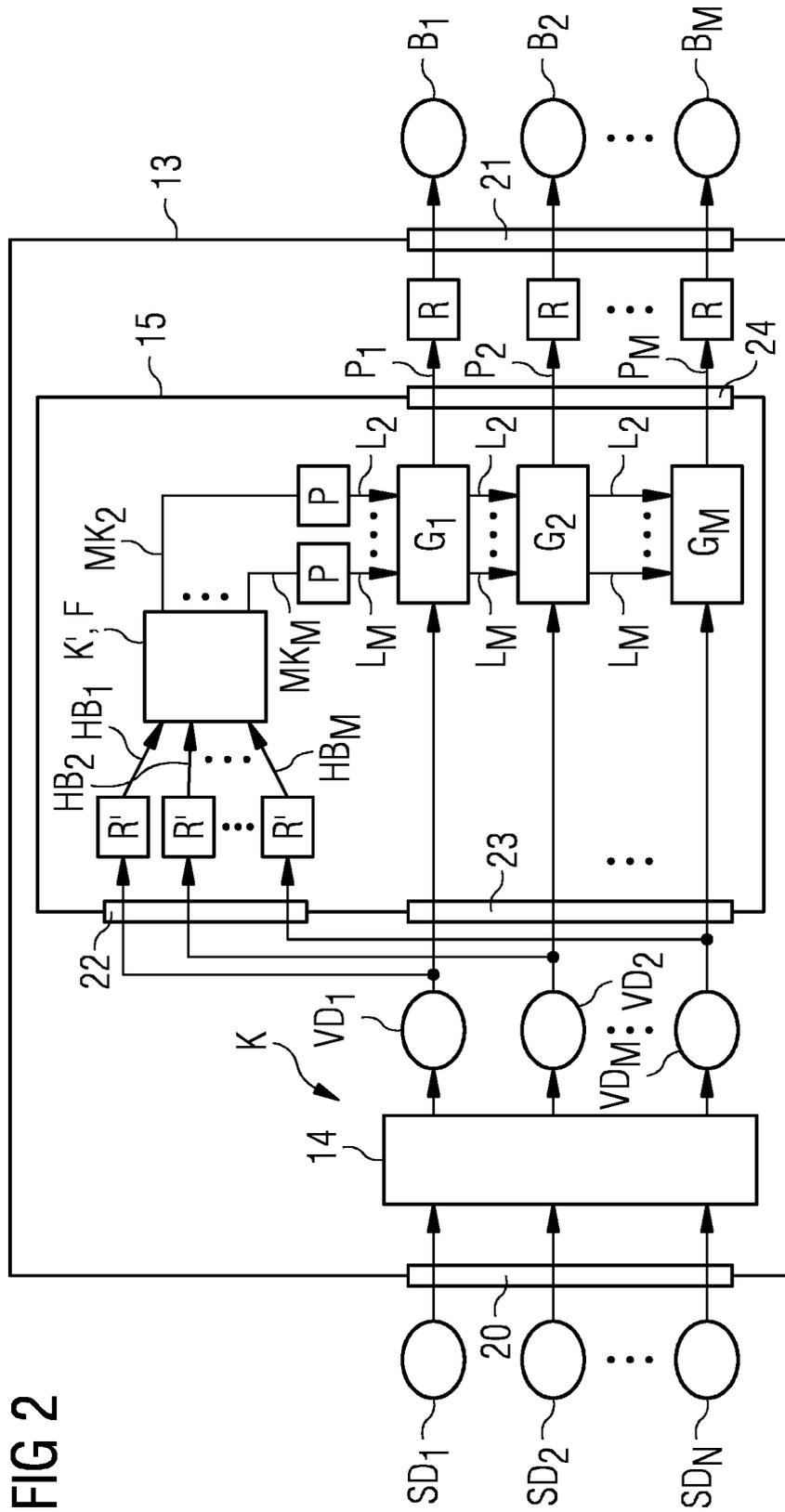


FIG 2

FIG 3

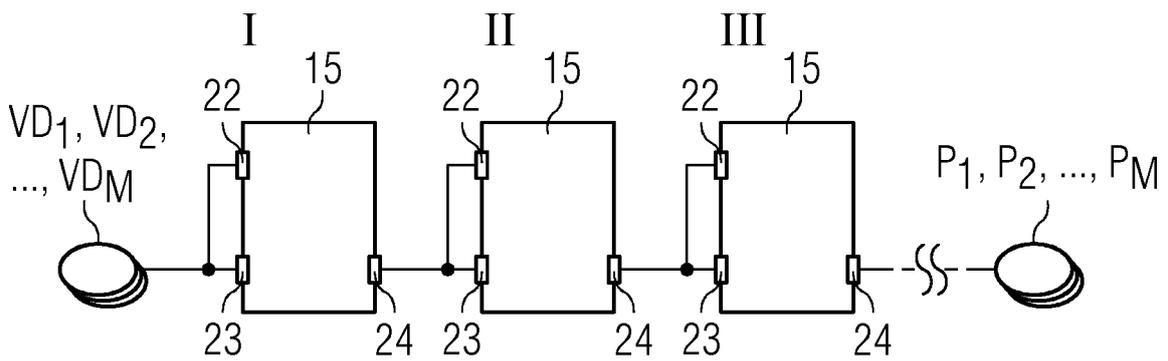


FIG 4

