



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 103 52 013 B4** 2008.02.07

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **103 52 013.9**
 (22) Anmeldetag: **07.11.2003**
 (43) Offenlegungstag: **16.06.2005**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **07.02.2008**

(51) Int Cl.⁸: **G01N 23/06** (2006.01)
A61B 6/00 (2006.01)

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

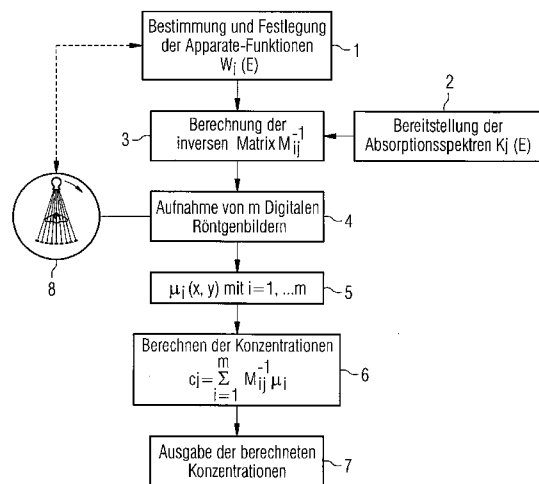
(73) Patentinhaber:
Siemens AG, 80333 München, DE

(72) Erfinder:
Heismann, Björn, Dr., 91052 Erlangen, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:
DE 101 43 131 A1
US 42 47 774 A

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur orts aufgelösten Bestimmung der Elementkonzentrationen in Untersuchungsobjekten**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur orts aufgelösten Bestimmung der Konzentration von n Elementen und/oder Elementkombinationen in einem Untersuchungsobjekt (11), das sich aus diesen Elementen und/oder Elementkombinationen zusammensetzt, bei dem mit einer Röntgenanlage (8) gleichzeitig oder nacheinander mehrere digitale Röntgenbilder zumindest eines Bereiches des Untersuchungsobjektes (11) mit $m \geq n$ unterschiedlichen spektralen Verteilungen der Röntgenstrahlung $S(E)$ und/oder der Detektorempfindlichkeit $D(E)$ unter gleichen geometrischen Bedingungen aufgezeichnet werden, um für jedes in den Röntgenbildern den gleichen Ort repräsentierende Pixel m Schwächungswerte μ_i zu erhalten, und für zumindest ein Pixel aus den jeweils m Schwächungswerten μ_i unter Berücksichtigung bekannter spektraler Absorptionsspektren $\kappa_j(E)$ der n Elemente und/oder Elementkombinationen und der m unterschiedlichen spektralen Verteilungen der Röntgenstrahlung $S(E)$ und/oder der Detektorempfindlichkeit $D(E)$ die Konzentrationen c_j der n Elemente und/oder Elementkombinationen berechnet werden.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zur orts aufgelösten Bestimmung der Konzentrationen von Elementen und/oder Elementkombinationen in einem Untersuchungsobjekt, das sich aus den Elementen und/oder Elementkombinationen zusammensetzt, mit einer Röntgenabsorptionstechnik.

[0002] Das Ergebnis radiographischer Verfahren, wie bspw. der Computertomographie (CT), der Mammographie, der Angiographie, der Röntgen-Inspektionstechnik oder vergleichbarer Verfahren, ist zunächst die Darstellung der Schwächung eines Röntgenstrahls entlang seines Weges von der Röntgenquelle zum Röntgendetektor in einem Projektionsbild. Diese Schwächung wird von den durchstrahlten Materialien entlang des Strahlengangs verursacht, so dass die Schwächung auch als Linienintegral über die Schwächungskoeffizienten aller Volumenelemente (Voxel) entlang des Strahlenweges verstanden werden kann. Insbesondere bei Tomographie-Verfahren, bspw. bei der Röntgencomputertomographie, ist es über Rekonstruktionsverfahren möglich, von den projizierten Schwächungsdaten auf die Schwächungskoeffizienten μ der einzelnen Voxel zurückzurechnen und damit zu einer erheblich sensitiveren Untersuchung als bei reiner Betrachtung von Projektionsbildern zu gelangen.

[0003] Zur Darstellung der Schwächungsverteilung wird statt des Schwächungskoeffizienten in der Regel ein auf den Schwächungskoeffizienten von Wasser normierter Wert, die sog. CT-Zahl, verwendet. Diese berechnet sich aus einem aktuell durch Messung ermittelten Schwächungskoeffizienten μ und dem Referenz-Schwächungskoeffizienten μ_{H_2O} nach folgender Gleichung:

$$C = 1000x \frac{\mu - \mu_{H_2O}}{\mu_{H_2O}} [HU]$$

mit der CT-Zahl C in der Einheit Hounsfield [HU]. Für Wasser ergibt sich ein Wert $C_{H_2O} = 0$ HU und für Luft ein Wert $C_L = -1000$ HU. Da beide Darstellungen ineinander transformierbar bzw. äquivalent sind, bezeichnet im Folgenden der allgemein gewählte Begriff Schwächungswert oder Schwächungswertkoeffizient sowohl den Schwächungskoeffizienten μ als auch den CT-Wert.

[0004] Aus dem Schwächungswert einer Röntgenaufnahme kann jedoch nicht auf die Materialzusammensetzung eines Untersuchungsobjekts geschlossen werden, da die Röntgenabsorption sowohl von der effektiven Ordnungszahl des Materials als auch von der Materialdichte bestimmt wird. Materialien bzw. Gewebe unterschiedlicher chemischer wie physikalischer Zusammensetzung können daher im Röntgenbild identische Schwächungswerte aufweisen.

[0005] Zur Erhöhung der Aussagekraft eines auf den lokalen Schwächungskoeffizienten basierenden Röntgenbildes ist es daher bspw. aus der US 4 247 774 A bekannt, voneinander verschiedene Röntgenspektren oder Röntgenquantenenergien zur Erzeugung eines Röntgenbildes einzusetzen. Dieses im Bereich der Computertomographie eingesetzte Verfahren, das allgemein auch als Zwei-Spektren-CT bezeichnet wird, nutzt aus, dass Materialien höherer Ordnungszahl niederenergetische Röntgenstrahlung deutlich stärker absorbieren als Materialien niedriger Ordnungszahl. Bei höheren Röntgenstrahlenergien gleichen sich dagegen die Schwächungswerte an und sind vorwiegend eine Funktion der Materialdichte. Durch Berechnung der Unterschiede in den bei unterschiedlichen Röntgenröhrenspannungen aufgenommenen Röntgenbildern können daher Zusatzinformationen über die den einzelnen Bildbereichen zugrundeliegenden Materialien gewonnen werden.

[0006] Noch spezifischere Aussagen werden erhalten, wenn zusätzlich die Methode der sog. Basismaterialzerlegung bei Röntgenaufnahmen angewendet wird. Bei diesem Verfahren werden die Röntgenschwächungswerte eines Untersuchungsobjekts mit Röntgenstrahlen niedriger und höherer Energie gemessen und die erhaltenen Werte mit den entsprechenden Referenzwerten zweier Basismaterialien wie bspw. Kalzium für Skelettmaterial und Wasser für Weichteilgewebe, verglichen. Hierbei wird angenommen, dass sich jeder Messwert als lineare Superposition der Messwerte der beiden Basismaterialien darstellen lässt. So kann für jedes Element der bildlichen Darstellung des Untersuchungsobjekts aus dem Vergleich mit den Werten der Basismaterialien ein Skelettanteil und ein Weichteilgewebeanteil berechnet werden, so dass eine Transformation der ursprünglichen Aufnahmen in Darstellungen der beiden Basismaterialien ermöglicht wird.

[0007] Aus der deutschen Patentanmeldung DE 101 43 131 A1 ist weiterhin ein Verfahren bekannt, dessen Sensitivität und Aussagekraft die der Basismaterialzerlegung noch übertrifft und bspw. eine funktionale CT-Bildgebung hoher Aussagekraft ermöglicht. Mit dem Verfahren kann die räumliche Verteilung der Dichte ρ

(r) und der effektiven Ordnungszahl $Z(r)$ durch Auswertung der spektral beeinflussten Messdaten einer Röntgenapparatur berechnet werden. Aus einer kombinierten Auswertung der Verteilung der Dichte sowie der effektiven Ordnungszahl lassen sich Körperbestandteile wie bspw. Jod oder dergleichen quantitativ bestimmen und bspw. Calcifizierungen basierend auf der Ordnungszahl heraus segmentieren.

[0008] Keines der bisher dargestellten Verfahren ermöglicht es jedoch, orts aufgelöst die Konzentration von Elementen und/oder Elementkombinationen zu bestimmen, aus denen sich das Untersuchungsobjekt zusammensetzt.

[0009] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht daher darin, ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zur orts aufgelösten Bestimmung der Konzentrationen von Elementen und/oder Elementkombinationen in einem Untersuchungsobjekt anzugeben, das sich aus diesen Elementen und/oder Elementkombinationen zusammensetzt.

[0010] Die Aufgabe wird mit dem Verfahren sowie der Vorrichtung gemäß den Patentansprüchen 1 und 6 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen des Verfahrens sowie der Vorrichtung sind Gegenstand der Unteransprüche oder lassen sich aus der nachfolgenden Beschreibung sowie den Ausführungsbeispielen entnehmen.

[0011] Bei dem vorliegenden Verfahren zur orts aufgelösten Bestimmung der Konzentrationen von n Elementen und/oder Elementkombinationen in einem Untersuchungsobjekt, das sich aus den n Elementen und/oder Elementkombinationen zusammensetzt, werden mit einer Röntgenanlage gleichzeitig oder nacheinander mehrere digitale Röntgenbilder zumindest eines Bereiches des Untersuchungsobjektes mit $m \geq n$ unterschiedlichen spektralen Verteilungen der Röntgenstrahlung $S(E)$ und/oder der Detektorempfindlichkeit $D(E)$ unter gleichen geometrischen Bedingungen aufgezeichnet, um für jedes in den Röntgenbildern den gleichen Ort repräsentierende Bildelement (Pixel) m Schwächungswerte μ_i ($i = 1, \dots, m$) zu erhalten. Anschließend werden für ein oder mehrere Pixel aus den jeweils m Schwächungswerten μ_i unter Berücksichtigung bekannter spektraler Absorptionsspektren $\kappa_j(E)$ ($j = 1 \dots n$) der n Elemente und/oder Elementkombinationen und der m unterschiedlichen spektralen Verteilungen der Röntgenstrahlung $S(E)$ und/oder der Detektorempfindlichkeit $D(E)$ die Konzentrationen c_j der n Elemente und/oder Elementkombinationen berechnet.

[0012] Für die Durchführung des Verfahrens muss somit für jede der spektralen Verteilungen die spektrale Apparatfunktion, d. h. eine Kombination aus dem Röntgenspektrum $S(E)$ und der Detektorempfindlichkeit $D(E)$ der Röntgenanlage, bekannt sein. Die spektrale Verteilung der Röntgenstrahlung $S(E)$ hängt dabei in der Regel von der Art der eingesetzten Röntgenröhre sowie der Röhrenspannung sowie ggf. zusätzlich eingesetzten Filtern ab. Die Detektorempfindlichkeit $D(E)$ ist eine Eigenschaft der eingesetzten Röntgendetektoren, die unterschiedliche Spektralanteile einer Strahlung mit unterschiedlichen Wirkungsgraden umsetzen und somit verschieden Wichten. Diese anlagenspezifischen Größen können einmalig direkt bestimmt oder indirekt mittels der Schwächungswerte von Eichproben ermittelt werden. Selbstverständlich ist es auch möglich, diese Funktionen aus entsprechenden, den Röhrentyp sowie den Detektortyp charakterisierenden Daten der technischen Spezifikationen der Röntgenanlage abzuleiten.

[0013] Die mehreren digitalen Röntgenbilder müssen nicht notwendigerweise nacheinander, bspw. als Aufnahmen mit unterschiedlicher Röhrenspannung, aufgezeichnet werden. Da jede Röntgenröhre ein Röntgenspektrum mit einer gewissen Breite emittiert, ist es bei entsprechender spektralselektiver Ausgestaltung der zugehörigen Detektoreinheit auch möglich, die unterschiedlichen Röntgenbilder weitestgehend oder völlig simultan aufzuzeichnen. Hierzu können bspw. mehrere gesonderte vorhandene Röntgendetektorarrays verwendet werden. In einer bevorzugten Ausgestaltung werden Quantenenergie-selektive Röntgendetektoren eingesetzt, die nach unterschiedlichen Spektralbereichen aufgelöste Schwächungswerte liefern. Die Röntgendetektoren messen hierbei unterschiedliche spektrale Bereiche, d. h. unterschiedliche Energiebereiche der Röntgenstrahlung aus. Vorzugsweise wird hierfür eine gleichmäßige Unterteilung des Primärenergiespektrums, also bspw. in Intervalle von 30–40 keV, 40–50 keV, ... 130–140 keV bei einem 30–140 keV umfassenden Primärenergiespektrum, vorgenommen.

[0014] Durch die Aufzeichnung dieser mehreren digitalen Röntgenbilder des interessierenden Bereiches Untersuchungsobjektes unter jeweils gleichen geometrischen Bedingungen werden für jedes den gleichen Ort repräsentierende Pixel der Röntgenbilder m in der Regel unterschiedliche Schwächungswerte μ_i ($i = 1 \dots m$) erhalten. Für zumindest eines dieser Pixel können dann aus den jeweils m diesem Pixel zugeordneten Absorptions- bzw. Schwächungswerten unter Berücksichtigung der m unterschiedlichen spektralen Verteilungen, die durch die spektralen Apparatfunktionen repräsentiert werden, sowie unter Berücksichtigung der bekannten spektralen Absorptionsspektren $\kappa_j(E)$ der n Elemente und/oder Elementkombinationen die Konzentrationen c_j

($j = 1 \dots n$) der n Elemente und/oder Elementkombinationen berechnet werden. Hierfür wird ausgenutzt, dass die gemessenen Schwächungswerte nur von diesen Konzentrationen und den bekannten bzw. vorab ermittelten Apparatefunktionen abhängen. Die spektralen Absorptionsspektren $\kappa(E)$ der einzelnen Elemente oder Elementkombinationen lassen sich ohne weiteres der Literatur entnehmen. Unter Elementkombinationen sind hierbei Elementverbindungen, wie bspw. Wasser oder Kunststoffe, feste Zusammensetzungen von Körpern, wie bspw. Knochen, oder auch bekannte Mischungen von einzelnen Elementen zu verstehen. In jedem Falle wird das Absorptionsspektrum dieses Materials eingesetzt, um die Konzentration des Materials innerhalb des Untersuchungsobjekts zu bestimmen.

[0015] Mit dem vorliegenden Verfahren können somit die Konzentrationen der Elemente oder Elementkombinationen im Untersuchungsobjekt an einem bestimmten Ort, der durch das Pixel im Röntgenbild repräsentiert wird, bestimmt werden. Bei Einsatz eines einfachen Röntgendurchleuchtungsverfahrens wird hierbei ein gemittelter Wert auf dem durch das Pixel repräsentierten Pfad der Röntgenstrahlung durch das Untersuchungsobjekt erhalten. In der bevorzugten Ausgestaltung des vorliegenden Verfahrens, bei dem eine Röntgen-CT-Anlage zur Aufzeichnung der digitalen Röntgenbilder eingesetzt wird, können auf diese Weise für jedes Volumenelement (Voxel) des untersuchten Bereiches des Untersuchungsobjektes die Konzentrationen der Elemente oder Elementkombinationen bestimmt werden. Durch die Auswertung mehrerer Pixel und Röntgenschnittbilder wird somit eine räumliche Verteilung der Konzentrationen der in dem Untersuchungsobjekt enthaltenen chemischen Elemente oder Elementkombinationen, wie beispielsweise Wasserstoff, Kohlenstoff oder Eisen, erhalten. Dies betrifft im Falle der Untersuchung eines menschlichen Körpers als Untersuchungsobjekt insbesondere die Elemente Stickstoff, Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Kalzium. Auch die Konzentration von Elementkombinationen durch den Einsatz nicht elementarer Absorptionsspektren, wie bspw. von Wasser oder Knochen, kann auf diese Weise räumlich aufgelöst ermittelt werden. Selbstverständlich lässt sich das vorliegende Verfahren nicht nur im Bereich der Medizintechnik sondern auch für zahlreiche andere technische Anwendungen, bspw. bei der Materialinspektion oder in der Sicherheitstechnik, einsetzen. Hierbei werden dann die Konzentrationen der entsprechenden Elemente oder Elementkombinationen des jeweiligen Untersuchungsobjektes bestimmt.

[0016] Das vorliegende Verfahren basiert auf der Grundlage, dass ein mit einem Röntgenabsorptionsverfahren gemessener Schwächungskoeffizient μ eines Elementes von der spektralen Apparatefunktion der eingesetzten Röntgenanlage, im Folgenden auch als spektrale Wichtungsfunktion $w(E)$ bezeichnet, sowie dem Absorptionsspektrum $\kappa(E)$ des Elementes abhängt:

$$\mu = \int \kappa(E)w(E)dE$$

wobei die Wichtungsfunktion $w(E)$ aus dem emittierten Röntgenspektrum $S(E)$ und der spektralen Detektorempfindlichkeit $D(E)$ mit $0 < D(E) < 1$, in folgender Weise erhalten wird:

$$w(E) = \frac{S(E)D(E)}{\int S(E)D(E)dE}$$

[0017] Bei Vorliegen von n unterschiedlichen Elementen bzw. Elementkombinationen lässt sich dieser Zusammenhang bei Messung von m Schwächungswerten μ , die mit den unterschiedlichen Spektralverteilungen erhalten werden, in folgender Weise in Matrixschreibweise darstellen:

$$\begin{pmatrix} \mu_1 \\ \dots \\ \mu_m \end{pmatrix} = \mu_i = \sum_j^n c_j M_{ij}$$

$$\text{mit } M_{ij} = \int_E w_i(E)\kappa_j(E)dE$$

[0018] Mit diesem Zusammenhang lässt sich ein Maximum von $n \leq m$ Elementkonzentrationen aus den gemessenen Daten ermitteln, wobei μ_i den m gemessenen Schwächungswerten $i = 1$ bis m und w_i der spektralen Wichtungsfunktion des i -ten spektralen Messkanals, d. h. der i -ten spektralen Verteilung entsprechen. $\kappa_i(E)$ stellt das spektrale Absorptionsspektrum des jeweiligen chemischen Elementes bzw. der Elementkombination dar, das aus der Literatur bekannt ist. In der dargestellten Matrixschreibweise kann nun nach den Konzentra-

tionen der Elemente bzw. Elementkonzentrationen aufgelöst werden:

$$c_j = \sum_i^m M_{ij}^{-1} \mu_i$$

[0019] M_{ij}^{-1} ist die zu M_{ij} inverse Matrix, die aus den Apparatefunktionen, d. h. $w_i(E)$, der Röntgenanlage berechnet wird. Auf Basis dieser Gleichung wird bei der bevorzugten Ausgestaltung des vorliegenden Verfahrens die Konzentrationsberechnung aus den gemessenen lokalen Schwächungswerten μ durchgeführt. Die unterschiedlichen spektralen Verteilungen für die einzelnen Röntgenbilder, die den spektralen Wichtungsfunktionen $w_i(E)$ der Röntgenanlage entsprechen, können dabei so gewählt werden, dass die Matrix M_{ij} möglichst weit von der Singularität entfernt ist ($\det M_{ij} \neq 0$), um eine präzise und gegen numerische Fehler stabile Inversion der Matrix zu ermöglichen. Dies lässt sich durch Einschluss einer K-Kante eines zu bestimmenden Elementes in eine der spektralen Verteilungen bzw. Energieintervalle realisieren, da diese Charakteristik des Spektrums die Invertierbarkeit der Matrix M_{ij} und damit die Genauigkeit der Konzentrationsbestimmung positiv beeinflusst.

[0020] Die Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens umfasst in bekannter Weise zumindest eine Röntgenquelle zur Emission von Röntgenstrahlung und mehrere der Röntgenquelle gegenüberliegende Röntgendetektoren zum Erfassen von Röntgenschwächungsdaten eines zwischen der Röntgenquelle und den Röntgendetektoren angeordneten Untersuchungsobjekts sowie eine Auswerteeinheit zur Umwandlung von elektrischen Signalen der Röntgendetektoren in Röntgenschwächungswerte. Die Vorrichtung zeichnet sich dadurch aus, dass sie ein Modul zur Konzentrationsbestimmung umfasst, das aus m Schwächungswerten für zumindest ein in mehreren digitalen Röntgenbildern zumindest eines Bereiches des Untersuchungsobjektes den gleichen Ort repräsentierendes Pixel, die mit $m \geq n$ unterschiedlichen spektralen Verteilungen der Röntgenstrahlung $S(E)$ und/oder der Detektorempfindlichkeit $D(E)$ unter gleichen geometrischen Bedingungen aufgezeichnet wurden, unter Berücksichtigung bekannter spektraler Absorptionsspektren $\kappa_i(E)$ der n Elemente und/oder Elementkombinationen und der m unterschiedlichen spektralen Verteilungen der Röntgenstrahlung $S(E)$ und/oder der Detektorempfindlichkeit $D(E)$ die Konzentrationen c_j der n Elemente und/oder Elementkombinationen berechnet.

[0021] Das vorliegende Verfahren lässt sich besonders vorteilhaft mit einer Röntgen-CT-Anlage einsetzen, mit der räumlich aufgelöste Bilder des Untersuchungsobjekts gewonnen werden. Durch den Einsatz des vorliegenden Verfahrens in Verbindung mit der Computertomographie wird eine neuartige dreidimensionale Information über die räumliche Konzentration von chemischen Elementen und/oder Elementkombinationen im Untersuchungsobjekt erhalten. Die gesteigerte spektrale Auflösung existierender oder zukünftiger Röntgenabsorptionssysteme ermöglicht eine für viele Anwendungen ausreichende Genauigkeit.

[0022] Das vorliegende Verfahren sowie die zugehörige Vorrichtung werden nachfolgend anhand eines Ausführungsbeispiels in Verbindung mit den Zeichnungen nochmals kurz erläutert. Hierbei zeigen:

[0023] [Fig. 1](#) ein Ablaufdiagramm gemäß einem Ausführungsbeispiel des vorliegenden Verfahrens; und

[0024] [Fig. 2](#) schematisch ein Beispiel für den Aufbau der vorliegenden Vorrichtung.

[0025] [Fig. 1](#) zeigt schematisch ein Ablaufdiagramm gemäß einem Ausführungsbeispiel des vorliegenden Verfahrens. Bei diesem Verfahren werden im ersten Schritt **1** die Apparatefunktionen der eingesetzten Röntgenanlage, im vorliegenden Beispiel ein Computertomograph **8**, bestimmt und festgelegt. Diese Apparatefunktionen $w_i(E)$ setzen sich aus der von der Röntgenquelle emittierten spektralen Verteilung der Eingangintensität $S(E)$ und der spektralen Detektorempfindlichkeit $D(E)$ zusammen. Für die Erzeugung der unterschiedlichen spektralen Verteilungen für die einzelnen Röntgenbilder kann sowohl das Röhrenspektrum $S(E)$ als auch die Detektorempfindlichkeit $D(E)$ in spektrale Bereiche unterteilt werden.

[0026] Nach der Bestimmung und Festlegung der Apparatefunktionen $w_i(E)$ wird die inverse Matrix M_{ij}^{-1} im Schritt **3** berechnet. Hierfür werden die bekannten Absorptionsspektren der Elemente und/oder Elementkombinationen bereitgestellt (Schritt **2**), aus denen sich der zu untersuchende Bereich des Untersuchungsobjektes zusammensetzt. Bei einem menschlichen Untersuchungsobjekt sind dies bspw. die Absorptionsspektren der Elemente Wasserstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Kalzium.

[0027] Nach der Berechnung der inversen Matrix wird das Untersuchungsobjekt in dem hier ebenfalls ange deuteten Röntgencomputertomographen **8** in Schritt **4** untersucht, um m digitale Röntgenaufnahmen zu erhalten, die bei den vorab festgelegten m unterschiedlichen Apparatefunktionen aufgezeichnet werden.

[0028] In Schritt **5** wird die bei der Computertomographie erforderliche Bildrekonstruktion basierend auf den von den Detektoren erhaltenen Rohdaten durchgeführt, bei der zu jedem der Röntgenbilder die Schwächungswertverteilung $\mu_i(x, y)$, mit $i = 1$ bis m , innerhalb eines Transversalschichtbildes mit den Koordinaten x und y erzeugt wird.

[0029] Aus den Schwächungswerten $\mu_i(x, y)$ werden schließlich in Schritt **6** für zumindest ein Pixel, d. h. einen Ort x_0, y_0 aus den zugehörigen Schwächungswerten $\mu_i(x_0, y_0)$ die Konzentrationen c_j durch

$$c_j = \sum_{i=1}^m M_{ij}^{-1} \mu_i$$

berechnet.

[0030] Diese Berechnung wird beim vorliegenden Beispiel für alle Pixel und Schichtbilder des interessierenden Bereiches durchgeführt, so dass eine räumliche Konzentrationsverteilung der Elemente oder Elementkombinationen erhalten wird, aus denen sich das Untersuchungsobjekt zusammensetzt. Die entsprechend berechneten Konzentrationen werden in Schritt **7** auf einem entsprechenden Monitor ausgegeben. Diese Ausgabe kann bspw. auch in graphischer Darstellung erfolgen, wobei die Darstellung bspw. elementweise erfolgen kann, d. h. dass für jedes Element und jede Schicht des Untersuchungsobjektes ein Bild ausgegeben wird, das die Konzentrationsverteilungen des Elementes in diesem Bereich darstellt. In einer anderen Ausgestaltung kann auch eine Interaktion implementiert werden, bei der der Bediener in üblicher Weise ein entsprechend gewähltes Transversalschichtbild auf dem Monitor sieht und durch Anklicken eines Bildpunktes oder Bildbereiches innerhalb des Transversalschichtbildes, bspw. mit einem Mauszeiger über eine graphische Benutzeroberfläche, die Anzeige einer Information über die in diesem Bereich ermittelten Elementkonzentrationen auslöst.

[0031] **Fig. 2** zeigt schließlich stark schematisiert ein Beispiel für den Aufbau der vorliegenden Vorrichtung. In dieser Figur ist ein Röntgen-CT-Gerät **8** mit rotierendem Detektorsystem **9** zu erkennen. Die von der Röntgenröhre **10** fächerförmig emittierten Röntgenstrahlen **11** durchleuchten das Untersuchungsobjekt **12** aus einer bestimmten Winkelstellung und treffen schließlich auf eine zeilenförmige Anordnung diskreter Detektoren. Ein Aufnahmezyklus umfasst eine Vielzahl solcher Durchleuchtungen in unterschiedlichen Winkelstellungen zum Untersuchungsobjekt. Die von den Röntgendetektoren **9** gelieferten elektrischen Signale werden von einer Auswerteeinheit **13** in Röntgenschwächungswerte umgewandelt. Im vorliegenden Beispiel umfasst diese Auswerteeinheit **13** ein Modul **14** zur Konzentrationsbestimmung, das aus m Schwächungswerten für zumindest ein in mehreren digitalen Röntgenbildern zumindest eines Bereiches des Untersuchungsobjektes den gleichen Ort repräsentierendes Pixel, die mit $m \geq n$ unterschiedlichen spektralen Verteilungen der Röntgenstrahlung $S(E)$ und/oder der Detektorempfindlichkeit $D(E)$ unter gleichen geometrischen Bedingungen aufgezeichnet wurden, unter Berücksichtigung bekannter spektraler Absorptionsspektren $\kappa_j(E)$ der n Elemente und/oder Elementkombinationen und der m unterschiedlichen spektralen Verteilungen der Röntgenstrahlung $S(E)$ und/oder der Detektorempfindlichkeit $D(E)$ die Konzentrationen c_j der n Elemente und/oder Elementkombinationen berechnet. Die spektralen Absorptionsspektren $\kappa_j(E)$ der n Elemente und/oder Elementkombinationen sind in diesem Beispiel in der Speichereinrichtung **15** abgespeichert, aus der sie das Modul **14** abrufen. Das Ergebnis wird am angeschlossenen Monitor **16** angezeigt.

Patentansprüche

1. Verfahren zur orts aufgelösten Bestimmung der Konzentration von n Elementen und/oder Elementkombinationen in einem Untersuchungsobjekt (**11**), das sich aus diesen Elementen und/oder Elementkombinationen zusammensetzt, bei dem mit einer Röntgenanlage (**8**) gleichzeitig oder nacheinander mehrere digitale Röntgenbilder zumindest eines Bereiches des Untersuchungsobjektes (**11**) mit $m \geq n$ unterschiedlichen spektralen Verteilungen der Röntgenstrahlung $S(E)$ und/oder der Detektorempfindlichkeit $D(E)$ unter gleichen geometrischen Bedingungen aufgezeichnet werden, um für jedes in den Röntgenbildern den gleichen Ort repräsentierende Pixel m Schwächungswerte μ_i zu erhalten, und für zumindest ein Pixel aus den jeweils m Schwächungswerten μ_i unter Berücksichtigung bekannter spektraler Absorptionsspektren $\kappa_j(E)$ der n Elemente und/oder Elementkombinationen und der m unterschiedlichen spektralen Verteilungen der Röntgenstrahlung $S(E)$ und/oder der Detektorempfindlichkeit $D(E)$ die Konzentrationen c_j der n Elemente und/oder Elementkombinationen berechnet werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Konzentrationen c_j der n Elemente und/oder Elementkombinationen nach folgender Formel berechnet werden:

$$c_j = \sum_i^m \mu_i M_{ij}^{-1}$$

wobei

$$M_{ij} = \int_E w_i(E) \kappa_j(E) dE$$

und w_i eine spektrale Wichtungsfunktion für die i -te spektrale Verteilung darstellen, die durch

$$w(E) = \frac{S(E)D(E)}{\int_E S(E)D(E)dE}$$

gegeben ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die digitalen Röntgenbilder mit m spektralen Verteilungen der Detektorempfindlichkeit $D(E)$ aufgezeichnet werden, die eine zumindest annähernd gleichmäßige Unterteilung des Röntgenspektrums der von der Röntgenanlage (**8**) emittierten Röntgenstrahlung darstellen.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die spektralen Verteilungen so gewählt werden, dass zumindest eine K-Kante eines der n Elemente oder Elementkombinationen in eine der spektralen Verteilungen fällt.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Röntgenbilder mit einer Röntgen-CT-Anlage (**8**) aufgezeichnet werden.

6. Vorrichtung zur orts aufgelösten Bestimmung der Konzentration von n Elementen und/oder Elementkombinationen in einem Untersuchungsobjekt (**11**), mit einer Röntgenquelle (**10**) zur Emission von Röntgenstrahlung und mehreren der Röntgenquelle (**10**) gegenüber liegenden Röntgendetektoren (**9**) zur orts aufgelösten Erfassung von auftreffender Röntgenstrahlung und mit einer Auswerteeinheit (**13**) zur Umwandlung von elektrischen Signalen der Röntgendetektoren (**9**) in Schwächungswerte, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswerteeinheit (**13**) ein Modul (**14**) zur Konzentrationsbestimmung umfasst, das aus m Schwächungswerten für zumindest ein in mehreren digitalen Röntgenbildern zumindest eines Bereiches des Untersuchungsobjektes (**11**) den gleichen Ort repräsentierendes Pixel, die mit $m \geq n$ unterschiedlichen spektralen Verteilungen der Röntgenstrahlung $S(E)$ und/oder der Detektorempfindlichkeit $D(E)$ unter gleichen geometrischen Bedingungen aufgezeichnet wurden, unter Berücksichtigung bekannter spektraler Absorptionsspektren $\kappa_j(E)$ der n Elemente und/oder Elementkombinationen und der m unterschiedlichen spektralen Verteilungen der Röntgenstrahlung $S(E)$ und/oder der Detektorempfindlichkeit $D(E)$ die Konzentrationen c_j der n Elemente und/oder Elementkombinationen berechnet.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Modul (**14**) die Formel gemäß Patentanspruch 2 zur Berechnung der Konzentrationen implementiert.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

FIG 1

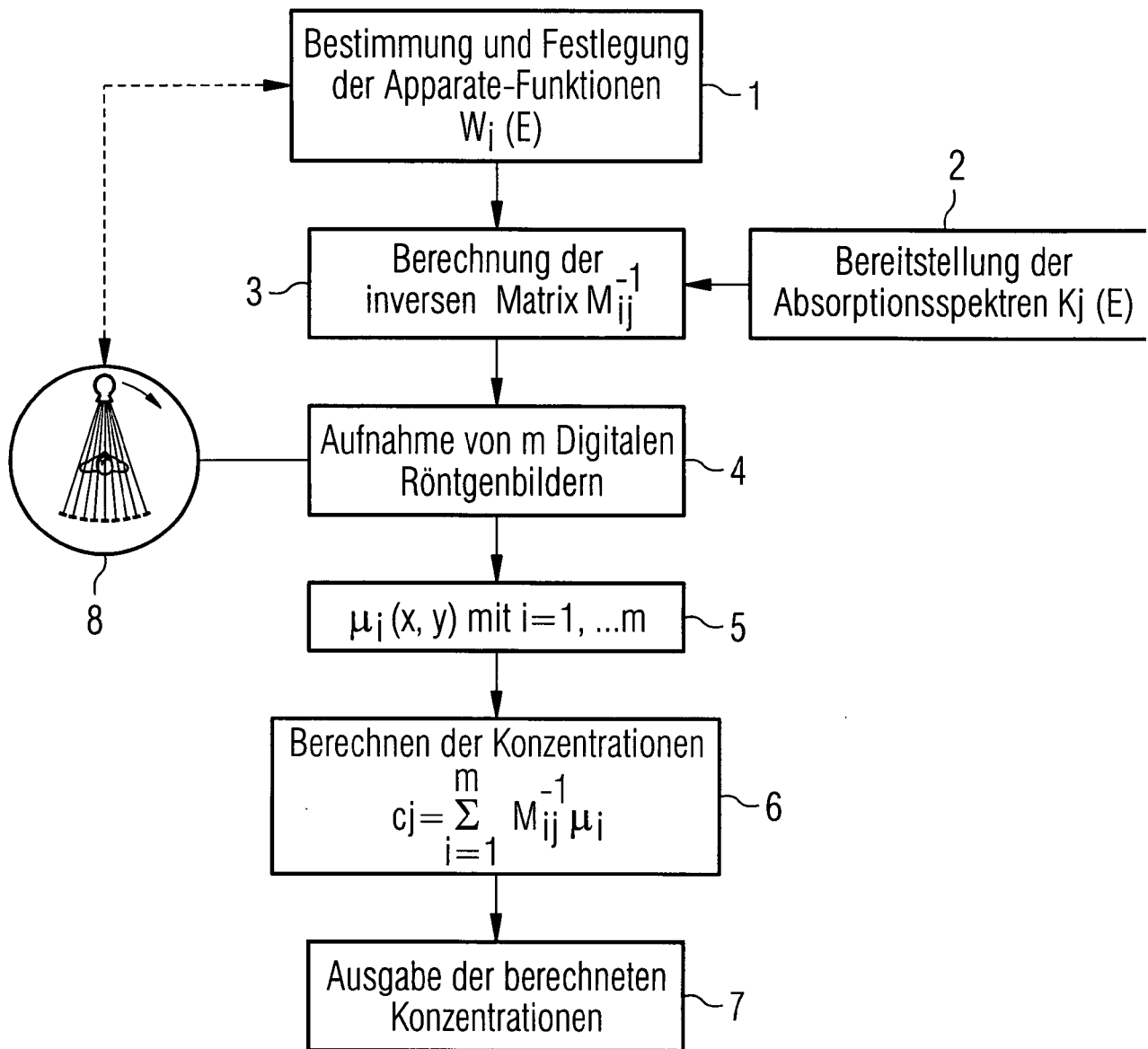


FIG 2

