(19) Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 102 37 347 A1** 2004.03.04

(12) # Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **102 37 347.7**
(22) Anmeldetag: **14.08.2002**
(43) Offenlegungstag: **04.03.2004**

(51) Int Cl.[7]: **G06T 11/00**

(71) Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

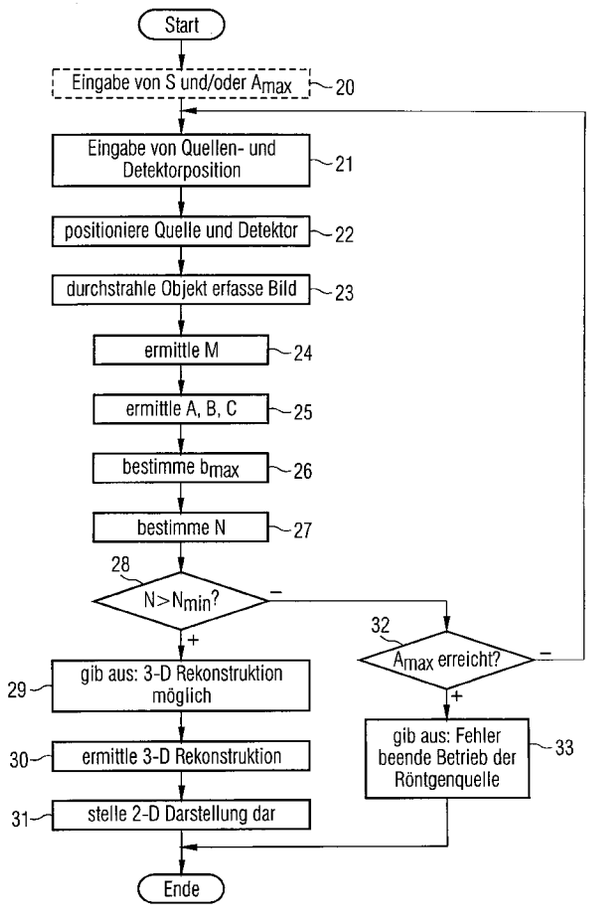
(72) Erfinder:
Freytag, Rudolf, Dr., 91088 Bubenreuth, DE;
Hornegger, Joachim, Dr., 91083 Baiersdorf, DE

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Ermittlungsverfahren für ein Abbruchkriterium beim Erfassen von zweidimensionalen Bildern eines dreidimensionalen Objekts**

(57) Zusammenfassung: Von einer Röntgenquelle (1) ist bei einer Anzahl von Quellenpositionen relativ zu einem 3-D-Objekt (8) dieses zu durchstrahlen. Von einem Röntgendetektor (1') ist bei einer Anzahl von korrespondierenden Detektorpositionen relativ zum Objekt (8) ein 2-D-Bild des durchstrahlten Objekts (8) zu erfassen. Eine Auswerteeinheit (7) ermittelt anhand der Quellen- und der Detektorpositionen als solcher selbsttätig, ob eine 3-D-Rekonstruktion des Objekts (8) möglich ist. Sobald dies der Fall ist, ist das Abbruchkriterium zum Erfassen von Bildern des Objekts (8) erfüllt.



Beschreibung

[0001] Ermittlungsverfahren für ein Abbruchkriterium beim Erfassen von zweidimensionalen Bildern eines dreidimensionalen Objekts Die vorliegende Erfindung betrifft ein Ermittlungsverfahren für ein Abbruchkriterium beim Erfassen von zweidimensionalen Bildern eines dreidimensionalen Objekts.

[0002] Derartige Verfahren werden insbesondere bei bildgebenden Röntgenverfahren benötigt.

[0003] Bei jeder Röntgenaufnahme ist das erfasste zweidimensionale (Röntgen-)Detektorsignal (= das Bild) unter anderem durch das Objekt selbst (insbesondere dessen Absorptionseigenschaften), die Detektorposition relativ zum Objekt und die Quellenposition relativ zum Objekt bestimmt. Die Position im Sinne der vorliegenden Erfindung kann dabei gegebenenfalls auch die Orientierung des Röntgendetektors bzw. der Röntgenquelle umfassen. Das Bild I lässt sich daher schreiben als

$$\underline{I} = \underline{\underline{P}}\,\underline{O}.$$

[0004] I ist dabei ein Vektor, der die Gesamtheit der Bildelemente eines zweidimensionalen Bildes umfasst. O ist ein Vektor, der die Volumenelemente des dreidimensionalen Objekts umfasst. P ist eine Abbildungsmatrix. Sie sind insbesondere durch die Positionen der Röntgenquelle und des Röntgendetektors relativ zum Objekt bestimmt.

[0005] Für eine einzige Projektion, das heißt ein einzelnes Bild, ist das oben stehende Gleichungssystem im allgemeinen nicht lösbar bzw. die Abbildungsmatrix P nicht invertierbar. Die Invertierung ist vielmehr mehrdeutig bzw. unbestimmt. Bei nur einer Aufnahme bzw. nur wenigen Aufnahmen ist daher in der Regel lediglich eine zweidimensionale Wiedergabe der Projektionen des Objekts möglich, nicht aber eine dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts.

[0006] Mit jeder weiteren Projektion erhält man aber weitere Informationen über das Objekt. Gemäß dem Feldkamp-Algorithmus ist es möglich, eine dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts selbst zu ermitteln, wenn Röntgenquelle und Röntgendetektor auf einer gemeinsamen Kreisbahn um mindestens 180° um das Objekt herum rotieren. Anhand der Rekonstruktion des dreidimensionalen Objekts als solchem sind dann beliebige zweidimensionale Projektionen und auch Schnitte ermittelbar und darstellbar. Der Feldkamp-Algorithmus ist z. B. in „Image Reconstruction from Projections: The Fundamentals of Computerized Tomography", G. T. Herman, Academic Press, New York, 1980, beschrieben.

[0007] Das Verschwenken auf der gemeinsamen Kreisbahn um das Objekt um mindestens 180° erfolgt im Rahmen der Computertomographie oder der 3D-Angiographie. Im Rahmen der Computertomographie ist ferner bekannt, zusammen mit dem Rotieren von Röntgenquelle und Röntgendetektor gleichzeitig das Objekt linear senkrecht zur Rotationsebene zu verschieben, so dass im Ergebnis die Röntgenquelle und der Röntgendetektor gemeinsam spiralförmig um das Objekt umlaufen. In diesem Fall ist eine dreidimensionale Rekonstruktion möglich, wenn die Linearbewegung des Objekts nicht zu groß ist. Denn es muss – z. B. durch Interpolation – eine Umrechnung in eine Kreisbewegung um das Objekt möglich sein.

[0008] Die Lösung nach Feldkamp setzt also, wie oben stehend ausgeführt, im wesentlichen eine kreisförmige Bewegung der Röntgenquelle und des Röntgendetektors auf einer gemeinsamen Kreisbahn voraus. Die Röntgenquelle und der Röntgendetektor liegen einander dabei bezüglich des Drehpunkts gegenüber. Führen die Röntgenquelle und/oder der Röntgendetektor andere als kreisförmige Bewegungen um die Drehachse aus, ist der Rekonstruktionsalgorithmus von Feldkamp nicht anwendbar.

[0009] Aus G. T. Herman, A. Kuba, Discrete Tomography: Foundations, Algorithms, and Applications, Springer Verlag, Telos, 1999, ist die sogenannte ART-Methode (ART = Algebraic Reconstruction Technique) bekannt. Mittels dieser Methode ist prinzipiell eine Rekonstruktion des dreidimensionalen Objekts aus einer Anzahl von Projektionen möglich, die beliebig liegen können. Insbesondere ist es also bei der Aufnahme der Bilder nicht notwendigerweise erforderlich, dass die Röntgenquelle und der Röntgendetektor auf einer gemeinsamen Kreisbahn um das Objekt rotieren bzw. verschwenkt werden.

[0010] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein gattungsgemäßes Ermittlungsverfahren zu schaffen, mittels dessen erkennbar ist, ob mittels der aufzunehmenden Bilder eine dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts möglich ist.

[0011] Die Aufgabe wird dadurch gelöst,

– dass von einer Röntgenquelle bei einer Anzahl von Quellenpositionen relativ zum Objekt das Objekt zu durchstrahlen ist und von einem Röntgendetektor bei einer Anzahl von korrespondierenden Detektorpositionen relativ zum Objekt ein Bild des durchstrahlten Objekts zu erfassen ist,

– wobei eine Auswerteeinheit anhand der Quellenpositionen und der Detektorpositionen als solcher selbsttätig ermittelt, ob eine dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts möglich ist, und

– wobei das Abbruchkriterium erfüllt ist, sobald die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts möglich ist.

[0012] Das Ermitteln, ob die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts möglich ist, erfolgt vorzugsweise auf folgende Weise:

– Es wird ein Gleichungssystem ermittelt, das funktionale Abhängigkeiten der Bilder von Volumendatenwerten beschreibt.

– Jedem Volumendatenwert ist eine Position im Raum zugeordnet.

– Die Volumendatenwerte in ihrer Gesamtheit beschreiben das dreidimensionale Objekt.

– Die Koeffizienten des Gleichungssystems sind durch die Quellenpositionen und die Detektorpositionen bestimmt und bilden eine Koeffizientenmatrix mit n Spalten und m Zeilen.
– Die Auswerteeinheit ermittelt anhand der Koeffizientenmatrix, ob die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts möglich ist.

[0013] Die Koeffizientenmatrix ist – mittels der an sich bekannten Singulärwertzerlegung – als Produkt dreier Matrizen darstellbar. Die erste Matrix ist dabei eine orthogonale quadratische Matrix mit m Spalten und m Zeilen. Die zweite Matrix ist eine Diagonalmatrix mit n Spalten und m Zeilen. Die dritte Matrix ist wieder eine orthogonale quadratische Matrix, allerdings mit n Spalten und n Zeilen. Wenn die Auswerteeinheit die Diagonalmatrix ermittelt und anhand der Diagonalmatrix ermittelt, ob die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts möglich ist, ist der Rechenaufwand minimierbar.

[0014] Die Diagonalmatrix weist Diagonalkoeffizienten auf. Die Auswerteeinheit ermittelt den betragsmäßig größten Diagonalkoeffizienten und die Anzahl an Diagonalkoeffizienten, deren Quotient mit dem betragsmäßig größten Diagonalkoeffizienten betragsmäßig größer als eine Konditionszahl ist. Die Bedeutung der Konditionszahl ist z. B. in L. N. Trefethen, D. Bau: Numerical Linear Algebra, Siam Verlag, Philadelphia, 1997, beschrieben. Die Auswerteeinheit vergleicht diese Anzahl dann mit einer Variablenzahl für die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts. Die Variablenzahl ist die Anzahl der zu bestimmenden Volumendatenwerte. Dadurch ist der Rechenaufwand noch weiter minimierbar. Die Konditionszahl kann alternativ fest vorgegeben sein oder aber der Auswerteeinheit von einem Benutzer der Auswerteeinheit vorgegeben werden.

[0015] Es ist möglich, das Ermittlungsverfahren rein rechnerisch vorab auszuführen. Es ist also möglich, der Auswerteeinheit nur die Quellen- und Detektorpositionen, nicht aber die Bilder selbst zuzuführen.

[0016] Vorzugsweise werden der Auswerteeinheit aber zumindest die erfassten Bilder zugeführt. Die Bilder können der Auswerteeinheit dabei alternativ jeweils zusammen mit einer Quellenposition und einer korrespondierenden Detektorposition oder aber nach der Prüfung, ob die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts möglich ist, zugeführt werden. Es ist sogar möglich, der Auswerteeinheit nur die Bilder zuzuführen und die Quellenpositionen und die korrespondierenden Detektorpositionen von der Auswerteeinheit anhand der zugeführten Bilder selbsttätig ermitteln zu lassen.

[0017] Wenn die Auswerteeinheit das Erfassen der Bilder einstellt, sobald das Abbruchkriterium erfüllt ist, wird der Rechenaufwand zum Ermitteln der dreidimensionalen Rekonstruktion des Objekts minimiert. Darüber hinaus ist gegebenenfalls möglich, insbesondere die Röntgenquelle automatisch mit abzuschalten und so eine Röntgenbelastung des Objekts zu minimieren. Die Strahlenbelastung eines zu untersuchenden Patienten ist daher nicht größer als unbedingt nötig.

[0018] Wenn die Auswerteeinheit das Erfassen der Bilder (auch) dann einstellt, wenn ihr eine Maximalanzahl von Bildern zugeführt . worden ist, kann es nicht geschehen, dass aufgrund ungünstiger Positionsvorgaben eine Endlosschleife durchlaufen wird. Die Maximalanzahl kann der Auswerteeinheit dabei fest vorgegeben sein. Alternativ kann sie der Auswerteeinheit auch von einem Benutzer der Auswerteeinheit vorgegeben werden.

[0019] Es ist möglich, dass die Auswerteeinheit die ihr zugeführten Bilder nur zwischenspeichert und die Rekonstruktion des dreidimensionalen Objekts von einer anderen Einrichtung durchgeführt wird. Vorzugsweise ermittelt die Auswerteeinheit aber auch die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts, und zwar insbesondere unmittelbar nach dem Erfüllen des Abbruchkriteriums.

[0020] Vorzugsweise gibt die Auswerteeinheit an den Benutzer ein Signal aus, anhand dessen für den Benutzer erkennbar ist, ob das Abbruchkriterium erfüllt ist. Diese Vorgehensweise ist insbesondere dann sinnvoll, wenn die Positionsvorgaben manuell durch den Benutzer erfolgen. Das Signal kann ein optisches, ein akustisches oder ein anderes vom Benutzer mit seinen Sinnesorganen unmittelbar wahrnehmbares Signal sein.

[0021] Mittels des erfindungsgemäßen Ermittlungsverfahrens ist eine Rekonstruktion bei beliebigen Quellen- und Detektorpositionen möglich. Diese müssen also insbesondere nicht notwendigerweise auf einer Kreisbahn oder einem Zylindermantel liegen.

[0022] Es ist möglich, dass die Auswerteeinheit nicht direkt auf die Röntgenquelle und den Röntgendetektor einwirkt. Vorzugsweise werden sie aber von der Auswerteeinheit positioniert. Die Auswerteeinheit ist also vorzugsweise als Auswerte- und Steuereinheit ausgebildet.

[0023] Wenn die Positionierung der Röntgenquelle und/oder des Röntgehdetektors mittels eines xyz-Manipulators erfolgt bzw. mittels xyz-Manipulatoren erfolgen, sind die Positionen besonders flexibel vorgebbar.

[0024] Weitere Vorteile und Einzelheiten ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels in Verbindung mit den Zeichnungen. Dabei zeigen in Prinzipdarstellung

[0025] **Fig.** 1 eine Röntgenanlage von der Seite,

[0026] **Fig.** 2 die Röntgenanlage von **Fig.** 1 von vorne,

[0027] **Fig.** 3 bis 5 Flussdiagramme und

[0028] **Fig.** 6 bis 9 beispielhaft Quellen- und Detektorpositionen.

[0029] Gemäß den **Fig.** 1 und 2 umfasst eine Röntgenanlage eine Röntgenquelle **1** und einen Röntgendetektor **1'**. Die Röntgenquelle **1** ist auf einer teleskopartig ausfahrbaren Säule **2** angeordnet. Durch

Ausfahren der Säule **2** ist die Röntgenquelle **1** in einer (vertikalen) Richtung z verfahrbar.

[0030] Die Säule **2** ist auf einem Querträger **3** in einer (horizontalen) Richtung x verfahrbar. Der Querträger **3** wiederum ist auf einer Hauptschiene **4** in einer weiteren (ebenfalls horizontalen) Richtung y verfahrbar. Die Röntgenquelle **1** ist ferner um eine Mittelachse **5** sowie um eine senkrecht hierzu verlaufende Drehachse **6** schwenkbar. Die Röntgenquelle **1** weist somit fünf Freiheitsgrade auf.

[0031] Die Richtungen x, y und z bilden ein rechtwinkeliges, kartesisches Koordinatensystem. Die Säule **2**, der Querträger **3** und die Hauptschiene **4** bilden also einen xyz-Manipulator für die Röntgenquelle **1**.

[0032] Der Röntgendetektor **1'** ist ebenso angeordnet und weist dieselben Freiheitsgrade auf wie die Röntgenquelle **1**. Die korrespondierenden Komponenten **2'** bis **6'** entsprechen denen der Röntgenquelle **1**, sind allerdings zusätzlich mit einem Strich versehen.

[0033] Die Röntgenquelle **1** und der Röntgendetektor **1'** sind mit einer Steuer- und Auswerteeinheit **7** daten- und steuerungstechnisch verbunden. Der Kürze wegen wird nachfolgend nur der Begriff „Auswerteeinheit **7"** verwendet. Mittels der Auswerteeinheit **7** sind die Röntgenquelle **1** und der Röntgendetektor **1'** relativ zu einem dreidimensionalen Objekt **8** an beliebigen Orten unter beliebigen Orientierungen positionierbar. Ferner wird durch die Auswerteeinheit **7** die Ansteuerung der Röntgenquelle **1** als solcher und des Röntgendetektors **1'** als solchem bewirkt. Die Auswerteeinheit **7** bewirkt also, dass die Röntgenquelle **1** Röntgenstrahlung emittiert und der Röntgendetektor **1'** empfangene Röntgenstrahlung der Auswerteeinheit **7** als zweidimensionales Bild zuführt.

[0034] Die Auswerteeinheit **7** ist mit einem Computerprogrammprodukt **9** programmiert. Aufgrund der Programmierung der Auswerteeinheit **7** mit dem Computerprogrammprodukt **9** führt diese das nachfolgend näher beschriebene erfindungsgemäße Ermittlungsverfahren aus.

[0035] Gemäß **Fig.** 3 wird der Auswerteeinheit **7** von einem Benutzer **10** in einem Schritt 21 zunächst eine Quellenposition der Röntgenquelle **1** relativ zum Objekt **8** und eine korrespondierende Detektorposition des Röntgendetektors **1'** relativ zum Objekt **8** zugeführt. Die Röntgenquelle **1** und der Röntgendetektor **1'** werden sodann von der Auswerteeinheit **7** entsprechend den vorgegebenen Positionen in einem Schritt 22 positioniert. Sodann wird im Schritt 23 die Röntgenquelle **1** von der Auswerteeinheit **7** angesteuert, so dass sie (zumindest kurzzeitig) Röntgenstrahlung emittiert und so das Objekt **8** durchstrahlt. Unmittelbar danach wird – ebenfalls noch im Schritt 23 – vom Röntgendetektor **1'** das korrespondierende zweidimensionale Bild erfasst und der Auswerteeinheit **7** zugeführt.

[0036] Sodann wird von der Auswerteeinheit **7** in einem Schritt 24 eine Koeffizientenmatrix M eines Gleichungssystems $X = M \times Y$ ermittelt. X ist dabei ein Vektor, der alle Bildpunkte aller betrachteten Projektionen umfasst. Y ist ein Vektor der Volumendatenwerte. Jedem Volumendatenwert ist eine Position im Raum zugeordnet. In ihrer Gesamtheit beschreiben die Volumendatenwerte das dreidimensionale Objekt **8**. Die Koeffizientenmatrix M weist n Spalten und m Zeilen auf. Sie beschreibt die funktionalen Abhängigkeiten der Bilder von den Volumendatenwerten.

[0037] Zur Ermittlung des Gleichungssystems ist es erforderlich, die projektive Abbildung vom dreidimensionalen Raum in die zweidimensionale Bildebene des Röntgendetektors **1'** zu kennen. Die diesbezüglichen Verfahren sind allgemein bekannt. Beispielhaft wird auf E. Trucco, A. Verri, Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, Prentice Hall, 1999, verwiesen. Man erhält also für jeden Projektionsstrahl von der Röntgenquelle **1** zum Röntgendetektor **1'** eine lineare Gleichung. Die Gesamtheit der (zweidimensional angeordneten) Detektorelemente des Röntgendetektors **1'** liefert also das lineare Gleichungssystem. Die Koeffizienten des Gleichungssystems sind dabei durch die jeweilige Quellen- und Detektorposition bestimmt. Sie bilden in ihrer Gesamtheit eine Koeffizientenmatrix M.

[0038] Um die Volumendatenwerte eindeutig ermitteln zu können, ist es nicht ausreichend, nur das Gleichungssystem zu berücksichtigen, das von einer einzigen Projektion stammt. Auch einige wenige Projektionen werden in der Regel nicht ausreichen. In die Koeffizientenmatrix M gehen daher nicht nur die momentane Projektion, sondern auch etwaige zuvor ermittelte Projektionen ein. Das Gleichungssystem wächst also mit jeder weiteren Projektion. Dadurch ist die Auswerteeinheit **7** in der Lage, anhand der Quellenpositionen und der Detektorpositionen als solcher selbsttätig zu ermitteln, ob eine dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts **8** möglich ist. Dies geschieht wie folgt: Zunächst wird die Koeffizientenmatrix M in einem Schritt 25 als Produkt dreier Matrizen A, B und C dargestellt. Die Matrizen A und C sind dabei quadratische, orthogonale Matrizen. Die Matrix A weist m Spalten und m Zeilen auf, die Matrix C n Spalten und n Zeilen. Die Matrix B ist eine Diagonalmatrix mit n Spalten und m Zeilen. Sie weist also Koeffizienten bis auf, die nur dann ungleich Null sein können, wenn die Indizes i und j gleiche Werte annehmen. Die Koeffizienten bis, bei denen die Indizes i und j den gleichen Wert aufweisen, werden nachfolgend als Diagonalkoeffizienten bi bezeichnet.

[0039] In einem Schritt 26 kann daher der betragsmäßig größte Diagonalkoeffizient b_{max} ermittelt werden. Sodann wird in einem Schritt 27 die Anzahl N an Diagonalkoeffizienten b_i ermittelt, deren Quotient mit dem betragsmäßig größten Diagonalkoeffizienten b_{max} betragsmäßig größer als eine Konditionszahl S ist. Diese Anzahl N wird in einem Schritt 28 mit einer Variablenzahl N_{min} verglichen. Die Variablenzahl N_{min} entspricht der Zahl der zu bestimmenden Volumendatenwerte. Ist die Anzahl N größer oder gleich der

Variablenzahl N_{min}, ist eine eindeutige Ermittlung der Volumendatenwerte möglich.

[0040] Die Auswerteeinheit **7** ermittelt also anhand der Diagonalmatrix B und damit indirekt anhand der Koeffizientenmatrix M, ob die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts **8** möglich ist. Je nach dem Ergebnis der Prüfung im Schritt 28 kann daher alternativ mit Schritten 29 bis 31 oder einem Schritt 32 fortgefahren werden.

[0041] Im Schritt 29 wird von der Auswerteeinheit **7** ein – vorzugsweise optisches oder akustisches – Signal an den Benutzer **10** ausgegeben, so dass der Benutzer **10** erkennen kann, dass die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts **8** nunmehr möglich ist, das Abbruchkriterium also erfüllt ist. Ferner stellt die Auswerteeinheit **7** unter anderem das Erfassen der Bilder ein. Insbesondere wird die Röntgenquelle **1** sofort abgeschaltet. Ferner wird unmittelbar anschließend im Schritt 30 von der Auswerteeinheit **7** die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts **8** ermittelt. Im Schritt 31 kann dann eine beliebige zweidimensionale Darstellung des ermittelten Volumendatensatzes erfolgen. Die Ermittlung solcher Darstellungen ist z. B. in Schumann, Müller: Visualisierung, Springer Verlag, Heidelberg, 2000, Kapitel 7, beschrieben.

[0042] Wenn im Schritt 28 die Variablenzahl N_{min} noch nicht erreicht ist, wird im Schritt 32 geprüft, ob die Anzahl der der Auswerteeinheit **7** zugeführten Bilder eine Maximalanzahl A_{max} erreicht hat. Falls dies der Fall ist, wird in einem Schritt 33 ebenfalls das Erfassen der Bilder eingestellt. Insbesondere beendet die Auswerteeinheit **7** auch in diesem Fall den weiteren Betrieb der Röntgenquelle **1**. Ferner wird im Schritt 33 eine entsprechende Fehlermeldung an den Benutzer **10** ausgegeben.

[0043] Wenn die Maximalanzahl A_{max} von Bildern noch nicht erreicht ist, wird vom Schritt 32 aus zum Schritt 21 gesprungen, so dass der Benutzer **10** eine neue Quellenposition und/oder eine neue Detektorposition vorgeben kann.

[0044] Bei der oben stehend beschriebenen Ausführungsform sind die Konditionszahl S und die Maximalanzahl A_{max} fest eingestellt. Es ist aber, wie in **Fig.** 3 gestrichelt eingezeichnet, auch möglich, dass der Benutzer **10** der Auswerteeinheit **7** diese Werte S, A_{max} in einem Schritt 20 vorgibt.

[0045] Bei der oben stehend in Verbindung mit **Fig.** 3 beschriebenen Ausführungsform werden die Bilder der Auswerteeinheit **7** jeweils zusammen mit einer Quellenposition und einer korrespondierenden Detektorposition zugeführt. Es ist aber auch möglich, der Auswerteeinheit **7** nur die Bilder, also ohne die korrespondierenden Quellen- und Detektorpositionen, zuzuführen. In diesem Fall ermittelt die Auswerteeinheit **7** die korrespondierenden Quellen- und Detektorpositionen selbsttätig anhand der zugeführten Bilder. Ein Verfahren zum Ermitteln der korrespondierenden Quellen- und Detektorpositionen ist z. B. in R. Hartley, A. Zisserman: Multiple View Geometry in Computer Vision, erschienen in Cambridge University Press, 2000 beschrieben.

[0046] Ferner ist es auch möglich die Bilder der Auswerteeinheit **7** erst nach der Prüfung, ob die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts **8** möglich ist, zuzuführen. In diesem Fall werden von der Auswerteeinheit **7** zwei verschiedene Routinen durchgeführt, die nachfolgend in Verbindung mit den **Fig.** 4 und 5 näher beschrieben werden. Soweit dabei in den **Fig.** 4 und 5 die selben Bezugszeichen verwendet werden wie in **Fig.** 3, werden auch die selben Schritte ausgeführt.

[0047] Die Routine gemäß **Fig.** 4 umfasst im wesentlichen das Ermitteln einer Gruppe von Quellen- und Detektorpositionierungen, mittels derer später eine dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts **8** möglich ist. Die einzigen nicht bereits in Verbindung mit **Fig.** 3 erläuterten Schritte sind die Schritte 34 und 35. Im Schritt 34 wird eine ermittelte Gruppe von Quellen- und Detektorpositionen abgespeichert. Im Schritt 35 wird eine Fehlermeldung ausgegeben, nicht aber gleichzeitig der Betrieb der Röntgenquelle **1** beendet, weil diese ja gar nicht betrieben wurde.

[0048] In **Fig.** 5 sind die einzigen nicht bereits in Verbindung mit **Fig.** 3 erläuterten Schritte die Schritte 36 und 37. Im Schritt 36 wird die Gruppe von Quellen- und Detektorpositionen, die im Schritt 34 (siehe **Fig.** 4) abgespeichert wurde, abgerufen. Im Schritt 37 wird lediglich geprüft, ob alle im Schritt 36 abgerufenen Positionen bereits angefahren wurden.

[0049] Die Quellen- und Detektorpositionen können prinzipiell beliebig gewählt werden. Insbesondere ist es möglich, dass sie weder auf einer Kreisbahn noch auf einem Zylindermantel liegen. Beispiele derartiger Positionsfolgen sind in den **Fig.** 6 bis 9 dargestellt.

[0050] Gemäß **Fig.** 6 wird beispielsweise nur die Röntgenquelle **1** an verschiedene Positionen verfahren, wohingegen der Röntgendetektor **1'** ortsfest bleibt. Gemäß den **Fig.** 7 bis 9 werden die Röntgenquelle **1** und der Röntgendetektor **1'** symmetrisch verfahren, aber nicht auf einer Kreisbahn um eine gemeinsame Rotationsachse.

[0051] Die Darstellungen gemäß den **Fig.** 6 bis 9 sind rein beispielhaft möglich. Es sind auch beliebige andere Verfahrwege möglich, wenn nur hinterher eine dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts **8** möglich ist. Beispielsweise könnten von der Röntgenquelle **1** und dem Röntgendetektor **1'** die Außenkanten von einander gegenüberliegenden Oktanten einer Kugel abgefahren werden. Auch könnten beispielsweise die Röntgenquelle **1** und der Röntgendetektor **1'** an ihren ursprünglichen Positionen gehalten werden und das Objekt **8** gedreht und/oder verfahren werden. Entscheidend ist lediglich, dass aufgrund der ermittelten zweidimensionalen Bilder die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts **8** möglich ist.

[0052] Das erfindungsgemäße Ermittlungsverfahren wird bevorzugt im medizinischen Bereich eingesetzt. Es ist aber nicht auf den medizinischen Bereich

beschränkt. Insbesondere könnte es auch in der Materialprüfung oder z. B. zur Gepäckkontrolle an Flughäfen eingesetzt werden. Im letztgenannten Fall ist es beispielsweise möglich, die Röntgenquelle **1** und den Röntgendetektor **1'** ortsfest zu montieren und das zu untersuchende Objekt **8** relativ hierzu zu bewegen.

Patentansprüche

1. Ermittlungsverfahren für ein Abbruchkriterium beim Erfassen von zweidimensionalen Bildern eines dreidimensionalen Objekts (**8**),
– wobei von einer Röntgenquelle (**1**) bei einer Anzahl von Quellenpositionen relativ zum Objekt (**8**) das Objekt (**8**) zu durchstrahlen ist und von einem Röntgendetektor (**1'**) bei einer Anzahl von korrespondierenden Detektorpositionen relativ zum Objekt (**8**) ein Bild des durchstrahlten Objekts (**8**) zu erfassen ist,
– wobei eine Auswerteeinheit (**7**) anhand der Quellenpositionen und der Detektorpositionen als solcher selbsttätig ermittelt, ob eine dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts (**8**) möglich ist, und
– wobei das Abbruchkriterium erfüllt ist, sobald die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts (**8**) möglich ist.

2. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,
– dass die Auswerteeinheit (**7**) ein Gleichungssystem ermittelt, das funktionale Abhängigkeiten der Bilder von Volumendatenwerten beschreibt,
– dass jedem Volumendatenwert eine Position im Raum zugeordnet ist und die Volumendatenwerte in ihrer Gesamtheit das dreidimensionale Objekt (**8**) beschreiben,
– dass die Koeffizienten des Gleichungssystems durch die Quellenpositionen und die Detektorpositionen bestimmt sind,
– dass die Koeffizienten eine Koeffizientenmatrix (M) mit n Spalten und m Zeilen definieren und
– dass die Auswerteeinheit (**7**) anhand der Koeffizientenmatrix (M) ermittelt, ob die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts (**8**) möglich ist.

3. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet,
– dass Koeffizientenmatrix (M) als Produkt dreier Matrizen (A, B, C) darstellbar ist, wobei die erste Matrix (A) eine orthogonale quadratische Matrix mit m Spalten und m Zeilen, die zweite Matrix (B) eine Diagonalmatrix mit n Spalten und m Zeilen und die dritte Matrix (C) eine orthogonale quadratische Matrix mit n Spalten und n Zeilen ist, und
– dass die Auswerteeinheit (**7**) die Diagonalmatrix (B) ermittelt und anhand der Diagonalmatrix (B) ermittelt, ob die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts (**8**) möglich ist.

4. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet,
– dass die Diagonalmatrix (B) Diagonalkoeffizienten (b_i) aufweist,
– dass die Auswerteeinheit (**7**) den betragsmäßig größten Diagonalkoeffizienten (b_{max}) ermittelt,
– dass die Auswerteeinheit (**7**) die Anzahl (N) an Diagonalkoeffizienten (b_i) ermittelt, deren Quotient mit dem betragsmäßig größten Diagonalkoeffizienten (b_{max}) betragsmäßig größer als eine Konditionszahl (**5**) ist, und
– dass die Auswerteeinheit (**7**) diese Anzahl (N) mit einer Variablenzahl (N_{min}) für die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts (**8**) vergleicht.

5. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Konditionszahl (S) fest vorgegeben ist.

6. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Konditionszahl (S) der Auswerteeinheit (**7**) von einem Benutzer (**10**) der Auswerteeinheit (**7**) vorgegeben wird.

7. Ermittlungsverfahren nach einem der obigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Auswerteeinheit (**7**) die erfassten Bilder zugeführt werden.

8. Ermittlungsverfahren nach einem der obigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Quellenpositionen und die korrespondierenden Detektorpositionen der Auswerteeinheit (**7**) zugeführt werden.

9. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Bilder der Auswerteeinheit (**7**) nach der Prüfung, ob die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts (**8**) möglich ist, zugeführt werden.

10. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Bilder der Auswerteeinheit (**7**) jeweils zusammen mit einer Quellenposition und einer korrespondierenden Detektorposition zugeführt werden.

11. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Auswerteeinheit (**7**) nur die Bilder zugeführt werden und dass die Auswerteeinheit (**7**) anhand der zugeführten Bilder selbsttätig die Quellenpositionen und die korrespondierenden Detektorpositionen ermittelt.

12. Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswerteeinheit (**7**) das Erfassen der Bilder einstellt, sobald das Abbruchkriterium erfüllt ist.

13. Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswerteeinheit (**7**) das Erfassen der Bilder einstellt,

wenn ihr eine Maximalanzahl (A_{max}) von Bildern zugeführt worden ist.

14. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Maximalanzahl (A_{max}) fest vorgegeben ist.

15. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Maximalanzahl (A_{max}) der Auswerteeinheit (**7**) von einem Benutzer (**10**) der Auswerteeinheit (**7**) vorgegeben wird.

16. Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswerteeinheit (**7**) auch die dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts (**8**) ermittelt.

17. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass das Ermitteln der dreidimensionalen Rekonstruktion des Objekts (**8**) unmittelbar nach dem Erfüllen des Abbruchkriteriums erfolgt.

18. Ermittlungsverfahren nach einem der obigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswerteeinheit (**7**) an einen Benutzer (**10**) ein Signal ausgibt, anhand dessen für den Benutzer (**10**) erkennbar ist, ob das Abbruchkriterium erfüllt ist.

19. Ermittlungsverfahren nach einem der obigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Quellenpositionen und die Detektorpositionen weder auf einer Kreisbahn noch auf einem Zylindermantel liegen.

20. Ermittlungsverfahren nach einem der obigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Röntgenquelle (**1**) und der Röntgendetektor (**1'**) von der Auswerteeinheit (**7**) positioniert werden.

21. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass die Positionierung der Röntgenquelle (**1**) und/oder des Röntgendetektors (**1'**) mittels eines xyz-Manipulators erfolgt bzw. mittels xyz-Manipulatoren erfolgen.

22. Computerprogrammprodukt zur Durchführung eines Ermittlungsverfahrens nach einem der obigen Ansprüche.

23. Mit einem Computerprogrammprodukt nach Anspruch 22 programmierte Auswerteeinheit.

24. Röntgenanlage mit einer Röntgenquelle (**1**), einem Röntgendetektor (**1'**) und einer Auswerteeinheit (**7**) nach Anspruch 23, wobei die Röntgenquelle (**1**) und der Röntgendetektor (**1'**) mit der Auswerteeinheit (**7**) zumindest datentechnisch verbunden sind.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

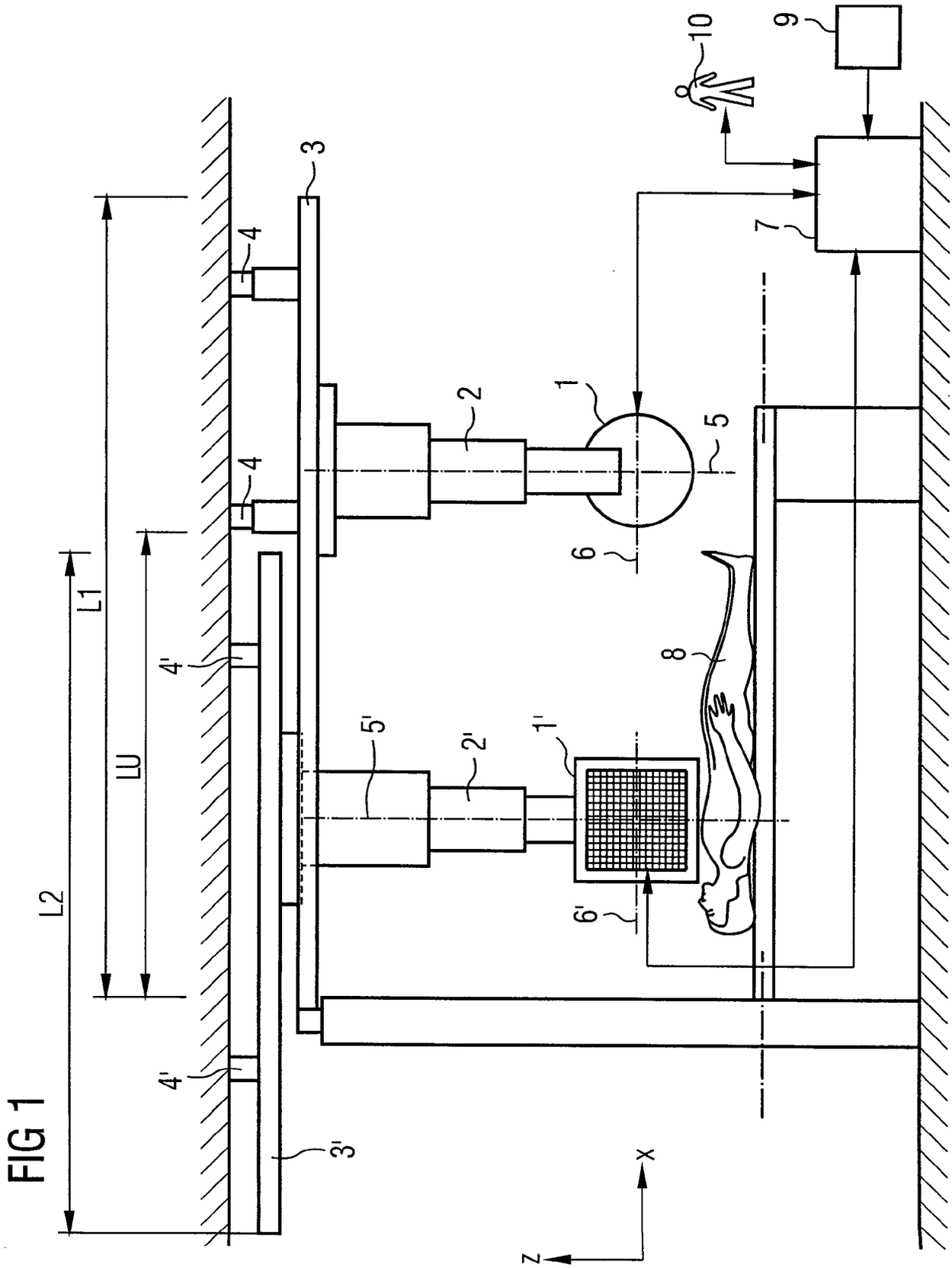


FIG 1

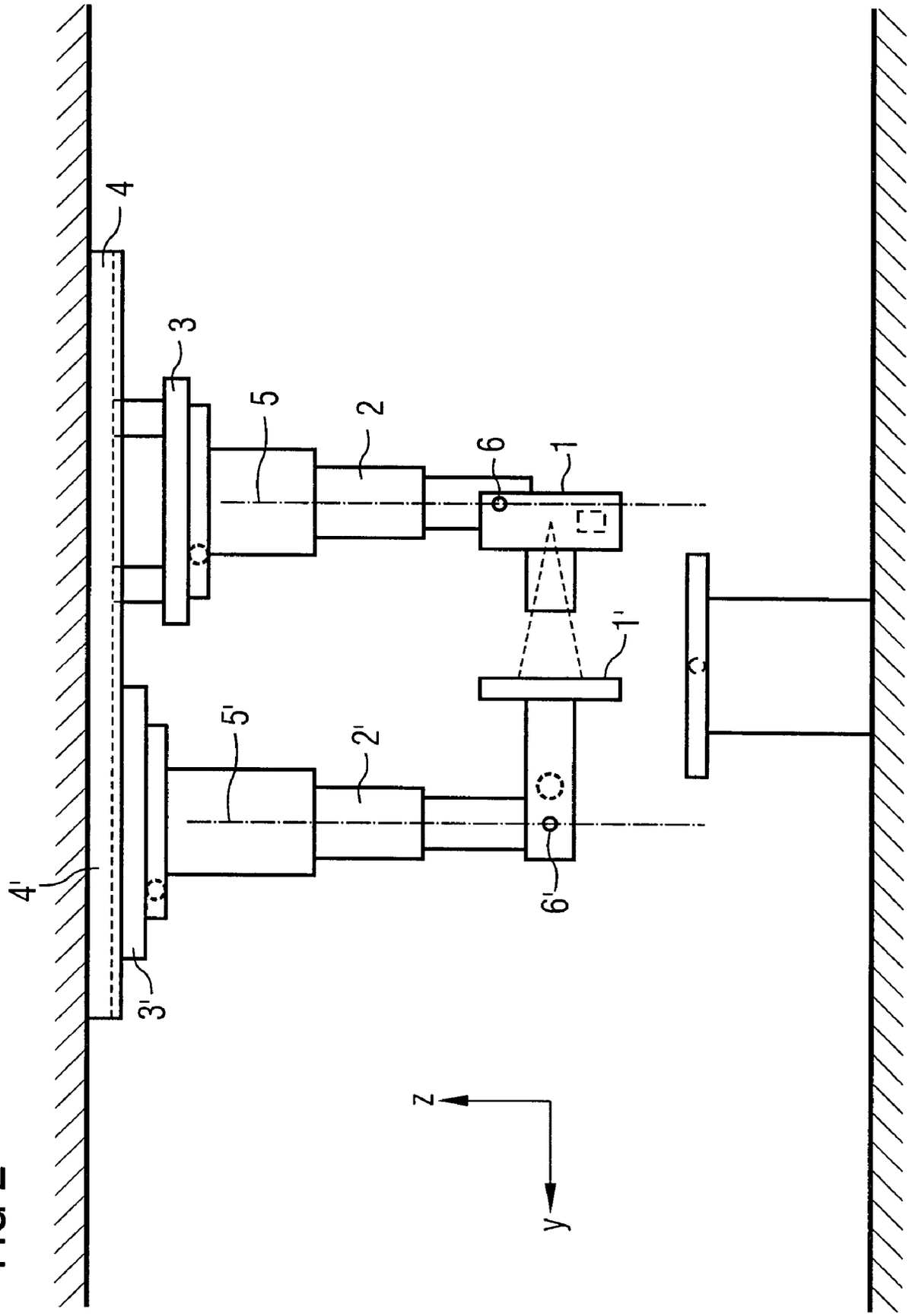


FIG 2

FIG 3

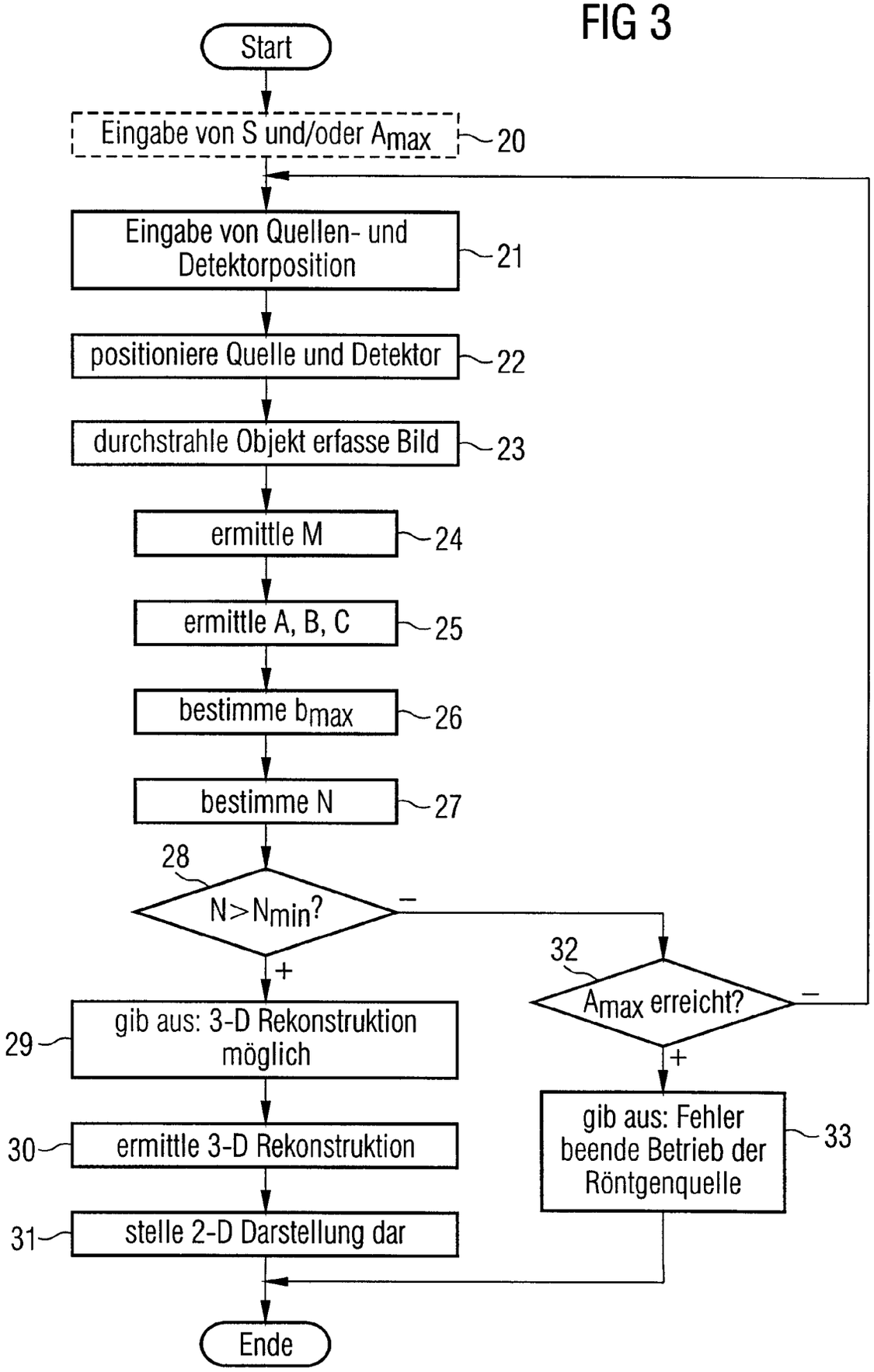

Start
Eingabe von S und/oder Amax
20
Eingabe von Quellen- und Detektorposition
21
positioniere Quelle und Detektor
22
durchstrahle Objekt erfasse Bild
23
ermittle M
24
ermittle A, B, C
25
bestimme bmax
26
bestimme N
27
28
N>Nmin?
–
+
32
Amax erreicht?
–
+
29
gib aus: 3-D Rekonstruktion möglich
30
ermittle 3-D Rekonstruktion
31
stelle 2-D Darstellung dar
gib aus: Fehler beende Betrieb der Röntgenquelle
33
Ende

FIG 4

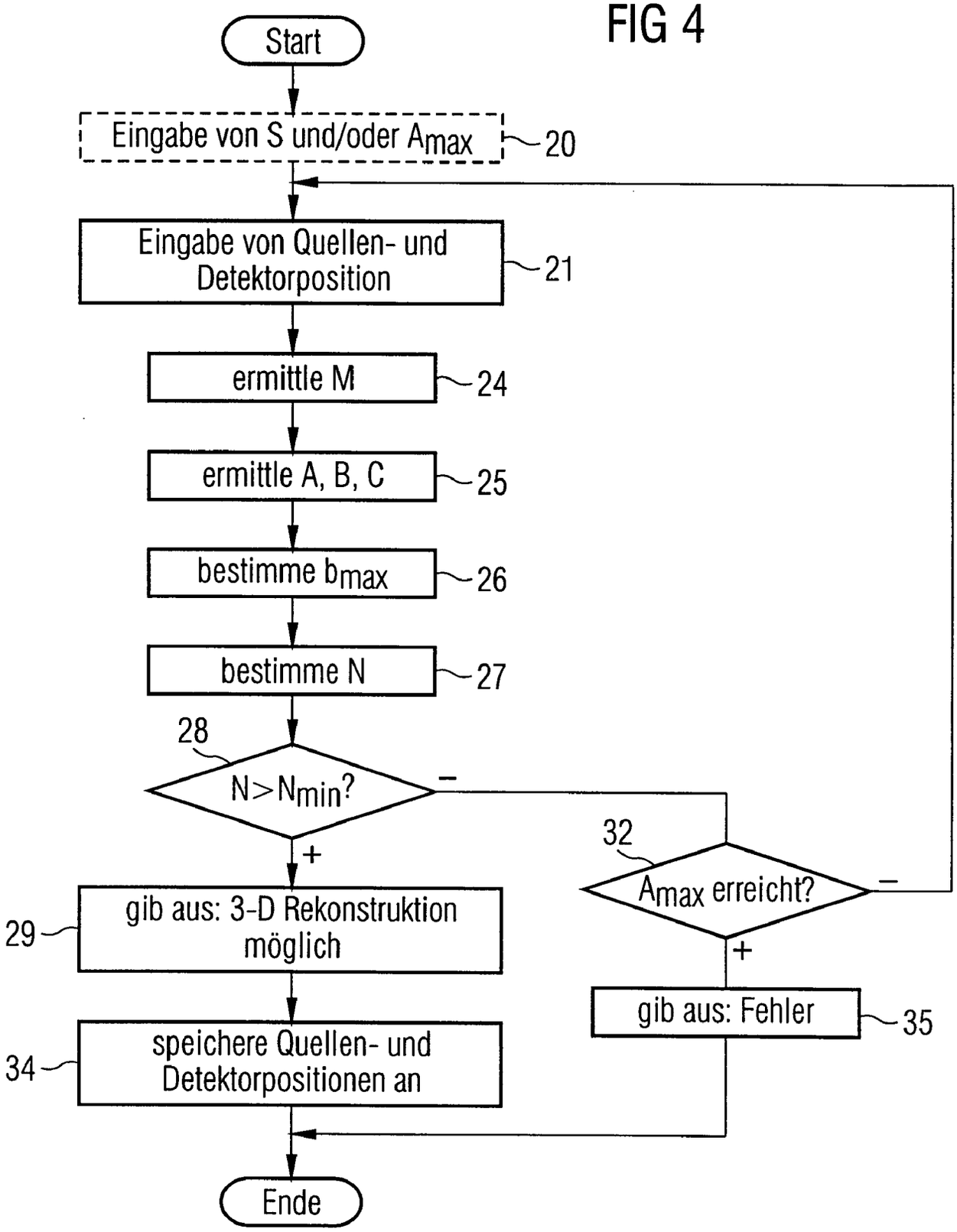

Start
Eingabe von S und/oder A_{max}
20
Eingabe von Quellen- und Detektorposition
21
ermittle M
24
ermittle A, B, C
25
bestimme b_{max}
26
bestimme N
27
28
$N > N_{min}$?
–
+
32
A_{max} erreicht?
–
+
29
gib aus: 3-D Rekonstruktion möglich
gib aus: Fehler
35
34
speichere Quellen- und Detektorpositionen an
Ende

FIG 5

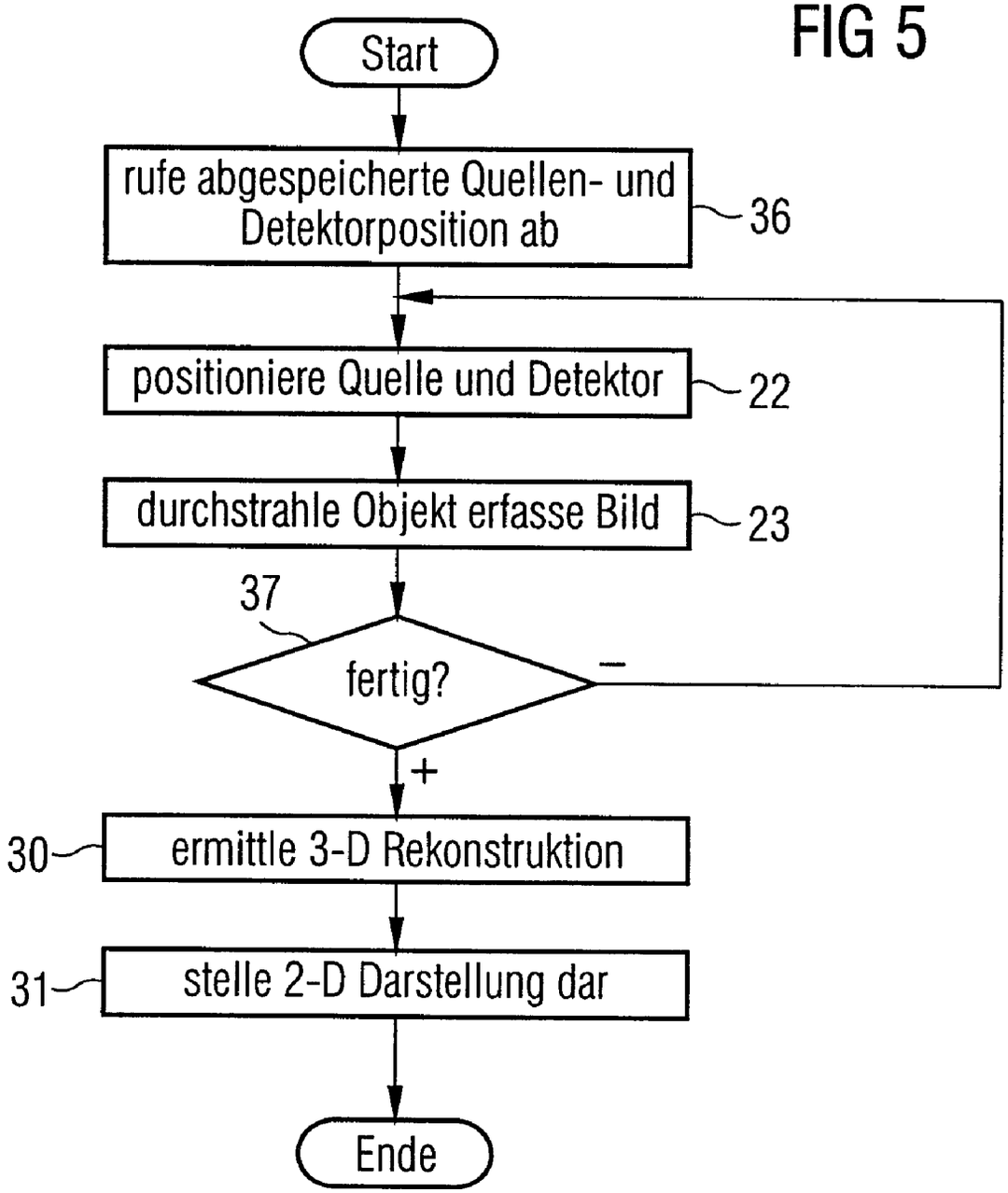

Start
rufe abgespeicherte Quellen- und Detektorposition ab
36
positioniere Quelle und Detektor
22
durchstrahle Objekt erfasse Bild
23
37
fertig?
–
+
30
ermittle 3-D Rekonstruktion
31
stelle 2-D Darstellung dar
Ende

FIG 6

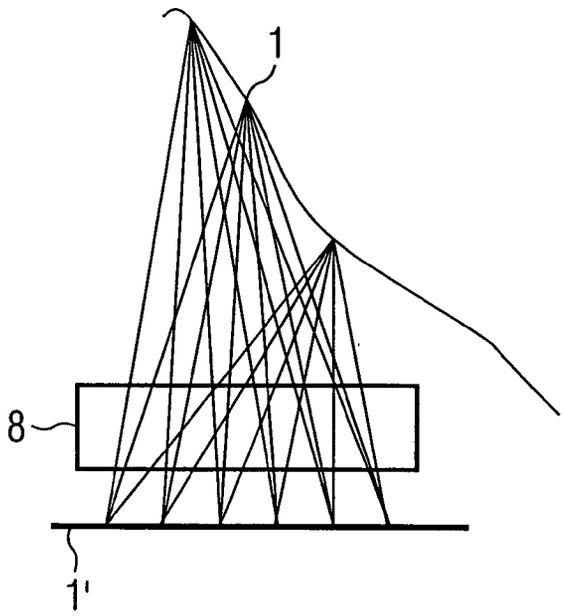


FIG 7

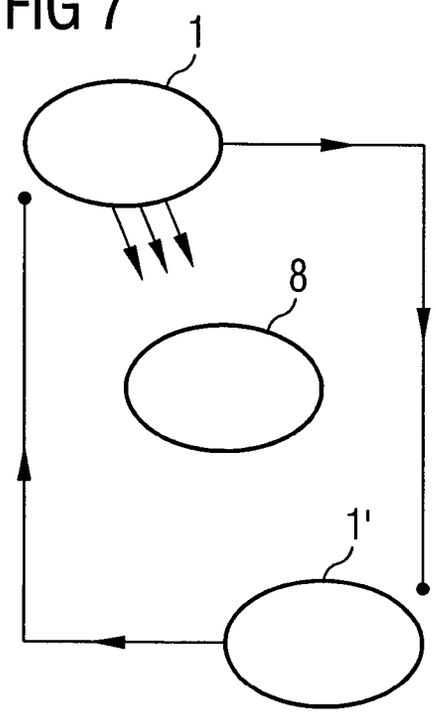


FIG 8

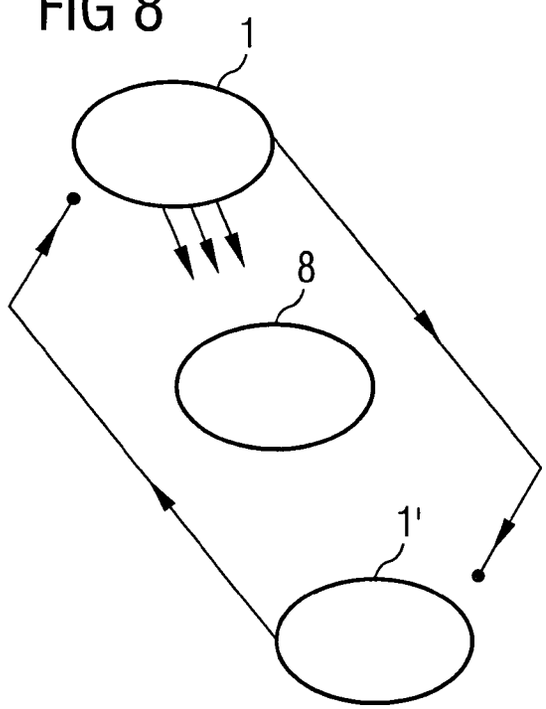
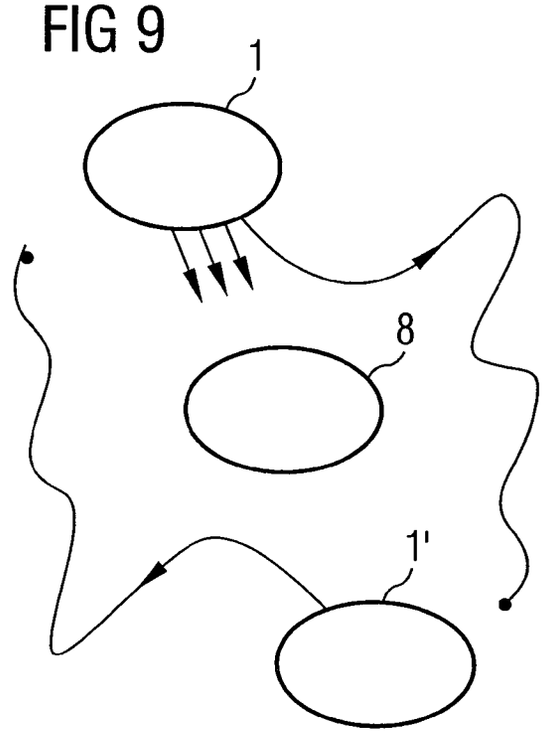



FIG 9