

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
28. Mai 2009 (28.05.2009)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2009/065601 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G01N 23/04 (2006.01) **A61B 6/00** (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2008/009892

(22) Internationales Anmeldedatum:

21. November 2008 (21.11.2008)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

10 2007 056 276.6

22. November 2007 (22.11.2007) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.** [DE/DE]; Hansastrasse 27c, 80686 München (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **EBERHORN,**

Markus [DE/DE]; Lachnerstrasse 77, 91058 Erlangen (DE). **HANKE, Randolph** [DE/DE]; Veilchenweg 8, 90617 Puschendorf (DE). **WENZEL, Thomas** [DE/DE]; Amalienstrasse 79, 90763 Fürth (DE). **FUCHS, Theobald** [DE/DE]; Fürther Strasse 91, 90429 Nürnberg (DE). **BAUSCHER, Ingo** [DE/DE]; Bayreutherstrasse 61, 91338 Igensdorf (DE). **SCHRÖPFER, Stefan** [DE/DE]; Coburger Strasse 23, 90522 Oberasbach (DE).

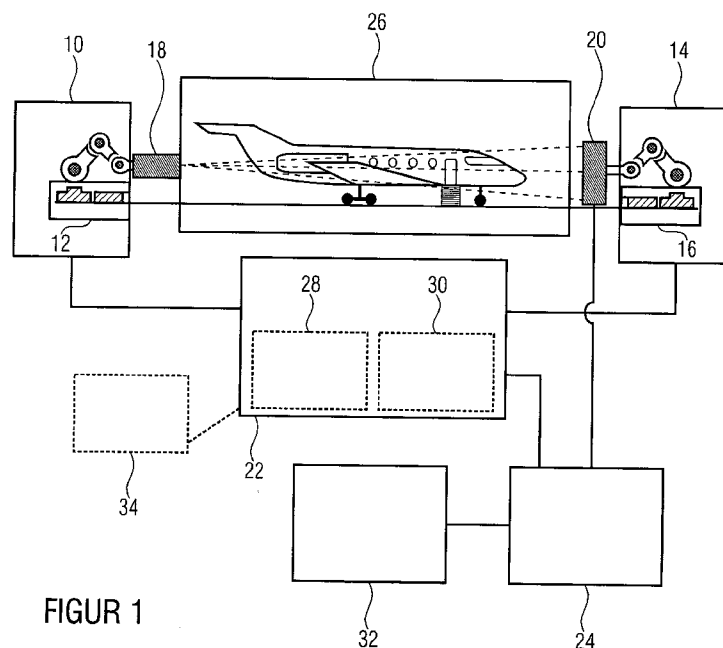
(74) Anwälte: **SCHENK, Markus** usw.; Schoppe, Zimmermann, Stöckeler & Zinkler, Postfach 246, 82043 Pullach (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: X-RAY DEVICE COMPRISING ROBOT ARMS FOR POSITIONING RADIATION SOURCE AND RADIATION DETECTOR

(54) Bezeichnung: RÖNTGENVORRICHTUNG MIT ROBOTERARMEN ZUR POSITIONIERUNG VON STRAHLUNGSQUELLE UND STRAHLUNGSDETEKTOR



FIGUR 1

(57) Abstract: The invention relates to a device comprising a radiation source (18) and a radiation receiver (20), two robot arms (10, 14) for positioning the radiation source and the radiation receiver, a control device (22) for controlling the robot arms, and a processing device (24) for reconstructing a data set for imaging the object (26), in order to display the object by means of x-ray examination.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2009/065601 A1



MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(84) Bestimmungsstaaten (*soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart*): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU,

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht

(57) Zusammenfassung: Es wird eine Vorrichtung mit einer Strahlungsquelle (18) und einem Strahlungsempfänger (20), zwei Roboterarmen (10, 14) zur Positionierung der Strahlungsquelle und des Strahlungsempfängers, einer Ansteuereinrichtung (22) zum Ansteuern der Roboterarme und einer Verarbeitungseinrichtung (24) zur Rekonstruktion eines Datensatzes zur Darstellung des Objekts (26) beschrieben, um das Objekt mittels Durchleuchtung darzustellen.

RÖNTGENVORRICHTUNG MIT ROBOTERARMEN ZUR POSITIONIERUNG VON STRAHLUNGSQUELLE
UND STRAHLUNGSEKTEKTOR

5

Beschreibung

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung
und ein Verfahren zum Darstellen eines Objekts mittels
Durchleuchtung, wie z.B. zur zerstörungsfreien Prüfung von
10 mechanischen Objekten.

In der röntgenbasierten zerstörungsfreien Prüfung sind
derzeit folgende Methoden bzw. technische Geräte allgemein
bekannt und routinemäßig bei der industriellen Produktion
15 im Einsatz:

- Digitale bildgebende Systeme (Empfänger) zur Aufnahme
und Speicherung von Durchstrahlungsbildern (Röntgenprojek-
tionen), die an jedem Bildpunkt (Pixel) ein quantitatives
20 Maß für die Intensität der Röntgenstrahlung, die diesen
Punkt auf dem bildgebenden System erreicht, liefert. Ent-
sprechend dem inneren Aufbau, dem Material und der Geomet-
rie des Objekts enthält jeder Intensitätsmesswert Informa-
tionen über die integrale Röntgenschwächungseigenschaften
25 des Objekts entlang des Strahls von der Röntgenquelle zum
Bildpunkt.

- Robuste und vielseitig einsetzbare Röntgenröhren, die
einen breiten Bereich von Beschleunigungsspannungen (5 bis
30 500 kV) und Brennfleckgrößen (1 bis 3.000 µm) abdecken.
Insbesondere wurden in den letzten Jahren kompakte und
leichtgewichtige Röhren entwickelt, die eine ausreichende
Ausgangsstrahlungsleistung liefern, um auch dichte und
große Objekte, wie z. B. Fahrzeug- und Flugzeugkomponenten,
35 durchdringen zu können.

- Algorithmen, die aus einer geeigneten Serie von Rönt-
genprojektionen aus einer Vielzahl (typisch 50 bis 1.500)

von Blickrichtungen auf das Objekt eine dreidimensionale Repräsentation des Objektvolumens berechnen, das an jedem Punkt eine von der Umgebung unabhängige numerische Information über die röntgenphysikalischen Eigenschaften des Objekts an diesem Punkt enthält.

Die wichtigste Voraussetzung zur Rekonstruktion von Materialeigenschaften (Röntgenschwächungsvermögen) an einem beliebigen Punkt im dreidimensionalen Raum ist eine Serie von Röntgenprojektionen, die unter mathematisch wohl definierten geometrischen Bedingungen aufgenommen wurden.

Die existierenden Schnittbildverfahren können hinsichtlich der Messgeometrie in drei Klassen eingeteilt werden:

15

1. Axiale Verfahren, die auf einer relativ zueinander festen Anordnung von Röntgenquelle (z. B., aber nicht zwingend, einer Röntgenröhre) und dem bildgebenden System (z. B., aber nicht zwingend, einem digitalen Flachbilddetektor) beruhen. Die Bahn des Röntgenbrennflecks (der Ausgangspunkt des Strahlenbündels) bezüglich des zu prüfenden Objekts während der aufeinander folgenden Aufnahmen der Projektionsbilder geht als wichtigste Information in den Rekonstruktionsalgorithmus ein; diese Bahn wird in diesem Zusammenhang als Trajektorie bezeichnet. Für die reale Messung ist es belanglos, ob das Objekt zwischen einem feststehenden Detektor und einer Röntgenquelle gedreht oder verschoben wird, oder sich umgekehrt eine miteinander synchronisierte Kombination aus Quelle und Detektor um das Objekt bewegt. Die Art der Trajektorie (Vollkreis, Teilkreis, Helix und andere) entscheidet über den zur Rekonstruktion geeigneten Algorithmus, der außerdem als Steuerparameter die exakten geometrischen Angaben zur Position der Quelle und des Detektors während der Aufnahme jeder einzelnen Röntgenprojektion benötigt.

35

2. Derivate der axialen Verfahren, die auf algebraischen oder auf der Radon-Inversion basierten Algorithmen basieren, welche zur Rekonstruktion dreidimensionaler Volumendatensätze eine Projektionsbildserie verarbeiten können, die mit Nichtstandardgeometrien aufgenommen wurden, z. B. nichtäquidistant abgetastete oder unvollständige Kreisbahnen, die durch beliebige andere Positionen der Quelle ergänzt werden, beliebige Kombinationen aus linearen oder kreisförmigen Bewegungen, sinusförmig modellierte oder elliptische Kreisbahnen, Bahnen auf Kugeloberflächen, aber auch allen anderen. In der Praxis nachteilig an diesen Derivaten ist, dass sie an den Aufbau des Messsystems Anforderungen stellen, die bisher mittels herkömmlicher Rotations- oder Translationsachsen nicht oder nur unter einem unverhältnismäßig hohen Aufwand realisiert werden konnten.
3. Planare Verfahren, bei denen Röntgenquelle und bildgebendes System unabhängig voneinander, aber miteinander synchronisiert, linear oder kreisförmig auf beiden Seiten des Objekts bewegt werden. Diese Vorgehensweise erzeugt geeignete Eingangsdaten für spezielle Rekonstruktionsalgorithmen (unter anderem Tomosynthese, digitale Laminographie, oder algebraische Verfahren), mittels derer die Röntgenschwächungseigenschaften innerhalb beliebiger Schichten des Objekts berechnet werden können.

In der technischen Umsetzung der axialen Verfahren wird die Röntgenquelle und der Röntgenempfänger auf einer mechanischen Vorrichtung montiert, die sich dann relativ zum durchstrahlenden Objekt bewegt, oder aber das Objekt ist an einer mechanischen Vorrichtung befestigt, die sich relativ zur Röntgenröhre und zum Röntgenempfänger bewegt. Die mechanische Vorrichtung kann beispielsweise ein C-Bogen sein, an dessen Enden jeweils die Röntgenröhre und der Röntgenempfänger befestigt sind. Mittels des C-Bogens ist es möglich, einerseits die Röntgenröhre und den Röntgenemp-

fänger um das zu durchstrahlende Objekt zu drehen bzw. an diesem Objekt entlang zu schieben, um die verschiedenen Durchstrahlungsbilder zu erhalten. Andererseits ist es auch möglich, dass der C-Bogen statisch fest ist, und das Objekt
5 beispielsweise mittels eines mechanischen Tisches durch den C-Bogen geschoben wird.

Bei planaren Verfahren ist es üblich, dass das Objekt zwischen Röntgenquelle und Röntgenempfänger gestellt wird,
10 und sich dann die Röntgenquelle und der Röntgenempfänger relativ zum Objekt bewegen.

Sowohl für herkömmliche axiale Verfahren als auch herkömmliche planare Verfahren ist es nachteilig, dass die Dimension des zu durchleuchtenden Objekts in die durchleuchtende Vorrichtung passen muss. Dies bedeutet z. B. bei der Verwendung eines C-Bogens, dass nur Objekte durchleuchtet werden können, die zwischen Röntgenquelle und Röntgenempfänger passen, und sich diese dann auch noch relativ zum
15 Objekt bewegen lassen. Die Verwendung von modifizierten C-Bögen, bei denen der Abstand zwischen Röntgenquelle und Röntgenempfänger in einem gewissen Rahmen durch Teleskopstangen vergrößert werden kann, erlauben es zwar das Röntgenmesssystem der Größe des Objekts in einem gewissen
20 Rahmen anzupassen, ändern aber nichts an der grundlegenden Tatsache, dass nicht beliebige Objekte beleuchtet werden können.

Des Weiteren ist es ein Nachteil heutiger Geräte zur röntgenbasierten zerstörungsfreien Prüfung, dass diese in den
30 möglichen Freiheitsgraden der Bewegung der Röntgenquelle und des Röntgenempfängers relativ zum zu durchstrahlenden Objekt stark eingeschränkt sind. Dies hat den Nachteil, dass unter Umständen die „optimale“ Positionierung der Röntgenquelle und des Röntgenempfängers relativ zum zu durchstrahlenden Objekt nicht erreicht werden kann und sich somit Artefakte in den Durchstrahlungsbildern nicht reduzieren lassen.
35

Ausgehend von diesem Stand der Technik besteht die Aufgabe der vorliegenden Erfindung darin, eine Vorrichtung und ein Verfahren zu schaffen, die es erlaubt für Objekte mit
5 größerer Varianz in Form und Größe, ein Objekt mittels Durchstrahlung darzustellen.

Diese Aufgabe wird durch eine Vorrichtung gemäß Anspruch 1, ein Verfahren gemäß Anspruch 12 oder durch ein Softwarepro-
10 grammprodukt gemäß Anspruch 13 gelöst.

Der vorliegenden Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass eine Darstellung eines Objekts für eine breite Gruppe von Objekten unterschiedlichster Größe und Form mittels
15 Durchleuchtung erzeugt werden kann, wenn eine Strahlungsquelle und ein Strahlungsempfänger auf zwei verschiedenen Roboterarmen installiert werden, und die Roboterarme durch eine Ansteuereinrichtung derart angesteuert werden, dass ein Durchleuchten des Objekts und die Erstellung von Durch-
20 strahlungsbildern aus verschiedenen Perspektiven möglich ist. Eine Verarbeitungseinrichtung kann dann aus den verschiedenen Durchstrahlungsbildern einen dreidimensionalen Datensatz als Darstellung des Objekts rekonstruieren.

25 Ein Vorteil der vorliegenden Erfindung liegt darin, dass durch die Verwendung zweier verschiedener Roboterarme als Trägerkonstruktion für die Strahlungsquelle und den Strahlungsempfänger der Abstand zwischen der Strahlungsquelle und dem Strahlungsempfänger variabel ist, und dadurch eine
30 Anpassung der Messvorrichtung an die Größe und Form des zu durchstrahlenden Objekts vorgenommen werden kann. Es ist auch vorteilhaft, dass die Strahlungsquelle und der Strahlungsempfänger so aufgestellt werden können, dass eine bevorzugte Durchstrahlrichtung des Objektes, z. B. entlang
35 der Längs- oder Querachse des Objektes, vorgenommen werden kann.

- Des Weiteren kann mit der Vorrichtung und dem Verfahren eine Wahl der zur Durchleuchtung des Objekts verwendeten Durchstrahlungsrichtung getroffen werden, was es erlaubt, die Erzeugung der Durchstrahlungsbilder den äußeren (z. B. Form des Objekts) als auch den inneren (z. B. Dichteverteilung des Materials) Eigenschaften des Objekts anzupassen, um eine möglichst fehlerfreie Rekonstruktion des Objekts zu erreichen.
- Ein weiterer Vorteil der vorliegenden Erfindung ist es, dass durch die Verwendung zweier unabhängiger Roboterarme als Trägerkonstruktion für die Strahlungsquelle und den Strahlungsempfänger ein Durchleuchten eines Objektes nach obig beschriebenen planaren Verfahren als auch nach obig beschriebenen axialen Verfahren und deren Derivaten möglich ist. Die vorliegende Erfindung und das vorliegende Verfahren vereint also diese beiden Durchleuchtungstechniken der Computertomographie.
- Bevorzugte Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden nachfolgend Bezug nehmend auf die beiliegenden Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:
- Fig. 1 eine schematische Darstellung zur Durchleuchtung eines Objekts; und
- Fig. 2 ein Flussdiagramm für die Abarbeitung der einzelnen Schritte eines Verfahrens beim Durchleuchten eines Objekts.
- Bezug nehmend auf Fig. 1 bis 2 wird nun ein erstes Ausführungsbeispiel für die Vorrichtung zur Darstellung eines Objekts mittels Durchleuchtung beschrieben. In den Figuren werden für Objekte und Elemente gleiche oder ähnliche Bezugszeichen verwendet. Funktionsgleiche Objekte und Elemente, die in mehreren Figuren auftreten, werden darüber hinaus mit gleichen Bezugszeichen bezeichnet.

Obwohl im Folgenden eine Vorrichtung zum Durchleuchten von Flugzeugturbinen beschrieben wird um beispielsweise Materialermüdungen und Risse in Bauteilen der Flugzeugturbine zu erkennen, ist es auch möglich, andere Objekte zu durchleuchten, wie es im Anschluss an die Figurenbeschreibung noch erörtert werden wird.

Die Durchleuchtungsanordnung in Fig. 1 umfasst zwei Roboterarme 10, 14 mit jeweils einer Standvorrichtung 12 und 16, eine Strahlungsquelle 18, einen Strahlungsempfänger 20, eine Ansteuereinrichtung 22, eine Verarbeitungseinrichtung 24 sowie ein Objekt 26, welches in diesem Ausführungsbeispiel eine an einem Flugzeug angebrachte Flugzeugturbine ist. Die beiden Roboterarme 10 und 14 sind in zwei, bezüglich des Objektes 26, gegenüberliegenden Positionen aufgestellt. Die Roboterarme 10, 14 können hierbei Industrieroboter sein, wie sie beispielsweise in der Automobilindustrie eingesetzt werden. In Fig. 1 sind beispielsweise zwei Roboterarme 10 und 14 mit jeweils drei Kugelgelenken, welche die Funktionsweise des menschlichen Armes mit Schulter-, Ellbogen- und Handgelenk nachstellen, zur dreidimensionalen Positionierung und zur dreidimensionalen Ausrichtung der Roboterarme 10 und 14 dargestellt. An dem ersten Roboterarm 10 ist die Strahlungsquelle 18 (z.B. eine industrieübliche Röntgenröhre mit Beschleunigungsspannungen zw. 500 und 1.500 kV) angebracht, die die Strahlung erzeugt, welche zur Durchleuchtung der Flugzeugturbine 26 verwendet wird. An dem zweiten Roboterarm 14 ist ein Strahlungsempfänger 20 angebracht, welcher die von der Strahlungsquelle 18 erzeugte und durch die Flugzeugturbine 26 gegangene Strahlung empfängt. Der Strahlungsempfänger 20 kann z. B. eine industrieübliche Bildverstärker oder ein industrieübliches Flatpanel für Röntgenstrahlung sein.

Die Ansteuereinrichtung 22 dient zum Ansteuern, d. h. zur dreidimensionalen Positionierung und zur dreidimensionalen Ausrichtung der beiden Roboterarme 10 und 14 und damit zur dreidimensionalen Positionierung und zur dreidimensionalen

Ausrichtung der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20.

An den Strahlungsempfänger 20 ist die Verarbeitungseinrichtung 24 angeschlossen, welche, wie im Folgenden noch näher erläutert werden wird, eine Anschlussmöglichkeit für externe Vorrichtungen 32 besitzt. Die Verarbeitungseinrichtung 24 ist ausgebildet, um aus den vom Strahlungsempfänger 20 erzeugten Durchstrahlungsbildern einen dreidimensionalen Datensatz zur Darstellung der Flugzeugturbine 26 zu rekonstruieren. Zu diesem Zweck ist die Verarbeitungseinrichtung 24 mit der Ansteuereinrichtung 22 verbunden, um die für die Rekonstruktion der Flugzeugturbine 26 nötigen Informationen über die verwendeten Durchstrahlungsrichtungen für die einzelnen Durchstrahlungsbilder, d.h. die Information über die dreidimensionale Positionierung und dreidimensionale Ausrichtung der Roboterarme 10 und 14 (bzw. der Strahlungsquelle 18 und dem Strahlungsempfänger 20), zu erhalten.

Die Ansteuereinrichtung 22 umfasst eine Lagekontrolleinrichtung 28, welche dazu dient, die Lage der Roboterarme 10 und 14 (und damit der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20), d. h. die dreidimensionale Positionierung und die dreidimensionale Ausrichtung der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20 zu erfassen. Des Weiteren umfasst die Verarbeitungseinrichtung 24 eine Vorrichtung zum nichtflüchtigen Speichern (wie z. B. einen FLASH-, PROM-, EPROM-Baustein oder eine Festplatte) der Ansteuersignale zur dreidimensionalen Positionierung und dreidimensionalen Ausrichtung der Roboterarme 10 und 14.

Im Folgenden sollen nun die einzelnen Schritte des Verfahrens zur Darstellung eines Objekts mittels Durchleuchtung anhand des Ausführungsbeispiels zur Durchleuchtung einer Flugzeugturbine beschrieben werden.

In Schritt 40 werden als erstes die einzelnen dreidimensionalen Positionierungen und Ausrichtungen der Strahlungs-

quelle 18 und des Strahlungsempfängers 20 programmiert, und in der Einrichtung zum nichtflüchtigen Speichern 30 der Ansteuereinrichtung 22 abgelegt. Dabei wird die Programmierung, worauf zu einem späteren Zeitpunkt noch näher eingegangen wird, der dreidimensionalen Positionierung und der dreidimensionalen Ausrichtung der Roboterarme 10 und 14 Beispielsweise so vorgenommen, dass zum Zeitpunkt der Erzeugung eines Durchstrahlungsbildes die Strahlungsquelle 18 auf den Strahlungsempfänger 20 ausgerichtet ist, damit einerseits die maximal mögliche Intensität der Strahlung den Strahlungsempfänger 20 erreicht, und andererseits Projektionseffekte, aufgrund einer zueinander verkippten Ausrichtung der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20 ausgeschlossen werden können.

Des Weiteren wird in Schritt 40 eine Durchleuchtungssequenz festgelegt, d. h. es wird bestimmt, welche der durch die Roboterarme 10 und 14 eingenommenen einzelnen dreidimensionalen Positionierungen und dreidimensionalen Ausrichtungen der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20 für die Erzeugung eines Durchstrahlungsbildes verwendet werden wird. Auch diese Information wird in der Speichervorrichtung zum nichtflüchtigen Speichern 30 hinterlegt.

Die Verwendung frei beweglicher Roboterarme 10, 14 erlaubt es hierbei, sowohl die Sequenz der dreidimensionalen Positionierungen und dreidimensionalen Ausrichtungen der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20, als auch die Festlegung der Durchleuchtungssequenz optimal an das zu durchleuchtende Objekt 26, beispielsweise an die Flugzeugturbine, anzupassen. Das heißt aus der Gesamtheit aller möglichen Durchstrahlungsrichtungen der Flugzeugturbine 26 können diejenige in einer Durchstrahlungssequenz zusammengefasst werden, die für die Rekonstruktion eines dreidimensionalen Datensatzes zur Darstellung der Flugzeugturbine 26 vorteilhaft erscheinen.

In einem nächsten Schritt 44 wird die Kalibrierung der Vorrichtung vorgenommen. Der Schritt 44 kann einen Unterschritt 42 beinhalten, in welchem die Vorrichtung zu dem zu durchstrahlenden Objekt 26 transportiert wird, falls es
5 sich bei dem zu durchstrahlenden Objekt 26 um ein sehr großes bzw. fest installiertes Objekt, wie z. B. ein Flugzeug, einer Kraftwerksturbine oder einem Brückenpfeiler, handelt und es vorteilhaft ist die Vorrichtung zum Objekt 26 zu transportieren.

10

Die Kalibrierung der Vorrichtung umfasst einerseits das Aufstellen der Roboterarme 10 und 14 mittels der Standvorrichtungen 12 und 16 derart, dass der Abstand zwischen der Strahlungsquelle 18 und dem Strahlungsempfänger 20 mög-
15 lichst gering ist, aber beide dennoch noch genügend Bewegungsfreiraum um das Objekt 26 haben, dass die im Schritt 40 gewählte Durchstrahlungssequenz zur Durchstrahlung des Objekts 26 möglich ist. Dabei werden die Roboterarme 10 und 14 bevorzugt auf gegenüberliegenden Seiten des Objektes 26
20 aufgestellt, um eine Durchstrahlung des Objektes 26 zu ermöglichen. Die Wahl des Freiheitsgrades welche Seiten gewählt werden, also das Objekt 26 beispielsweise entlang der Längs- oder Querachse durchstrahlt wird, ist vom Bediener beim Aufstellen der Roboterarme 10 und 14 zu treffen,
25 und kann z. B. von der Größe und Form des Objekts 26 aber auch von Anforderungen an die Durchstrahlung des Objektes 26 abhängen.

Andererseits umfasst der Schritt 44 der Kalibrierung der
30 Vorrichtung auch, dass nach einer örtlichen Änderung des Standorts der Roboterarme 10 und 14 (z. B. nach dem Transport und Aufbau der Vorrichtung zu bzw. an dem Standort des Flugzeuges) die Position der Roboterarme 10 und 14 eindeutig bestimmt ist und damit ein Durchlaufen der im Schritt
35 40 bestimmten Durchstrahlungssequenz unter der Bedingung, dass jeweils zum Zeitpunkt der Erzeugung eines Strahlungsbildes die Strahlungsquelle 18 und der Strahlungsempfänger 20 aufeinander ausgerichtet sind, möglich ist. Auf mögliche

technische Realisierungen dieser Kalibrierung wird in späteren Ausführungsbeispielen noch eingegangen werden. Nach erfolgter Kalibrierung der Vorrichtung benötigen die Roboterarme 10 und 14 keine direkte optische Verbindung, da
5 die relative Position der Roboterarme 10 und 14 in ihrem gemeinsamen Koordinatensystem festgelegt ist.

Nach Schritt 44 erfolgt im Schritt 46 die Messung, d. h. das Durchleuchten der Flugzeugturbine 26. In diesem Schritt
10 46 steuert die Ansteuereinrichtung 22 mittels der in der nichtflüchtigen Speichereinrichtung 30 abgelegten Informationen die Roboterarme 10 und 14 so an, dass sequentiell die gewünschten dreidimensionalen Positionierungen und dreidimensionalen Ausrichtungen der Strahlungsquelle 18 und
15 des Strahlungsempfängers 20 eingestellt werden und die einzelnen Durchstrahlungsbilder der Durchstrahlungssequenz aufgenommen werden.

Während des Schritts 46 überprüft die Lagekontrolleinrichtung 28 ständig die tatsächliche dreidimensionale Positionierung und dreidimensionale Ausrichtung der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20 mit der gewünschten, in der nichtflüchtigen Speichereinrichtung 30 abgelegten, dreidimensionalen Position und dreidimensionalen
25 Ausrichtung, und veranlasst bei einer Abweichung die Ansteuereinrichtung 22, die Roboterarme 10 und 14 derart anzusteuern, dass die tatsächliche dreidimensionale Positionierung und die tatsächliche dreidimensionale Ausrichtung der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20 auf
30 die Werte der in der nichtflüchtigen Speichereinrichtung 30 abgelegten Positions- und Ausrichtungsangaben zu korrigieren. Hierzu kann, wie später noch näher erläutert werden wird, die Lagekontrolleinrichtung 28 optional Informationen von einer externen Einrichtung 34, welche dazu dient die
35 dreidimensionale Positionierung und die dreidimensionale Ausrichtung der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20 zu ermitteln, verarbeiten.

Jedes der im Schritt 46 vom Strahlungsempfänger 20 erzeugten Durchstrahlungsbilder wird an die Verarbeitungseinrichtung 24 übertragen. Des Weiteren überträgt die Ansteuereinrichtung 22 an die Verarbeitungseinrichtung 24 die Informationen, welche dreidimensionale Positionierung und dreidimensionale Ausrichtung der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20 (also welche Durchstrahlungsrichtung des Objekts 26) zum Zeitpunkt jedes erzeugten Durchstrahlungsbildes vorlag.

10

Nach Abschluss aller sequentiellen Schritte der Messung erfolgt im Schritt 48 die Darstellung des Objektes 26, also beispielsweise der Flugzeugturbine. Unter der Verwendung geeigneter adaptierter Rekonstruktionsalgorithmen, wie beispielsweise gefilterte Kegelstrahlrekonstruktion, Tomosynthese oder einer algebraischen Methode, rekonstruiert die Verarbeitungseinrichtung 24 aus den einzelnen vom Strahlungsempfänger 20 erzeugten Durchstrahlungsbildern und der von der Ansteuereinrichtung 22 an die Verarbeitungseinrichtung 24 gelieferten zugehörigen Durchstrahlrichtungen der Flugzeugturbine 26 einen dreidimensionalen Datensatz, welcher den inneren Aufbau der durchstrahlten Flugzeugturbine 26 wiedergibt. Hierbei ist die Verarbeitungseinrichtung 24 so ausgelegt, dass sie weitere zusätzliche Informationen, die bei der Rekonstruktion des dreidimensionalen Datensatzes der Flugzeugturbine 26 behilflich sind, und welche von einer externen Einrichtung 32 zur Verfügung gestellt werden, verwenden kann. Diese zusätzliche Information kann z. B. ein dreidimensionaler Datensatz sein, welcher bei einer simulierten Durchstrahlung der Flugzeugturbine 26 erzeugt wurde. Solch ein simulierter dreidimensionaler Datensatz kann beispielsweise von der Verarbeitungseinrichtung 24 verwendet werden, um Bildartefakte im aus den Messwerten rekonstruierten dreidimensionalen Datensatz der Flugzeugturbine 26 zu minimieren. Im Anschluss kann der Datensatz z.B. auf Risse im Material der Flugzeugturbine ausgewertet werden.

Wie schon obig erwähnt, ist es für die Erzeugung eines Durchleuchtungsbildes vorteilhaft, wenn die Strahlungsquelle 18 und der Strahlungsempfänger 20 zum Zeitpunkt der Aufnahme eines Durchleuchtungsbildes aufeinander ausgerichtet sind. Dies kann z. B. dadurch erreicht werden, dass beide Roboterarme 10 und 14 in demselben Koordinatensystem definiert sind und damit die Positionsangaben (also die Koordinaten) und die Blickrichtungen (also die Richtungsvektoren) der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20 es ermöglichen, festzustellen, ob beide aufeinander ausgerichtet sind. Dies bedeutet, dass man im Schritt 40 bei der Programmierung eines Bewegungsablaufs und der Durchstrahlungssequenz ein gemeinsames Koordinatensystem für beide Roboterarme 10 und 14 definiert und die Schritte der dreidimensionalen Positionierung und der dreidimensionalen Ausrichtung der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20 so programmiert werden, dass beide aufeinander ausgerichtet sind.

Alternativ kann die Ansteuerereinrichtung 22 so ausgelegt sein, dass nur das für beide Roboterarme 10 und 14 verwendete Koordinatensystem und die Ansteuerschritte eines Roboterarmes, unter eventuell einer Angabe eines Abstandes zwischen Strahlungsquelle und Strahlungsempfänger, programmiert wird, und die Ansteuerereinrichtung 22 die Ansteuerung des zweiten Roboterarmes selbstständig derart vornimmt, dass die Strahlungsquelle 18 und der Strahlungsempfänger 20 aufeinander ausgerichtet werden.

Da ein offensichtlicher Vorteil durch das Ausrichten der Roboterarme 10 und 14 bzw. der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20 aufeinander nur jeweils zum Zeitpunkt der Erzeugung eines Durchstrahlungsbildes gegeben ist, ist die Art, auf die (d.h. auf welchem Weg) die beiden Roboterarme 10 und 14 die Positionen für ein Durchstrahlungsbild einnehmen, nicht bedeutend, d.h. die Ansteuerereinrichtung 22 kann beispielsweise die Roboterarme 10 und 14 nach der P2P-Methode (P2P = point to point = von Punkt zu

Punkt), aber beispielsweise auch nach der ebenfalls CP-Methode (CP = continuous path = durchgehender Weg), ansteuern.

5 Damit während der Messung (Schritt 46) die Roboterarme 10 und 14 bzw. die Strahlungsquelle 18 und der Strahlungsempfänger 20 zu den Zeitpunkten der Aufnahme der Durchstrahlungsbilder aufeinander ausgerichtet sind, indem definierte Positionen in einem gemeinsamen, in Schritt 40 festgelegten, Koordinatensystem angesteuert werden, umfasst der
10 Schritt 44 der Kalibrierung der Vorrichtung auch das Einstellen einer definierten Grundposition für die dreidimensionale Positionierung und die dreidimensionale Ausrichtung beider Roboterarme 10 und 14 in dem in Schritt 40 festgelegten gemeinsamen Koordinatensystem. Von dieser Grundposition der Roboterarme 10 und 14 ausgehend kann dann die
15 Ansteuereinrichtung 22 die weitere Durchleuchtungssequenz während des Schrittes 46 ansteuern.

20 Das Einstellen der Grundposition im verwendeten Koordinatensystem, von der aus die Ansteuereinrichtung 22 dann die dreidimensionalen Positions- und dreidimensionalen Ausrichtungen der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20, gemäß der in Schritt 40 gemachten Vorgaben, vornimmt,
25 kann z. B. dadurch erfolgen, dass der Bediener der Vorrichtung die Roboterarme 10 und 14 manuell im Schritt 44 auf die Grundpositionen einstellt und diese mit industrieüblichen Techniken, wie z. B. Lineal, Wasserwaagen und lasergestützten Systemen, überprüft.

30

Alternativ kann das Einstellen der Grundposition der Roboterarme 10 und 14 im gemeinsamen Koordinatensystem auch dadurch erfolgen, dass die Ansteuereinrichtung 22 die räumliche Lage der Roboterarme 10 und 14 kennt und selbstständig die Grundposition ansteuert und überprüft. Dies
35 kann z. B. dadurch erreicht werden, dass an den Gelenken der Roboterarme 10 und 14 Sender angebracht sind, deren Position im Raum von einer externen Vorrichtung 34 durch

Triangulation bestimmt werden, und die externe Einrichtung 34 diese Positionsangaben dann an die Lagekontrolleinrichtung 28 der Ansteuereinrichtung 22 meldet. Für diese Sender würde sich z. B. die RFID-Technologie (RFID = radio frequency identification = Radiofunkerken-
5 nung) oder aber auch Ultraschall-Techniken eignen. Alternativ könnte die externe Vorrichtung 34 die Lagebestimmung der Roboterarme 10 und 14 auch über eine Verwendung von Stereokameras vornehmen. Mit diesen Informationen wäre die Ansteuereinrichtung 22 die
10 Kalibrierung der Grundposition im Schritt 44 selbstständig vorzunehmen.

Ist die Kalibrierung der Position der Roboterarme 10 und 14 in ihrem gemeinsamen Koordinatensystem, z. B. durch manuelles Einstellen durch den Bediener, oder durch die Verwen-
15 dung von Triangulationsmethoden, erfolgt, so kann wie obig beschrieben im Schritt 46 die Durchleuchtung des Objekts 26 vorgenommen werden.

Im Folgenden soll anhand eines Ausführungsbeispiels noch näher auf die Lagekontrolle der Roboterarme 10 und 14, d. h. auf die tatsächlichen eingenommenen dreidimensionalen Positionierungen und Ausrichtungen im Schritt 46 (der Messung) eingegangen werden. Zu Beginn der Messung in
20 Schritt 46 steuert die Ansteuereinrichtung 22, ausgehend von den im Schritt 44 eingestellten Grundpositionen der Roboterarme 10 und 14, nacheinander die einzelnen dreidimensionalen Positionierungen und Ausrichtungen der Roboter-
25 arme 10 und 14 an, wie sie im Schritt 40 in der nichtflüchtigen Speichereinrichtung 30 abgelegt wurden. Hierbei protokolliert z.B. die Lagekontrolleinrichtung 28 die Positionsänderungen (= Drehwinkel) aller in den Roboterarme 10 und 14 eingebauten mechanischen Gelenke, welche bei-
30 spielsweise über industrieübliche Schrittmotoren bewegt werden, mit, und kann so die dreidimensionalen Positionie-
35 rungen und Ausrichtungen der Roboterarme 10 und 14 in ihrem gemeinsamen Koordinatensystem fortschreiben.

Sind die Roboterarme 10 und 14 bzw. die in ihnen befindliche Antriebseinrichtung mit einer Elektronik zur Stellgradrückmeldung ausgestattet, so kann alternativ die Lagekontrolleinrichtung 28 die Positionsbestimmung der Roboterarme 10 und 14 aus diesen Informationen beziehen.

In beiden Beispielen bestimmt also die Lagekontrolleinrichtung 28 die Positionierung und Ausrichtung der Roboterarme 10 und 14 aus der Ansteuerung der einzelnen mechanischen Gelenke der Roboterarme.

Wie obig schon erwähnt wurde, ist es auch möglich, dass die Lagekontrolleinrichtung 28 Informationen einer externen Einrichtung 34, welche die Lage der Roboterarme 10 und 14 betreffen, verarbeitet. Wie schon erwähnt wurde, ist es z. B. vorstellbar, dass die externe Einrichtung 34 die Lage der Roboterarme 10 und 14 mittels Triangulation oder mittels einer Verwendung von Stereokameras bestimmt und diese Information über die dreidimensionale Positionierung und dreidimensionale Ausrichtung der Roboterarme an die Lagekontrolleinrichtung 28 übermittelt. Zur zusätzlichen Absicherung der dreidimensionalen Positionierung und der dreidimensionalen Ausrichtung oder zur Verbesserung bzw. Kontrolle der Genauigkeit können beispielsweise außerdem am Objekt 26 Kalibrierkörper, wie z. B. absorbierende Kugeln oder Netze, angebracht werden, deren Positionen in den einzelnen Projektionsbildern dann bei der Rekonstruktion von der Verarbeitungseinrichtung erkannt und ausgewertet werden, um festzustellen, ob die zur Rekonstruktion der 3D-Gestalt des Objekts 26 herangezogenen bzw. angenommenen Lagepositionen der Roboterarme 18 und 20 bei den einzelnen Projektionsbildern korrekt waren, und/oder um diese angenommenen Lagepositionen zu korrigieren, wie z.B. dann, wenn die Abweichung zu groß ist. Die Kalibrierkörper können an vorbestimmten Orten des zu vermessenden Objektes 26 oder an beliebigen Orten desselben befestigt werden. Die Kalibrierkörper können vor der eigentlichen Sequenz von Durchleuchtungen vorab genau in ihrer relativen Lage vermessen

werden, aber eine solche Vorabvermessung kann auch unterbleiben. Zu jedem bereits vorliegenden Durchleuchtungsbild existiert beispielsweise ein Satz von Parametern, die eine (angenommene) Sollstellung der Roboterarme von Strahlungsquelle und -detektor repräsentieren. Aus einer Mehrzahl dieser Bilder, wie z.B. allen, kann eine sehr genaue Lage der Kalibrierkörper ermittelt werden, wenn diese nicht bereits vorab bestimmt worden ist. Dann kann für jedes Bild eine Abweichung einer tatsächlichen Roboterarmstellung zum Zeitpunkt der Aufnahme des jeweiligen Bildes zu der Sollstellung ermittelt werden, indem die Lage der Kalibrierkörper zueinander ausgewertet wird. Beispielsweise wird die Abweichung der Positionen der Kalibrierkörper in dem jeweiligen Durchleuchtungsbild von den Positionen ausgewertet, die sich ergäben, wenn die Sollstellung vorläge. Diese ermittelte Abweichung kann dann zur Roboterarmsteuerung verwendet werden.

Die Lagekontrolle kann anhand der Projektionsbilder auch anhand von CAD-Daten des Objekts 26 vorgenommen werden, wie z.B. indem die Verarbeitungseinrichtung 24 simuliert, wie das jeweilige Projektions- bzw. Durchleuchtungsbild aussähe, wenn es tatsächlich in der angenommenen, wie z.B. von der Ansteuereinrichtung 22 angegebenen, Stellung von Quelle 18 und Empfänger 20 erhalten worden wäre, und indem sie dann die angenommene Stellung entsprechend ändert, wenn sie feststellt, dass die Abweichung eine gewisse Schwelle übersteigt. Die bestimmte Lage bzw. Stellung von Quelle 18 und Empfänger 20, wie sie im vorhergehenden erwähnt und im folgenden noch erwähnt wird, kann sich auf die absolute Lage derselben oder ihre relative Lage zueinander beziehen. Die simulierten Durchleuchtungsbilder können der Verarbeitungseinrichtung 24 natürlich auch von außen zugeführt werden.

35

Anstelle einer Überprüfung können die Lageauswertungen der Durchleuchtungsbilder auch unmittelbar als Grundlage für die Bestimmung der tatsächlichen Stellungen von Quelle 18

und Empfänger 20 bei den einzelnen Durchleuchtungsbildern herangezogen werden, welche dann bei der Rekonstruktion verwendet werden. In dem Fall der Verwendung von Kalibrierkörpern kann beispielsweise eine Sequenz von Durchleuchtungsbildern durchgeführt werden, woraufhin für jedes Durchleuchtungsbild beispielsweise ein Satz von Parametern vorliegt, die eine (angenommene) Sollstellung der Roboterarme von Strahlungsquelle und -detektor repräsentieren. Aus einer Mehrzahl dieser Bilder, wie z.B. allen, wird dann beispielsweise eine Lage der Kalibrierkörper ermittelt, wenn diese nicht - wie oben erwähnt - bereits vorab bestimmt worden ist. Dann kann für jedes Bild jede angenommene Sollstellung in eine tatsächliche Roboterarmstellung korrigiert werden, indem die Lage der Kalibrierkörper zueinander ausgewertet wird. Beispielsweise wird die Abweichung der Positionen der Kalibrierkörper in dem jeweiligen Durchleuchtungsbild von den Positionen ausgewertet, die sich ergäben, wenn die Sollstellung vorläge. In dem Fall der Verwendung von Vergleichsdurchleuchtungsbildern aus den Solllagen kann auf ähnliche Weise vorgegangen werden, indem für jedes Durchleuchtungsbild die angenommene bzw. vermutete Sollage anhand der Abweichung zwischen tatsächlicher Aufnahme und Vergleichsdurchleuchtungsbild ausgewertet wird.

Alternativ zur Befestigung der Kalibrierkörper auf dem Objekt, können die Kalibrierkörper an dem Empfänger 20 bzw. auf Empfängerseite und/oder an der Quelle 18 bzw. auf Quellenseite angebracht sein. Sie werden dazu fix mit der Quelle 18 bzw. dem Empfänger verbunden und zwar so, dass sie durch den Empfänger abgebildet werden. Beispielsweise können zwei Kreuze in Strahlungsrichtung gesehen hintereinander angebracht zur Kalibrierung eingesetzt werden. Durch den Versatz in der Abbildung der Kalibrierkörper, der durch die Strahlungsrichtung bestimmt wird, kann auf eine eventuelle Diskrepanz zwischen der tatsächlichen Position der Roboterarme und der hinterlegten Sollposition geschlossen werden. Diese Diskrepanz kann entweder durch Korrektur der

Position der Roboterarme korrigiert oder im Rekonstruktionsalgorithmus entsprechend berücksichtigt bzw. korrigiert werden.

- 5 Während der Messung, also im Schritt 46, vergleicht die Lagekontrolleinrichtung 28 die ermittelte tatsächliche Position der Roboterarme 10 und 14 mit der gewünschten, also anzusteuern, Position und Ausrichtung der Roboterarme 10 und 14 und veranlasst die Ansteuereinrichtung 22
10 bei einer Abweichung nachzuregeln, d. h. die gewünschte Position und Ausrichtung der Roboterarme 10 und 14 anzusteuern. Dies ist notwendig, da die Verarbeitungseinrichtung 24 im Schritt 48 zur Rekonstruktion und Darstellung des Objekts 26 neben den einzelnen erzeugten Durchleuchtungsbildern auch die Blickwinkel, d. h. die dreidimensionalen Positionsangaben und dreidimensionalen Ausrichtungen der Strahlungsquelle 18 und des Strahlungsempfängers 20, benötigt. Sollte es z. B. im Schritt 46 nicht möglich sein, eine der gewünschten dreidimensionalen Positionierungen und
15 dreidimensionalen Ausrichtungen der Roboterarme 10 und 14 anzusteuern, da dies z. B. die Schrittweite der einzelnen Schrittmotoren in den Roboterarmen 10 und 14 nicht zulässt, eine Korrektur der der Lagekontrolleinrichtung 28 bekannten tatsächlichen dreidimensionalen Positionierung und dreidimensionalen Ausrichtung der Roboterarme 10 und 14 auf die
20 in der nichtflüchtigen Speichereinrichtung 30 abgelegten Werte also nicht möglich ist, so kann alternativ die Lagekontrolleinrichtung 28 die entsprechende gewünschte, aber nicht erreichbare, dreidimensionale Positionierung und dreidimensionale Ausrichtung der Roboterarme 10 und 14 auf die
25 in der nichtflüchtigen Speichereinrichtung 30 überschreiben, damit die Verarbeitungseinrichtung 24 im Schritt 48 der Rekonstruktion und Darstellung des Objekts 26 einen konsistenten Satz aus Durchleuchtungsbildern und Durchstrahlrichtungen (= Blickwinkel) erhält.
30
35

Zu den im vorhergehenden beschriebenen Ausführungsbeispielen existieren verschiedene Alternativen. So ist es bei-

spielsweise möglich, dass anstelle der Ansteuereinrichtung 22 die Verarbeitungseinrichtung 24 selbst die Lagesteuerung der Roboterarme 10 und 14 vornimmt, und dass die Ansteuereinrichtung beispielsweise lediglich die Protokollierungsaufgabe übernimmt, um die tatsächlich eingenommenen Lagepositionen der Roboterarme bzw. von Strahlungsquelle 18 und Strahlungsempfänger 20 für die Rekonstruktion durch die Verarbeitungseinrichtung 24 zu erfassen und protokollieren. Auf ähnliche Weise ist es nicht unbedingt erforderlich, dass der Bewegungsablauf der Roboterarme 10 und 14 vorab einprogrammiert wird. Vielmehr kann es auch vorgesehen sein, dass beispielsweise die Verarbeitungseinrichtung 24 die einzunehmende Stellung von Quelle 18 und Empfänger 20 denselben online während der Messung vorgibt.

Der Bewegungsablauf, der den Roboterarmen 10 und 14 vorgegeben wird, kann neben obigen Nebenbedingungen, wie z.B. der Aufeinanderausrichtung von Quelle 18 und Empfänger 20, beispielsweise noch an folgende Nebenbedingungen geknüpft sein. Beispielsweise weist die Ansteuereinrichtung 22 zwei Betriebsmodi auf, wobei bei dem ersten der zwei Betriebsmodi die Strahlungsquelle 18 und der Strahlungsempfänger 20 so bewegt werden, dass sich dieselben um eine gemeinsame Achse mit einem jeweils festen Abstand bewegen (axiales Verfahren), und bei dem zweiten der Betriebsmodi die Strahlungsquelle 18 und der Strahlungsempfänger 20 so bewegt werden, dass sich dieselben in jeweiligen Ebenen, die parallel zueinander sind, parallel zueinander bewegen (planares Verfahren). Im erstgenannten Fall beschreiben Quelle 18 und Empfänger 20 beispielsweise eine oder mehrere vollständige Kreisbahnen bzw. Drehungen oder eine oder mehrere Kreisbögen bzw. Teildrehungen um das Objekt 26. In dem Fall mehrerer Voll- oder Teilkreisbahnen können diese um verschiedene und insbesondere nicht-parallele Drehachsen definiert sein, beispielsweise je nach dem, welche Kombination von Durchleuchtungsebenen und Drehbewegungen innerhalb dieser Ebenen zu einem ausreichenden Rekonstruktionsergebnis bei kürzestem Messablauf ergeben. Diese Kreisbögen können

wiederum natürlich anhand eines CAD-Modells des Objekts 26 ermittelt werden.

Im vorhergehenden wurde die Möglichkeit erwähnt, dass eine tatsächliche Lage der Strahlungsquelle (18) und des Strahlungsempfängers (20) basierend auf den Durchstrahlungsbildern einerseits und einem Vergleich derselben mit Vergleichsdurchstrahlungsbildern bei einer angenommenen Stellung des Strahlungsempfängers (20) und der Strahlungsquelle (18) oder Positionen von an dem Objekt, der Strahlungsquelle (18) oder dem Strahlungsempfänger angebrachten Kalibrierkörpern in den Durchstrahlungsbildern andererseits bestimmt oder basierend darauf auf eine Übereinstimmung mit der angenommenen Stellung überprüft wird. Dazu seien noch verschiedenen Alternativen bzw. Details erwähnt. Die Vergleichsdurchleuchtungsbilder können beispielsweise aus einer geometrischen 3-D Beschreibung des Prüfobjektes gewonnen werden und einer Berechnung des Schattenwurfes des über diese 3-D Beschreibung definierten Objektes, also dessen Kontur auf dem Bildempfänger, die sich mittels Methoden der analytischen Geometrie ergibt, entsprechen. Allerdings können die Vergleichsdurchleuchtungsbilder auch unter Berücksichtigung der Röntgenphysik gewonnen werden, indem eine physikalisch-deterministische Berechnung der idealen Schwächungsverteilung hinter dem Objekt basierend auf Durchstrahlungslängen, die aus den a-priori Informationen abgeleitet werden können, durchgeführt wird. Eine sicherlich aufwendigere aber ebenfalls mögliche Alternative zur Bestimmung der Vergleichsdurchleuchtungsbilder, welche physikalisch realistische Vorhersagen für die Röntgenprojektionen liefert, wäre die Verwendung von Monte Carlo-Simulationen, welche die vollständige Palette der physikalischen Wechselwirkungen in einem Objekt auf Basis einer detaillierten Beschreibung von Materialien und Strukturen nachbildet, inklusive beispielsweise Rauschen, Streuung und/oder Ineffizienzen bzw. Inhomogenitäten des Strahlungsempfängers.

- Die "Berechnung der Durchstrahlungsbilder" kann zusätzlich oder alternativ die Kalibrierkörper berücksichtigen, die bei der realen Messung am Objekt angebracht werden. Diese Kalibrierkörper sind z.B. stark absorbierende, kleine Kugeln oder Drähte und können natürlich beliebig kompliziert gestaltet und/oder angeordnet werden, damit sie - und folglich deren räumliche Position - in den Projektionsbildern eineindeutig identifiziert werden können.
- 10 Hinsichtlich der a-priori Informationen, aus denen die Vergleichsdurchleuchtungsbilder berechnet werden, stehen natürlich auch verschiedene Informationsquellen zur Verfügung. Beispielsweise könnten das die CAD-Daten des Objektes sein, aber auch Daten, die aus vorangegangenen Messungen
- 15 wie optischer 3-D Oberflächenerfassung stammen. Schließlich ist es möglich, als Vergleichsdurchleuchtungsbilder auch solche zu verwenden, die zuvor in den Sollagestellungen an einem dem Messobjekt entsprechenden stellvertretenden Referenzmessobjekt durchgeführt worden sind.
- 20 Obwohl im obigen Ausführungsbeispiel davon ausgegangen wurde, dass die Vorrichtung dazu verwendet wird, große Objekte, wie z. B. Flugzeugturbinen, Kraftwerksturbinen oder Brückenpfeiler, zu durchleuchten, und deshalb die
- 25 Vorrichtung an den Standort des zu durchleuchtenden Objekts transportiert wird, ist es auch möglich, die Vorrichtung fest zu installieren, und mit dieser Objekte 26 zu durchleuchten, die man zum Standort der Vorrichtung bringen kann. In diesem Fall ist eine Definition des gemeinsamen
- 30 Koordinatensystems für die Roboterarme 10 und 14 und die Kalibrierung der Vorrichtung im Schritt 44 nur einmal, nämlich während der einmaligen Installation der Vorrichtung nötig. So ist es beispielsweise vorstellbar die Vorrichtung bei der Fertigung von Maschinenteilen, wie z.B. Motorblö-
- 35 cken, einzusetzen um hier eine Kontrolle der Maschinenteile auf Risse, Schwachstellen, Materialfehler und dergleichen durchzuführen.

Obwohl im obigen Ausführungsbeispiel davon ausgegangen wurde, dass die Programmierung der Durchstrahlungssequenz zeitlich vor einem eventuellen Transport der Vorrichtung und deren Aufbau an dem Standort des zu durchstrahlenden Objektes 26 erfolgt, ist es auch möglich, dass die Programmierung der Durchstrahlungssequenz zusammen mit der Kalibrierung der Vorrichtung erst nach einem eventuellen Transport der Vorrichtung und deren Aufbau am Standort des Objektes 26 stattfindet.

10

Abhängig von den Gegebenheiten kann das erfindungsgemäße Verfahren zur Darstellung eines Objekts mittels Durchstrahlung in Hardware oder in Software implementiert werden. Die Implementierung kann auf einem digitalen Speichermedium, insbesondere einer Diskette, einer CD oder einer DVD, mit elektronisch auslesbaren Steuersignalen erfolgen, die so mit einem programmierbaren Computersystem zusammenwirken können, dass das Verfahren zur Darstellung eines Objekts mittels Durchleuchtung ausgeführt wird. Allgemein besteht die Erfindung somit auch in einem Softwareprogrammprodukt bzw. einem Programmprodukt mit einem auf einem maschinenlesbaren Träger gespeicherten Programmcode zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens, wenn das Softwareprogrammprodukt auf einem Rechner oder auf einem Prozessor abläuft. In anderen Worten ausgedrückt kann die Erfindung somit als ein Computerprogramm bzw. Softwareprogramm bzw. Programm mit einem Programmcode zur Durchführung des Verfahrens realisiert werden, wenn das Programm auf einem Prozessor abläuft. Der Prozessor kann hierbei von einem Computer, einer Chipkarte (Smartcard) oder einem anderen integrierten Schaltkreis gebildet sein.

25

30

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Darstellung eines Objekts mittels Durchstrahlung mit folgenden Merkmalen:
- 5 einer Strahlungsquelle (18);
- einem Strahlungsempfänger (20);
- 10 einem ersten Roboterarm (10) zur dreidimensionalen Positionierung und zur dreidimensionalen Ausrichtung der Strahlungsquelle (18);
- einem zweiten Roboterarm (14) zur dreidimensionalen Positionierung und zur dreidimensionalen Ausrichtung
- 15 des Strahlungsempfängers (14);
- einer Ansteuereinrichtung (22) zum Ansteuern des ersten und zweiten Roboterarms (10, 14), derart, dass
- 20 Durchstrahlungsbilder des Objekts (26) aus verschiedenen Perspektiven erhalten werden können; und
- eine Verarbeitungseinrichtung (24) zur Rekonstruktion eines dreidimensionalen Datensatzes aus den Durch-
- 25 strahlungsbildern des Objekts (26).
2. Vorrichtung gemäß Anspruch 1, bei der die Ansteuereinrichtung (22) derart ausgebildet ist, dass die dreidimensionale Positionierung und die dreidimensionale
- 30 Ausrichtung der Strahlungsquelle (18) und des Strahlungsempfängers (20) so erfolgt, dass beide über eine Folge von Durchstrahlungsvorgängen hinweg zueinander ausgerichtet sind.
- 35 3. Vorrichtung gemäß Anspruch 1 oder 2, bei der die Ansteuereinrichtung (22) derart ausgebildet ist, dass diese eine Lagekontrolleinrichtung (28) zur Bestimmung

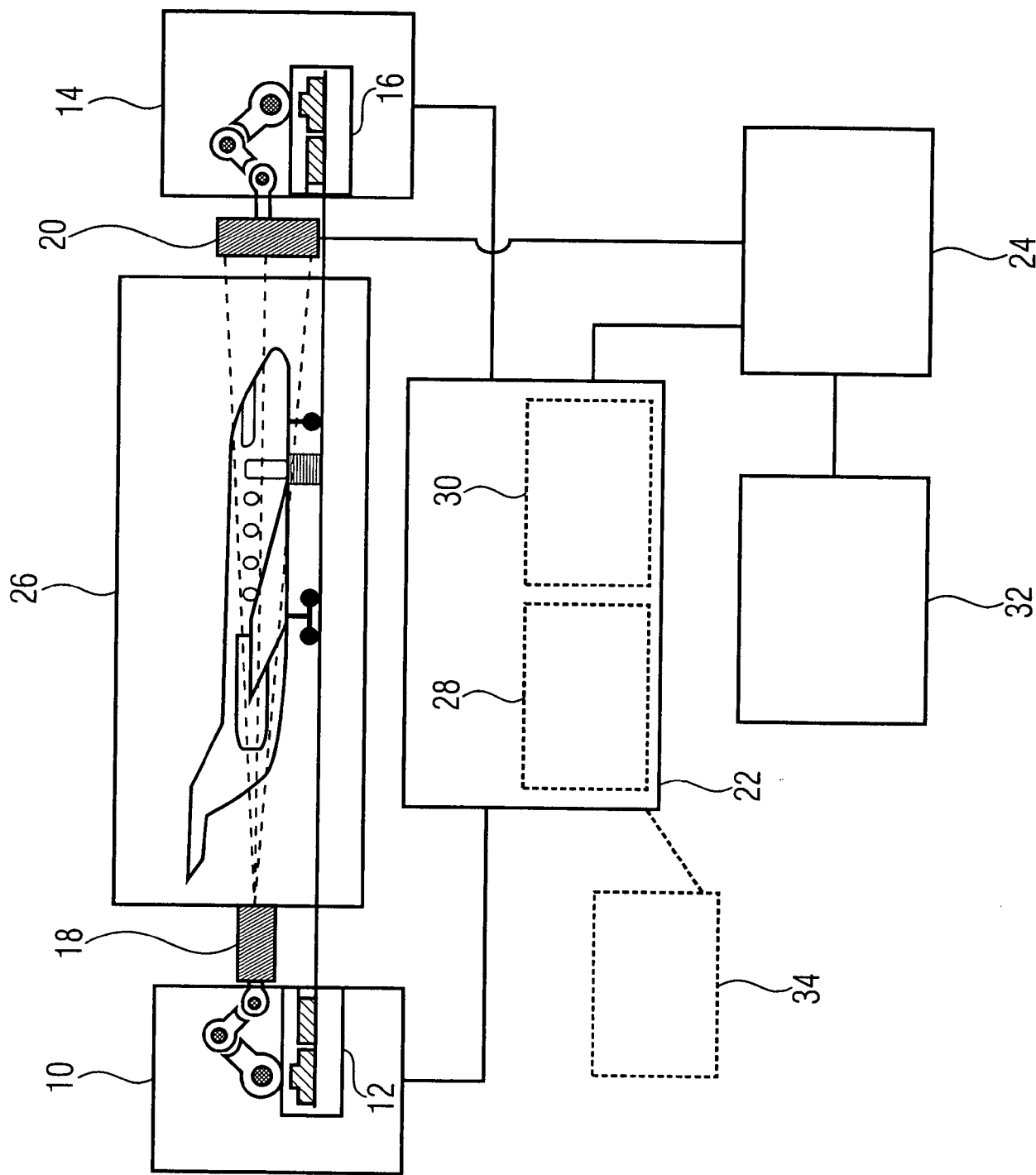
einer tatsächlichen Lage der Strahlungsquelle (18) und des Strahlungsempfängers (20) aufweist.

4. Vorrichtung gemäß Anspruch 3, bei der die Lagekontrolleinrichtung (28) zur Bestimmung der tatsächlichen Lage der Strahlungsquelle (18) und des Strahlungsempfängers (20) ausgebildet ist, um externe Informationen über die Lage der Strahlungsquelle (18) und des Strahlungsempfängers (20) zu empfangen.
5. Vorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die Ansteuereinrichtung (22) derart ausgebildet ist, dass diese eine Lagekontrolleinrichtung (28) aufweist, die ausgebildet ist, um eine tatsächliche Lage der Strahlungsquelle (18) und des Strahlungsempfängers (20) basierend auf den Durchstrahlungsbildern einerseits und einem Vergleich derselben mit Vergleichsdurchstrahlungsbildern bei einer angenommenen Stellung des Strahlungsempfängers (20) und der Strahlungsquelle (18) oder Positionen von an dem Objekt, der Strahlungsquelle (18) oder dem Strahlungsempfänger angebrachten Kalibrierkörpern in den Durchstrahlungsbildern andererseits zu bestimmen oder auf eine Übereinstimmung mit der angenommenen Stellung zu überprüfen.
6. Vorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die Verarbeitungseinrichtung (24) ausgelegt ist, um zur Rekonstruktion des dreidimensionalen Datensatzes aus den Durchstrahlungsbildern des Objekts (26) die tatsächliche Lage der Strahlungsquelle (18) und des Strahlungsempfängers (20) zu verwenden.
7. Vorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der erste und zweite Roboterarm (10, 14) jeweils eine Standvorrichtung (12, 16) aufweisen, um in einem beliebigen Abstand zueinander aufgestellt zu werden.

8. Vorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die Ansteuereinrichtung (22) programmierbar ist, um den ersten und zweiten Roboterarm (10, 14) so anzusteuern, dass die Strahlungsquelle (18) und der Strahlungsempfänger (20) einen Bewegungsablauf einnehmen.
9. Vorrichtung gemäß Anspruch 8, bei der die Verarbeitungseinrichtung (24) eine Einrichtung zum nichtflüchtigen Speichern (30) des Bewegungsablaufs enthält.
10. Vorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die Roboterarme (10, 14) und die Ansteuereinrichtung (22) ausgebildet sind, um eine gewünschte dreidimensionale Positionierung und dreidimensionale Ausrichtung der Strahlungsquelle (18) und des Strahlungsempfängers (20) mit der tatsächlichen dreidimensionalen Ausrichtung der Strahlungsquelle (18) und des Strahlungsempfängers (20) zu vergleichen, und bei einer Abweichung eine Korrektur der Position der Positionierung und der Ausrichtung der Strahlungsquelle (18) und des Strahlungsempfängers (20) vorzunehmen.
11. Vorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die Verarbeitungseinrichtung (24) ausgebildet ist, um zur Rekonstruktion des dreidimensionalen Datensatzes aus den vom Strahlungsempfänger (20) erzeugten Durchstrahlungsbildern zusätzlich von einer externen Vorrichtung (32) zur Verfügung gestellte Daten, welche Informationen über den dreidimensionalen Aufbau des Objekts (26) aufweisen, zu verwenden.
12. Vorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Ansteuereinrichtung (22) zwei Betriebsmodi aufweist, wobei bei dem ersten der zwei Betriebsmodi die Strahlungsquelle (18) und der Strahlungsempfänger (20) so bewegt werden, dass sich dieselben um eine gemeinsame Achse mit einem jeweils festen Abstand bewe-

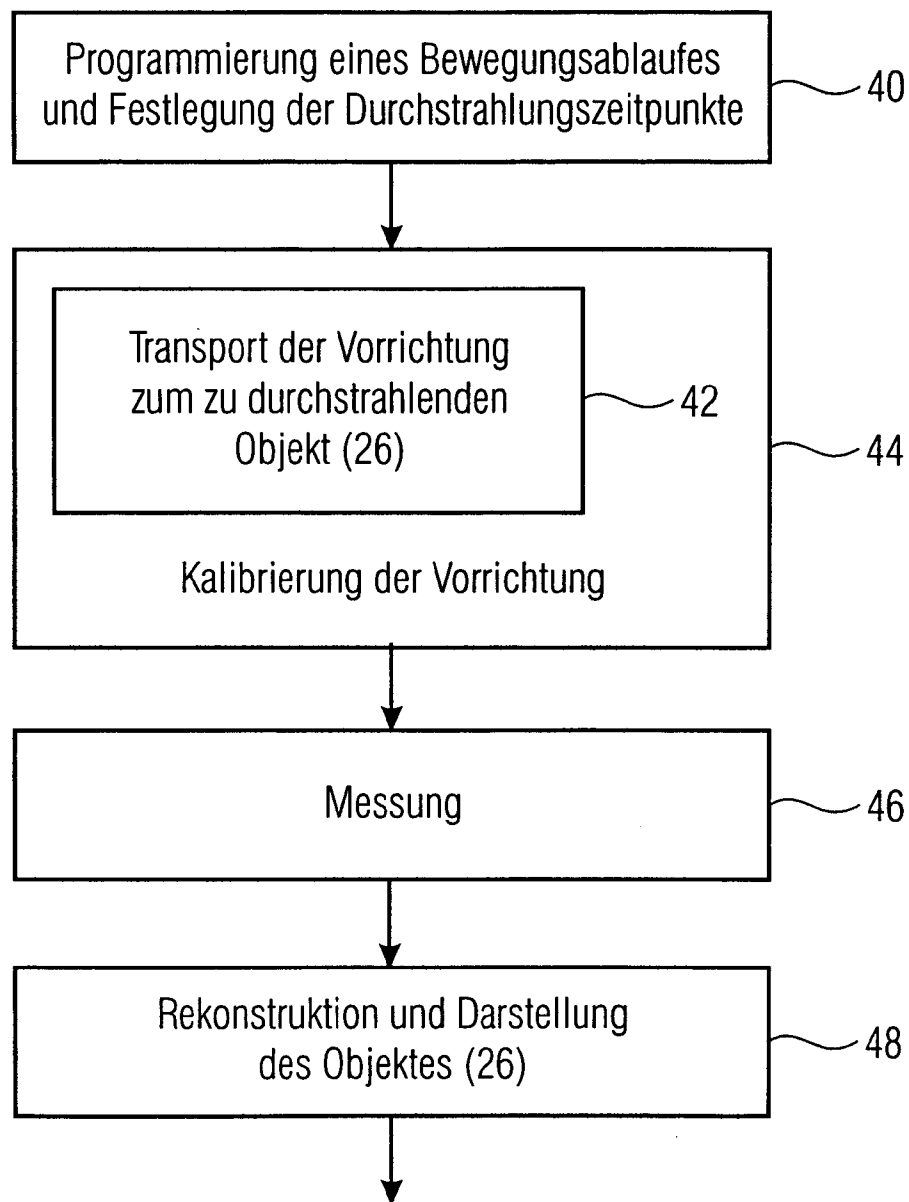
gen, und bei dem zweiten der Betriebsmodi die Strahlungsquelle 18 und der Strahlungsempfänger 20 so bewegt werden, dass sich dieselben in jeweiligen Ebenen, die parallel zueinander sind, parallel zueinander bewegen.

13. Verfahren zur Darstellung eines Objekts mittels Durchstrahlung unter Verwendung
- einer Strahlungsquelle (18);
- einem Strahlungsempfänger (20);
- einem ersten Roboterarm (10), an dem die Strahlungsempfänger (18) angebracht ist;
- einem zweiten Roboterarm (14), an dem der Strahlungsempfänger (20) angebracht ist;
- mit folgenden Schritten:
- Ansteuern des ersten und zweiten Roboterarms (10, 14), derart, dass Durchstrahlungsbilder des Objekts (26) aus verschiedenen Perspektiven erhalten werden können; und
- Rekonstruktion eines dreidimensionalen Datensatzes aus den Durchstrahlungsbildern des Objekts (26).
14. Computerprogramm mit einem Programmcode zum Ausführen des Verfahrens gemäß Patentanspruch 13, wenn das Computerprogramm auf einem Rechner läuft.



FIGUR 1

2/2



FIGUR 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2008/009892

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01N23/04 A61B6/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01N A61B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 2006/042211 A (UNIV FLORIDA [US]; BANKS SCOTT ARTHUR [US]) 20 April 2006 (2006-04-20) page 5, paragraph 20 - page 8, paragraph 33; figure 1	1-14
X	DE 198 55 213 A1 (SIEMENS AG [DE]) 29 June 2000 (2000-06-29) column 2, line 33 - column 5, line 7; figure 1	1-14
X	EP 0 220 501 A (SIEMENS AG [DE]) 6 May 1987 (1987-05-06) column 2, line 47 - column 4, line 32; figure 1	1-14
	----- -/-	

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *&* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

20 Februar 2009

Date of mailing of the international search report

27/02/2009

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Huenges, Alexandra

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2008/009892

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 6 049 586 A (KITAGUCHI HIROSHI [JP] ET AL) 11 April 2000 (2000-04-11) column 17, line 45 - column 19, line 60; figures 29,32 -----	1-14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2008/009892

Patent document cited in search report		Publication date		Patent family member(s)	Publication date
WO 2006042211	A	20-04-2006	US	2008037701 A1	14-02-2008
DE 19855213	A1	29-06-2000	JP	2000166906 A	20-06-2000
			US	6435715 B1	20-08-2002
EP 0220501	A	06-05-1987	JP	6049284 Y2	14-12-1994
			JP	62064504 U	22-04-1987
			US	4894855 A	16-01-1990
US 6049586	A	11-04-2000	US	6333962 B1	25-12-2001

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2008/009892

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G01N23/04 A61B6/00

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G01N A61B

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	WO 2006/042211 A (UNIV FLORIDA [US]; BANKS SCOTT ARTHUR [US]) 20. April 2006 (2006-04-20) Seite 5, Absatz 20 - Seite 8, Absatz 33; Abbildung 1	1-14
X	DE 198 55 213 A1 (SIEMENS AG [DE]) 29. Juni 2000 (2000-06-29) Spalte 2, Zeile 33 - Spalte 5, Zeile 7; Abbildung 1	1-14
X	EP 0 220 501 A (SIEMENS AG [DE]) 6. Mai 1987 (1987-05-06) Spalte 2, Zeile 47 - Spalte 4, Zeile 32; Abbildung 1	1-14
	----- -/--	

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie

- * Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
 - *A* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
 - *E* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
 - *L* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
 - *O* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
 - *P* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
 - *T* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
 - *X* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
 - *Y* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
 - *G* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
20. Februar 2009	27/02/2009
Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Huenges, Alexandra

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2008/009892

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 6 049 586 A (KITAGUCHI HIROSHI [JP] ET AL) 11. April 2000 (2000-04-11) Spalte 17, Zeile 45 - Spalte 19, Zeile 60; Abbildungen 29,32 -----	1-14

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2008/009892

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2006042211 A	20-04-2006	US 2008037701 A1	14-02-2008
DE 19855213 A1	29-06-2000	JP 2000166906 A	20-06-2000
		US 6435715 B1	20-08-2002
EP 0220501 A	06-05-1987	JP 6049284 Y2	14-12-1994
		JP 62064504 U	22-04-1987
		US 4894855 A	16-01-1990
US 6049586 A	11-04-2000	US 6333962 B1	25-12-2001