



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2022 109 902.4**

(22) Anmeldetag: **25.04.2022**

(43) Offenlegungstag: **26.10.2023**

(51) Int Cl.: **G01N 23/046** (2018.01)

G01B 15/00 (2006.01)

(71) Anmelder:
**Carl Zeiss GOM Metrology GmbH, 38122
Braunschweig, DE**

(72) Erfinder:
Wedekind, Markus, 38118 Braunschweig, DE

(74) Vertreter:
**Meissner Bolte Patentanwälte Rechtsanwälte
Partnerschaft mbB, 30175 Hannover, DE**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

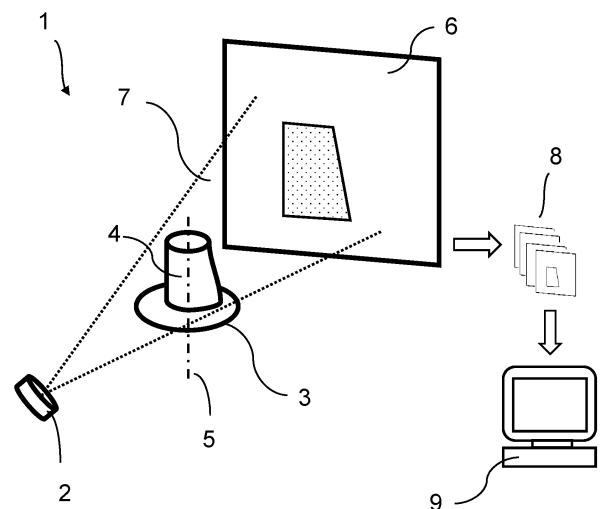
(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Erstellung eines Volumenmodells eines Objektes, Computerprogramm und Messvorrichtung hierzu**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung beschreibt ein Verfahren zur Erstellung eines Volumenmodells (10) eines mittels realer oder virtueller Computertomografie vermessenen Objektes (4), wobei im Zuge der computertomographischen Vermessung Projektionsbilder (8) des in den Strahlengang (7) zwischen einer Strahlungsquelle (2) und einem Detektor (6) positionierten Objektes (4) mit einem Detektor (6) erfasst wurden, mit den Schritten A) Erzeugen eines Start-Volumenmodells des Objektes (4) mittels Rekonstruktion aus den durch reale oder virtuelle Computertomographie erhaltenen Projektionsbildern (8, 8e) des Objektes;

B) Bestimmen von Durchstrahlungslängen von Objekt-Materialien für Positionen von Pixeln in den durch reale oder virtuelle Computertomographie erhaltenen oder korrigierten Projektionsbildern (8, 8e, 8k) mittels Verfolgung eines Strahls (Ray-Tracing) durch das Start-Volumenmodell oder ein korrigiertes Volumenmodell;

C) Bestimmen einer von den Durchstrahlungslängen und der Pixelhelligkeit abhängigen Korrekturfunktion und Anwenden dieser Korrekturfunktion auf die Projektionsbilder, um korrigierte Projektionsbilder (8k) zu erhalten;

D) Berechnen eines korrigierten Volumenmodells aus den korrigierten Projektionsbildern.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erstellung eines Volumenmodells eines mittels realer oder virtueller Computertomografie vermessenen Objektes, sowie ein Computerprogramm und eine Messvorrichtung hierzu.

[0002] Eine häufig gestellte Aufgabe im industriellen Umfeld ist die zerstörungsfreie Vermessung von Bauteilen (Objekten) beispielsweise zu Zwecken der Qualitätssicherung.

[0003] Dabei können Messeinrichtungen zur computertomografischen Vermessung von Objekten zum Einsatz kommen. Eine typische Messeinrichtung zur computertomografischen Vermessung eines Objektes beinhaltet zum Beispiel eine Strahlungsquelle, zum Beispiel Röntgenquelle, eine Positionierungsvorrichtung zur Positionierung und Bewegung des Objektes (Manipulationssystem, beispielsweise ein Drehtisch), und eine Detektoreinheit wie beispielsweise einen Flat-Panel-Detektor.

[0004] Um das Objekt computertomografisch zu vermessen, wird dieses aus verschiedenen Richtungen durchstrahlt, um so eine Mehrzahl von Durchstrahlungsbildern / Projektionsbildern, insbesondere Röntgenbildern, aufzunehmen.

[0005] Zunehmend gewinnt auch die virtuelle Computertomografie an Bedeutung, die eine entsprechende computertomografische Vermessung zum Beispiel zu Analysezwecken lediglich simuliert.

[0006] Je nach Material und Materialstärke wird die invasive Strahlung der Strahlungsquelle unterschiedlich stark beim Durchdringen des Objektes abgeschwächt. Die in der Detektoreinheit registrierte Helligkeit nimmt dabei abhängig von der Länge des durchstrahlten Materials ab.

[0007] Aus den Projektionsbildern kann in bekannter Weise mit Hilfe eines Rekonstruktionsalgorithmus ein Volumendatensatz berechnet werden, der das Objekt dreidimensional beschreibt.

[0008] Einfache Berechnungsansätze gehen dabei zumeist von einer monochromen Röntgenstrahlung aus. In der Realität sind die in der Computertomografie verwendeten Röntgenquellen allerdings nicht vollkommen monochromatisch. Sobald die verwendete Röntgenstrahlung ein Spektrum verschiedener Energien aufweist, können diese verschiedenen Energien zu unterschiedlichen Abschwächungen beim Durchdringen eines Materials führen. Niederenergetische Photonen werden sehr viel leichter im Material absorbiert, so dass das Strahlspektrum beim Durchdringen von Material niedrigerenergetische Anteile verliert und sich der Schwerpunkt des Strahlungsspektrums

leicht zu höheren Energien verschiebt. Der Strahl wird „härter“.

[0009] Bei der Computertomografie kann es durch die Strahlaufhärtung zu Artefakten kommen.

[0010] Besonders wenn das Objekt mehrere Materialien mit unterschiedlichen Abschwächungskoeffizienten aufweist, kann sich die Strahlaufhärtung sehr nachteilig auswirken. In Bereichen hoher Materialdichte entstandene Streifenartefakte können beispielsweise die Messungen in Bereichen geringerer Materialdichte überlagern und dadurch stark verfälschen.

[0011] Um die Qualität der Ergebnisse einer Computertomografie-Messung zu verbessern oder zu gewährleisten, können Korrekturmethode zum Einsatz kommen.

[0012] Zum Beispiel können physikalische Vorfilter z. B. aus Kupfer oder Aluminium zum Einsatz kommen. Diese filtern niederenergetische Strahlungsanteile aus. Die für die Vermessung verwendete Strahlung wird durch den Filter bereits aufgehärtet und zeigt ein monochromatischeres Verhalten, wodurch Strahlaufhärtungseffekte beim anschließenden Durchstrahlen des Objektes reduziert werden können.

[0013] Neben den Effekten der Strahlaufhärtung können noch weitere Störeffekte auftreten. Beispielsweise können in den Röntgendetektoren Streueffekte auftreten. Die Röntgenstrahlung streut beim Auftreffen auf einen Detektorpixel auch in umliegende Pixel. Diese Streueffekte betreffen dabei nicht nur direkte Nachbarpixel. Auch zum Beispiel in 100 Pixeln Entfernung konnten diese Effekte schon nachgewiesen werden. In den aufgenommenen Projektionsbildern macht sich dieser Effekt beispielsweise als eine Weichzeichnung der Materialkanten bemerkbar.

[0014] Weitere Artefakte können z. B. im Bereich von Materialkanten entstehen. Detektorpixel nehmen beispielsweise Strahlungsanteile wahr, die unterschiedliche Materialien durchdrungen haben. Damit ist ein Rückschluss von der aufgenommenen Helligkeit auf die durchdrungene Materiallänge sehr fehlerhaft.

[0015] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein verbessertes Verfahren zur Erstellung eines Volumenmodells eines Objektes, insbesondere eines aus mehreren Materialien bestehenden Objektes, aus den Projektionsbildern einer computertomografischen Messung zu schaffen.

[0016] Auftretende Artefakte, wie z. B. Strahlaufhärtungsartefakte, aus der computertomografischen

Vermessung, insbesondere bei Multimaterialobjekten sollen dabei reduziert werden. Insbesondere soll ein Verfahren geschaffen werden Artefakte zu reduzieren, ohne dass Vorkenntnisse über das Energiespektrum der Strahlungsquelle oder die Abschwächungskoeffizienten im Objekt notwendig sind.

[0017] Des Weiteren soll eine verbesserte Messeinrichtung zur computertomografischen Vermessung von Objekten geschaffen werden.

[0018] Die Aufgabe wird durch das Verfahren nach Anspruch 1, die Messeinrichtung nach Anspruch 24 und das Computerprogramm mit den Merkmalen des Anspruchs 23 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen sind in den Unteransprüchen beschrieben.

[0019] Für das verbesserte Verfahren zur Erstellung eines Volumenmodells eines Objektes werden Projektionsbilder aus einer computertomografischen Vermessung eines Objektes oder einer Simulation einer solchen Vermessung verwendet.

[0020] Diese Projektionsbilder können mit einer geeigneten Messvorrichtung zur computertomografischen Vermessung (Computer-Tomograf) real erfasst werden. Der Computer-Tomograf erfasst mittels eines Detektors Bilder eines in den Strahlengang zwischen einer Strahlungsquelle und der Detektoreinheit positionierten Objektes. Zur Vermessung eines Objektes ist es dabei üblich Bilder in bis zu mehreren hundert unterschiedlichen Positionen des Objektes aufzunehmen, beispielsweise indem sich das Objekt auf einem Drehtisch befindet und zwischen oder während der Aufnahmen um einen vorgegebenen Winkel rotiert. Die so gewonnen Bilder stellen dabei mögliche Projektionsbilder für das nachfolgend beschriebene Verfahren dar.

[0021] Die virtuelle Computertomografie ermöglicht heute verschiedene Einflüsse einer computertomografischen Vermessung eines Objektes zu simulieren. Dabei sind zum Beispiel auch Simulationen von Durchstrahlungsprozessen möglich, die entsprechend simulierte Projektionsbilder generieren können.

[0022] Vorteilhaft ist es, wenn die Projektionsbilder mittels eines optionalen Vorverarbeitungsschritts bereits so aufbereitet werden, dass negative Effekte aufgrund von Detektorstreuung reduziert werden. Nach der optionalen Vorverarbeitung können die Projektionsbilder dann als Eingangsdaten für die nachfolgenden Verfahrensschritte Anwendung finden.

[0023] Für die Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens oder des erfindungsgemäßen Computerprogramms ist es nicht von Belang, ob eine reale computertomografische Vermessung erfolgte, oder

ob die Daten, wie bspw. die Projektionsbilder, aus einer Simulation, wie einer virtuellen Computertomografie stammen.

[0024] Das Verfahren zur Erstellung eines verbesserten Volumenmodells eines Objektes umfasst die folgenden Schritte:

A) Erzeugen eines Start-Volumenmodells des Objektes mittels Rekonstruktion aus den durch reale oder virtuelle Computertomographie erhaltenen Projektionsbildern des Objektes (Schritt 101);

B) Bestimmen von Durchstrahlungslängen von Objekt-Materialien für Positionen von Pixeln in den durch reale oder virtuelle Computertomographie erhaltenen oder korrigierten Projektionsbildern mittels Verfolgung eines Strahls (Ray-Tracing) durch das Start-Volumenmodell oder durch ein korrigiertes Volumenmodell (Schritt 102);

C) Bestimmen einer von den Durchstrahlungslängen und der Pixelhelligkeit abhängigen Korrekturfunktion und Anwenden dieser Korrekturfunktion auf die Projektionsbilder, um korrigierte Projektionsbilder zu erhalten (Schritt 103);

D) Berechnen eines korrigierten Volumenmodells aus den korrigierten Projektionsbildern (Schritt 104).

[0025] Zu Anfang wird ein erstes vorläufiges Volumenmodell des Objektes erstellt. Dieses erste Volumenmodell kann auch als Start-Volumenmodell bezeichnet werden.

[0026] Das Start-Volumenmodell des Objektes kann dabei ohne Einsatz irgendwelcher Korrekturfunktionalitäten aus den vorliegenden Projektionsbildern rekonstruiert werden. Dabei können altbekannte Rekonstruktionsalgorithmen Anwendung finden. Das resultierende Volumenmodell wird wahrscheinlich von Artefakten durchsetzt sein. Diese Artefakte können eine Segmentierung des Volumenmodells in Bereiche unterschiedlicher Materialien behindern. Trotzdem kann angenommen werden, dass eine erste Segmentierung in gewissem Umfang, wenn auch möglicherweise fehlerbehaftet möglich ist. Gerade Materialien mit hoher Dichte, wie beispielsweise Metalle lassen häufig eine gute Segmentierung zu. Materialien geringer Dichte, wie beispielsweise Kunststoffe werden hingegen oft durch Artefakte stark beeinflusst, und lassen sich daher meist nur ungenau segmentieren.

[0027] In einer vorteilhaften Ausführungsform kann diese erste Rekonstruktion zur Erstellung eines Start-Volumenmodells mit einer reduzierten Auflösung erfolgen. Dadurch lässt sich zum Beispiel der benötigte Rechenaufwand gegenüber einer Rekon-

struktions mit voller Auflösung reduzieren. Unter einer reduzierten Auflösung ist dabei eine Auflösung zu verstehen, die geringer als die maximale auf Basis der vorliegenden Projektionsbilder erreichbaren Auflösung ist. Die reduzierte Auflösung des Start-Volumenmodells kann kleiner als die Auflösung eines im Schritt D) berechneten korrigierten Volumenmodells sein.

[0028] Auch eine Reduzierung der bei der Rekonstruktion für das Volumenmodell verwendeten Auflösung um wenige Prozent führt bereits zu einer Reduzierung des Rechenaufwandes gegenüber der Rekonstruktion in der maximal möglichen Auflösung.

[0029] Eine deutliche Zeitersparnis ist beispielsweise schon bei einer 80%igen Auflösung erreichbar. Noch mehr Zeitersparnis lässt sich vorteilhafterweise mit einer Auflösungsreduzierung auf unter 50 %, besser auf 25 % der Maximalauflösung erreichen.

[0030] Da sich eine reduzierte Auflösung allerdings negativ auf die Genauigkeit des Volumenmodells auswirken kann, ist eine beliebige Reduzierung aber auch nicht sinnvoll.

[0031] In einer besonders vorteilhaften Ausführungsform wird vorgeschlagen, ein Start-Volumenmodell mit unterschiedlichen Auflösungsbereichen zu nutzen. So kann zum Beispiel ein ausgewogenes Verhältnis von Zeitersparnis und Genauigkeitsanforderungen erreicht werden.

[0032] Dazu kann zum Beispiel zur Bestimmung des Start-Volumenmodells, zuerst ein Volumenmodell mit einer reduzierten Auflösung, beispielsweise 20% der Maximalauflösung, erstellt werden. Dieses Volumenmodell wird in Bereiche, die unterschiedlichen Materialien zugeordnet sind, segmentiert, und anschließend kann in ausgewählten Bereichen mit einer höheren Auflösung rekonstruiert werden. „Mit höherer Auflösung“ meint dabei, dass eine Rekonstruktion mit einer Auflösung erfolgt, die höher als die zuvor genutzte reduzierte Auflösung ist. Diese höhere Auflösung kann, muss aber nicht, die maximale erreichbare Auflösung sein. Ein so erzeugtes Volumenmodell mit Bereichen unterschiedlicher Auflösung („multi-resolution“) kann dann als Start-Volumenmodell genutzt werden.

[0033] Nicht nur das Start-Volumenmodell, sondern auch die im Folgenden ermittelten Volumenmodelle können diesen sogenannten „multi-resolution“ Ansatz nutzen, bei dem das Volumenmodell Bereiche unterschiedlicher Auflösung enthält.

[0034] Bereiche, die unterschiedlichen Materialien zugeordnet sind, können dabei mit für das jeweilige Material gewählter Auflösung rekonstruiert sein.

Unterschiedlichen Materialien können unterschiedliche Auflösungen zugeordnet sein.

[0035] Vorteilhaft ist es Bereiche von Materialien höherer Dichte in höheren Auflösungen zu rekonstruieren als Bereiche mit Materialien von vergleichsweise niedrigerer Dichte.

[0036] Eine höhere Dichte kann sich dabei auf höher als die Dichte eines anderen Objekt-materials, oder auch als höher als eine vorgegebene Dichte (Grenzwert) beziehen. Dies gilt analog für den Begriff niedrigere Dichte.

[0037] Wenn mehr als zwei Materialien in einem Objekt vorliegen, kann es sinnvoll sein, einigen Materialien identische Auflösungen zuzuordnen. Hat ein Objekt zum Beispiel fünf unterschiedliche Objektmaterialien, von denen eines eine sehr geringe Dichte und eines eine sehr hohe Dichte aufweist, so könnte beispielsweise der Bereich der geringsten Dichte gering aufgelöst, z. B. mit einem Achtel der Maximalauflösung, der Bereich der höchsten Dichte höchst aufgelöst, zum Beispiel mit maximaler Auflösung, und die restlichen Bereiche mit einer mittleren Auflösung, zum Beispiel halber Auflösung, rekonstruiert werden. Auch viele andere Auflösungsverhältnisse, wie beispielsweise 10 % / 40 % / 80 %, 25 % / 50 % / 100 %, 50 % / 75 % / 90 % usw. sind denkbar.

[0038] In einer weiteren Ausführungsform ist lediglich der Bereich des Objekt-Materials mit der geringsten Dichte reduziert aufgelöst und alle Bereiche die Materialien mit höherer als der geringsten Dichte zugeordnet wurden, sind mit der maximal möglichen Auflösung rekonstruiert.

[0039] Durch Zurückverfolgung eines von der Position eines Pixels eines Projektionsbildes ausgehenden Strahls zur Strahlungsquelle durch das zuvor bestimmte Volumenmodell (Ray-Tracing), kann für die verschiedenen Materialien des Objekts ihre durchstrahlte Länge bestimmt und diese Durchstrahlungslänge als Information dem jeweiligen Pixel bzw. der Pixelposition zugeordnet werden.

[0040] Die Pixelhelligkeit, oder auch Helligkeitswert eines Pixels genannt, ist aus dem Projektionsbild bekannt.

[0041] Angenommen das Messobjekt hat zwei Materialien M1 und M2. Sei L1 die Durchstrahlungslänge für Material M1 und L2 die Durchstrahlungslänge für Material M2, so könnte beispielsweise vereinfacht der Helligkeitswert $H(p)$ an einem Pixel p eines Projektionsbildes ausgedrückt werden durch $f(H(p)) = x \cdot L1 + y \cdot L2$, wobei f eine eindeutige, umkehrbare Funktion ist. Mit x und y sind Funktionsparameter bezeichnet, die vom Material abhängig sein können.

[0042] Somit lässt sich von den Durchstrahlungslängen der Materialien auf die Pixelhelligkeit schließen, oder aber bei bekannter Durchstrahlungslänge L_2 und bekannter Pixelhelligkeit $H(p)$ auf die Durchstrahlungslänge L_1 .

[0043] Die Umgebungsluft kann als Material vernachlässigt werden, da sie die Strahlung nicht wesentlich abschwächt.

[0044] Auch für Objekte mit mehr als zwei Materialien ist es möglich einen entsprechenden Zusammenhang von Pixelhelligkeit und Durchstrahlungslängen zu beschreiben. Dafür kann beispielsweise eine n -dimensionale kubische Spline-Funktion für ein aus n Materialien (n ist eine natürliche Zahl) bestehendes Objekt genutzt werden.

[0045] Diese beschreibende Funktion kann dann genutzt werden, um eine Korrekturfunktion zu erstellen.

[0046] Für die erste bestimmte Korrekturfunktion (Initiallösung) kann eine Funktion mit vorläufigen, geschätzten Parametern Anwendung finden.

[0047] Es lassen sich aber auch durch Auswertung von Pixelhelligkeitswerten und Durchstrahlungslängen einer Mehrzahl oder aller Projektionsbilder Funktionsparameter der Korrekturfunktion, wie zum Beispiel x oder y , ermitteln.

[0048] Durch das Analysieren von einer großen Anzahl von Projektionsbildern kann ausgenutzt werden, dass einzelne „schlechte“ Pixel aufgrund ihrer Fehlerbehaftung zwar zu falschen Parametern, insbesondere zu falsch bestimmten durchstrahlten Längen, führen, eine Vielzahl von „guten“ Pixeln diesem Effekt aber gegensteuern. In folgenden wiederholten Ausführungen der Verfahrensschritte kann das Volumenmodell basierend auf korrigierten Projektionsbildern erneut berechnet und die Korrekturfunktion mithilfe des neuen Volumenmodells bestimmt werden. Damit reduziert sich die Anzahl und Fehlerhaftigkeit der „schlechten“ Pixel, wodurch sich die Qualität der Korrekturfunktion verbessert.

[0049] Es ist denkbar beide Vorgehensweisen zur Bestimmung bzw. Festlegung der Korrekturfunktion zu kombinieren. So kann für die Erzeugung eines Start-Volumenmodells eine vorläufige, geschätzte Korrekturfunktion, beispielsweise basierend auf Erfahrungswerten genutzt werden. Bei weiteren Iterationsdurchläufen kann die Korrekturfunktion basierend auf der Analyse von Projektionsbildern und Durchstrahlungslängen gebildet werden.

[0050] Wurden die Durchstrahlungslängen der Materialien bestimmt, kann mit Hilfe der Korrekturfunktion ein korrigierter Helligkeitswert für die jeweili-

gen einzelnen Pixel der Projektionsbilder berechnet werden.

[0051] Die so ermittelten korrigierten Projektionsbilder können für eine erneute Rekonstruktion eines Volumenmodells genutzt werden. Damit lassen sich beispielsweise Strahlaufhärtungsartefakte reduzieren.

[0052] Liegen Solldaten des Objektes, beispielsweise in Form eines CAD (computer-aided design) vor, so können diese in eines oder mehrere der Volumenmodelle der Rekonstruktion gefittet werden. Damit kann die Qualität der Korrekturfunktion verifiziert werden. Dies ist insbesondere vorteilhaft, um durch Fitten eines CAD-Modells in das Rekonstruktionsergebnis der ersten Iteration sicherzustellen, dass die erste bestimmte Korrekturfunktion (Initiallösung) den eigenen Qualitätsansprüchen genügt. Das Einfitten von Solldaten kann dabei nicht nur der Verifizierung dienen, sondern es ermöglicht auch eine Anpassung und Verbesserung der Korrekturfunktion. Handelt es sich bei der Initiallösung der Korrekturfunktion beispielsweise um eine geschätzte Korrekturfunktion, so lassen sich basierend auf diesen Erkenntnissen, die geschätzten Parameter leicht anpassen, um die Qualität der Korrekturfunktion zu erhöhen.

[0053] In einer vorteilhaften Ausführungsform wird angenommen, dass alle Materialien mit Ausnahme des Materials der geringsten Dichte (im Vergleich zu den anderen Materialien des Objektes) mit guter Qualität (z. B. mindestens 75% der Maximalauflösung) rekonstruiert und segmentiert wurden. Dann kann auch auf die fehlende Durchstrahlungslänge des Materials mit der geringsten Dichte in guter Qualität geschlussfolgert werden.

[0054] Dies kann auch bei der Erstellung der Korrekturfunktion ausgenutzt werden.

[0055] Für Objekte mit mehr als zwei Materialien wird in einer vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens die Korrekturfunktion derart erstellt, dass sie die Durchstrahlungslänge des am wenigsten abschwächenden Materials bzw. des Materials mit der geringsten Dichte in Abhängigkeit von den Durchstrahlungslängen aller anderen Materialien und vom Pixelhelligkeitswert bestimmt.

[0056] Vorkenntnisse über die Materialien der Objekte sind dabei nicht notwendig. Das heißt es ist nicht wesentlich, ob es sich bei Material 1 zum Beispiel um Stahl, Aluminium, Keramik oder Kunststoff handelt. Es wird lediglich unterschieden, welches Material eine höhere oder niedrigere Abschwächung erzeugt, bzw. welches Material eine höhere oder geringere Dichte als die anderen Objektmaterialien

aufweist. Der konkrete Wert der Dichte ist dabei nicht von Belang.

[0057] Zur weiteren Verbesserung des Volumenmodells ist es vorteilhaft das Verfahren mehrmals zu wiederholen. Dabei können bei einem erneuten Durchlauf des Verfahrens die bereits in einem vorherigen Durchlauf des Verfahrens korrigierten Projektionsbilder als Projektionsbilder genutzt werden.

[0058] Die Anzahl der Verfahrensdurchläufe kann vorab festgelegt worden sein und dient damit als Abbruchkriterium oder das Verfahren wird so lange wiederholt, bis beispielsweise eine (als ausreichend vordefinierte) vorgegebene Güte des Rekonstruktionsergebnisses erreicht wurde, oder ein Vergleich der Volumenmodelle zweier oder mehr aufeinander folgender Rekonstruktionen nur noch Abweichungen unterhalb eines vordefinierten Schwellwertes aufweisen.

[0059] Das soeben beschriebene Verfahren ist zum Beispiel geeignet, um Strahlauhärtungsartefakte bei der Rekonstruktion von Multi-Material Objekten zu reduzieren. Dabei kommt es ohne Vorkenntnisse der Materialien und des Strahlungsspektrums aus. Ein weiterer Vorteil ist eine stark verkürzte Rechenzeit des Ray-Tracings, und damit des gesamten Verfahrens, wenn ein Multi-Resolution Volumenmodell bei dessen Durchführung zum Einsatz kommt. Der Multi-Resolution Ansatz des Volumenmodells kann also nicht nur beim Start-Volumenmodell, sondern auch wenn gewünscht bei den jeweils korrigierten Volumenmodellen der weiteren Iterationen Anwendung finden.

[0060] Das abschließende Volumenmodell kann dann aber auch wieder mit einheitlicher hoher, insbesondere maximaler, Auflösung rekonstruiert werden.

[0061] In vorteilhafter Weise kann dieses Verfahren mit einem Verfahren zur Korrektur von Detektorstreueffekten kombiniert werden. Dazu können die vom Detektor aufgenommenen Projektionsbilder mittels eines Vorverarbeitungsschritts bereits so aufbereitet werden, dass negative Effekte aufgrund von Detektorstreuung reduziert werden. Nach der optionalen Vorverarbeitung können die Projektionsbilder dann als Eingangsdaten für das Verfahren zur Erstellung von Volumendaten genutzt werden.

[0062] Die Detektorstreuung ist abhängig vom jeweils verwendeten Detektor und nicht mit Streueffekten am Messobjekt zu verwechseln.

[0063] Die auftretenden Streueffekte müssen nicht gleichmäßig verteilt über den Detektor auftreten, sondern können abhängig sein von der Position des Pixels auf dem Detektor und von der Richtung der einfallenden Strahlung. Je nach Position des Pixels

auf dem Detektor trifft die einfallende Strahlung, beispielsweise einer Strahlungsquelle mit kegelförmiger Abstrahlung in unterschiedlichen Winkeln ein. Eine entsprechende Detektorstreukorrekturfunktion kann dadurch sehr komplex und nur mit sehr hohem Rechenaufwand anwendbar werden.

[0064] In einem besonders vorteilhaften Verfahren zur Detektorstreukorrektur, wird daher das Streuverhalten des Detektors in Form einer Funktion (Streufunktion) beschrieben, die die Helligkeit der Streustrahlung um einen bestrahlten Punkt in Abhängig vom Abstand zu diesem beschreibt. Damit ist die gegenseitige Beeinflussung zweier Detektorpixel durch Detektorstreuung nur noch von ihrem Abstand abhängig.

[0065] Dabei wird von einem über den kompletten Detektor gleichförmigen Streueffekt ausgegangen, das heißt, die Detektorstreuung wird als unabhängig vom Ort des Pixels auf dem Detektor und auch als unabhängig von der Richtung der einfallenden Strahlung betrachtet. Dies ist in der Regel zwar nicht ganz korrekt, aber durch diese Annahme kann mit einem stark reduzierten Rechenaufwand dennoch schon eine wesentliche Reduzierung von Detektorstreueffekten erzielt werden.

[0066] Die Streufunktion kann eine kubische Spline-Funktion sein. Sowohl die Streufunktion als auch ihre Ableitung nehmen mit dem Abstand monoton ab. Um ansteigende Funktionswerte zu erhalten, kann die Streufunktion auch als Funktion des negativen Abstandes definiert werden. Bezieht man die zweite Ableitung in die Überlegungen mit ein und stellt sicher, dass ihre Werte stets positiv sind, so ist ein monoton ansteigendes von 1. Ableitung und Streufunktion gewährleistet. Zur vollständigen Funktionserstellung sind allerdings noch einige Funktionskoeffizienten notwendig, um zum Beispiel den Startwert und die Steigung an der Position des Startwertes beschreiben zu können.

[0067] Zur Bestimmung dieser Funktionskoeffizienten der Streufunktion wird daher ein Durchstrahlbild eines Objektes aus strahlungsabschirmendem Material, wie z. B. einer Bleiplatte, vom Detektor aufgenommen. Diese Platte wird dabei derart zwischen Strahlungsquelle und Detektor platziert, dass Teile, zum Beispiel die Hälfte, des Detektors verdeckt sind. Die Detektorpixel, die dem verdeckten Bereich entsprechen, dürften somit keine Strahlung empfangen, die gemessene Intensität sollte NULL sein. Die Detektorpixel des nicht verdeckten Bereiches empfangen die volle Strahlungsintensität, ihre Intensität kann normiert mit EINS angegeben werden.

[0068] Durch die Detektorstreuung werden in der Bildaufnahme aber abweichende Werte auftauchen.

Diese Werte können genutzt werden, um die Funktionskoeffizienten der Streufunktion zu bestimmen.

[0069] Um beispielsweise Rauscheffekte bei der Bildaufnahme zu unterdrücken, ist es vorteilhaft nur die verdeckten Bereiche, d.h. die Bereiche mit der Sollintensität NULL, auszuwerten.

[0070] Da die Detektorstreuung nur abhängig vom Detektor und in gewissem Maße auch von der Wellenlänge der Strahlung abhängt, ist es ausreichend die Streufunktion einmal je Strahlungsspektrum zu bestimmen. Die Streufunktion des Detektors ändert sich nicht mit der Zeit und ist auch unabhängig vom Messobjekt.

[0071] Auch ist es möglich, eine Abschirmung zu verwenden, die nicht stark genug ist, um die Sollintensität auf NULL zu reduzieren. In diesem Fall genügt es sicherzustellen, dass alle abgeschirmten Bereiche des Detektors die gleiche Stärke an Abschirmung erfahren. Die Sollintensität für die abgeschirmten Bereiche kann in diesem Fall anhand der Helligkeitswerte von Pixeln, die hinreichend weit von nicht abgeschirmten Bereichen des Detektors entfernt sind, um einen nennenswerten Einfluss von Streustrahlung auszuschließen, bestimmt werden.

[0072] Wurde die Streufunktion bestimmt, so kann ihre Umkehrfunktion gebildet und als Detektorstreu-Korrekturfunktion auf die Projektionsbilder aus der Objektvermessung angewendet werden, um Detektorstreuereffekte zu reduzieren.

[0073] In weiterer vorteilhafter Weise kann das erfindungsgemäße Verfahren zur Erstellung eines Volumenmodells mit einer Durchstrahlungslängenkorrektur ergänzt und damit das erfindungsgemäße Verfahren damit vorteilhaft erweitert werden.

[0074] Vorteilhafterweise wird die Durchstrahlungslängenkorrektur in den Verfahrensschritt B) integriert.

[0075] Die Bestimmung der Durchstrahlungslängen der verschiedenen Objektmaterialien setzt ein in die verschiedenen Materialbereiche segmentiertes Volumenmodell voraus, durch das ein Strahl zurückverfolgt wird. Um gute Werte für die Durchstrahlungslängen zu erhalten, ist es dabei wichtig, den Übergang zwischen den verschiedenen Materialien, also die Materialübergänge möglichst genau zu erkennen. Bildpixel des Projektionsbildes die einen inneren Bereich eines Materialbereiches darstellen, werden bei der Rückverfolgung überwiegend auf Materialkanten treffen, die sich eher senkrecht zur Strahlausbreitungsrichtung des zurückverfolgten Strahles befinden. Ungenaue Materialübergänge in Ausbreitungsrichtung des zurückverfolgten Strahles haben dabei nur einen geringen Einfluss auf die ermittelte Durchstrahlungslänge. Anders sieht es bei Pixeln

aus, deren Strahlen bei der Verfolgung durch das Volumenmodell sich im Bereich einer Materialkante befinden. Ungenauigkeiten der Materialübergänge die zum Beispiel durch die Grenzen der Auflösung des Projektionsbildes oder der Rekonstruktion, aber auch durch andere Effekte hervorgerufen wurden, können hier gravierende Unterschiede bei der Bestimmung der Durchstrahlungslänge hervorrufen. Sieht ein Bildpixel noch mehrere Zentimeter eines Materials, so sieht sein Nachbarpixel eventuell gar nichts mehr.

[0076] Gerade bei dichten Materialien, wie beispielsweise Metall, lassen sich im Bereich der Materialkanten sogenannte Aliasing-Artefakte beobachten, die durch die diskrete Abtastung von eigentlich kontinuierlichen Werten, insbesondere bei der Durchstrahlbildaufnahme, der Volumenrekonstruktion und bei der Strahlverfolgung (Ray-Tracing) durch das Volumenmodell, entstehen. Gerade Pixel des Projektionsbildes die sich in Bereichen solcher Materialkanten, bzw. im Bereich dieser Aliasing-Effekte befinden, werden mit hoher Wahrscheinlichkeit beim Ray-Tracing auch fehlerbehaftete Durchstrahlungslängen zurückliefern.

[0077] Daher wird vorgeschlagen die durch Strahlverfolgung (Ray-Tracing) bestimmten Durchstrahlungslängen einem Korrekturverfahren zu unterziehen. Bei einem solchen Korrekturverfahren werden Informationen, wie beispielsweise Durchstrahlungslängen, aus benachbarten, also unmittelbar benachbarten oder in der Nähe liegenden Pixeln berücksichtigt, um die Korrektheit der durch Ray-Tracing bestimmten Durchstrahlungslängen zu verifizieren und eventuell zu verbessern.

[0078] Hierfür ist es vorteilhaft, Pixel danach zu klassifizieren, wie wahrscheinlich die bestimmten Durchstrahlungslängen korrekt sind. Diese Klassifizierung teilt die Pixel in Klassen ein. In einem einfachen Fall lediglich in zwei Klassen, also mittels einer Einordnung in „sichere“ und „unsichere“ Pixel, wobei „sichere“ Pixel eine hohe und „unsichere“ Pixel eine niedrige Wahrscheinlichkeit für die Korrektheit der für sie bestimmten Durchstrahlungslängen aufweisen. Eine Aufteilung in mehr als zwei Klassen ist aber auch denkbar. Welche Wahrscheinlichkeit hierbei für welche Klasse der Klassifizierung gilt, kann beispielsweise vom Anwender eingegeben oder auch fest vorgegeben in das Verfahren implementiert sein. Dabei kann zum Beispiel ein Grenzwert für die Wahrscheinlichkeit der Korrektheit gesetzt werden, ab dem ein Pixel als „sicher“ gilt und ansonsten als „unsicher“.

[0079] Mittels einer solchen Klassifizierung kann die Korrektur lediglich für Pixel angewandt werden, die ausgewählten Klassen entsprechen, beispielsweise vorwiegend auf „unsichere“ Pixel.

[0080] Die Durchstrahlungslängenkorrektur kann vorteilhafterweise vorwiegend anhand der für sichere Pixeln zur Verfügung stehenden Informationen erfolgen. Das heißt von den für das Korrekturverfahren verwendeten Informationen von benachbarten Pixeln, werden nur Informationen von Pixeln verwendet, die einer oder mehrerer ausgewählten Klassen angehören.

[0081] Für die Klassifikation eignet es sich, insbesondere diejenigen Pixel als unsicher zu klassifizieren, deren Strahl bei der Verfolgung entlang von im Volumenmodell erkennbaren Objektkanten verläuft.

[0082] Das Korrekturverfahren, muss damit nicht für die Durchstrahlungslängen aller Materialien ausgeführt werden. So kann es auch lediglich auf die Durchstrahlungslängen eines Materials angewendet werden. Die mittels Korrekturverfahren korrigierten Durchstrahlungslängen für ein oder mehrere Materialien, können dann eingesetzt werden, um auf die Durchstrahlungslängen der anderen Materialien zurückzuschließen.

[0083] Für die Durchstrahlungslängenkorrektur kann ausgenutzt werden, dass bei einer Rekonstruktion mit einer Anzahl von n nicht-Luft Materialien nur die reduzierte Anzahl $n - 1$ der dazugehörigen Durchstrahlungslängen korrekt bestimmt werden müssen, um zum Beispiel ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Erstellung eines Volumenmodells anwenden zu können.

[0084] Des Weiteren kann ausgenutzt werden, dass die Strahlen der meisten Pixel entlang höchstens einer Materialkante liegen, wodurch, falls diese Kante zwischen einem nicht-Luft Material und Luft verläuft, die Durchstrahlungslängen für alle außer ein nicht-Luft Material innerhalb der Nachbarschaft keine großen Unterschiede aufweisen oder, falls diese Kante zwischen zwei nicht-Luft Materialien verläuft, die Summe der Durchstrahlungslängen aller nicht-Luft Materialien innerhalb der Nachbarschaft keine großen Unterschiede aufweist.

[0085] Eine vorteilhafte Durchstrahlungslängenkorrektur korrigiert die Durchstrahlungslänge eines Materials an einem Pixel, indem sie für alle anderen Materialien die Durchstrahlungslängen basierend auf den Durchstrahlungslängen dieser Materialien an den Pixeln ihrer Nachbarschaft schätzt und dann basierend auf diesen geschätzten Durchstrahlungslängen der anderen Materialien aus die Durchstrahlungslänge für das gesuchte Material zurückzuschließt.

[0086] Dies ist insbesondere vorteilhaft, um unsichere Pixel zu korrigieren, falls die Durchstrahlungslängen für alle außer ein nicht-Luft Material bei allen sicheren Pixeln innerhalb der Nachbarschaft keine

großen Unterschiede aufweisen, indem für alle außer dieses eine nicht-Luft Material die Durchstrahlungslänge basierend auf den Durchstrahlungslängen der sicheren Pixel in der Nachbarschaft geschätzt wird.

[0087] Eine vorteilhafte Durchstrahlungslängenkorrektur korrigiert die Durchstrahlungslänge eines Materials an einem Pixel, indem sie die Summe der Durchstrahlungslängen aller Materialien basierend auf der Summe der Durchstrahlungslängen an den Pixeln der Nachbarschaft schätzt, und dann basierend auf dieser geschätzten Summe der Durchstrahlungslängen auf die Durchstrahlungslänge für das gesuchte Material zurückzuschließt.

[0088] Insbesondere ist dies vorteilhaft einzusetzen, um unsichere Pixel zu korrigieren, falls die Summe der Durchstrahlungslängen aller nicht-Luft Materialien innerhalb der Nachbarschaft keine großen Unterschiede aufweist, indem die Summe der Durchstrahlungslängen aller nicht-Luft Material basierend auf der Summe der Durchstrahlungslängen der sicheren Pixel in der Nachbarschaft geschätzt wird. Basierend auf dieser Summe und der Information zwischen welchen Materialien die Kante verläuft, die zu der Klassifizierung des Pixels als unsicher beiträgt, sowie optional beispielsweise auch unter zur Hilfenahme einer wie in Schritt C) des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Erstellung eines Volumenmodells erstellten Korrekturfunktion kann auf die Verteilung der Durchstrahlungslängen auf die einzelnen Materialien geschlossen werden.

[0089] Die geschätzten Informationen können in einem einfachen Fall beispielsweise durch die Errechnung eines gewichteten Mittelwertes geschätzt werden.

[0090] Sowohl das erfindungsgemäße Verfahren zur Erstellung eines Volumenmodells an sich, insbesondere auch in einer iterativen Ausführungsform, sowie auch die Detektorstreckkorrektur und auch die Durchstrahlungslängenkorrektur können einzeln bereits zur Verbesserung des Volumenmodells durch eine Reduzierung von Artefakten beitragen. Eine Kombination der Korrekturverfahren ist allerdings besonders vorteilhaft. Auch eine Kombination mit weiteren Korrekturmethode, wie zum Beispiel einer physikalischen Vorfilterung, kann erfolgen.

[0091] Die Erfindung wird anhand von Ausführungsbeispielen mit den beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 - Schematische Darstellung einer Messanordnung zur computertomografischen Vermessung eines Objektes;

Fig. 2 - Schematischer Ablauf eines erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0092] Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer beispielhaften Messeinrichtung 1, die zur Ausführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens eingerichtet ist. Die Messeinrichtung 1 hat eine Strahlungsquelle 2 zur Abgabe invasiver Strahlung, zum Beispiel eine Röntgenquelle, eine Positionierungsvorrichtung 3 zur Positionierung und Bewegung eines Messobjektes 4 (nachfolgend auch kurz als Objekt bezeichnet). Bei der Positionierungsvorrichtung 3 kann es sich beispielsweise wie hier dargestellt um einen Drehtisch mit einer Drehachse 5 handeln, aber auch andere Manipulationseinheiten, wie zum Beispiel Roboter können Anwendung finden. Des Weiteren ist eine Detektoreinheit 6, beispielsweise ein Flat-Panel-Detektor, vorgesehen.

[0093] Um ein Objekt 4 computertomografisch zu vermessen, wird dieses beispielsweise mit Hilfe der Positionierungsvorrichtung 3 im Strahlengang 7 zwischen der Strahlungsquelle 2 und der Detektoreinheit 6 positioniert. Es werden mit Hilfe der Detektoreinheit 6 Projektionsbilder 8 in unterschiedlichen Positionen des Objektes 4 aufgenommen. Beispielsweise wird das Objekt 4 mit Hilfe des Drehtisches zwischen den Bildaufnahmen um einen vorgegebenen Winkel gedreht.

[0094] Des Weiteren ist eine Auswerteeinheit 9 vorhanden. Die Auswerteeinheit 9 ist zur Ausführung geeigneter Programmcodemittel ausgebildet, um ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Erstellung eines Volumenmodells des Messobjektes 4 basierend auf den Projektionsbildern 8, die durch computertomografische Vermessung des in den Strahlengang 7 zwischen der Strahlungsquelle 2 und der Detektoreinheit 6 positionierten Objektes 4 erfasst wurden, auszuführen.

[0095] Die vom Detektor 6 aufgenommenen Projektionsbilder 8 werden an die Auswerteeinheit 9 übertragen. Diese Datenübertragung kann beispielsweise Leitungsgebunden, aber auch drahtlos, z. B. über WiFi, Funk, Bluetooth oder Infrarotschnittstelle, erfolgen.

[0096] Die Auswerteeinheit 9 kann auch kombiniert mit einer Steuereinheit ausgebildet sein. Wobei die Steuereinheit unter anderem zur Ansteuerung von Strahlungsquelle 2 und/oder Drehtisch und/oder Detektor 6 eingerichtet sein kann.

[0097] Die Auswerteeinheit 9, kann beispielsweise ein mit geeigneten Programmcodemitteln ausgestatteter Computer sein, um ein Verfahren zur Erstellung eines Volumenmodells des mittels Computertomografie vermessenen Objektes 4 auszuführen, bei dem in der Vermessung auftretende Artefakte wie beispielsweise Strahlaufhärtung, Detektorstreuung oder auch Aliasing-Effekte durch entsprechende Korrekturverfahren reduziert werden.

[0098] Fig. 2 stellt einen schematischen Ablauf einer möglichen Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Erstellung eines Volumenmodells eines mittels Computertomografie vermessenen Objektes 4 dar. Bei der computertomografischen Vermessung eines Objektes 4, beispielsweise mit einer wie in Fig. 1 beschriebenen Messeinrichtung 1, werden mit einem Detektor 6 Projektionsbilder 8 des im Strahlengang 7 zwischen einer Strahlungsquelle 2 und dem Detektor 6 positionierten Objektes 4 erfasst. Diese Projektionsbilder 8 werden zum Beispiel in einen zur Durchführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens geeigneten Computer 9 übertragen.

[0099] Die computertomografische Vermessung kann aber auch virtuell erfolgen. Das heißt es findet keine Vermessung eines realen Objektes mittels einer Messeinrichtung 1 statt, sondern der Messprozess wird beispielsweise in einem entsprechend ausgebildeten Computer simuliert. Für die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist es unerheblich, ob die verwendeten Daten aus einer realen Messung oder einer Simulation stammen.

[0100] Die Projektionsbilder 8 haben Pixel mit einer Pixelposition (Koordinate) und jeweiligen Helligkeitswerten. Die Pixelposition kann beispielsweise in Form einer Koordinate in einem Bildkoordinatensystem angegeben werden.

[0101] In einer vorteilhaften Ausführungsform werden in einem Vorverarbeitungsschritt 100 die Projektionsbilder 8 einer Detektorstreckkorrektur unterzogen. Zur Vorbereitung wurde dazu im Vorfeld ein Verfahrensschritt 300 zur Ermittlung einer für den Detektor 6 spezifische Detektorstreckkorrekturfunktion ausgeführt. Dieser Verfahrensschritt 300 umfasst dabei die Schritte

- 300a - Reales oder virtuelles Aufnehmen eines Detektorbildes bei teilabgedeckter Detektorfläche;
- 300b - Auswerten der Helligkeitswerte der Pixel des abgedeckten Teils der Detektorfläche;
- 300c - Erstellen einer Streufunktion mittels schneller Fourier Transformation und bilden einer die Detektorstreckkorrekturfunktion bildenden Umkehrfunktion.

[0102] Auch der Verfahrensschritt 300 kann basierend auf einer Simulation erfolgen.

[0103] Im Schritt 100 wird die Detektorstreckfunktion auf die Projektionsbilder 8 angewendet, so dass entstretete Projektionsbilder 8e erhalten werden.

[0104] Die entstreteten Projektionsbilder 8a werden verwendet um in Schritt 101 ein vorläufiges Rekonstruktionsergebnis, als ein erstes vorläufiges Volumen-

modell zu erstellen (= Schritt A)). Für die spätere Weiterverarbeitung ist eine Segmentierung dieses vorläufigen Volumenmodells in Bereiche unterschiedlicher Materialien vorgesehen. Durch vorhandene Artefakte wird diese Segmentierung insbesondere für Materialien mit geringer Dichte, wie beispielsweise Kunststoffe, erschwert sein. Hochdichte Materialien, wie zum Beispiel Metalle, hingegen lassen sich oft nahezu perfekt segmentieren. Dies wird auch ausgenutzt um das vorläufige Volumenmodell als ein Volumenmodell mit einem multi-resolution Ansatz zu erstellen. Das heißt das vorläufige Rekonstruktionsergebnis weist Bereiche unterschiedlicher Auflösung auf. Dadurch kann im Gegensatz zur Verwendung eines vollaufgelösten Volumenmodells im Folgenden wichtige Rechenzeit und auch Speicherplatz gespart werden. In gut zu bestimmenden Bereichen, wie denen von Metallen, kann eine erhöhte Auflösung, bevorzugt die volle Auflösung, verwendet werden.

[0105] Das in Schritt 101 (= Schritt A)) erstellte Volumenmodell (Start-Volumenmodell) wird in Schritt 102 (= Schritt B)) genutzt, um mittels Strahlverfolgung (Ray-Tracing) für die Pixel der Projektionsbilder 8e die Durchstrahlungslängen der verschiedenen im Objekt 4 vorhandenen Materialien zu bestimmen. Dabei können beispielsweise auch lediglich die Durchstrahlungslängen aller Materialien, außer dem mit der geringsten Dichte bestimmt werden. Gerade Materialien geringer Dichte werden besonders durch die dichteren Nachbarmaterialien negativ, zum Beispiel durch Strahlaufhärtungseffekte, beeinflusst.

[0106] Im Bereich von Materialkanten, die sich durch hohe Dichtedifferenzen auszeichnen, ist es zum Beispiel durch Aliasing Artefakte schwierig Durchstrahlungslängen korrekt zu bestimmen. Um diese Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Durchstrahlungslängen zu reduzieren, kann optional ein Verfahrensschritt 200 zur Durchstrahlungslängenkorrektur ausgeführt werden.

[0107] Vorteilhaft ist es, wenn bereits vorab eine Klassifizierung der Pixel stattgefunden hat, die es ermöglicht, die besonders durch Aliasing Artefakte gefährdeten Pixel zu bestimmen. Dadurch kann Zeit gespart werden, indem die Durchstrahlungslängenkorrektur nur für diese „unsicheren“ Pixel Anwendung findet.

[0108] Die Durchstrahlungslängenkorrektur kann zur Bestimmung der korrekten oder annähernd korrekten Durchstrahlungslängen für einen Pixel eines Projektionsbildes auf die Informationen seiner benachbarten Pixel zurückgreifen.

[0109] Die Größe der Nachbarschaft, kann frei definiert werden. Beispielsweise umfasst die Nachbarschaft nur die direkten Nachbarn, oder die direkten

Nachbarn plus deren direkten Nachbarn oder eine vorgegebene geometrische Nähe wie einen Radius einer gewissen Länge.

[0110] Auch können die Ergebnisse der Nachbarpixel abstandsabhängig mit unterschiedlicher Wichtung in die Durchstrahlungslängenkorrektur eingehen.

[0111] Die in Schritt 102 (= Schritt B)) ermittelten und optional in 200 korrigierten Durchstrahlungslängen können in Schritt 103 (= Schritt C)) genutzt werden, um zum Beispiel in einer vorteilhaften Ausführungsform mittels der Methode der kleinsten Quadrate eine n-dimensionale kubische Spline-Funktion f zu bilden, wobei n der Anzahl der unterschiedlichen Materialien entspricht. Die Ausgabe der Funktion f ist beispielsweise die Durchstrahlungslänge des am wenigsten dichten Materials und die Funktionseingabe besteht aus den Durchstrahlungslängen der anderen Materialien und der im Projektionsbild aufgenommenen Helligkeit des betrachteten Pixels.

[0112] Nehmen wir an, dass alle Materialien, außer dem der geringsten Dichte, gut rekonstruiert und segmentiert wurden, so kann auch die Durchstrahlungslänge des am wenigsten dichten Materials gut bestimmt werden.

[0113] Sind die Durchstrahlungslängen aller Materialien bekannt, kann durch Umstellung der Funktion f zu einer Korrekturfunktion k für jeden Pixel seine korrekte Helligkeit mittels der Korrekturfunktion k berechnet werden. Durch Anwendung der Korrekturfunktion k auf die Projektionsbilder 8e werden korrigierte Projektionsbilder 8k ermittelt.

[0114] In Schritt 104 (= Schritt D)) werden die korrigierten Projektionsbilder 8k genutzt, um ein verbessertes Volumenmodell 10 zu erstellen und auszugeben.

[0115] Zur weiteren Verbesserung des Volumenmodells 10 werden dabei vorteilhafterweise die Schritte 102, 103 und 104, d.h. die Schritte B) bis D), mehrfach wiederholt, optional inklusive der Durchstrahlungslängenkorrektur 200. Die Anzahl der Wiederholungen kann beispielsweise vorab, zum Beispiel durch eine Benutzereingabe, definiert werden. Es kann aber auch ein anders gestaltetes Abbruchkriterium gewählt werden, wie fehlende oder geringe Unterschiede zweier in aufeinanderfolgenden Verfahrensausführungen erstellter Volumenmodelle 10.

[0116] Ist das Abbruchkriterium erreicht, kann das Volumenmodell 10 zum Beispiel auf einem Monitor ausgegeben werden.

[0117] Zur Optimierung der Verfahrensdauer und/oder des Speicherbedarfs werden vorteilhafterweise

Volumenmodelle mit unterschiedlichen Auflösungs-bereichen während des Verfahrens verwendet. Um allerdings das finale verbesserte Volumenmodell 10 in besonders guter Qualität zu erhalten, kann eine letzte Rekonstruktion mit voller Auflösung erfolgen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Erstellung eines Volumenmodells (10) eines mittels realer oder virtueller Computertomografie vermessenen Objektes (4), wobei im Zuge der computertomographischen Vermessung Projektionsbilder (8) des in den Strahlengang (7) zwischen einer Strahlungsquelle (2) und einem Detektor (6) positionierten Objektes (4) mit einem Detektor (6) erfasst wurden, mit den Schritten

A) Erzeugen eines Start-Volumenmodells des Objektes (4) mittels Rekonstruktion aus den durch reale oder virtuelle Computertomographie erhaltenen Projektionsbildern (8, 8e) des Objektes;

B) Bestimmen von Durchstrahlungslängen von Objekt-Materialien für Positionen von Pixeln in den durch reale oder virtuelle Computertomographie erhaltenen oder korrigierten Projektionsbildern (8, 8e, 8k) mittels Verfolgung eines Strahls (Ray-Tracing) durch das Start-Volumenmodell oder ein korrigiertes Volumenmodell;

C) Bestimmen einer von den Durchstrahlungslängen und der Pixelhelligkeit abhängigen Korrekturfunktion und Anwenden dieser Korrekturfunktion auf die Projektionsbilder, um korrigierte Projektionsbilder (8k) zu erhalten;

D) Berechnen eines korrigierten Volumenmodells aus den korrigierten Projektionsbildern.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schritte B) bis D) bis zu einem vorabdefinierten Abbruchkriterium wiederholt werden, wobei in Schritt C) im ersten Durchlauf die Startprojektionsbilder (8, 8e) und bei weiteren Durchläufen die im vorhergehenden Iterationsdurchlauf berechneten korrigierten Projektionsbilder (8k) und im Schritt B) im ersten Durchlauf das Start-Volumenmodell und bei weiteren Durchläufen das im vorhergehenden Iterationsdurchlauf berechnete korrigierte Volumenmodell zugrunde gelegt werden.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Start-Volumenmodell ein Volumenmodell mit im Vergleich zu der Auflösung eines der im Schritt D) berechneten korrigierten Volumenmodelle oder im Vergleich zu der auf Basis der computertomographisch gemessenen Projektionsbilder maximal erreichbarer Auflösung reduzierter Auflösung ist.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Start-Volumenmodell und/oder folgende korrigierte

Volumenmodelle Bereiche unterschiedlicher Auflösung voneinander aufweisen können.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Erzeugen des Start-Volumenmodells mit Bereichen unterschiedlicher Auflösung erfolgt, indem

- zuerst ein Volumenmodell mit einer Auflösung ermittelt wird, die geringer als die maximal mögliche Auflösung ist,

- das Volumenmodell geringer Auflösung in Bereiche segmentiert wird, die unterschiedlichen Objekt-Materialien zugeordnet werden

- in ausgewählten Bereichen eine erneute höheraufgelöste Rekonstruktion erfolgt, wobei diese höheraufgelöste Rekonstruktion eine Auflösung aufweist, die höher als die reduzierte Auflösung ist und die gleich oder geringer der maximalen Auflösung sein kann.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass Bereiche, die unterschiedlichen Materialien zugeordnet werden, mit für diese Materialien gewählten Auflösungen rekonstruiert werden.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens zwei unterschiedlichen Materialien gleiche Auflösungen zugeordnet sind.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass Bereiche, die Materialien zugeordnet sind, die im Vergleich zu der Dichte eines anderen Materials des Objektes eine höhere Dichte aufweisen, oder deren Dichte einen vorgegebenen Grenzwert überschreitet, Auflösungen zugeordnet sind, die höher sind, als die Auflösungen der Bereiche, die Materialien einer niedrigeren Dichte zugeordnet sind, oder deren Dichte den vorgegebenen Grenzwert nicht überschreitet.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass nur der Bereich, der dem Objekt-Material mit der geringsten Dichte im Vergleich zu den Dichten der anderen Materialien des Objektes zugeordnet ist, geringer aufgelöst rekonstruiert wird als die Bereiche, die anderen Objekt-Materialien zugeordnet sind und die in höchstmöglicher Auflösung rekonstruiert werden.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass in Schritt C) eine vorläufige, geschätzte Korrekturfunktion für die erste Iteration genutzt wird.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein

Sollmodell des Objekts (4), insbesondere ein CAD-Modell, in das Rekonstruktionsergebnis gefittet wird, um die Qualität der Korrekturfunktion zu verifizieren und/oder zu verbessern, insbesondere um die Qualität der ersten bestimmten Korrekturfunktion zu verifizieren und/oder zu verbessern.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Korrekturfunktion dazu geeignet ist, die Durchstrahlungslänge des im Vergleich zu den anderen Materialien des Objektes (4) am wenigsten abschwächenden bzw. des am wenigsten dichten Materials eines aus mehreren Materialien bestehenden Objektes (4) in Abhängigkeit vom Pixelwert und den Durchstrahlungslängen aller anderen Materialien zu bestimmen.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass in einem Vorbereitungsschritt eine Detektorstreukorrektur der Projektionsbilder (8) erfolgt, bevor diese für die Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 12 verwendet werden.

14. Verfahren nach Anspruch 13, mit einer Detektorstreukorrektur, bei der als Detektorstreukorrekturfunktion die Umkehrfunktion einer ortsunabhängigen Streufunktion verwendet wird.

15. Verfahren nach Anspruch 13 oder 14, wobei Funktionskoeffizienten der Streufunktion bestimmt werden, indem ein Bild eines in den Strahlengang (7) zwischen Strahlungsquelle (2) und Detektor (6) eingebrachten und den Detektor (6) dabei teilweise abdeckenden strahlungsabschwächenden Objektes, insbesondere einer Bleiplatte, aufgenommen und analysiert wird.

16. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Durchstrahlungslängenkorrektur erfolgt.

17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Durchstrahlungslängenkorrektur in den Verfahrensschritt B), dem Bestimmen von Durchstrahlungslängen von Objekt-Materialien für Positionen von Pixeln in den Projektionsbildern mittels Verfolgung eines Strahls durch das Volumenmodell (Ray-Tracing), integriert wird.

18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Durchstrahlungslängenkorrektur erfolgt, bei der für die Korrektur, der zu einem Pixel zugehörigen Durchstrahlungslängen, die an benachbarten Pixeln ermittelten Durchstrahlungslängen herangezogen werden.

19. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Durchstrahlungslängenkorrektur die Durchstrahlungslänge eines Materials an einem Pixel korrigiert, wobei die Durchstrahlungslängen aller anderen Materialien an diesem Pixel oder die Summe der Durchstrahlungslängen aller Materialien an diesem Pixel basierend auf den Durchstrahlungslängen aller anderen Materialien oder der Summe der Durchstrahlungslängen aller Materialien an den Pixeln seiner Nachbarschaft geschätzt wird.

20. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Klassifizierung der Pixel der Projektionsbilder (8, 8e, 8k) erfolgt, und eine Durchstrahlungslängenkorrektur nur für Pixel einer oder mehrerer ausgewählter Klassen, insbesondere der Klasse „unsicher“, erfolgt.

21. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Klassifizierung der Pixel der Projektionsbilder (8, 8e, 8k) erfolgt, und für eine Durchstrahlungslängenkorrektur nur Informationen von Pixeln ausgewählter Klassen, insbesondere der Klasse „sicher“, genutzt werden.

22. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Schritt A) das Start-Volumenmodell des Objektes mittels Rekonstruktion aus den real oder virtuell computertomographisch erhaltenen und mit einer vorläufigen, geschätzten Korrekturfunktion korrigierten Projektionsbildern des Objektes erzeugt wird.

23. Computerprogramm, umfassend Befehle, die bei Ausführung des Computerprogramms durch einen Computer diesen veranlassen, das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche auszuführen.

24. Messeinrichtung (1) zur computertomographischen Vermessung eines Objektes (4) mit invasiver Strahlung, mit einem Detektor (6) und mit einer Strahlungsquelle (2), wobei die Strahlungsquelle (2) dazu eingerichtet ist invasive Strahlung in Richtung des Detektors (6) abzugeben, und wobei der Detektor (6) zur Erfassung von Projektionsbildern (8) eingerichtet ist, und mit einer Steuereinheit, einer Auswerteeinheit oder einer kombinierten Steuer- und Auswerteeinheit, wobei die Steuer- und/oder Auswerteeinheit dazu eingerichtet ist, ein Verfahren zur Erstellung von Volumendaten (10) des Objektes (4) nach einem der Ansprüche 1 bis 22 auszuführen.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

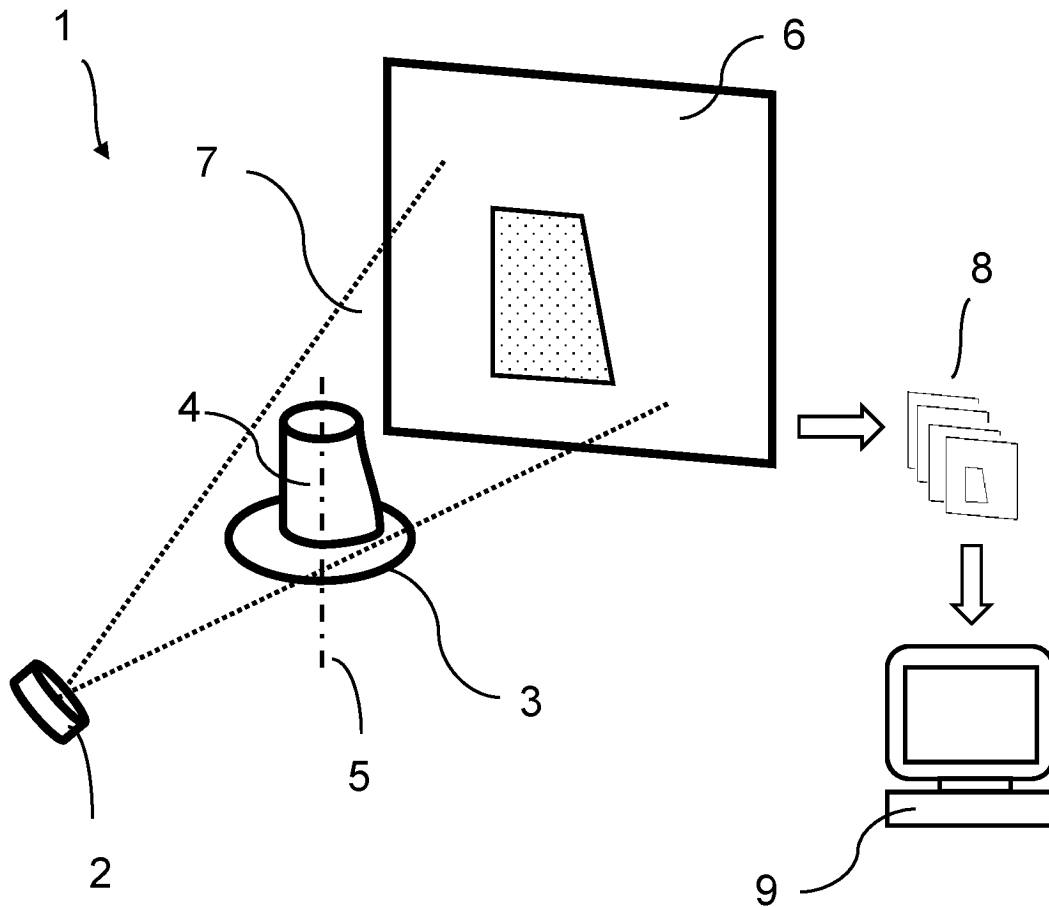


Fig. 1

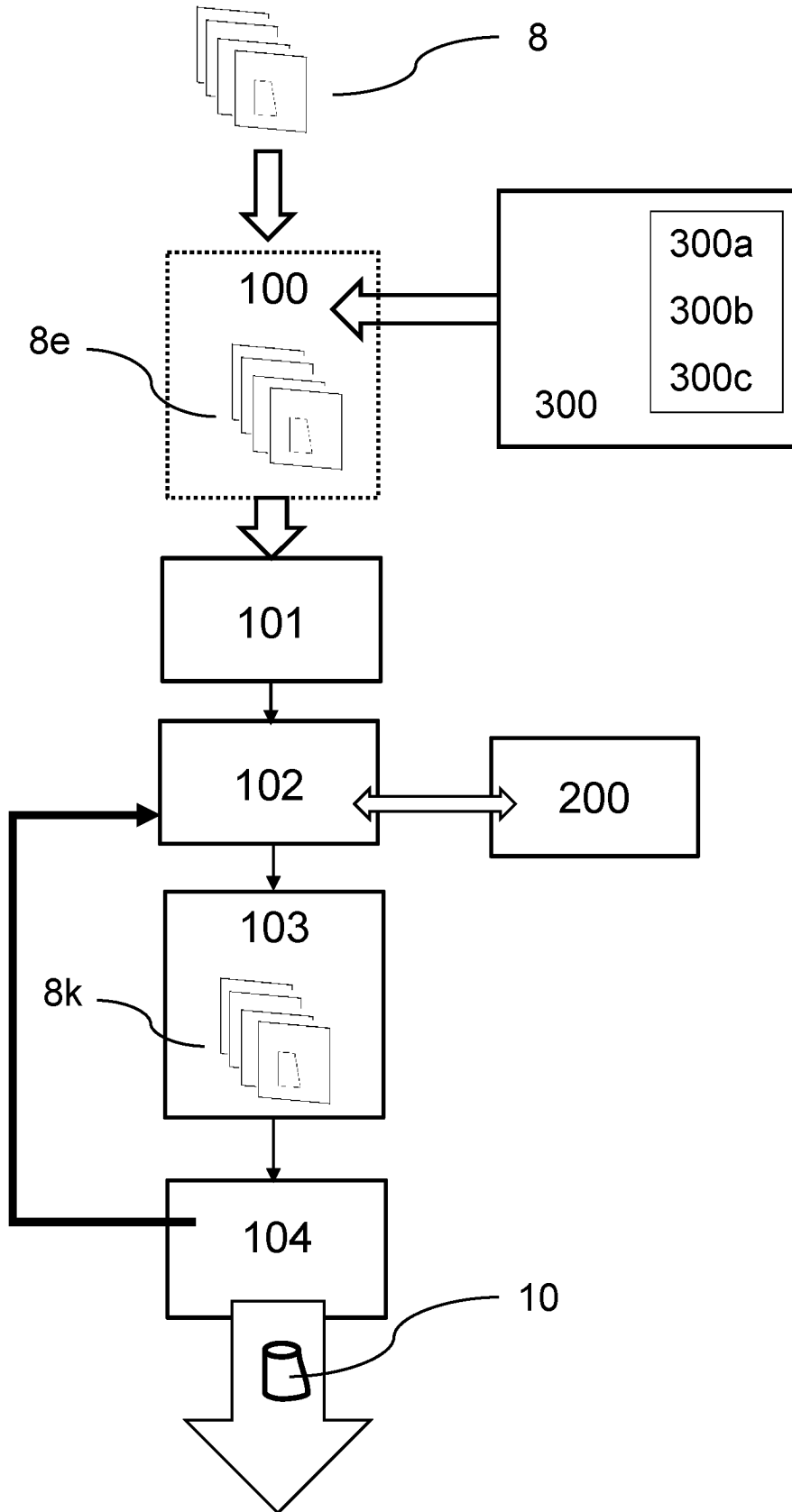


Fig. 2