(19) Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 103 06 016 A1** 2004.09.02

(12) # Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **103 06 016.2**
(22) Anmeldetag: **13.02.2003**
(43) Offenlegungstag: **02.09.2004**

(51) Int Cl.[7]: **G06T 17/00**

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

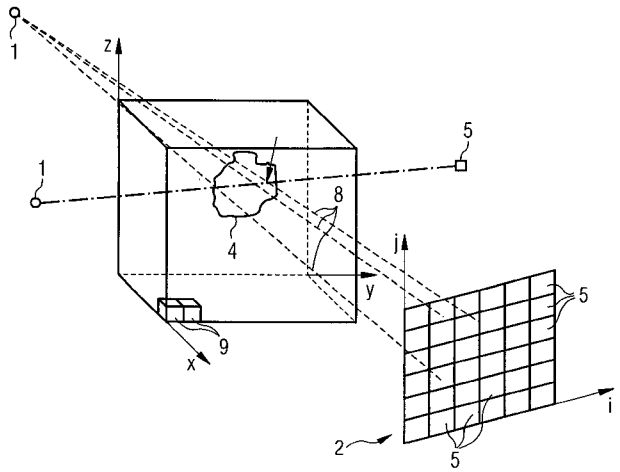
(72) Erfinder:
Brunner, Thomas, Dr., 90427 Nürnberg, DE; Böhm, Stefan, 90522 Oberasbach, DE; Hornegger, Joachim, Dr., 91083 Baiersdorf, DE; Neumair, Christian, 85072 Eichstätt, DE

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Ermittlungsverfahren für eine Rekonstruktion eines dreidimensionalen Objekts**

(57) Zusammenfassung: Mittels einer Aufnahmeanordnung (1, 2) wird eine Anzahl von Projektionen (P) eines dreidimensionalen Objekts (4) aufgenommen. Jede Projektion (P) umfasst einen Datensatz von örtlich zusammenhängenden Datenwerten. Die Projektionen (P) werden einem Rechner (6) vorgegeben. Ein erster Teil der Datenwerte der Projektionen (P) wird durch neue Datenwerte ersetzt, ein zweiter Teil der Datenwerte der Projektionen (P) bleibt unverändert. So werden geänderte Projektionen (P') generiert, anhand derer vom Rechner (6) eine Rekonstruktion des Objekts (4) ermittelt wird.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Ermittlungsverfahren für eine Rekonstruktion eines dreidimensionalen Objekts anhand einer Anzahl von mittels einer Aufnahmeanordnung aufgenommener Projektionen des Objekts, wobei jede Projektion einen Datensatz von örtlich zusammenhängenden Datenwerten umfasst, wobei die aufgenommenen Projektionen einem Rechner vorgegeben werden, von dem die Rekonstruktion ermittelt wird.

[0002] Die vorliegende Erfindung betrifft ferner ein auf einem Datenträger gespeichertes Computerprogramm zur Durchführung eines derartigen Verfahrens und einen Rechner, der derart programmiert ist, dass mit ihm ein derartiges Verfahren ausführbar ist.

[0003] Derartige Ermittlungsverfahren sind allgemein bekannt. Sie werden beispielsweise bei der Computertomographie und bei der 3D-Angiographie eingesetzt.

[0004] Bei der Vorgehensweise des Standes der Technik entstehen – insbesondere durch Metallteile im Objekt – oftmals Artefakte. Je nach Lage des Einzelfalls sind diese Artefakte nicht störend, zwar störend, aber tolerierbar oder nicht akzeptabel.

[0005] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Ermittlungsverfahren für eine Rekonstruktion eines dreidimensionalen Objekts derart zu verbessern, dass Artefakte reduzierbar und in einer Reihe von Fällen sogar weitgehend eliminierbar sind.

[0006] Die Aufgabe wird dadurch gelöst, dass ein erster Teil der Datenwerte der Projektionen durch neue Datenwerte ersetzt wird und ein zweiter Teil der Datenwerte der Projektionen unverändert bleibt und so geänderte Projektionen generiert werden und die Rekonstruktion vom Rechner anhand der geänderten Projektionen ermittelt wird.

[0007] Die Erfindung beruht also auf der Erkenntnis, dass Artefakte am einfachsten dadurch vermeidbar sind, dass bereits die Eingangsdaten für das Ermitteln der Rekonstruktion, also die Projektionen, geeignet aufbereitet werden.

[0008] Im einfachsten Fall wird dem Rechner von einem Anwender für jede der aufgenommenen Projektionen vorgegeben, welche Datenwerte zu ersetzen sind. Dieses Verfahren funktioniert stets, ist aber für den Anwender mühsam und aufwendig.

[0009] Erheblich komfortabler ist es, wenn dem Rechner vom Anwender für mindestens zwei – vorzugsweise genau zwei – der aufgenommenen Projektionen vorgegeben wird, welche Datenwerte zu ersetzen sind, und der Rechner anhand dieser Vorgaben selbsttätig ermittelt, welche Datenwerte in den anderen aufgenommenen Projektionen zu ersetzen sind. Die beiden erstgenannten Projektionen schließen dabei vorzugsweise miteinander einen Winkel ein, der in der Nähe von 90° liegt.

[0010] Alternativ zur Vorgabe der zu ändernden Datenwerte in zwei Projektionen ist es auch möglich, dass vom Rechner anhand der aufgenommenen Projektionen eine vorläufige Rekonstruktion ermittelt wird, dem Rechner von einem Anwender in der vorläufigen Rekonstruktion mindestens ein Ort im dreidimensionalen Raum vorgegeben wird und vom Rechner anhand des mindestens einen Ortes selbsttätig die zu ersetzenden Datenwerte der aufgenommenen Projektionen ermittelt werden.

[0011] Alternativ zur manuellen Vorgabe der zu ersetzenden Datenwerte durch den Anwender ist es auch möglich, dass die zu ersetzenden Datenwerte vom Rechner anhand der Datenwerte der Projektionen selbsttätig ermittelt werden. Dabei ist es theoretisch möglich, dass die zu ersetzenden Datenwerte vom Rechner in den gesamten Projektionen ermittelt werden. Besser aber ist eine zweistufige, interaktive Vorgehensweise. Dabei wird in der ersten Stufe dem Rechner von einem Anwender mindestens ein in sich örtlich zusammenhängender Bereich vorgegeben, innerhalb bzw. außerhalb dessen der Rechner dann die zu ersetzenden Datenwerte ermittelt.

[0012] Analog zur manuellen Vorgabe der zu ersetzenden Datenwerte ist es auch hier möglich, dass dem Rechner von einem Anwender für jede der aufgenommenen Projektionen mindestens ein in sich örtlich zusammenhängender Bereich vorgegeben wird und der Rechner die zu ersetzenden Datenwerte dann ausschließlich innerhalb bzw. außerhalb des Bereichs ermittelt.

[0013] Wenn dabei mehrere örtlich voneinander getrennte, aber in sich örtlich zusammenhängende Bereiche vorgegeben werden, werden die Bereiche entweder mittels einer Oder- oder mittels einer Und-Verknüpfung miteinander verbunden. Wenn die zu ersetzenden Datenwerte ausschließlich innerhalb der vorgegebenen Bereiche zu ermitteln sind, sind die Bereiche Oder-verknüpft. Wenn die zu ersetzenden Datenwerte außerhalb der Bereiche zu ermitteln sind, sind die Bereiche Und-verknüpft.

[0014] Ebenso analog zur Vorgabe der zu ersetzenden Datenwerte ist es auch hier wieder komfortabler, wenn dem Rechner von einem Anwender für mindestens zwei – vorzugsweise genau zwei – der aufgenommenen Projektionen mindestens ein in sich örtlich zusammenhängender Bereich vorgegeben wird, der Rechner bezüglich dieser aufgenommenen Projektionen die zu ersetzenden Datenwerte ausschließlich innerhalb oder ausschließlich außerhalb der Bereiche ermittelt und der Rechner anhand der vorgegebenen Bereiche in den anderen aufgenommenen Projektionen selbsttätig ermittelt, innerhalb bzw. außerhalb welcher Bereiche von ihm die zu ersetzenden Datenwerte zu ermitteln sind. Auch hier sollten die beiden erstgenannten Projektionen vorzugsweise im Wesentlichen einen rechten Winkel miteinander einschließen.

[0015] Auch hier ist es alternativ wieder möglich, dass vom Rechner anhand der aufgenommenen Projektionen eine vorläufige Rekonstruktion ermittelt wird, dem Rechner von einem Anwender in der vorläufigen Rekonstruktion mindestens ein in sich örtlich

zusammenhängender Bereich im dreidimensionalen Raum vorgegeben wird, der Rechner anhand des Bereichs korrespondierende Bereiche in den aufgenommenen Projektionen ermittelt und die zu ersetzenden Datenwerte ausschließlich innerhalb oder ausschließlich außerhalb der korrespondierenden Bereiche ermittelt werden.

[0016] Zur Ermittlung der zu ersetzenden Datenwerte ist es möglich, dass diese vom Rechner ausschließlich anhand der zu ersetzenden Datenwerte selbst ermittelt werden. Beispielsweise können die Datenwerte vom Rechner mit einem vorab ermittelten oder mit einem dem Rechner vorab vorgegebenen Schwellwert verglichen werden.

[0017] Besser ist es hingegen, wenn die zu ersetzenden Datenwerte vom Rechner anhand der zu ersetzenden Datenwerte selbst und der örtlich benachbarten Datenwerte, insbesondere der örtlich unmittelbar benachbarten Datenwerte, ermittelt werden. In diesem Fall kann beispielsweise durch Vergleich der Differenz unmittelbar benachbarter Datenwerte mit einem statischen oder dynamischen Schwellwert eine Kantendetektion vorgenommen werden. Sich so ergebende geschlossene Flächen können dann in an sich bekannter Weise gefüllt werden. Auch andere – gegebenenfalls auch zusätzlich auszuführende – Vorverarbeitungen, z. B. ein Erweitern um eine fest vorgegebene oder parametrierbare Anzahl von örtlich benachbarten Datenwerten, ist möglich.

[0018] Die Projektionen können beliebiger Natur sein. Insbesondere können sie (z. B. bei der Computertomographie) eindimensional oder (z. B. bei der 3D-Angiographie) zweidimensional sein. Auch können sie parallele Projektionen oder perspektivische Projektionen sein.

[0019] Bezüglich der neuen Datenwerte werden im einfachsten Fall für jede Projektion die neuen Datenwerte vom Rechner anhand von unverändert bleibenden Datenwerten aus der örtlichen Umgebung der zu ersetzenden Datenwerte selbsttätig ermittelt. Beispielsweise können die zu ersetzenden Datenwerte durch den Mittelwert der Umgebung – gegebenenfalls leicht verschliffen – ersetzt werden.

[0020] Vorzugsweise aber wird für jede Projektion eine Maske der zu ersetzenden Datenwerte ermittelt, für jede Projektion das Ortsspektrum der unverändert bleibenden Datenwerte und der Maske ermittelt und für jede Projektion die neuen Datenwerte vom Rechner anhand der Ortsspektren der unverändert bleibenden Datenwerte und der Maske selbsttätig ermittelt. Insbesondere kann dadurch eine adaptive Filterung bzw. Medianfilterung erfolgen. Auch kann die Filterung derart erfolgen, wie sie von Til Aach und Volker Metzler in ihrem Aufsatz „Defect interpolation in digital radiography – how object-oriented transform coding helps", veröffentlicht in Proceedings of SPIE, Vol. 4322 (2001), Seiten 824 bis 835 beschrieben ist.

[0021] Weitere Vorteile und Einzelheiten ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels in Verbindung mit den Zeichnungen. Dabei zeigen in Prinzipdarstellung

[0022] **Fig.** 1 eine bildgebende medizinische Anlage,

[0023] **Fig.** 2 eine Draufsicht auf eine Schwenkebene,

[0024] **Fig.** 3 eine erläuternde Darstellung einer Projektion,

[0025] **Fig.** 4 ein Ablaufdiagramm,

[0026] **Fig.** 5 eine Projektion,

[0027] **Fig.** 6 eine Maske von zu ersetzenden Datenwerten,

[0028] **Fig.** 7 bis 10 Ablaufdiagramme,

[0029] **Fig.** 11 das Prinzip einer Triangulation,

[0030] **Fig.** 12 bis 15 Ablaufdiagramme,

[0031] **Fig.** 16 eine erläuternde Darstellung einer Projektion,

[0032] **Fig.** 17 und 18 Ablaufdiagramme und

[0033] **Fig.** 19 eine Projektion einer Rekonstruktion.

[0034] Gemäß den **Fig.** 1 bis 3 weist eine bildgebende medizinische Anlage eine Strahlungsquelle **1** und einen Strahlungsdetektor **2** auf. Die Strahlungsquelle **1** und der Strahlungsdetektor **2** bilden eine Aufnahmeanordnung. Sie sind um eine gemeinsame Schwenkachse **3** verschwenkbar. Im Bereich der Schwenkachse **3** ist ein zu durchstrahlendes dreidimensionales Objekt **4** (z. B. ein Mensch oder ein Körperteil eines Menschen) angeordnet.

[0035] Die Strahlungsquelle **1** ist im Wesentlichen punktförmig ausgebildet. Eine vom Strahlungsdetektor **2** aufgenommene Projektion P ist somit im Wesentlichen eine perspektivische Projektion des Objekts **4**. Bei geeigneter Ausgestaltung der Strahlungsquelle **1** könnte die Projektion P aber auch eine parallele Projektion sein.

[0036] Wie insbesondere aus **Fig.** 3 ersichtlich ist, weist der Strahlungsdetektor **2** eine zweidimensionale Anordnung von Sensoren **5** auf. Die vom Strahlungsdetektor **2** gelieferte Projektion P ist somit eine zweidimensionale Projektion. Jede Projektion P entspricht somit einem Datensatz, der eine Anzahl von örtlich zusammenhängenden Datenwerten fit aufweist. Prinzipiell könnte der Strahlungsdetektor **2** auch nur eine einzige Zeile von Sensoren **5** aufweisen. In diesem Fall wäre die Projektion P eindimensional.

[0037] Die bildgebende medizinische Anlage kann beispielsweise eine Röntgenanlage sein. Gemäß den **Fig.** 1 bis 3 ist sie eine Röntgen-Angiographieanlage. Aber auch andere bildgebende medizinische Anlagen, z. B. ein Computertomograph, könnten verwendet werden.

[0038] Die bildgebende medizinische Anlage wird von einem Rechner **6** gesteuert. Der Rechner **6** selbst wiederum nimmt von einem Anwender **7** Befehle entgegen. Der Rechner **6** steuert unter anderen das (gemeinsame) Verschwenken der Strahlungsquelle **1** und des Strahlungsdetektors **2** um die Schwenkachse **3**. Während des Verschwenkens steuert er ferner die Strahlungsquelle **1** an, so dass diese Strahlung emittiert. Weiterhin liest er die vom

Strahlungsdetektor **2** aufgenommenen Projektionen P ein.

[0039] In der Regel erfolgt – siehe **Fig.** 2 – ein Verschwenken um einen Schwenkwinkel α. Während des Verschwenkens wird jeweils nach Überstreichen eines Inkrementalwinkels β eine Projektion P in den Rechner **6** eingelesen. Der Schwenkwinkel α beträgt gemäß **Fig.** 2 etwa 90°. In der Regel ist der Schwenkwinkel α aber größer als 90°, meist sogar größer als 180°. Denn dadurch ist – bei der Aufnahme von hinreichend vielen Projektionen P – eine dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts **4** gemäß dem Feldkamp-Algorithmus möglich.

[0040] Das Verhältnis von Schwenkwinkel α zu Inkrementalwinkel β bestimmt die Anzahl N der aufgenommenen Projektionen P. Die Anzahl N liegt in der Regel zwischen 40 und 400. Jede Projektion P bildet, wie bereits erwähnt, einen Datensatz von örtlich zusammenhängenden Datenwerten f_{ij}.

[0041] Anhand der Projektionen P ermittelt der Rechner **6** eine Rekonstruktion des Objekts **4**. Der Rechner **6** ermittelt also anhand der Datenwerte fit einen Volumendatensatz V_{xyz}, der – Idealerweise – dem Objekt **4** entspricht. Derartige Verfahren sind an sich bekannt. Beispielhaft wird der bereits erwähnte Feldkamp-Algorithmus genannt, der beispielsweise in dem Aufsatz „Practical Cone-beam Algorithm" von L. A. Feldkamp, L. C. Davis und J. W. Kress, veröffentlicht in JOSA A1, 612 (1984), beschrieben ist.

[0042] Zum Durchführen des Ermittlungsverfahrens – und auch zum Steuern der bildgebenden medizinischen Anlage – ist der Rechner **6** mit einem Computerprogramm **8** programmiert. Das Computerprogramm **8** ist dem Rechner **6** zuvor über einen Datenträger **9** zugeführt worden, auf dem das Computerprogramm **8** gespeichert ist. Der Datenträger **9** kann beispielsweise eine CD-ROM sein, auf dem das Computerprogramm **8** in ausschließlich maschinen lesbarer Form gespeichert ist. Es sind aber auch andere Datenträger **9** denkbar, beispielsweise ein Listing auf Papier. Auch ein Fernladen des Computerprogramms **8** ist möglich. In diesem Fall wäre der Datenträger **9** die Festplatte oder ein ähnliches Speichermedium eines Servers.

[0043] Zur Ermittlung der dreidimensionalen Rekonstruktion des ebenfalls dreidimensionalen Objekts **4** führt der Rechner **6** das nachfolgend in Verbindung mit **Fig.** 4 näher erläuterte Verfahren aus. Dabei wird ergänzend auch auf die **Fig.** 1 bis 3 sowie auf die **Fig.** 5 und 6 Bezug genommen. Details der Schrittabfolge von **Fig.** 4 werden dann in Verbindung mit den **Fig.** 7 bis 18 näher erläutert.

[0044] Gemäß **Fig.** 4 nimmt der Rechner **6** in einem Schritt S1 zunächst die Projektionen P auf und speichert sie intern ab. Alternativ zum Aufnehmen der Projektionen P könnten die Projektionen P dem Rechner **6** aber auch anderweitig vorgegeben werden. Der Rechner **6** muss also das Aufnehmen der Projektionen P nicht unbedingt selbst steuern.

[0045] **Fig.** 5 zeigt beispielhaft eine Aufnahme bzw. Projektion P eines menschlichen Schädels. Die Strahlungsquelle **1** ist bei dieser Aufnahme hinter dem Hinterkopf des Menschen angeordnet. Der Strahlungsdetektor **2** ist vor dem Gesicht des Menschen angeordnet. Deutlich zu erkennen sind in **Fig.** 5 dunkle Zonen im Gebissbereich **10** des Menschen.

[0046] Sodann werden in einem Schritt S2 die zu ersetzenden Datenwerte bestimmt (lokalisiert). Auf die Details der Bestimmung der zu ersetzenden Datenwerte wird später noch näher eingegangen werden.

[0047] Sodann werden in einem Schritt S3 die zu ersetzenden Datenwerte durch neue Datenwerte ersetzt. Auch auf das Ersetzen der Datenwerte wird später noch näher eingegangen werden. Die anderen, nicht zu ersetzenden Datenwerte bleiben unverändert. Der Rechner **6** generiert so geänderte Projektionen P'.

[0048] **Fig.** 6 zeigt für die Projektion P von **Fig.** 5 die zu ersetzenden Datenwerte. Es handelt sich zum einen um Elemente, die im Gebissbereich **10** angeordnet sind, zum anderen um Datenwerte, die in Ohrbereichen **11**, **11'** des Menschen angeordnet sind.

[0049] In einem Schritt S4 ermittelt der Rechner **6** anhand der geänderten Projektionen P' die Rekonstruktion des Objekts **4**. Die Ermittlung erfolgt dabei gemäß an sich bekannter Rekonstruktions-Algorithmen, z. B. gemäß dem bereits genannten Feldkamp-Algorithmus.

[0050] Der Schritt S2 des Verfahrens gemäß **Fig.** 4 kann in einer einfachen Version des erfindungsgemäßen Ermittlungsverfahrens wie in **Fig.** 7 dargestellt ausgestaltet sein. Gemäß **Fig.** 7 wird in einem Schritt S5 vom Rechner **6** eine der Projektionen P – z. B. die Projektion gemäß **Fig.** 5 – auf einem Sichtgerät **12** dargestellt. Vom Anwender **7** wird dann vorgegeben, welche Datenwerte zu ersetzen sind. Der Rechner **6** nimmt also in einem Schritt S6 Orte der zu ersetzenden Datenwerte entgegen. Das Markieren kann vom Anwender **7** z. B. durch Bewegen eines Cursors auf eine Stelle und Eingeben eines Click-Befehls erfolgen.

[0051] Der Rechner **6** überprüft sodann in einem Schritt S7, ob noch eine weitere Projektion P abgearbeitet werden muss. Wenn dies der Fall ist, verzweigt er zu einem Schritt S8 und wählt dort die nächste Projektion P aus. Vom Schritt S8 geht der Rechner dann wieder in den Schritt S5 über. Wenn hingegen alle Projektionen P abgearbeitet sind, wird, ausgehend vom Schritt S7, die Routine gemäß **Fig.** 7 verlassen. In diesem Fall wird mit dem Schritt S3 von **Fig.** 4 fortgefahren.

[0052] Wie besonders deutlich aus **Fig.** 3 ersichtlich ist, entspricht jeder Punkt einer Projektion P einer Projektionslinie im Raum. Das Selektieren eines Punktes einer Projektion P legt somit eine Linie im Raum fest. Alternativ zur Vorgehensweise gemäß **Fig.** 7 ist es in einer etwas komfortableren Version des erfindungsgemäßen Ermittlungsverfahrens daher möglich, zunächst in einem Schritt S9 eine erste

Projektion P1 auf dem Sichtgerät **12** darzustellen und in einem Schritt S10 Orte in der ersten Projektion P1 entgegen zu nehmen. Die Schritte S9 und S10 korrespondieren dabei inhaltlich mit den Schritten S5 und S6 von **Fig.** 7.

[0053] Sodann wird in einem Schritt S11 eine zweite Projektion P2 auf dem Sichtgerät **12** dargestellt. Auch bezüglich dieser Projektion P2 nimmt der Rechner **6** in einem Schritt S12 wieder Orte für die zu ersetzenden Datenwerte entgegen. Auch die Schritte S11 und S12 entsprechen inhaltlich den Schritten S5 und S6 von **Fig.** 7.

[0054] Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, dass der Rechner **6** in einem Schritt S13 Orte im Raum ermittelt, an denen sich korrespondierende Projektionslinien der ersten und der zweiten Projektion P1, P2 kreuzen. Die durch die Kreuzungspunkte definierten Orte im Raum können dann in die anderen Projektionen P abgebildet werden. Dadurch können in einem Schritt S14 die Orte in den anderen Projektionen P vom Rechner **6** selbsttätig ermittelt werden. Der Anwender **7** muss daher bei der Vorgehensweise gemäß **Fig.** 8 nicht mehr in N = 40 ... 400, sondern nur noch bezüglich zweier Projektionen P1, P2 die zu ersetzenden Datenwerte vorgeben.

[0055] Die Vorgehensweise gemäß **Fig.** 8 erfolgt am effizientesten dadurch, dass die zwei Projektionen P1, P2 simultan dargestellt werden. Die Darstellung kann dabei auf eigenen Sichtgeräten **12** erfolgen. Auch kann die Darstellung in zwei Fenstern eines einzelnen Sichtgeräts **12** erfolgen. Das Vorgeben eines Punktes in z. B. der Projektion P1 führt dann automatisch zur Anzeige einer korrespondierenden Linie in der Projektion P2. Durch Markieren von Punkten auf dieser Linie sind dann ein Ort (siehe z. B. den Pfeil in **Fig.** 3) bzw. mehrere Orte im Raum eindeutig bestimmt.

[0056] Schließlich ist es in einer weiteren Variante des erfindungsgemäßen Ermittlungsverfahrens gemäß **Fig.** 9 auch möglich, dass der Rechner **6** in einem Schritt S15 anhand der aufgenommenen (unveränderten) Projektionen P zunächst eine vorläufige Rekonstruktion ermittelt. Diese vorläufige Rekonstruktion wird dann über das Sichtgerät **12** dargestellt. Bezüglich dieser vorläufigen Rekonstruktion nimmt der Rechner **6** in einem Schritt S16 Orte im Raum entgegen, die ihm vom Anwender **7** vorgegeben werden. Bezüglich dieser Orte ermittelt der Rechner **6** in einem Schritt S17 selbsttätig die korrespondierenden Orte und damit die zu ersetzenden Datenwerte in den aufgenommenen Projektionen P.

[0057] Der Vorteil der Vorgehensweise gemäß **Fig.** 9 gegenüber der von **Fig.** 8 liegt darin, dass die vorläufige Rekonstruktion gemäß dem Schritt S15 zwar artefaktbehaftet ist, die Artefakte aber nicht überall auftreten. In manchen Fällen ist daher die Durchführung der Schritte S16 und S17 gar nicht erforderlich. Wenn sie hingegen erforderlich ist, kann der Anwender 7 im Schritt S16 auf Grund seines Wissens über mögliche Fehlerquellen direkt im Raum die potentiellen Fehlerquellen markieren.

[0058] Bei der Vorgehensweise gemäß den **Fig.** 7 bis 9 werden die zu ersetzenden Datenwerte direkt oder indirekt vom Anwender **7** bestimmt. Es ist aber auch möglich, dass die zu ersetzenden Datenwerte vom Rechner **6** anhand der Datenwerte der Projektionen selbsttätig ermittelt werden. Dies wird nachfolgend in Verbindung mit den **Fig.** 10 bis 16 näher erläutert.

[0059] Gemäß **Fig.** 10 ist es beispielsweise möglich, analog zum Schritt S5 von **Fig.** 7 in einem Schritt S18 auf dem Sichtgerät **12** eine Projektion P darzustellen. Bezüglich dieser Projektion P wird dem Rechner **6** dann vom Anwender **7** mindestens ein Bereich **13** (siehe **Fig.** 11) vorgegeben. Der Bereich **13** ist örtlich in sich zusammenhängend. Diesen Bereich **13** nimmt der Rechner **6** in einem Schritt S19 entgegen. Der Bereich **13** kann z. B. – siehe **Fig.** 5 und 6 – dem Gebissbereich **10** des Menschen entsprechen.

[0060] Der Rechner **6** ermittelt dann in einem Schritt S20 die Orte der zu ersetzenden Datenwerte dieser Projektion P. Die Ermittlung wird dabei vom Rechner **6** ausschließlich innerhalb des vorgegebenen Bereichs **13** vorgenommen. Alternativ wäre auch eine Ermittlung ausschließlich außerhalb des Bereichs **13** möglich. Auf die Details der Ermittlung wird später in Verbindung mit den **Fig.** 14 bis 16 noch näher eingegangen werden.

[0061] Analog zu **Fig.** 7 überprüft der Rechner **6** sodann in einem Schritt S21, ob noch eine Projektion P darzustellen und abzuarbeiten ist. Wenn dies der Fall ist, verzweigt der Rechner **6** zunächst zu einem Schritt S22, in dem er die nächste Projektion P auswählt. Sodann springt er zum Schritt S18 zurück. Anderenfalls wird die Routine gemäß **Fig.** 10 verlassen und mit dem Schritt S3 von **Fig.** 4 fortgefahren.

[0062] Bei dem Verfahren gemäß **Fig.** 10 erfolgt also eine Bereichsvorgabe für jede der Projektionen P. Innerhalb (bzw. außerhalb) der vorgegebenen Bereiche **13** hingegen erfolgt die Ermittlung durch den Rechner **6** selbsttätig.

[0063] Auch die Vorgehensweise gemäß **Fig.** 10 kann komfortabler ausgestaltet werden. In Analogie zur Vorgehensweise gemäß **Fig.** 8 ist es – siehe **Fig.** 12 – z. B. wieder möglich, in Schritten S23 und S25 zwei Projektionen P1, P2 über das Sichtgerät **12** (bzw. die Sichtgeräte **12**) darzustellen und für die Projektionen P1, P2 Bereiche **13'**, **13"** vorzugeben, die der Rechner **6** in Schritten S24 und S26 entgegen nimmt. Durch entsprechende Schnittbildung ist der Rechner **6** in der Lage, in einem Schritt S27 einen Bereich 14 im Raum zu ermitteln. Dieser Bereich **14** wird dann vom Rechner **6** in einem Schritt S28 selbsttätig in die anderen Projektionen P abgebildet. Somit können dort die korrespondierenden Bereiche **13** ermittelt werden. In einem Schritt S29 ermittelt der Rechner **6** dann bezüglich aller Projektionen P die Orte der zu ersetzenden Datenwerte. Für jede Projektion P erfolgt die Ermittlung dabei nur innerhalb (außerhalb) des vorgegebenen bzw. ermittelten Be-

reichs **13**, **13'**, **13"**.

[0064] Analog zur Vorgehensweise gemäß **Fig.** 9 ist es auch wieder möglich, direkt im Raum zu arbeiten. Hierzu wird gemäß **Fig.** 13 zunächst in einem Schritt S30 eine vorläufige Rekonstruktion des Objekts **4** ermittelt und über das Sichtgerät **12** ausgegeben. Sodann gibt der Anwender **7** in der vorläufigen Rekonstruktion dem Rechner **6** mindestens einen in sich örtlich zusammenhängenden Bereich 14 im Raum vor, den der Rechner **6** in einem Schritt S31 entgegen nimmt. In einem Schritt S32 ermittelt der Rechner **6** selbsttätig die korrespondierenden Bereiche **13** in den Projektionen P. Innerhalb (bzw. außerhalb) der Bereiche **13** der Projektionen P ermittelt der Rechner **6** in einem Schritt S33 dann selbsttätig die Orte der zu ersetzenden Datenwerte.

[0065] **Fig.** 14 zeigt nun ein einfaches Verfahren zum selbsttätigen Ermitteln der zu ersetzenden Datenwerte durch den Rechner **6**. Gemäß **Fig.** 14 wird zunächst in einem Schritt S34 überprüft, ob ein Datenwert an der Stelle (ij) einer Projektion P größer als ein Schwellwert SW1 ist. Wenn dies nicht der Fall ist, wird eine Maske an der Stelle (ij) in einem Schritt S35 auf den Wert 1 gesetzt. Ansonsten wird die Maske an der Stelle (ij) in einem Schritt S36 auf den Wert Null gesetzt. Sodann wird in einem Schritt S37 überprüft, ob alle Stellen (ij) der jeweiligen Projektion P abgearbeitet sind. Wenn dies nicht der Fall ist, wird zum Schritt S34 zurückgesprungen. Ansonsten wird – nach Durchführen einer entsprechenden Überprüfung in einem Schritt S38 – mit der nächsten Projektion P fortgefahren bzw. die Routine endgültig verlassen.

[0066] Bei der Vorgehensweise gemäß **Fig.** 14 werden die zu ersetzenden Datenwerte vom Rechner **6** also ausschließlich anhand der zu ersetzenden Datenwerte selbst ermittelt. Falls innerhalb der zu betrachtenden Projektion P durch den Anwender **11** eine Bereichsvorgabe erfolgte, wird das Verfahren gemäß **Fig.** 14 nur innerhalb bzw. nur außerhalb des vorgegebenen Bereichs **13** durchgeführt. Ansonsten erfolgt es bezüglich der gesamten Projektion P.

[0067] **Fig.** 15 zeigt nun ein weiteres Verfahren zur Ermittlung, ob ein Datenwert zu ersetzen ist oder nicht. Bei dem Verfahren gemäß **Fig.** 15 werden die zu ersetzenden Datenwerte vom Rechner **6** anhand der zu ersetzenden Datenwerte selbst und anhand der örtlich unmittelbar benachbarten Datenwerte ermittelt.

[0068] Gemäß **Fig.** 15 wird zunächst in einem Schritt S39 der Wert einer logischen Variable LOG ermittelt. Die logische Variable LOG nimmt den Wert Eins an, wenn das Maximum der Differenz des Datenwerts an der Stelle (ij) und der Datenwerte an den Stellen (nm) größer als ein Schwellwert SW2 ist. Der Index n durchläuft dabei die Werte i-1, i und i+1. Der Index m durchläuft die Werte j-1, j, und j+1. Der Schwellwert SW2 kann fest vorgegeben, vom Anwender **7** parametrierbar oder vom Rechner **6** – global oder lokal – selbst ermittelt werden.

[0069] In einem Schritt S40 wird überprüft, welchen Wert die logische Variable LOG angenommen hat. Je nach dem Ergebnis der Überprüfung im Schritt S40 wird die Maske an der Stelle (ij) entweder in einem Schritt S41 auf den Wert Eins oder in einem Schritt S42 auf den Wert Null gesetzt.

[0070] In einem Schritt S43 überprüft der Rechner **6** sodann, ob er alle Stellen (ij) der jeweiligen Projektion P abgearbeitet ab. Wenn dies nicht der Fall ist, führt er erneut an einer neuen Stelle (ij) das Verfahren gemäß den Schritten S39 bis S42 aus. Ansonsten füllt der Rechner **6** in einem Schritt S44 geschlossene Strukturen der Maske mit dem Wert Null. Der Rechner **6** sucht also beispielsweise – siehe **Fig.** 16 – in einer der Projektionen P eine geschlossene Kontur **15**, an der die Maske stets den Wert Null hat. Alle Datenwerte innerhalb der Kontur **15** sind dann ebenfalls zu ersetzende Datenwerte. Dies ist in **Fig.** 16 durch die Schraffur innerhalb der Kontur **15** angedeutet. Derartige Verfahren zum Ermitteln geschlossener Strukturen **15** sind allgemein bekannt.

[0071] Nach dem Füllen der geschlossenen Strukturen 15 im Schritt S44 kann sich noch eine Nachbearbeitung anschließen, die gegebenenfalls in einem Schritt S45 durchgeführt wird. Beispielsweise können aufgefundene Strukturen 15 um eine – gegebenenfalls vom Anwender **7** parametrierbare – Anzahl von Pixeln erweitert oder verringert werden. Auch eine Kombination beider Vorgehensweisen ist möglich. Beispielsweise können geschlossene Strukturen zunächst um fünf Pixel erweitert und sodann um drei Pixel verringert werden. Bei einer derartigen Vorgehensweise können insbesondere kleinere Lücken geschlossen werden.

[0072] Schließlich überprüft der Rechner **6** noch in einem Schritt **546**, ob alle Projektionen P abgearbeitet sind. Je nach dem Ergebnis der Überprüfung wird entweder mit der nächsten Projektion P fortgefahren oder die Routine verlassen.

[0073] Nach der Vorgabe bzw. Ermittlung (Lokalisierung) der zu ersetzenden Datenwerte müssen selbstverständlich auch die neuen Datenwerte bestimmt werden. Im einfachsten Fall ermittelt der Rechner **6** gemäß **Fig.** 17 in einem Schritt S47 einen Mittelwert der Datenwerte, welche die zu ersetzenden Datenwerte umgibt. Es wird also beispielsweise um die geschlossene Kontur **15** von **Fig.** 16 herum der Mittelwert der die Kontur **15** außen umgebenden Datenwerte ermittelt. In einem Schritt S48 wird dann überprüft, ob die Maske an der Stelle (ij) den Wert Eins hat. Wenn dies nicht der Fall ist, ist der Datenwert zu ersetzen. Der Datenwert an der Stelle (ij) wird in diesem Fall in einem Schritt S49 durch den im Schritt S47 ermittelten Mittelwert ersetzt.

[0074] In einem Schritt S50 wird dann wieder überprüft, ob alle Stellen (ij) abgearbeitet sind. Gegebenenfalls wird – selbstverständlich einer neuen Stelle (ij) – wieder mit dem Schritt S46 fortgefahren. Anderenfalls überprüft der Rechner **6** noch in einem Schritt S51, ob alle Projektionen P abgearbeitet sind. Je

nach dem Ergebnis der Überprüfung wird entweder mit der nächsten Projektion P fortgefahren oder die Routine verlassen.

[0075] Bei dem Verfahren gemäß **Fig.** 17 werden also für jede Projektion P die neuen Datenwerte vom Rechner **6** anhand von unverändert bleibenden Datenwerten aus der örtlichen Umgebung der zu ersetzenden Datenwerte selbsttätig ermittelt. Diese Vorgehensweise liefert bereits eine verbesserte Rekonstruktion. Besser ist es aber, für jede Projektion das in **Fig.** 18 dargestellte Verfahren auszuführen.

[0076] Gemäß **Fig.** 18 wird in einem Schritt S52 zunächst durch Fouriertransformation ein Ortsspektrum der unverändert bleibenden Datenwerte ermittelt. Sodann wird in einem Schritt S53 durch Fouriertransformation ein Ortsspektrum der Maske ermittelt. Anhand der beiden Fouriertransformationen werden dann die neuen Datenwerte vom Rechner **6** in einem Schritt S54 selbsttätig ermittelt.

[0077] Die Ermittlung kann beispielsweise auf die gleiche Art und Weise erfolgen, wie sie von Til Aach und Volker Metzler in dem oben stehend erwähnten Aufsatz beschrieben ist. Der Offenbarungsgehalt dieses Aufsatzes wird daher ausdrücklich in die vorliegende Anmeldung mit aufgenommen.

[0078] Zu dieser Ermittlung wird ein iterativer Algorithmus verwendet. Die unverändert bleibenden Datenwerte werden als Produkt der geänderten Projektionen P' und der Maske angenommen. Nach der Fouriertransformation ergibt sich somit eine Faltung des Ortsspektrums der unverändert bleibenden Datenwerte mit dem Ortsspektrum der Maske. Iterativ können so nach und nach Spektralkomponenten der geänderten Projektion P' ermittelt werden. Nach Ermittlung hinreichend vieler Spektrallinien ist dann die geänderte Projektion P' durch Fourierrücktransformation ermittelbar.

[0079] Mittels des erfindungsgemäßen Ermittlungsverfahrens ist somit trotz Artefakte verursachender Elemente im Objekt **4** auf einfache Weise eine gute Rekonstruktion des Objekts **4** möglich. **Fig.** 19 zeigt eine Projektion einer derartigen Rekonstruktion.

Patentansprüche

1. Ermittlungsverfahren für eine Rekonstruktion eines dreidimensionalen Objekts (**4**) anhand einer Anzahl (N) von mittels einer Aufnahmeanordnung (**1**, **2**) aufgenommener Projektionen (P) des Objekts (**4**), wobei jede Projektion (P) einen Datensatz von örtlich zusammenhängenden Datenwerten umfasst,
– wobei einem Rechner (**6**) die aufgenommenen Projektionen (P) vorgegeben werden,
– wobei ein erster Teil der Datenwerte der Projektionen (P) durch neue Datenwerte ersetzt wird und ein zweiter Teil der Datenwerte der Projektionen (P) unverändert bleibt und so geänderte Projektionen (P') generiert werden,
– wobei die Rekonstruktion vom Rechner (**6**) anhand der geänderten Projektionen (P') ermittelt wird.

2. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**,
dass dem Rechner (**6**) von einem Anwender (**7**) für jede der aufgenommenen Projektionen (P) vorgegeben wird, welche Datenwerte zu ersetzen sind.

3. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass dem Rechner (**6**) von einem Anwender (**7**) für mindestens zwei – vorzugsweise genau zwei – der aufgenommenen Projektionen (P) vorgegeben wird, welche Datenwerte zu ersetzen sind, und dass der Rechner (**6**) anhand dieser Vorgaben selbsttätig ermittelt, welche Datenwerte in den anderen aufgenommenen Projektionen (P) zu ersetzen sind.

4. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass vom Rechner (**6**) anhand der aufgenommenen Projektionen (P) eine vorläufige Rekonstruktion ermittelt wird, dass dem Rechner (**6**) von einem Anwender (**7**) in der vorläufigen Rekonstruktion mindestens ein Ort im dreidimensionalen Raum vorgegeben wird und dass vom Rechner (**6**) anhand des mindestens einen Ortes selbsttätig zu ersetzenden Datenwerte der aufgenommenen Projektionen (P) ermittelt werden.

5. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die zu ersetzenden Datenwerte vom Rechner (**6**) anhand der Datenwerte der Projektionen (P) selbsttätig ermittelt werden.

6. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass dem Rechner (**6**) von einem Anwender (**7**) für jede der aufgenommenen Projektionen (P) mindestens ein in sich örtlich zusammenhängender Bereich (**13**) vorgegeben wird und dass der Rechner (**6**) die zu ersetzenden Datenwerte ausschließlich innerhalb oder ausschließlich außerhalb des Bereichs (**13**) ermittelt.

7. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet,
– dass dem Rechner (**6**) von einem Anwender (**7**) für mindestens zwei – vorzugsweise genau zwei – der aufgenommenen Projektionen (P) mindestens ein in sich örtlich zusammenhängender Bereich (**13'**, **13"**) vorgegeben wird,
– dass der Rechner (**6**) bezüglich dieser aufgenommenen Projektionen (P1, P2) die zu ersetzenden Datenwerte ausschließlich innerhalb oder ausschließlich außerhalb der Bereiche (**13'**, **13"**) ermittelt und
– dass der Rechner (**6**) anhand der vorgegebenen Bereiche (**13'**, **13"**) in den anderen aufgenommenen Projektionen (P) selbsttätig ermittelt, innerhalb bzw. außerhalb welcher Bereiche (**13**) von ihm die zu ersetzenden Datenwerte zu ermitteln sind.

8. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet,

– dass vom Rechner (**6**) anhand der aufgenommenen Projektionen (P) eine vorläufige Rekonstruktion ermittelt wird,
– dass dem Rechner (**6**) von einem Anwender (**7**) in der vorläufigen Rekonstruktion mindestens ein in sich örtlich zusammenhängender Bereich (**14**) im dreidimensionalen Raum vorgegeben wird,
– dass der Rechner (**6**) anhand des Bereichs (**14**) korrespondierende Bereiche (**13**) in den aufgenommenen Projektionen (P) ermittelt und
– dass die zu ersetzenden Datenwerte vom Rechner (**6**) ausschließlich innerhalb oder ausschließlich außerhalb der korrespondierenden Bereiche **13** ermittelt werden.

9. Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die zu ersetzenden Datenwerte vom Rechner (**6**) ausschließlich anhand der zu ersetzenden Datenwerte selbst ermittelt werden.

10. Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die zu ersetzenden Datenwerte vom Rechner (**6**) anhand der zu ersetzenden Datenwerte selbst und der örtlich benachbarten Datenwerte, insbesondere der örtlich unmittelbar benachbarten Datenwerte, ermittelt werden.

11. Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die aufgenommenen Projektionen (P) eindimensionale Projektionen sind.

12. Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die aufgenommenen Projektionen (P) zweidimensionale Projektionen sind.

13. Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die aufgenommenen Projektionen (P) parallele Projektionen sind.

14. Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die aufgenommenen Projektionen (P) perspektivische Projektionen sind.

15. Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass für jede Projektion (P) die neuen Datenwerte vom Rechner (**6**) anhand von unverändert bleibenden Datenwerten aus der örtlichen Umgebung der zu ersetzenden Datenwerte selbsttätig ermittelt werden.

16. Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass für jede Projektion (P) eine Maske der zu ersetzenden Datenwerte ermittelt wird, dass für jede Projektion (P) Ortsspektren der unverändert bleibenden Datenwerte und der Maske ermittelt werden und dass für jede Projektion (P) die neuen Datenwerte anhand der Ortsspektren der unverändert bleibenden Datenwerte und der Maske selbsttätig ermittelt werden.

17. Auf einem Datenträger (**9**) gespeichertes Computerprogramm zur Durchführung eines Ermittlungsverfahrens nach einem der obigen Ansprüche.

18. Rechner, der derart programmiert ist, dass mit ihm ein Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16 ausführbar ist.

Es folgen 10 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

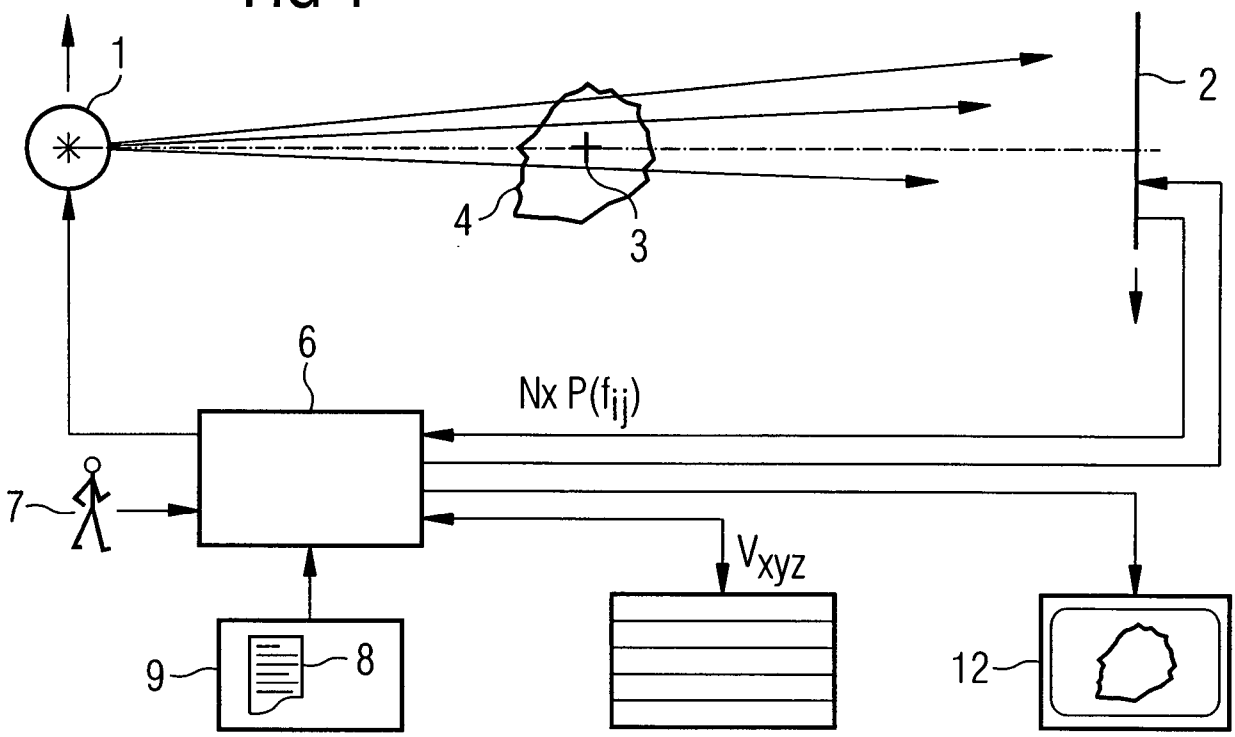


FIG 2

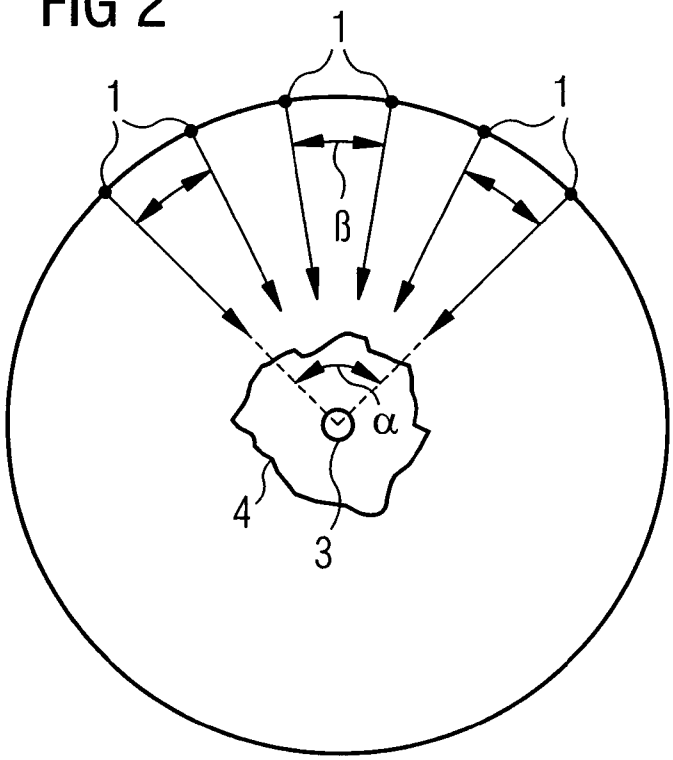


FIG 3

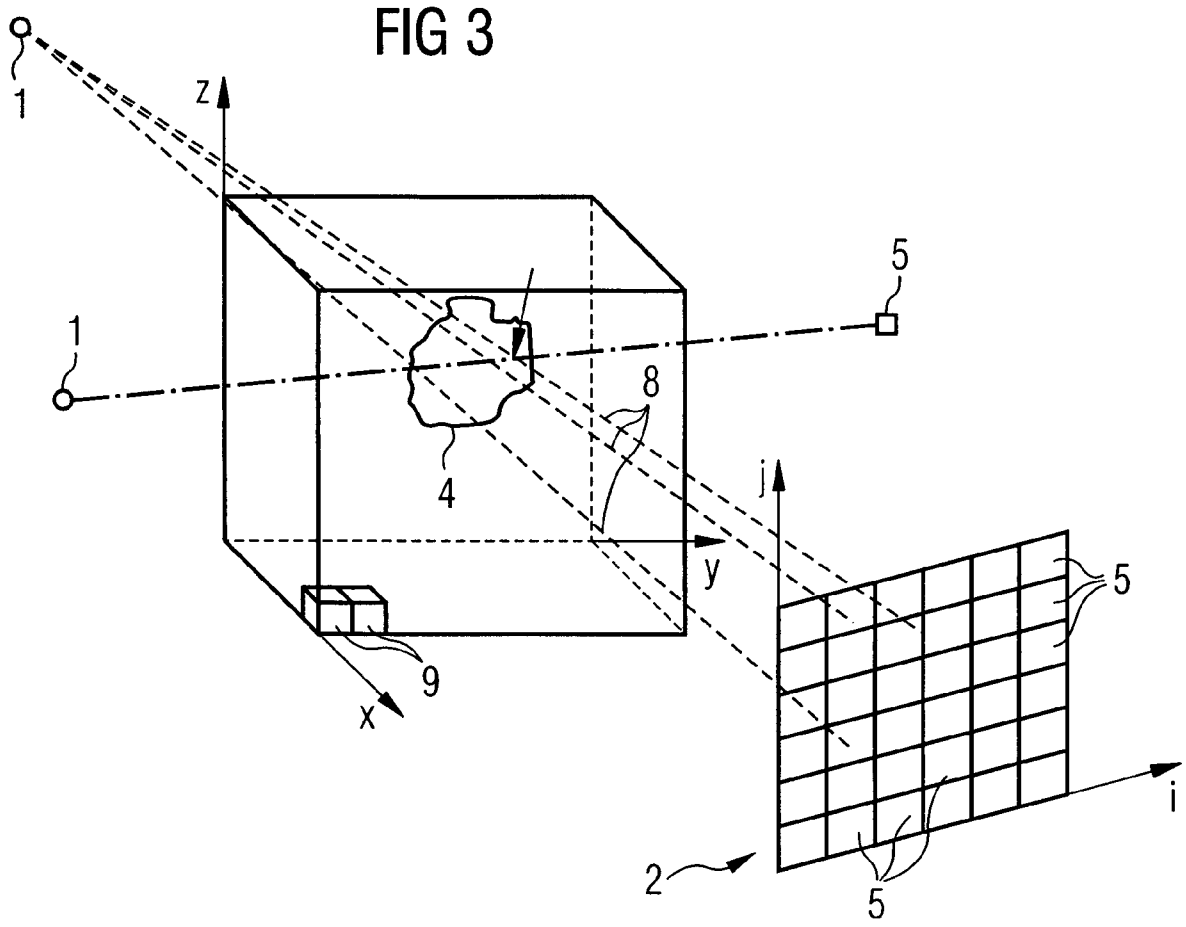

1
z
5
1
8
4
j
y
5
9
x
i
2
5

FIG 4

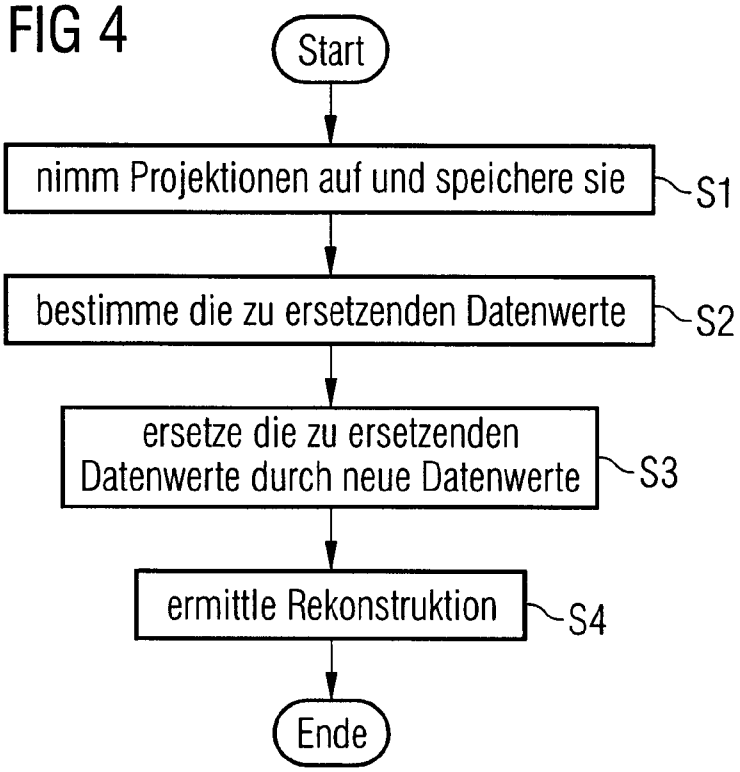

Start
nimm Projektionen auf und speichere sie
S1
bestimme die zu ersetzenden Datenwerte
S2
ersetze die zu ersetzenden Datenwerte durch neue Datenwerte
S3
ermittle Rekonstruktion
S4
Ende

FIG 5

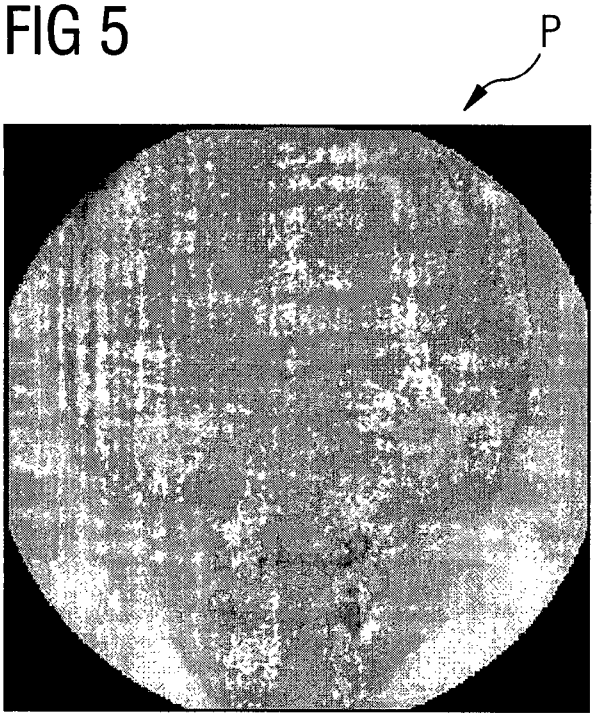


FIG 6

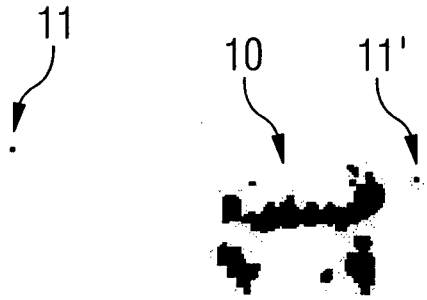


FIG 7

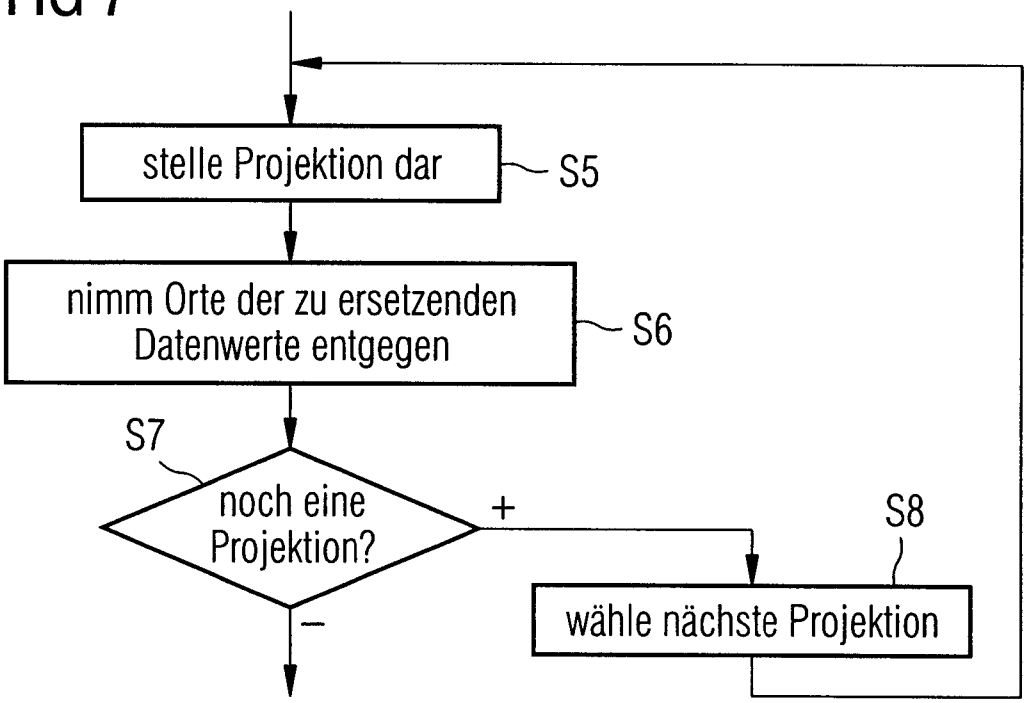


FIG 8

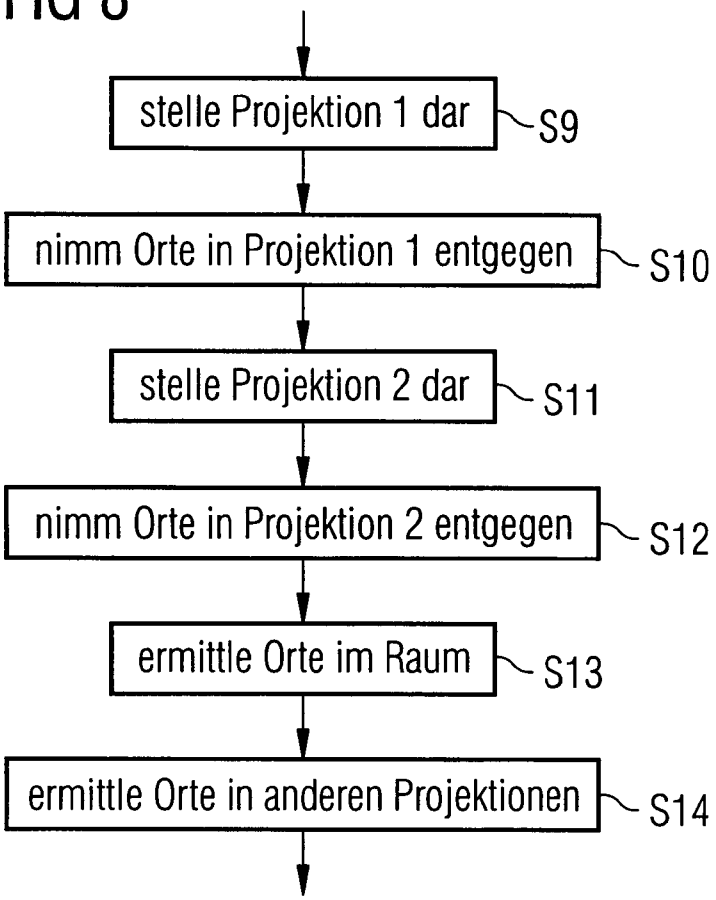

stelle Projektion 1 dar
S9
nimm Orte in Projektion 1 entgegen
S10
stelle Projektion 2 dar
S11
nimm Orte in Projektion 2 entgegen
S12
ermittle Orte im Raum
S13
ermittle Orte in anderen Projektionen
S14

FIG 9

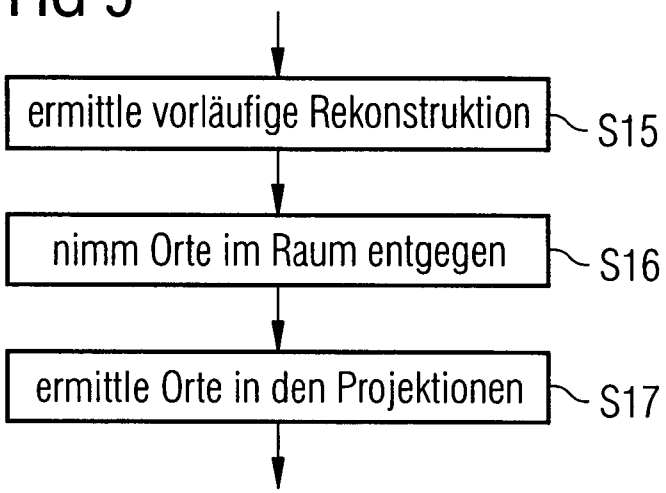

ermittle vorläufige Rekonstruktion
S15
nimm Orte im Raum entgegen
S16
ermittle Orte in den Projektionen
S17

FIG 10

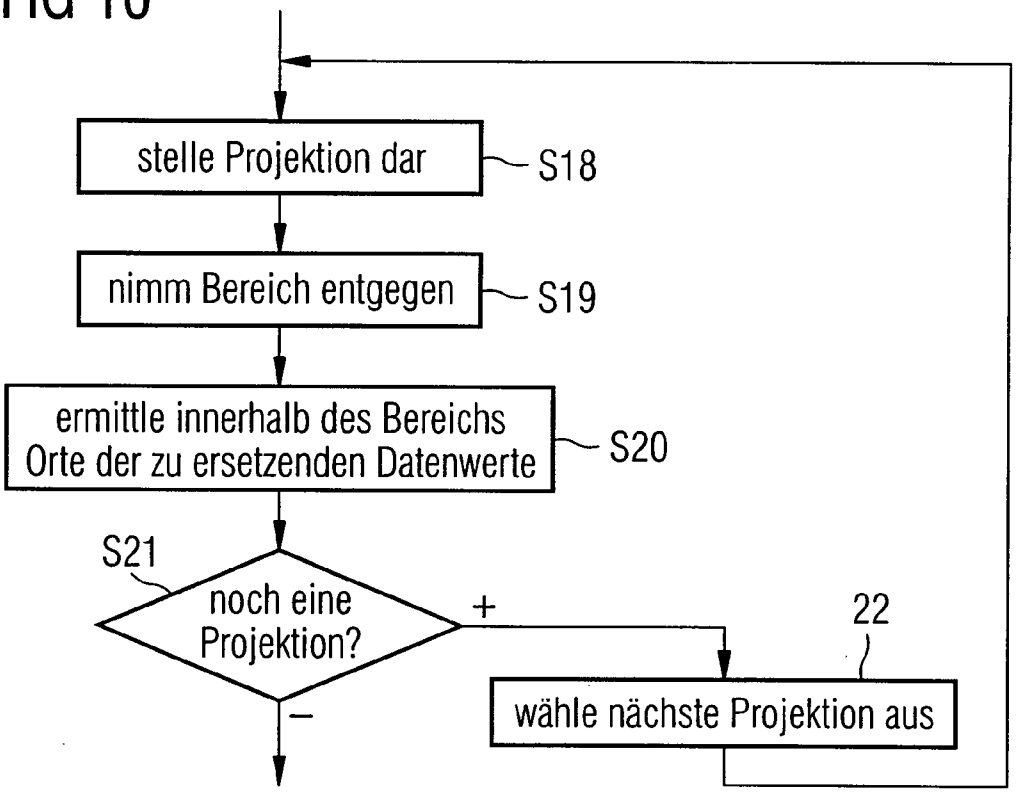

stelle Projektion dar
S18
nimm Bereich entgegen
S19
ermittle innerhalb des Bereichs
Orte der zu ersetzenden Datenwerte
S20
S21
noch eine
Projektion?
+
22
wähle nächste Projektion aus
–

FIG 11

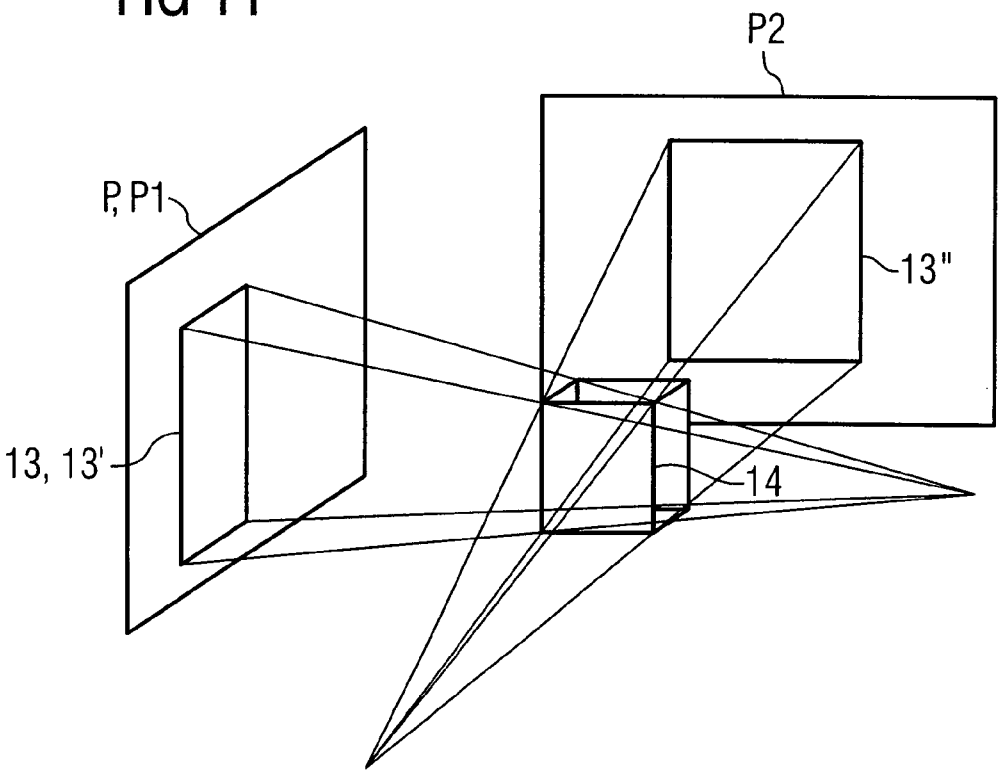

P2
P, P1
13"
13, 13'
14

FIG 12

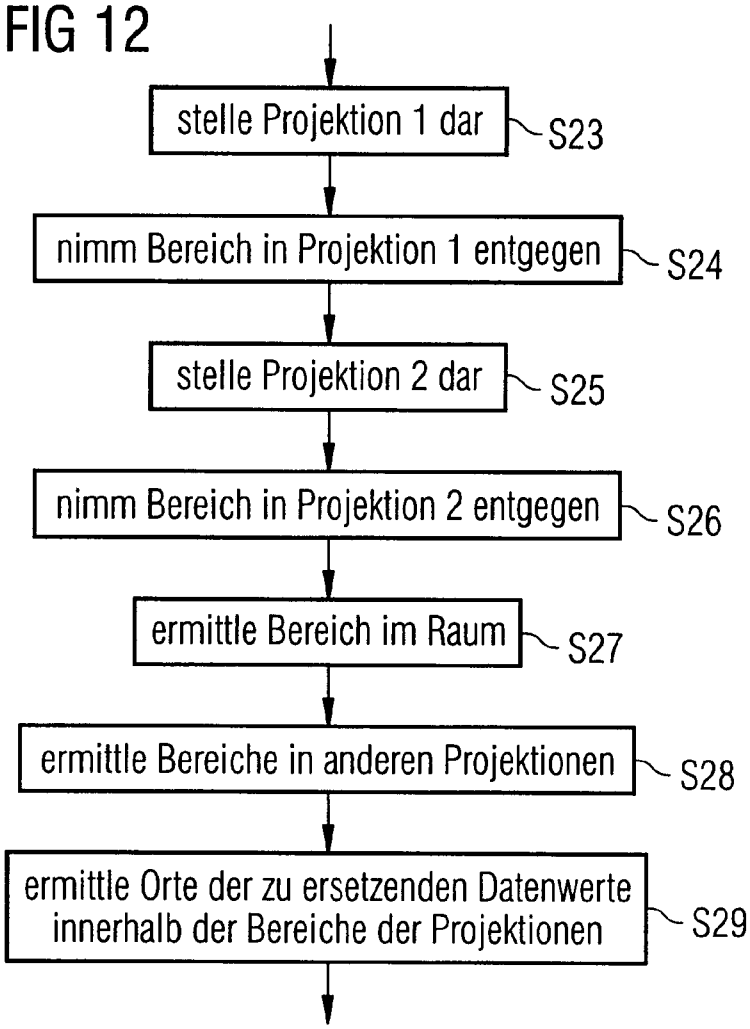

stelle Projektion 1 dar
S23
nimm Bereich in Projektion 1 entgegen
S24
stelle Projektion 2 dar
S25
nimm Bereich in Projektion 2 entgegen
S26
ermittle Bereich im Raum
S27
ermittle Bereiche in anderen Projektionen
S28
ermittle Orte der zu ersetzenden Datenwerte innerhalb der Bereiche der Projektionen
S29

FIG 13

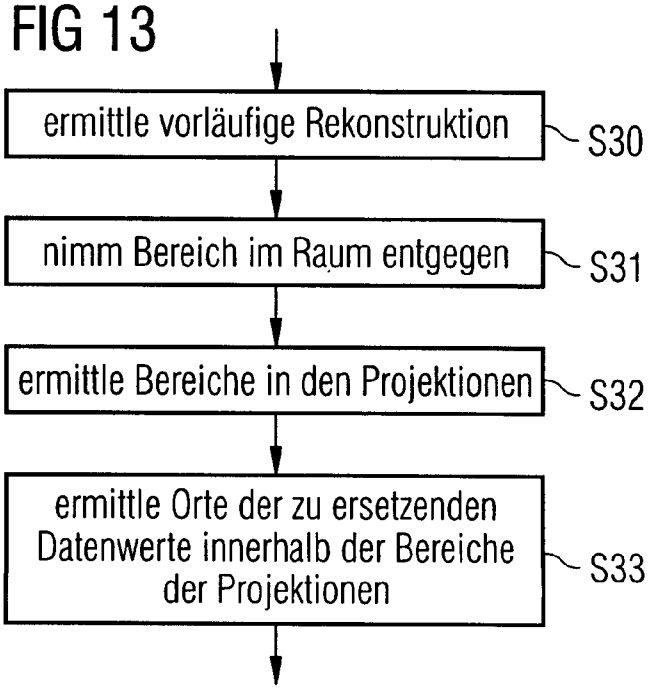

ermittle vorläufige Rekonstruktion
S30
nimm Bereich im Raum entgegen
S31
ermittle Bereiche in den Projektionen
S32
ermittle Orte der zu ersetzenden Datenwerte innerhalb der Bereiche der Projektionen
S33

FIG 14

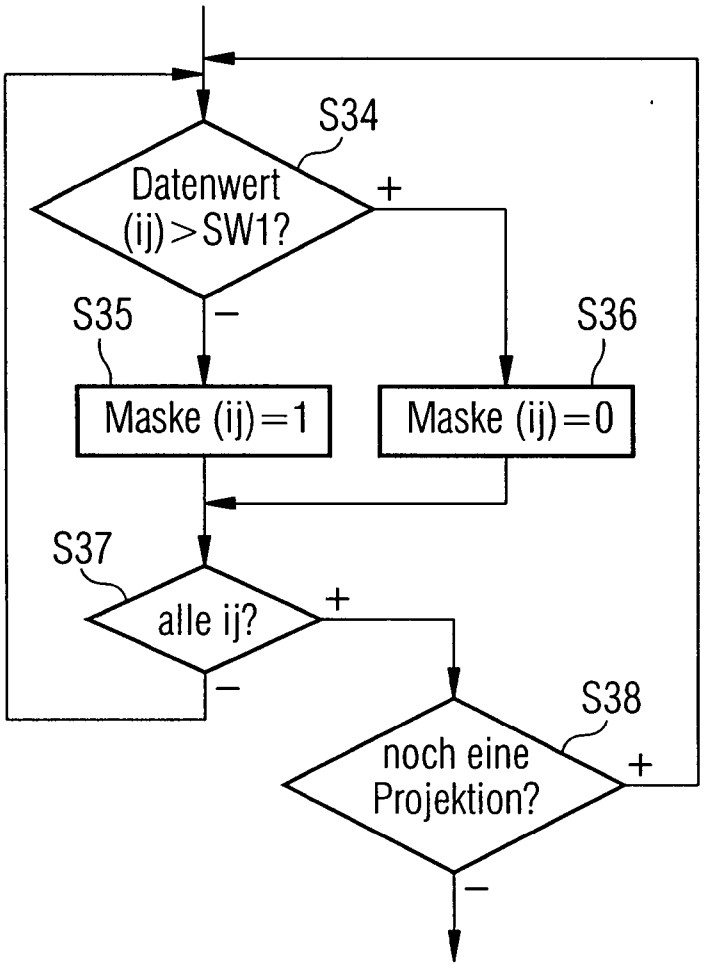

S34
Datenwert
(ij) > SW1?
+
−
S35
S36
Maske (ij) = 1
Maske (ij) = 0
S37
alle ij?
+
−
S38
noch eine
Projektion?
+
−

FIG 15

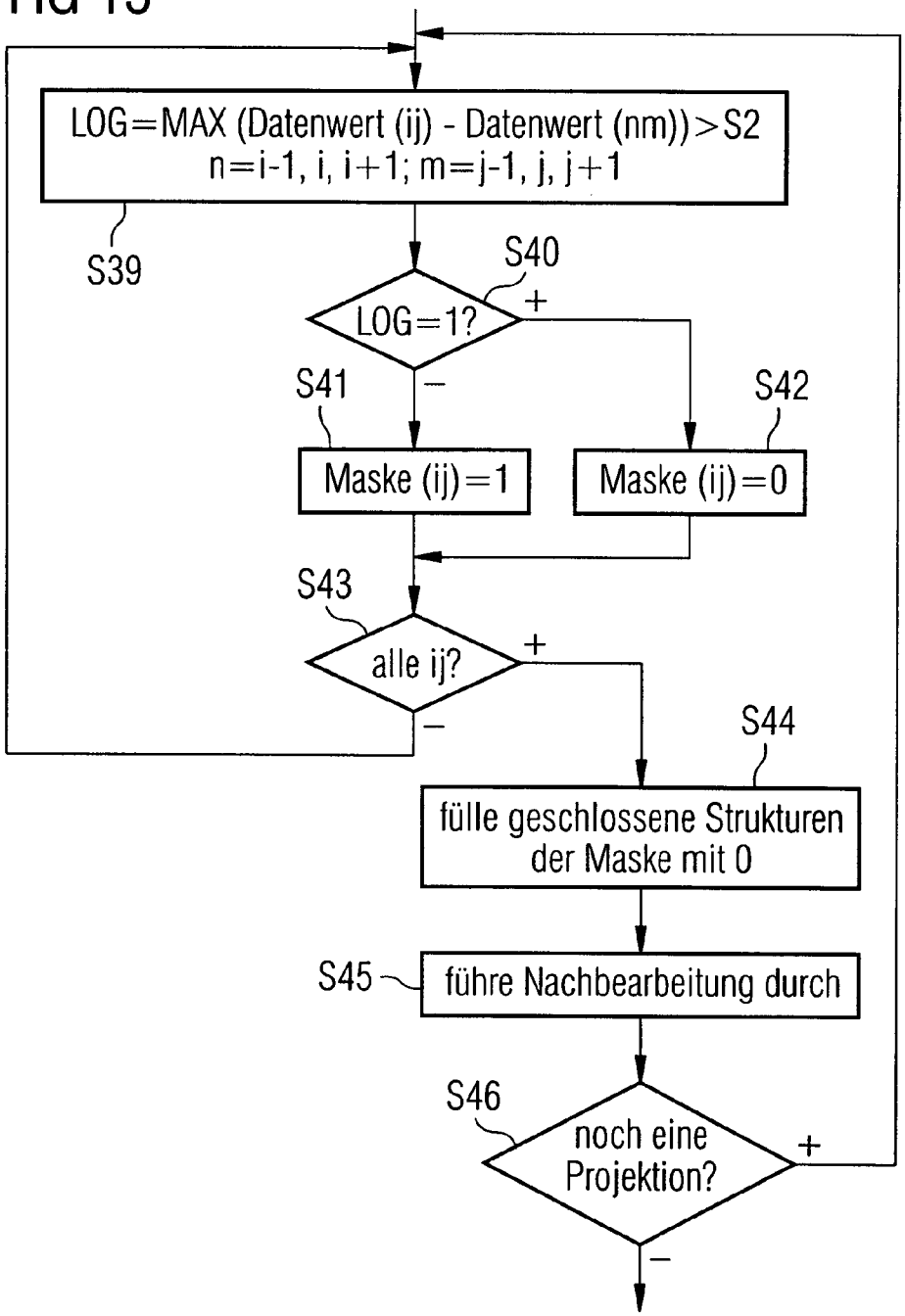

LOG=MAX (Datenwert (ij) - Datenwert (nm))>S2
n=i-1, i, i+1; m=j-1, j, j+1
S39
S40
LOG=1?
+
−
S41
S42
Maske (ij)=1
Maske (ij)=0
S43
alle ij?
+
−
S44
fülle geschlossene Strukturen der Maske mit 0
S45
führe Nachbearbeitung durch
S46
noch eine Projektion?
+
−

FIG 16

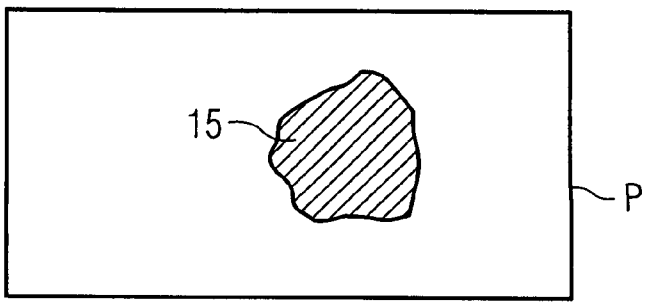

15
P

FIG 17

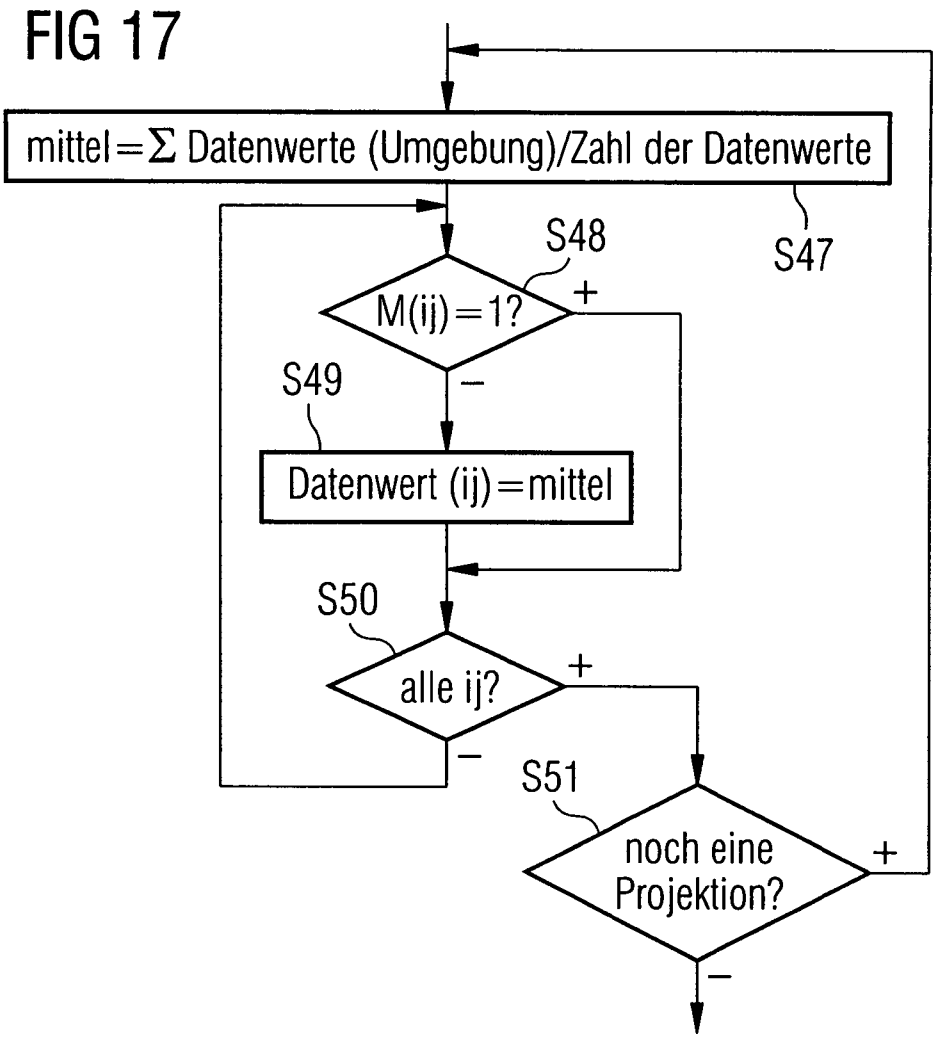

mittel=Σ Datenwerte (Umgebung)/Zahl der Datenwerte
S47
S48
M(ij)=1?
+
−
S49
Datenwert (ij)=mittel
S50
alle ij?
+
−
S51
noch eine Projektion?
+
−

FIG 18

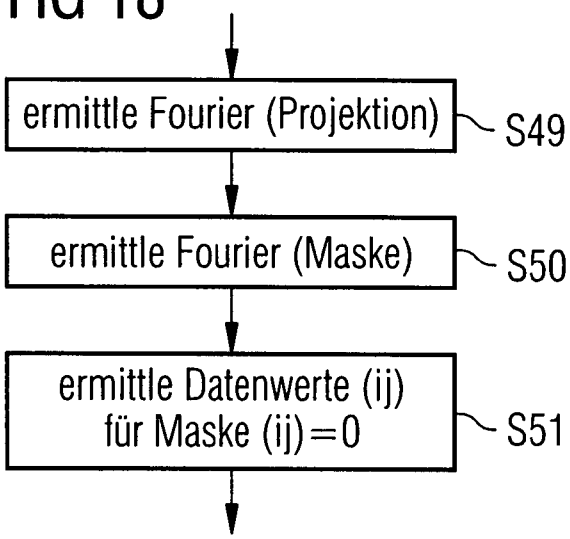

ermittle Fourier (Projektion)
S49
ermittle Fourier (Maske)
S50
ermittle Datenwerte (ij) für Maske (ij)=0
S51

FIG 19