



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 199 51 793 B4 2004.07.29**

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **199 51 793.2**
 (22) Anmeldetag: **27.10.1999**
 (43) Offenlegungstag: **10.08.2000**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **29.07.2004**

(51) Int Cl.7: **G01N 23/087**

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden.

(30) Unionspriorität:
09/237,401 26.01.1999 US

(71) Patentinhaber:
**Agilent Technologies, Inc. (n.d.Ges.d.Staates
 Delaware), Palo Alto, Calif., US**

(74) Vertreter:
**Schoppe, Zimmermann, Stöckeler & Zinkler, 82049
 Pullach**

(72) Erfinder:
Heumann, John M., Loveland, Col., US

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:

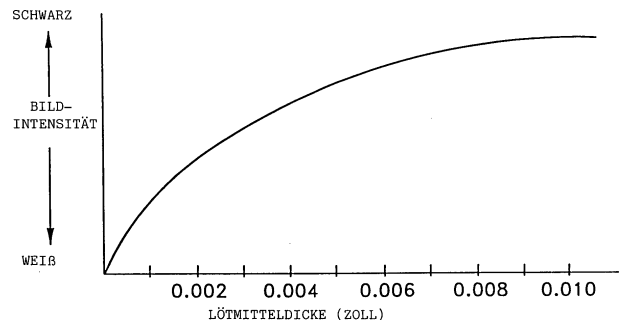
DE 197 07 645 A1
DE 196 04 348 A1
DE 37 51 924 T2
US 56 87 209 A
US 56 21 811 A
US 55 83 904 A
US 55 61 696 A
US 52 91 535 A
US 52 59 012 A
US 51 99 054 A
US 50 97 492 A
US 50 81 656 A
US 49 26 452 A

(54) Bezeichnung: **Verbesserte Dickenkalibrierung und Schattierungskorrektur für eine automatische Röntgeninspektion**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Kalibrierung eines Röntgenbilderzeugungssystems zum quantitativen Bestimmen der Dicke eines ersten absorbierenden Materials (310) beim Vorliegen eines zweiten absorbierenden Materials (320), wobei ein Einfall-Röntgenstrahl (330) mit einer Einfall-Röntgenstrahl-Intensität (I_0) durch das erste und das zweite absorbierende Material (310, 320) transmittiert wird, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:

Bereitstellen eines Kalibrierungsstandards (300) zum Charakterisieren des Bilderzeugungssystems, wobei der Kalibrierungsstandard (300) zumindest eine bekannte Dicke $t_{M1,i}$ des ersten absorbierenden Materials (310) in Kombination mit zumindest einer Dicke $t_{M2,i}$ des zweiten absorbierenden Materials (320) enthält;

Bestimmen eines Werts eines Vordergrund- und eines Hintergrund-Parameters (F, B), wobei: a) der Vordergrundparameter (F) die Intensität (I_2) eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität (I_0) entspricht, der durch das erste absorbierende Material (310) mit der Dicke $t_{M1,i}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material (320) mit einer Dicke $t_{M2,i}$ transmittiert wird; und b) der Hintergrundparameter (B) die Intensität (I_1) eines transmittierten...



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich allgemein auf die automatisierte Röntgeninspektion von gedruckten Schaltungsanordnungen und insbesondere auf Systeme, die Röntgenbilder von Lötstellen verwenden, um eine gemessene Dicke der Lötstellen zu liefern.

Stand der Technik

[0002] Schnelle und exakte Qualitätssteuerinspektionen des Lötens und Zusammenbaus von elektronischen Bauelementen wurden zu vorrangigen Gegenständen bei der Elektronikherstellungsindustrie. Viele existierende Inspektionssysteme für elektronische Bauelemente und Verbindungen verwenden die durchdringende Strahlung, um Bilder zu erzeugen, die Merkmale zeigen, die die innere Struktur der Bauelemente und Verbindungen darstellen. Diese Systeme verwenden häufig radiographische Techniken, bei denen die durchdringende Strahlung Röntgenstrahlen aufweist. Medizinische Röntgenbilder von verschiedenen Teilen des menschlichen Körpers, beispielsweise dem Brustkasten, den Armen, den Beinen, der Wirbelsäule und dergleichen sind vielleicht die vertrautesten Beispiele herkömmlicher radiographischer Bilder. Die erzeugten Abbildungen oder Bilder stellen den Röntgenschaten dar, der durch ein Objekt, das inspiziert wird, geworfen wird, wenn dasselbe durch einen Röntgenstrahl (ein Röntgenstrahlbündel) beleuchtet wird. Der Röntgenschaten wird durch ein Röntgenstrahl-empfindliches Material, beispielsweise einen Film oder eine elektronische Einrichtung, erfaßt und aufgezeichnet. Alternativ können tomographische Techniken, beispielsweise eine Laminographie und eine Computertomographie (CT) verwendet werden, um Querschnittsbilder des Objekts, das inspiziert wird, zu erzeugen. Laminographiesysteme, die in der Lage sind, die Geschwindigkeits- und Genauigkeits-Anforderungen zu erfüllen, die zur Elektronikinspektion notwendig ist, sind in den folgenden Patenten beschrieben: US-4,926,452; US-5,097,492; US-5,081,656; US-5,291,535; US-5,621,811; US-5,561,696; US-5,199,054; US-5,259,012; US-5,583,904; und US-5,687,209.

[0003] Bei einer automatisierten Röntgeninspektion (AXI; AXI = automated X-ray inspektion) gedruckter Schaltungsanordnungen werden Grauskalenbilder von Verbindungen oder Schnitten derselben untersucht, um unsachgemäße Verbindungsstellen zu erfassen und zu klassifizieren und/oder statistische Prozeßsteuerdaten, die sich auf das Herstellungsverfahren beziehen, zu liefern. Aus Gründen, die eine Übertragbarkeit, eine Reproduzierbarkeit und eine Klarheit einschließen, jedoch nicht auf dieselben begrenzt sind, ist es wünschenswert, daß aufgenommene Messungen sich direkt auf physikalische Charakteristika der inspizierten Verbindungsstelle beziehen. Bei der Charakterisierung von Lötstellen (Lötverbindungsstellen) ist es beispielsweise bevorzugt, gemessene Verbindungsstellendicken zu behandeln, und nicht Grauskalen-Pixelwerte. Jedoch ist das Extrahieren von Lötstellendicken aus den gemessenen Grauskalen-Pixelwerten aufgrund mehrerer Faktoren kompliziert. Zunächst emittieren Röntgenquellen, die bei der AXI verwendet werden, typischerweise Röntgenstrahlen bei vielen Wellenlängen mit variierenden Intensitäten als einer Funktion der Wellenlänge. Überdies treffen Röntgenstrahlen beim Durchlaufen einer gedruckten Schaltungsanordnung typischerweise auf weitere Absorbierer zusätzlich zu dem Lötmedium, beispielsweise Kupfer-Leistungs- und -Masse-Ebenen, Tantalkondensatoren, und dergleichen. Jedes Material besitzt sein eigenes charakteristisches Absorptionsspektrum als eine Funktion der Wellenlänge. Die resultierende Wechselwirkung ist stark nicht-linear, wobei eine vollständige Charakterisierung der Dicke des Lötmittels und anderer Schattierungsmaterialien in dem Weg aus einer begrenzten Anzahl von Grauskalen-Kalibrierungsmessungen allgemein nicht möglich ist.

[0004] Dennoch können brauchbare Näherungen durchgeführt werden, wenn eine vorherige Kenntnis der zu inspizierenden Anordnung verfügbar ist. Beispielsweise kann in vielen Fällen die Lötmitteldicke erwünscht sein, wobei es bekannt ist, daß die Hintergrundschattierung beinahe vollständig durch ein spezielles Material, beispielsweise Kupfer, erzeugt wird. In solchen Fällen kann man durch das Messen von Hintergrundgrauwerten (allein aufgrund des Kupfers) und Vordergrundgrauwerten (aufgrund sowohl des Kupfers als auch des Lötmittels) versuchen, die Lötmitteldicke abzuschätzen, wenn eine geeignete Korrektur für die Hintergrund-"Schattierung" durch das Kupfer konstruiert werden kann.

[0005] Frühere Kalibrierungsprozeduren trafen in der Praxis auf eine Anzahl von Schwierigkeiten. Beispielsweise waren frühere Versuche, die Polynomregressionstechniken verwenden, um einen Satz von Kalibrierungspunkten auf eine Oberfläche anzupassen, was eine Lötmitteldicke annähert, mangelhaft. Derartige angepaßte Oberflächen besitzen häufig ungewollte Maxima, Minima, Sattelpunkte und Wendepunkte und spiegeln häufig den zugrunde liegenden physikalischen Prozeß nicht genau wieder. Bessere Anpassungen können erhalten werden, indem eine beschränktere Oberfläche auf einen Abschnitt der Kalibrierungsoberfläche angewendet wird (beispielsweise eine, die entlang einer oder mehrerer Achsen linear ist). Dies hilft dabei, die Probleme zu vermeiden, unter denen häufig Oberflächen einer Regression höherer Ordnung leiden, führt jedoch zu seinen eigenen Schwierigkeiten. Insbesondere sind häufig mehrere "Teilflächen" erforderlich, um die gesamte Kalibrierungsoberfläche anzunähern. Beim Vorliegen eines Meßrauschens kann dies zu einem inkonsistenten Verhalten für Punkte führen, die in der Nähe der Grenzen von benachbarten Teilflächen liegen.

[0006] Aus der DE 3751924 ist bereits ein Verfahren zum Analysieren einer Probe mittels elektromagnetischer Strahlung auf der Grundlage von optischer Interferenz bekannt, bei dem Transmissionsgrade oder Reflexionsgrade einer Probe bestimmt und mit vorhandenen Sätzen korreliert werden, wobei auf der Grundlage der optimalen Korrelation die Identität der Probe oder des Materials ermittelt wird. Mit Kalibrierungsprozeduren für Hintergrundgrauwerte oder Vordergrundgrauwerte befaßt sich diese Schrift nicht.

[0007] Aus der DE 19604348 A ist ein Verfahren zum Kalibrieren einer Längenskala im Nanometerbereich für technische Geräte bekannt.

[0008] Aus der DE 19707645 A1 ist ein Verfahren zum Bestimmen der Schichtdicke von einer auf einem Substrat aufgetragenen dünnen Schicht bekannt, bei dem die Schichtdickenbestimmung mittels Röntgenfluoreszenzstrahlungsdetektion vorgenommen wird.

Aufgabenstellung

[0009] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Verfahren zum Kalibrieren eines Röntgenbilderzeugungssystems zu schaffen, um ein Röntgenbilderzeugungssystem derart zu kalibrieren, daß die zuverlässige Erfassung von Bildern aufgrund lediglich eines Röntgenstrahlabsorbierenden Materials möglich ist.

[0010] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren nach Anspruch 1 gelöst.

[0011] Die vorliegende Erfindung umgeht die oben genannten Schwierigkeiten bekannter Systeme, indem dieselbe:

- a) eine einzige, global konsistente Kalibrierung für jegliches gewählte Material beim Vorliegen variierender Beträge einer Schattierung durch ein zweites Material liefert;
- b) bezüglich ihrer Rechenanforderungen schnell ist;
- c) bezüglich ihrer Speicheranforderungen kompakt ist;
- d) genauer ist als bekannte Verfahren;
- e) numerisch umkehrbar ist;
- f) auf bekannte Standardkriterien zurückführbar ist, beispielsweise des National Institute of Standards & Technology (NIST) oder ähnlicher Standardorgane. Dieses Merkmal ermöglicht, daß Verfahreningenieure Dicken, die durch das Röntgensystem gemessen werden, auf physische Verbindungsstellenabmessungen beziehen. Eine Zurückführbarkeit kann erreicht werden, indem der Kalibrierungsstandard aus Materialien bekannter Reinheit aufgebaut wird, und indem Dicken des Kalibrierungsstandards unter Verwendung von Geräten, die selbst eine zurückführbare Kalibrierung aufweisen, gemessen werden;
- g) übertragbar ist, in dem Sinn, daß eine Messung der gleichen Verbindungsstelle auf mehreren Systemen gleichartige oder identische Dicken ergibt. Eine Übertragbarkeit erfordert, daß die Kalibrierung physikalisch signifikante Abweichungsquellen zwischen Systemen kompensiert; und
- h) mehrere Kalibrierungen unterstützt. Mit dem Erscheinen von bleifreien Lötmitteln können die Verbindungs- und Hintergrund-Zusammensetzungen von Platine zu Platine oder sogar innerhalb einer Platine variieren. Folglich ist es erwünscht, in der Lage zu sein, mehrere Kalibrierungen gleichzeitig zu speichern und es dem Benutzer zu ermöglichen, die geeignete Kalibrierung auf einer Stift-, Komponenten- oder Platinen-Ebene auszuwählen.

[0012] Die vorliegende Erfindung schafft ein verbessertes System, das eine genauere Bestimmung von Lötstellendicken, die von Röntgenbildern der Lötstellen abgeleitet werden, liefert. Allgemeiner kann die vorliegende Erfindung verwendet werden, um die Mengen zweier Materialien, die eine Zwei-Komponenten-Anordnung aufweist, zu bestimmen. Die Konfiguration der zwei Materialien in der Anordnung kann eine beliebige Form aufweisen, beispielsweise können die zwei Materialien in zwei getrennten Schichten, mehreren gemischten Schichten, einem homogenen Gemisch, usw., vorliegen. Die zwei Materialien selbst können aus komplexen chemischen Gemischen bestehen, und nicht aus reinen Elementen oder Verbindungen.

[0013] Es sei der Spezialfall von Blei oder Lötmedium, das durch Kupfer schattiert ist, zu Zwecken der Vereinfachung der folgenden Veranschaulichung betrachtet. Die vorliegende Erfindung mißt die Grauegel der Röntgenstrahlen einer Anzahl von Testabschnitten, die bekannte Dicken des Bleis oder des Lötmittels, die durch variierende Mengen von Kupfer schattiert sind, enthalten. Durch eine Kombination von theoretischen und empirischen Argumenten wurde herausgefunden, daß die Wirkung der Kupferschattierung durch eine spezielle nichtlineare Gleichung mit drei freien Parametern beschrieben werden kann. Überdies wurde herausgefunden, daß zwei der drei Parameter charakteristisch für das AXI-System sind und keine Funktionen der Kupfermenge oder des Bleis/Lötmittels in dem Röntgenstrahlweg sind. Ein Aspekt der Systemkalibrierung umfaßt die Abschätzung und Speicherung dieser zwei Parameter. Vordergrund- und Hintergrund-Grauegelwerte von einer unbekannt Probe sind ausreichend, um den dritten Parameter festzulegen, was den Schattierungseffekt für diese Probe vollständig charakterisiert. Folglich ist es möglich, die zwei gespeicherten Systemparameter und die bekannte Funktionsform der Schattierungsgleichung zu verwenden, um die Werte zu extrapolieren, die unter einem "Standard"- oder vorbestimmten Referenzschattierungspegel gemessen worden wären. Beispiels-

weise kann "keine Schattierung", d.h. ein Null-Hintergrund, als die Standardbedingung verwendet werden. Jedoch können andere Nicht-Null-Hintergrund-Schattierungspegel ebenfalls als die Standardbedingung ausgewählt werden. Da jede gemessene Probe ohne weiteres unter Verwendung dieses Lösungsansatzes auf Standardbedingungen umgewandelt werden kann, besteht kein Bedarf nach einer zweidimensionalen Dickenkalibrierung. Stattdessen reicht eine einfache eindimensionale Kurve, da Messungen stets auf Standardbedingungen korrigiert werden können.

[0014] Gemäß einem ersten Aspekt umfaßt die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Kalibrierung Röntgenbilderzeugungssysteme zum quantitativen Bestimmen der Dicke eines ersten absorbierenden Materials beim Vorliegen eines zweiten absorbierenden Materials, wobei ein Einfall-Röntgenstrahl mit einer Einfall-Röntgenstrahl-Intensität durch das erste und das zweite absorbierende Material transmittiert wird, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:

Bereitstellen eines Kalibrierungsstandards mit: a) mehreren Kombinationen einer ersten bekannten Dicke des ersten absorbierenden Materials (die mit $t_{M1,1}$ bezeichnet wird) in Kombination mit drei Dicken des zweiten absorbierenden Materials (die mit $t_{M2,1}$, $t_{M2,2}$ und $t_{M2,3}$ bezeichnet werden); und b) mehreren Kombinationen einer zweiten bekannten Dicke des ersten absorbierenden Materials (die mit $t_{M1,2}$ bezeichnet wird) in Kombination mit drei Dicken des zweiten absorbierenden Materials (die mit $t_{M2,4}$, $t_{M2,5}$ und $t_{M2,6}$ bezeichnet werden); Bestimmen der Werte eines ersten, eines zweiten und eines dritten Vordergrundparameters (die mit F_1 , F_2 und F_3 bezeichnet werden), wobei: a) der erste Vordergrundparameter F_1 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,1}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit der Dicke $t_{M2,1}$ transmittiert wird; b) der zweite Vordergrundparameter F_2 eine Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, die durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,1}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit der Dicke $t_{M2,2}$ transmittiert wird; und c) der dritte Vordergrundparameter F_3 eine Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,1}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit der Dicke $t_{M2,3}$ transmittiert wird; Bestimmen der Werte eines ersten, eines zweiten und eines dritten Hintergrundparameters (die mit B_1 , B_2 und B_3 bezeichnet werden), wobei: a) der erste Hintergrundparameter B_1 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch lediglich das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,1}$ transmittiert wird; b) der zweite Hintergrundparameter B_2 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der lediglich durch das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,2}$ transmittiert wird; und c) der dritte Hintergrundparameter B_3 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der lediglich durch das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,3}$ transmittiert wird; Bestimmen der Werte eines vierten, eines fünften und eines sechsten Vordergrundparameters (die mit F_4 , F_5 und F_6 bezeichnet werden), wobei: a) der vierte Vordergrundparameter F_4 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,2}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit der Dicke $t_{M2,4}$ transmittiert wird; b) der fünfte Vordergrundparameter F_5 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,2}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit der Dicke $t_{M2,5}$ transmittiert wird; und c) der sechste Vordergrundparameter F_6 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,2}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit der Dicke $t_{M2,6}$ transmittiert wird; Bestimmen der Werte eines vierten, eines fünften und eines sechsten Hintergrundparameters (die mit B_4 , B_5 und B_6 bezeichnet werden), wobei a) der vierte Hintergrundparameter B_4 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch lediglich das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,4}$ transmittiert wird; b) der fünfte Hintergrundparameter B_5 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch lediglich das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,5}$ transmittiert wird; und c) der sechste Hintergrundparameter B_6 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch lediglich das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,6}$ transmittiert wird; und Bestimmen einer ersten Funktionsform einer nichtlinearen Funktion, $y_1(x)$, die den Wert des Vordergrunds minus den Hintergrund ($y_1 = F - B$) als eine Funktion des Hintergrunds ($x = B$) beschreibt, derart, daß die nichtlineare Funktionsform: a) die folgenden Werte des Vordergrunds minus den Hintergrund annähert: $(F_1 - B_1)$, $(F_2 - B_2)$, $(F_3 - B_3)$, $(F_4 - B_4)$, $(F_5 - B_5)$ und $(F_6 - B_6)$; b) eine Extrapolation über den Bereich der Werte des Vordergrunds minus den Hintergrund $\{(F_1 - B_1)$, $(F_2 - B_2)$, $(F_3 - B_3)$, $(F_4 - B_4)$, $(F_5 - B_5)$, $(F_6 - B_6)\}$ und/oder des Vordergrunds $\{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6\}$ und/oder des Hintergrunds $\{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6\}$ hinaus unterstützt; und c) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähernd ein-

bringt. Die Schritte des Bestimmens der Werte der Vordergrund- und Hintergrund-Parameter können ferner folgende Schritte aufweisen: Beleuchten des Kalibrierungsstandards mit einem Röntgenstrahl (einem Röntgenstrahlbündel), der die Einfall-Röntgenstrahl-Intensität aufweist, wobei der Röntgenstrahl durch eine Röntgenquelle erzeugt wird; und Messen der Werte der Vordergrund- und Hintergrund-Parameter durch einen Röntgendetektor. Die Schritte des Bestimmens der Werte der Vordergrund- und Hintergrund-Parameter können ferner den Schritt des Simulierens der Werte der Vordergrund- und Hintergrund-Parameter unter Verwendung von einem oder mehreren der folgenden Simulationsfaktoren aufweisen: a) spektrale Charakteristika der Röntgenquelle; und/oder b) die Winkelverteilung der Röntgenstrahlen, die durch die Röntgenquelle erzeugt werden; und/oder c) die Absorptionseigenschaft und die spektrale Empfindlichkeit des Röntgendetektors; und/oder d) Röntgenstrahl-Dämpfungseigenschaften des ersten und des zweiten absorbierenden Materials als eine Funktion von Röntgenstrahl-Energie/Wellenlänge. Die Vordergrundparameter F_i können durch eine Funktionsform y_F beschrieben werden:

$$y_F = y_0 - \int \alpha(E) e^{-\beta(E)t_1} e^{-\gamma(E)t_2} dE$$

oder ihre diskrete Näherung:

$$y_F = y_0 - \sum_i \alpha_i e^{-\beta_i t_1} e^{-\gamma_i t_2}$$

wobei t_1 und t_2 die Dicken des ersten absorbierenden Materials bzw. des zweiten absorbierenden Materials sind; y_0 eine Anpassungskonstante ist; und wobei bei der allgemeinen Funktionsform: a) das Röntgenquellen-Energiespektrum als eine Funktion der Energie mit Gewichtungen, die durch den Parameter $\alpha(E)$ bestimmt sind, verteilt ist; und b) $\beta(E)$ und $\gamma(E)$ die Röntgenstrahl-Dämpfungskoeffizienten für das erste bzw. das zweite absorbierende Material sind, und wobei bei der diskreten Näherung: c) das gesamte Röntgenquellen-Energiespektrum in eine bestimmte Anzahl von Bändern i aufgeteilt ist, wobei die Gesamtquellenintensität als eine Funktion der Röntgenquellen-Energie und der Detektorempfindlichkeit unter den Bändern verteilt ist, wobei Gewichtungen für jedes Band i durch den Parameter α_i bestimmt sind; und d) β_i und γ_i die wirksamen linearen Dämpfungskoeffizienten für die Röntgenstrahlen in einem Band i für das erste bzw. das zweite absorbierende Material sind. Der Schritt des Bestimmens einer ersten Funktionsform einer glatt variierenden nichtlinearen Funktion, die den Wert des Vordergrunds minus den Hintergrund ($y_1 = F - B$) als eine Funktion des Hintergrunds ($x = B$) ausdrückt, kann ferner den Schritt des Auswählens einer Funktion in der folgenden Form aufweisen:

$$y_1 = \sqrt{(x-a)^2 + b^2} + c$$

wobei x dem Hintergrund B_i entspricht, y_1 der Differenz zwischen dem Vordergrund und dem Hintergrund ($F_i - B_i$) entspricht, und a , b und c Anpassungskonstanten sind. Das Verfahren kann ferner folgende Schritte aufweisen: Auswählen eines Referenzhintergrundpegels ($x = B_R$); Bestimmen der Werte des Vordergrunds minus den Hintergrund ($F_{Ri} - B_{Ri}$) bei dem Referenzhintergrundpegel (B_R) für mehrere bekannte Dicken des Kalibrierungsstandards unter Verwendung der glatt variierenden nicht-linearen Funktion y_1 , die den Wert des Vordergrunds minus den Hintergrund ($y_1 = F - B$) als eine Funktion des Hintergrunds ($x = B$) ausdrückt; und Bestimmen einer zweiten Funktionsform y_2 , die die Werte des Vordergrunds minus den Hintergrund ($F_{Ri} - B_{Ri}$) bei dem Referenzhintergrundpegel (B_R) für die mehreren bekannten Dicken des ersten absorbierenden Materials als eine Funktion der Dicke des ersten absorbierenden Materials ausdrückt. Der Schritt des Bestimmens einer zweiten Funktionsform y_2 kann ferner den Schritt des Auswählens einer Funktion aufweisen, die eine Summe von Exponentialfunktionen folgender Form ist:

$$y_2(t) = p - \sum_i q_i e^{-r_i t}$$

wobei p , q_i und r_i Anpassungskonstanten sind. Das Verfahren kann ferner den Schritt des Erzeugens einer Nachschlagtabelle von Werten von (Hintergrund) über (Vordergrund minus Hintergrund) über (Dicke) für eines oder beide des ersten und/oder des zweiten absorbierenden Materials aufweisen. Das Verfahren kann ferner folgende Schritte aufweisen: Bestimmen des Werts eines siebten Vordergrundparameters (der mit F_7 bezeichnet wird), der die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit einer unbekanntem Dicke $t_{M1,7}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit einer unbekanntem Dicke $t_{M2,7}$ transmittiert wird; Bestimmen des Werts eines siebten Hintergrundparameters (der mit B_7 bezeichnet wird), der die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das zweite absorbierende Material mit einer unbekanntem Dicke $t_{M2,7}$ transmittiert wird; und Verwenden der Nachschlagtabelle und der Werte von F_7 und B_7 , um eine unbekanntem Dicke oder beide unbekanntem Dicken des ersten absorbierenden Materials ($t_{M1,7}$) und/oder des zweiten absorbierenden Materials ($t_{M2,7}$) zu be-

stimmen. Dieses Verfahren kann ferner den Schritt des Interpolierens zwischen Werten der Nachschlagtabelle aufweisen. Der Schritt des Interpolierens kann ferner den Schritt einer bilinearen Interpolation aufweisen. Das Verfahren kann ferner den Schritt des Auswählens der Dicken des zweiten absorbierenden Materials ($t_{M2,i}$) aufweisen, derart, daß zumindest einer der Werte des ersten, zweiten und dritten Hintergrundparameters (die mit B_1 , B_2 und B_3 bezeichnet werden) gleich zumindest einem der Werte des vierten, fünften und sechsten Hintergrundparameters (die mit B_4 , B_5 und B_6 bezeichnet werden) ist. In gleicher Weise kann das Verfahren ferner den Schritt des Auswählens der Dicken des zweiten absorbierenden Materials $t_{M2,i}$ aufweisen, derart, daß zumindest zwei der Werte des ersten, zweiten und dritten Hintergrundparameters (die mit B_1 , B_2 und B_3 bezeichnet werden) gleich sind, und/oder zumindest zwei der Werte des vierten, fünften und sechsten Hintergrundparameters (die mit B_4 , B_5 und B_6 bezeichnet werden) gleich sind.

[0015] Gemäß einem zweiten Aspekt umfaßt die vorliegende Erfindung ein Verfahren zum Messen der Dicke eines ersten Materials beim Vorliegen eines zweiten Materials mit folgenden Schritten: Bereitstellen eines Kalibrierungsstandards mit: a) mehreren Kombinationen einer ersten bekannten Dicke des ersten Materials in Kombination mit einem Bereich von Dicken des zweiten Materials; und b) mehrere Kombinationen einer zweiten bekannten Dicke des ersten Materials in Kombination mit einem Bereich von Dicken des zweiten Materials; Belichten des Kalibrierungsstandards mit einer Quelle einer Transmissionsenergie mit einer Einfallintensität; Erfassen der Intensität der Transmissionsenergie, die durch den Kalibrierungsstandard fällt, wobei der Erfassungsschritt ferner folgenden Schritt aufweist: Aufnehmen mehrere Paare von Bilddaten, die einen Teil der Transmissionsenergie darstellen, der nach der Transmission durch das erste und das zweite Material gemessen wird, wobei ein Vordergrundwert (F) in jedem Paar von Bilddaten einem Teil der Einfallintensität entspricht, der durch die bekannte Dicke des ersten Materials in Kombination mit den mehreren Dicken des zweiten Materials transmittiert wird, und wobei ein Hintergrundwert (B) in jedem Paar von transmittierten Intensitäten einem Teil der Einfallintensität entspricht, der durch lediglich die entsprechende Dicke des zweiten Materials transmittiert wird, das in Kombination mit dem ersten Material vorlag als der Vordergrundwert (F) aufgenommen wurde; Bestimmen von Anpassungskonstanten a, b und c für jedes Mitglied einer Familie von hyperbolischen Kurven, die Delta Grauwerte ($y_1 = \Delta G = F - B$) als eine Funktion von Hintergrundwerten (B) beschreiben, wobei jede Kurve in der Familie Delta Grauwerte für eine feste bekannte Dicke des ersten Materials in Kombination mit einem Bereich von Dicken des zweiten Materials darstellt, wobei jede der hyperbolischen Kurven folgende allgemeine Form aufweist:

$$y_1 = \sqrt{(x-a)^2 + b^2} + c$$

wobei x den Hintergrundwerten ($x = B$) entspricht; y_1 den Delta Grauwerten ($y_1 = \Delta G = F - B$) für eine feste bekannte Dicke des ersten Materials in Kombination mit dem Bereich von Dicken des zweiten Materials entspricht; und a, b und c die Anpassungskonstanten sind, wobei die Anpassungskonstanten derart bestimmt sind, daß jede hyperbolische Kurve in der Familie den gleichen x-Achsen-Schnittpunkt ($BG_{MAX}, 0$) besitzt, und daß jede hyperbolische Kurve der Familie ein Minimum bei dem gleichen x-Wert ($x = a$) aufweist; Bestimmen eines Delta Graupegels bei einem Referenzhintergrundpegel, d.h. $y_1(x = B_R)$ für jede bekannte Dicke des ersten Materials aus der hyperbolischen Kurve, die durch die mehreren Paare von Bilddaten für die jeweilige bekannte Dicke des ersten Materials definiert ist; und Bestimmen von Anpassungskonstanten für eine zweite Funktionsform y_2 , die die Delta Graupegelwerte bei dem Referenzhintergrundpegel beschreibt, als eine Funktion der bekannten Dicken t des ersten Materials, wobei die Funktionsform lautet:

$$y_2(t) = BG_{MAX} - \beta e^{-k_1 t} - (BG_{MAX} - \beta) e^{-k_2 t}$$

wobei die Anpassungskonstanten β , k_1 und k_2 durch Anpassungen an die bekannten Dicken des ersten Materials und entsprechende Delta Graupegel bei dem Referenzhintergrundpegel, die von den hyperbolischen Kurven, die die Delta Grauwerte (y_1) als eine Funktion der Hintergrundwerte (B) beschreiben, abgeleitet werden, bestimmt werden.

[0016] Ein dritter Aspekt der vorliegenden Erfindung ist ein Verfahren zum Messen der Dicke eines ersten Materials beim Vorliegen eines zweiten Materials mit folgenden Schritten: Bereitstellen eines Kalibrierungsstandards mit: a) mehreren Kombinationen einer ersten bekannten Dicke ($t_{M1,1}$) des ersten Materials in Kombination mit einem Bereich von Dicken ($t_{M2,a}$, $t_{M2,b}, \dots, t_{M2,n1}$) des zweiten Materials; und b) mehrere Kombinationen einer zweiten bekannten Dicke ($t_{M1,2}$) des ersten Materials in Kombination mit einem Bereich von Dicken ($t_{M2,n1+1}$, $t_{M2,n1+2}, \dots, t_{M2,n1+n2}$) des zweiten Materials; Belichten des Kalibrierungsstandards mit einer Quelle von Transmissionsenergie mit einer Einfallintensität; Erfassen der Intensität der Transmissionsenergie, die durch den Kalibrierungsstandard fällt, und Bestimmen von Bilddaten aus derselben, die einen Teil der Transmissionsenergie darstellen, die nach der Transmission durch das erste und das zweite Material gemessen wird, wobei der Erfassungsschritt ferner folgenden Schritt aufweist: Aufnehmen mehrerer Paare von Bilddaten, wobei jedes Paar einen Vordergrundwert und einen Hintergrundwert aufweist, für jede bekannte Dicke des ersten Materials ($t_{M1,1}$,

$t_{M1,2}$ Kombination mit mehreren Dicken ($t_{M2,a}$, $t_{M2,b}$ usw.) des zweiten Materials; wobei der Vordergrundwert (y_f) in jedem Paar von Bilddaten einem Teil der Einfallintensität entspricht, der nach der Transmission durch die bekannte Dicke des ersten Materials in Kombination mit einer der mehreren Dicken des zweiten Materials gemessen wird, und wobei der Hintergrundwert (y_b) in jedem Paar von Bilddaten einem Teil der Einfallintensität entspricht, der nach der Transmission durch die entsprechende Dicke des zweiten Materials, das in Kombination mit dem ersten Material vorlag als der Vordergrund (y_f) aufgenommen wurde, gemessen wird; Bestimmen von Anpassungskonstanten y_0 , α_i und β_i aus den Kalibrierungsstandard-Hintergrundwerten für eine Funktionsform, die die gemessenen Hintergrundwerte (y_b) als eine Funktion der Dicke annähert, wobei die Funktionsform wie folgt lautet:

$$y_b = y_0 - \sum_i \alpha_i e^{-\beta_i t_{M2}}$$

[0017] Bestimmen von Anpassungskonstanten γ_i unter Verwendung der vorher bestimmten Anpassungskonstanten y_0 , α_i und β_i aus den Kalibrierungsstandard-Hintergrundwerten für eine Funktionsform, die die gemessenen Vordergrundwerte (y_f) als eine Funktion der Dicke annähert, wobei die Funktionsform wie folgt lautet:

$$y_f = y_0 - \sum_i \alpha_i e^{-\beta_i t_{M2}} e^{-\gamma_i t_{M1}}$$

wobei t_{M1} und t_{M2} die Dicken des ersten Materials bzw. des zweiten Materials sind; und Erzeugen einer Hintergrund- (y_b) über Delta-grau- ($\Delta G = y_f - y_b$) über Erstes-Material-Dicke (t_{M1}) -Oberfläche unter Verwendung der angepaßten Werte für y_0 , α_i , γ_i und β_i . Der Schritt des Aufnehmens mehrere Paare von Bilddaten kann den Schritt des Simulierens der Intensitäten der Transmissionsenergie, die durch den Kalibrierungsstandard fällt, unter Verwendung von einem oder mehreren der folgenden Simulationsfaktoren enthalten: a) spektrale Charakteristika der Quelle von Transmissionsenergie; und/oder b) die Winkelverteilung der Quelle von Transmissionsenergie; und/oder c) die Absorptionsfähigkeit und die spektrale Empfindlichkeit eines Transmissionsenergiedetektors; und/oder d) die Transmissionsenergie-Dämpfungseigenschaften des absorbierenden Materials als eine Funktion von Energie/Wellenlänge der Quelle von Transmissionsenergie. Dieses Verfahren kann ferner folgende Schritte aufweisen: Messen von Vordergrund- und Hintergrund-Werten für eine Kombination des ersten und des zweiten Materials mit unbekanntem Dicken; und Lokalisieren auf der Hintergrund- (y_b) über Delta-Grau- ($\Delta G = y_f - y_b$) über Erstes-Material-Dicke- (t_{M1}) -Oberfläche von Hintergrund- und Delta-Grau-Bilddatenwerten, die den gemessenen Hintergrund- und Vordergrund-Werten entsprechen, um zumindest eine der entsprechenden Dicken des ersten und/oder zweiten Materials zu bestimmen. Dieses Verfahren kann ferner den Schritt des Erzeugens einer Hintergrund- (y_b) über Delta-Grau- ($\Delta G = y_f - y_b$) über Erstes-Material-Dicke- (t_{M1}) und/oder Zweites-Material-Dicke- (t_{M2}) -Nachschlagtabelle unter Verwendung der angepaßten Werte für y_0 , α_i , γ_i und β_i aufweisen. Ferner kann das Verfahren zusätzlich folgende Schritte aufweisen: Messen von Vordergrund- und Hintergrund-Werten für eine Kombination des ersten und des zweiten Materials mit unbekanntem Dicken; und Lokalisieren von Hintergrund- und Delta-Grau-Intensitätswerten, die den gemessenen Hintergrund- und Vordergrund-Werten entsprechen, in der Hintergrund- (y_b) über Delta-Grau- ($\Delta G = y_f - y_b$) über Erstes-Material-Dicke- (t_{M1}) -Nachschlagtabelle, um zumindest eine der entsprechenden Dicken des ersten und/oder zweiten Materials zu bestimmen. Das Verfahren kann ferner den Schritt des Interpolierens zwischen Werten in der Nachschlagtabelle aufweisen.

[0018] Gemäß einem vierten Aspekt ist die vorliegende Erfindung ein Verfahren zum Kalibrieren eines Röntgenbilderzeugungssystems zum quantitativen Bestimmen der Dicke eines ersten absorbierenden Materials beim Vorliegen eines zweiten absorbierenden Materials, wobei ein Einfall-Röntgenstrahl mit einer Einfall-Röntgenstrahl-Intensität durch das erste und das zweite absorbierende Material transmittiert wird, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist: Bereitstellen eines Kalibrierungsstandards zum Charakterisieren des Bilderzeugungssystems, wobei der Kalibrierungsstandard eine erste bekannte Dicke des ersten absorbierenden Materials (die mit $t_{M1,1}$ bezeichnet wird) in Kombination mit zwei unterschiedlichen Dicken des zweiten absorbierenden Materials (die mit $t_{M2,1}$ und $t_{M2,2}$ bezeichnet werden) aufweist; Bestimmen von Werten von einem ersten und einem zweiten Vordergrundparameter (die mit F_1 und F_2 bezeichnet werden), wobei: a) der erste Vordergrundparameter F_1 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,1}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit der Dicke $t_{M2,1}$ transmittiert wird; und b) der zweite Vordergrundparameter F_2 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,1}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit der Dicke $t_{M2,2}$ transmittiert wird; Bestimmen von Werten eines ersten und eines zweiten Hintergrundparameters (die mit B_1 und B_2 bezeichnet werden), wobei: a) der erste Hintergrundparameter B_1 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der lediglich durch das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,1}$ transmittiert wird; und b) der zweite Hintergrundparameter B_2 die Intensität eines transmittierten Rönt-

genstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch lediglich das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,2}$ transmittiert wird; Bestimmen einer ersten nicht-linearen Funktionsform $y_1(x)$, die die Werte des Vordergrunds ($y_1 = F$) als Funktionen des Hintergrunds ($x = B$) beschreibt, derart, daß die erste nicht-lineare Funktionsform: a) die vorher bestimmten Werte des ersten und des zweiten Vordergrundparameters (F_1 und F_2) hinsichtlich der vorher bestimmten Werte des ersten und des zweiten Hintergrundparameters (B_1 und B_2) annähert; b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dieses Verhalten annähern; und c) eine Einrichtung liefert, um einen dritten Vordergrundparameter (F_3) bei einem entsprechenden dritten Hintergrundparameter (B_3) auf einen Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) zu extrapolieren, wodurch ein Referenzvordergrundwert ($y_1 = F_R$) bei dem Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) bestimmt wird; und Bestimmen einer zweiten nicht-linearen Funktionsform $y_2(x)$, die Referenzvordergrundwerte ($y_2 = F_{Ri}$) als eine Funktion von Dicken des ersten absorbierenden Materials ($x = t_{M1,i}$) beschreibt, derart, daß die zweite nicht-lineare Funktionsform: a) an einen Referenzvordergrundwert ($y_2 = F_{R1}$) der ersten bekannten Kalibrierungsstandarddicke des ersten absorbierenden Materials ($t_{M1,1}$) bei dem Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) annähert; und b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dieses Verhalten annähern. Der Schritt des Bestimmens einer ersten nicht-linearen Funktionsform $y_1(x)$ kann ferner den Schritt des Auswählens von hyperbolischen Funktionen als eine der zusätzlichen Beschränkungen, die Charakteristika aufweisen, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern, aufweisen. Der Schritt des Bestimmens einer zweiten nicht-linearen Funktionsform $y_2(x)$ kann ferner den Schritt des Invertierens, entweder numerisch oder analytisch, der zweiten nicht-linearen Funktionsform aufweisen, um eine Dicke ($t_{M1,K}$) des ersten Materials zu erhalten, die einem gegebenen Referenzvordergrundwert ($y_2 = F_{RK}$) entspricht. Der Schritt des Bestimmens einer zweiten nicht-linearen Funktionsform $y_2(x)$ kann ferner den Schritt des Auswählens einer Summe von Exponentialfunktionen als eine der zusätzlichen Beschränkungen, die Charakteristika aufweisen, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern, aufweisen. Bei diesem Verfahren können die Schritte des Bestimmens der Werte der Vordergrund- und Hintergrund-Parameter ferner den Schritt des Simulierens der Werte der Vordergrund- und Hintergrundparameter unter Verwendung von einem oder mehreren der folgenden Simulationsfaktoren aufweisen: a) den spektralen Charakteristika einer Röntgenquelle; und/oder b) der Winkelverteilung von Röntgenstrahlen, die durch die Röntgenquelle erzeugt werden; und/oder c) der Absorptionseigenschaft und der spektralen Empfindlichkeit eines Röntgendetektors; und/oder d) den Röntgenstrahl-Dämpfungseigenschaften des ersten und des zweiten absorbierenden Materials als Funktionen von Röntgenstrahl-Energie/Wellenlänge.

[0019] Ein fünfter Aspekt der vorliegenden Erfindung ist ein Verfahren zum Kalibrieren eines Röntgenbilderzeugungssystems zum quantitativen Bestimmen der Dicke eines ersten absorbierenden Materials beim Vorliegen eines zweiten absorbierenden Materials, wobei ein Einfall-Röntgenstrahl mit einer Einfall-Röntgenstrahl-Intensität durch das erste und das zweite absorbierende Material transmittiert wird, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist: Bereitstellen eines Kalibrierungsstandards zum Charakterisieren des Bilderzeugungssystems, wobei der Kalibrierungsstandard eine erste bekannte Dicke des ersten absorbierenden Materials (die mit $t_{M1,1}$ bezeichnet wird) in Kombination mit zwei unterschiedlichen Dicken des zweiten absorbierenden Materials (die mit $t_{M2,1}$ und $t_{M2,2}$ bezeichnet werden) aufweist; Bestimmen von Werten eines ersten und eines zweiten Vordergrundparameters (die mit F_1 und F_2 bezeichnet werden), wobei: a) der erste Vordergrundparameter F_1 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,1}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit der Dicke $t_{M2,1}$ transmittiert wird; und b) der zweite Vordergrundparameter F_2 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,1}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit der Dicke $t_{M2,2}$ transmittiert wird; Bestimmen von Werten eines ersten und eines zweiten Hintergrundparameters (die mit B_1 und B_2 bezeichnet werden), wobei: a) der erste Hintergrundparameter B_1 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch lediglich das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,1}$ transmittiert wird; und b) der zweite Hintergrundparameter B_2 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch lediglich das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,2}$ transmittiert wird; und Bestimmen einer Funktionsform einer nicht-linearen Funktion $y(x_1, x_2)$, die den Wert der Dicke des ersten Materials ($y = t_{M1}$) als eine Funktion des Vordergrunds und des Hintergrunds (beispielsweise $x_1 = F$, $x_2 = B$) beschreibt, derart, daß die nicht-lineare Funktionsform: a) einen Satz von Kalibrierungsdatenpunkten $\{(t_{M1,i}, F_i, B_i)\}$, die die vorher bestimmten ersten Materialdicken ($t_{M1,i}$), Vordergrundparameter (F_i) und Hintergrundparameter (B_i) enthalten, annähert; b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern; und c) eine Einrichtung liefert, um über den Bereich des Kalibrierungsstandards hinaus Vordergrund- und Hintergrund-Parameter zu extrapolieren. Der Schritt des Be-

stimmens einer Funktionsform der nicht-linearen Funktion $y(x_1, x_2)$ kann ferner den Schritt des Auswählens einer Summe des Produkts von zwei Exponentialfunktionen aufweisen, um die Vordergrundparameter darzustellen, und einer Summe von einzelnen Exponentialfunktionen, um die Hintergrundparameter darzustellen, als die zusätzlichen Beschränkungen, die Charakteristika aufweisen, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern. Der Schritt des Bestimmens einer Funktionsform der nichtlinearen Funktion $y(x_1, x_2)$ kann ferner den Schritt des Invertierens, entweder numerisch oder analytisch, der nicht-linearen Funktionsform aufweisen, derart, daß sowohl entweder y , x_1 oder x_2 als eine Funktion der verbleibenden zwei Variablen ausgedrückt werden können. Bei diesem Verfahren können die Schritte des Bestimmens der Werte der Vordergrund- und der Hintergrund-Parameter ferner den Schritt des Simulierens der Werte der Vordergrund- und Hintergrund-Parameter unter Verwendung von einem oder mehreren der folgenden Simulationsfaktoren aufweisen: a) den spektralen Charakteristika einer Röntgenquelle; und/oder b) der Winkelverteilung von Röntgenstrahlen, die durch die Röntgenquelle erzeugt werden; und/oder c) der Absorptionsfähigkeit und der spektralen Empfindlichkeit eines Röntgendetektors; und/oder d) den Röntgenstrahl-Dämpfungseigenschaften des ersten und des zweiten absorbierenden Materials als Funktionen von Röntgenstrahl-Energie/Wellenlänge.

[0020] Gemäß einem sechsten Aspekt ist die vorliegende Erfindung ein Verfahren zum Kalibrieren eines Röntgenbilderzeugungssystems zum quantitativen Bestimmen der Dicke eines ersten absorbierenden Materials beim Vorliegen eines zweiten absorbierenden Materials, wobei ein Einfall-Röntgenstrahl mit einer Einfall-Röntgenstrahl-Intensität durch das erste und das zweite absorbierende Material transmittiert wird, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist: Bereitstellen eines Kalibrierungsstandards zum Charakterisieren des Bilderzeugungssystems, wobei der Kalibrierungsstandard eine erste und eine zweite bekannte Dicke des ersten absorbierenden Materials (die mit $t_{M1,1}$ und $t_{M1,2}$ bezeichnet werden) in Kombination mit einer Dicke des zweiten absorbierenden Materials (die mit $t_{M2,1}$ und $t_{M2,2}$ bezeichnet werden) aufweist; Bestimmen von Werten eines ersten und eines zweiten Vordergrundparameters (die mit F_1 und F_2 bezeichnet werden), wobei: a) der erste Vordergrundparameter F_1 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,1}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit der Dicke $t_{M2,1}$ transmittiert wird; und b) der zweite Vordergrundparameter F_2 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,2}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit der Dicke $t_{M2,2}$ transmittiert wird; Bestimmen von Werten eines ersten und eines zweiten Hintergrundparameters (die mit B_1 und B_2 bezeichnet werden), wobei: a) der erste Hintergrundparameter B_1 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch lediglich das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,1}$ transmittiert wird; und b) der zweite Hintergrundparameter B_2 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch lediglich das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,2}$ transmittiert wird; Bestimmen einer ersten nicht-linearen Funktionsform $y_1(x)$, die Werte des Vordergrunds ($y_1 = F$) als Funktionen des Hintergrunds ($x = B$) beschreibt, derart, daß die erste nicht-lineare Funktionsform: a) die vorher bestimmten Werte des ersten und des zweiten Vordergrundparameters (F_1 und F_2) hinsichtlich der vorher bestimmten Werte des ersten und des zweiten Hintergrundparameters (B_1 und B_2) annähert; b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen enthält, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern; und c) eine Einrichtung liefert, um einen dritten Vordergrundparameter (F_3) bei einem entsprechenden dritten Hintergrundparameter (B_3) auf einen Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) zu extrapolieren, wodurch ein Referenzvordergrundwert ($y_1 = F_R$) bei dem Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) bestimmt wird; und Bestimmen einer zweiten nicht-linearen Funktionsform $y_2(x)$, die Referenzvordergrundwerte ($y_2 = F_{Ri}$) als eine Funktion entsprechender Dicken ($x = t_{M1,i}$) des ersten absorbierenden Materials beschreibt, derart, daß die zweite nicht-lineare Funktionsform: a) einen ersten Referenzvordergrundwert ($y_2 = F_{R1}$) der ersten bekannten Kalibrierungsstandarddicke des ersten absorbierenden Materials ($t_{M1,1}$) bei dem Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) und einen zweiten Referenzvordergrundwert ($y_2 = F_{R2}$) der zweiten bekannten Kalibrierungsstandarddicke des ersten absorbierenden Materials ($t_{M1,2}$) bei dem Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) annähert; und b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern. Der Schritt des Bereitstellens eines Kalibrierungsstandards kann ferner den Schritt des Auswählens des zweiten absorbierenden Materials aufweisen derart, daß die Dicke $t_{M2,1}$ gleich der Dicke $t_{M2,2}$ ist. Der Schritt des Bestimmens einer ersten nicht-linearen Funktionsform $y_1(x)$ kann ferner den Schritt des Auswählens hyperbolischer Funktionen als eine der zusätzlichen Beschränkungen, die Charakteristika aufweisen, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern, aufweisen. Bei diesem Verfahren kann der Schritt des Bestimmens einer zweiten nicht-linearen Funktionsform $y_2(x)$ ferner den Schritt des Invertierens, entweder numerisch oder analytisch, der zweiten nicht-linearen Funktionsform aufweisen, um eine Dicke des ersten Materials ($t_{M1,K}$) zu erhalten, die einem gegebenen Referenzvordergrundwert ($y_2 = F_{RK}$) entspricht. Der Schritt des Bestimmens einer zweiten

nichtlinearen Funktionsform $y_2(x)$ kann ferner den Schritt des Auswählens einer Summe von Exponentialfunktionen als eine der zusätzlichen Beschränkungen, die Charakteristika aufweisen, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern, aufweisen. Zusätzlich können die Schritte des Bestimmens der Werte der Vordergrund- und Hintergrund-Parameter ferner den Schritt des Simulierens der Werte der Vordergrund- und Hintergrund-Parameter unter Verwendung von einem oder mehreren der folgenden Simulationsfaktoren aufweisen: a) den spektralen Charakteristika einer Röntgenquelle; und/oder b) der Winkelverteilung von Röntgenstrahlen, die durch die Röntgenquelle erzeugt werden; und/oder c) der Absorptionseigenschaft und der spektralen Empfindlichkeit eines Röntgendetektors; und/oder d) den Röntgenstrahl-Dämpfungseigenschaften des ersten und des zweiten absorbierenden Materials als Funktionen von Röntgenstrahl-Energie/Wellenlänge.

[0021] Gemäß einem siebten Aspekt ist die vorliegende Erfindung ein Verfahren zum Kalibrieren eines Röntgenbilderzeugungssystems zum quantitativen Bestimmen der Dicke eines ersten absorbierenden Materials beim Vorliegen eines zweiten absorbierenden Materials, wobei ein Einfall-Röntgenstrahl mit einer Einfall-Röntgenstrahl-Intensität durch das erste und das zweite absorbierende Material transmittiert wird, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist: Bereitstellen eines Kalibrierungsstandards zum Charakterisieren des Bilderzeugungssystems, wobei der Kalibrierungsstandard eine erste und eine zweite bekannte Dicke des ersten absorbierenden Materials (die mit $t_{M1,1}$ und $t_{M1,2}$ bezeichnet werden) in Kombination mit einer Dicke des zweiten absorbierenden Materials (die mit $t_{M2,1}$ und $t_{M2,2}$ bezeichnet werden) aufweist; Bestimmen von Werten eines ersten und eines zweiten Vordergrundparameters (die mit F_1 und F_2 bezeichnet werden), wobei a) der erste Vordergrundparameter F_1 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,1}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit der Dicke $t_{M2,1}$ transmittiert wird; und b) der zweite Vordergrundparameter F_2 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,2}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit der Dicke $t_{M2,2}$ transmittiert wird; Bestimmen von Werten eines ersten und eines zweiten Hintergrundparameters (die mit B_1 und B_2 bezeichnet werden), wobei: a) der erste Hintergrundparameter B_1 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch lediglich das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,1}$ transmittiert wird; und b) der zweite Hintergrundparameter B_2 die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch lediglich das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,2}$ transmittiert wird; und Bestimmen einer Funktionsform einer nicht-linearen Funktion $y(x_1, x_2)$, die die Werte der Dicke des ersten Materials ($y = t_{M1}$) als eine Funktion des Vordergrunds und des Hintergrunds (beispielsweise $x_1 = F$, $x_2 = B$) beschreibt, derart, daß die nicht-lineare Funktionsform: a) einen Satz von Kalibrierungsdatenpunkten $\{(t_{M1,i}, F_i, B_i)\}$, der die vorher bestimmten Dicken ($t_{M1,i}$) des ersten Materials, die Vordergrundparameter (F_i) und die Hintergrundparameter (B_i) enthält, annähert; b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern; und c) eine Einrichtung liefert, um über den Bereich der Kalibrierungsstandards hinaus Vordergrund- und Hintergrund-Parameter zu extrapolieren. Der Schritt des Bereitstellens eines Kalibrierungsstandards kann ferner den Schritt des Auswählens des zweiten absorbierenden Materials derart, daß die Dicke $t_{M2,1}$ gleich der Dicke $t_{M2,2}$ ist, aufweisen. Bei diesem Verfahren kann der Schritt des Bestimmens einer Funktionsform der nicht-linearen Funktion $y(x_1, x_2)$ ferner den Schritt des Auswählens einer Summe des Produkts von zwei Exponentialfunktionen, um die Vordergrundparameter darzustellen, und einer Summe von einzelnen Exponentialfunktionen, um die Hintergrundparameter darzustellen, als die zusätzlichen Beschränkungen, die Charakteristika aufweisen, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern, aufweisen. Der Schritt des Bestimmens einer Funktionsform der nicht-linearen Funktion $y(x_1, x_2)$ kann ferner den Schritt des Invertierens, entweder numerisch oder analytisch, der nicht-linearen Funktionsform aufweisen, derart, daß sowohl y , x_1 als auch x_2 als eine Funktion von verbleibenden zwei Variablen ausgedrückt werden können. Zusätzlich können die Schritte des Bestimmens der Werte der Vordergrund- und Hintergrund-Parameter ferner den Schritt des Simulierens der Werte der Vordergrund- und Hintergrund-Parameter unter Verwendung von einem oder mehreren der folgenden Simulationsfaktoren aufweisen: a) den spektralen Charakteristika einer Röntgenquelle; und/oder b) der Winkelverteilung der Röntgenstrahlen, die durch die Röntgenquelle erzeugt werden; und/oder c) der Absorptionseigenschaft und der spektralen Empfindlichkeit eines Röntgendetektors; und/oder d) den Röntgenstrahl-Dämpfungseigenschaften des ersten und des zweiten absorbierenden Materials als Funktionen von Röntgenstrahl-Energie/Wellenlänge.

[0022] Ein achter Aspekt der vorliegenden Erfindung ist ein Verfahren zum Kalibrieren eines Röntgenbilderzeugungssystems zum quantitativen Bestimmen einer ersten Dicke T_x eines absorbierenden Materials beim Vorliegen einer zusätzlichen zweiten Dicke T_y des absorbierenden Materials, wobei ein Einfall-Röntgenstrahl mit einer Einfall-Röntgenstrahl-Intensität durch das absorbierende Material transmittiert wird, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist: Bereitstellen eines Kalibrierungsstandards zum Charakterisieren des Bilder-

zeugungssystem, wobei der Kalibrierungsstandard zwei bekannte Dicken T_1 und T_2 des absorbierenden Materials liefert; Bestimmen von Werten F_1 und F_2 , die Intensitäten von transmittierten Röntgenstrahlen entsprechend der Transmission durch die Dicken T_1 bzw. T_2 des absorbierenden Materials widerspiegeln; Bestimmen einer Funktionsform einer invertierbaren, nicht-linearen Funktion $y(x)$, die die Änderung der Intensität des transmittierten Röntgenstrahls als eine Funktion der Dicke des absorbierenden Materials beschreibt; Bestimmen von Werten B und F , die Intensitäten eines transmittierten Röntgenstrahls entsprechend der Transmission durch die zweite Dicke T_y des absorbierenden Materials bzw. durch die kombinierte Dicke $T_x + T_y$ des absorbierenden Materials widerspiegeln; Anwenden der vorher bestimmten Funktionsform, um T_y und $T_x + T_y$ aus den gemessenen Werten von F und B zu bestimmen; und Bestimmen der unbekanntesten ersten Dicke T_x als die Differenz $(T_x + T_y) - T_y$. Der Schritt des Bestimmens einer Funktionsform, die die Intensität des transmittierten Strahls als eine Funktion der Dicke beschreibt, kann ferner das Auswählen einer allgemeinen Funktionsform, die wie folgt beschrieben ist, aufweisen:

$$y = y_0 - \int \alpha(E) e^{-\beta(E)T} dE$$

oder ihrer diskreten Näherung:

$$y = y_0 - \sum_i \alpha_i e^{-\beta_i T}$$

wobei T die Dicke des absorbierenden Materials ist, y_0 eine Anpassungskonstante ist; und wobei in der allgemeinen Funktionsform: a) das Röntgenquellen-Energiespektrum als eine Funktion der Energie verteilt ist, wobei Gewichtungen durch den Parameter $\alpha(E)$ bestimmt sind; und b) $\beta(E)$ der Röntgenstrahl-Dämpfungskoeffizient für das absorbierende Material ist, und wobei in der diskreten Näherung: c) das Gesamtröntgenquellen-Energiespektrum in eine bestimmte Anzahl von Bändern i aufgeteilt ist, wobei die Gesamtquellenintensität unter den Bändern als eine Funktion der Röntgenquellenenergie und der Detektorempfindlichkeit aufgeteilt ist, wobei Gewichtungen für jedes Band i durch den Parameter α_i bestimmt sind; und d) β_i der effektive lineare Dämpfungskoeffizient für Röntgenstrahlung in einem Band i für das absorbierende Material ist. Der Schritt des Bestimmens der Werte F_1 und F_2 kann den Schritt des Simulierens der transmittierten Intensitäten unter Verwendung von einem oder mehreren der folgenden Simulationsfaktoren aufweisen: a) der spektralen Charakteristika des Einfall-Röntgenstrahls; und/oder b) der Winkelverteilung von Röntgenstrahlen, die der einfallende Röntgenstrahl aufweist; und/oder c) der Absorptionseigenschaft und der spektralen Empfindlichkeit eines Röntgendetektors; und/oder d) der Röntgenstrahl-Dämpfungseigenschaften des absorbierenden Materials als einer Funktion der Röntgenstrahl-Energie/Wellenlänge.

[0023] Ein neuerer Aspekt der vorliegenden Erfindung ist eine Vorrichtung zum Kalibrieren eines Röntgenbilderzeugungssystem zum quantitativen Bestimmen der Dicke eines ersten absorbierenden Materials beim Vorliegen eines zweiten absorbierenden Materials, wobei ein Einfall-Röntgenstrahl mit einer Einfall-Röntgenstrahl-Intensität durch das erste und das zweite absorbierende Material transmittiert wird, wobei die Vorrichtung folgende Merkmale aufweist: einen Kalibrierungsstandard zum Charakterisieren des Bilderzeugungssystem, wobei der Kalibrierungsstandard zumindest eine bekannte Dicke $t_{M1,i}$ des ersten absorbierenden Materials in Kombination mit zumindest einer Dicke $t_{M2,i}$ des zweiten absorbierenden Materials aufweist; eine Einrichtung zum Bestimmen eines Werts eines Vordergrund- und eines Hintergrund-Parameters (die mit F und B bezeichnet werden), wobei: a) der Vordergrundparameter F die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,i}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit einer Dicke $t_{M2,i}$ transmittiert wird; und b) der Hintergrundparameter B die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch lediglich das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,i}$ transmittiert wird; und eine Einrichtung zum Bestimmen einer nicht-linearen Funktionsform, die Werte des Vordergrunds und/oder des Hintergrunds und/oder der Materialdicken beschreibt, derart, daß die nicht-lineare Funktionsform: a) mit dem vorher bestimmten Vordergrundparameter (F), dem Hintergrundparameter (B) und den Dickenwerten konsistent ist; b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystem bestimmt sind oder dasselbe annähern; und c) eine Einrichtung liefert, um den Vordergrund und/oder den Hintergrund und/oder die Materialdicken über den Bereich des Kalibrierungsstandards hinaus zu extrapolieren. Die Einrichtung zum Bestimmen einer nicht-linearen Funktionsform kann ferner folgende Merkmale aufweisen: eine Einrichtung zum Bestimmen einer ersten nicht-linearen Funktionsform $y_1(x)$, die Werte des Vordergrunds ($y_1 = F$) als Funktionen des Hintergrunds ($x = B$) beschreibt, derart, daß die erste nichtlineare Funktionsform: a) den vorher bestimmten Wert des Vordergrundparameters (F) hinsichtlich des vorher bestimmten Werts des Hintergrundparameters (B) annähert; b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystem bestimmt sind oder dasselbe annähern; und c) eine Einrichtung liefert, um einen gemessenen Vordergrundparameter (F_M), der einem ersten absorbierenden Material mit einer

unbekannten Dicke $t_{M1,U}$ in Kombination mit einem zweiten absorbierenden Material mit einer Dicke $t_{M2,U}$ entspricht, auf einen Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) zu extrapolieren, wodurch ein Referenzvordergrundwert ($y_1 = F_{R,U}$) bei dem Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) bestimmt wird; und eine Einrichtung zum Bestimmen einer zweiten nicht-linearen Funktionsform $y_2(x)$, die Referenzvordergrundwerte ($y_2 = F_{Ri}$) als eine Funktion von entsprechenden Dicken des ersten absorbierenden Materials ($x = t_{M1,i}$) beschreibt, derart, daß die zweite nicht-lineare Funktionsform: a) einen Referenzvordergrundwert ($y_2 = F_{R1}$) des Kalibrierungsstandard der bekannten Dicke des ersten absorbierenden Materials ($t_{M1,1}$) bei dem Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) annähert; und b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenstrahlbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern. Die Einrichtung zum Bestimmen einer nicht-linearen Funktionsform kann ferner folgende Merkmale aufweisen: eine Einrichtung zum Bestimmen einer Funktionsform einer nicht-linearen Funktion $y(x_1, x_2)$, die die Werte der Dicke des ersten Materials ($y = t_{M1}$) als eine Funktion des Vordergrunds und des Hintergrunds (beispielsweise $x_1 = F$, $x_2 = B$) beschreibt, derart, daß die nicht-lineare Funktionsform: a) einen Satz von Kalibrierungsdatenpunkten $\{(t_{M1,i}, F_i, B_i)\}$ annähert, der die vorher bestimmten Dicken ($t_{M1,i}$) des ersten Materials, die Vordergrundparameter (F_i) und die Hintergrundparameter (B_i) enthält; b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern; und c) eine Einrichtung liefert, um über den Bereich des Kalibrierungsstandards hinaus Vordergrund- und Hintergrund-Parameter zu extrapolieren.

[0024] Ein zehnter Aspekt der vorliegenden Erfindung ist ein Verfahren zum Kalibrieren eines Röntgenbilderzeugungssystems zum quantitativen Bestimmen der Dicke eines ersten absorbierenden Materials beim Vorliegen eines zweiten absorbierenden Materials, wobei ein Einfall-Röntgenstrahl mit einer Einfall-Röntgenstrahl-Intensität durch das erste und das zweite absorbierende Material transmittiert wird, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist: Bereitstellen eines Kalibrierungsstandards zum Charakterisieren des Bilderzeugungssystems, wobei der Kalibrierungsstandard zumindest eine bekannte Dicke $t_{M1,i}$ des ersten absorbierenden Materials in Kombination mit zumindest einer Dicke $t_{M2,i}$ des zweiten absorbierenden Materials aufweist; Bestimmen eines Werts eines Vordergrund- und eines Hintergrund-Parameters (die mit F und B bezeichnet werden), wobei: a) der Vordergrundparameter F die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch das erste absorbierende Material mit der Dicke $t_{M1,i}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material mit einer Dicke $t_{M2,i}$ transmittiert wird; und b) der Hintergrundparameter B die Intensität eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität entspricht, der durch lediglich das zweite absorbierende Material mit der Dicke $t_{M2,i}$ transmittiert wird; und Bestimmen einer nicht-linearen Funktionsform, die Werte des Vordergrunds und/oder des Hintergrunds und/oder der Materialdicken beschreibt, derart, daß die nicht-lineare Funktionsform: a) mit dem vorbestimmten Vordergrundparameter (F), dem Hintergrundparameter (B) und den Dickenwerten konsistent ist; b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern; und c) eine Einrichtung liefert, um den Vordergrund und/oder den Hintergrund und/oder die Materialdicken über den Bereich des Kalibrierungsstandards hinaus zu extrapolieren. Der Schritt des Bestimmens einer nicht-linearen Funktionsform kann ferner folgende Schritte aufweisen: Bestimmen einer ersten nicht-linearen Funktionsform $y_1(x)$, die Werte des Vordergrunds ($y_1 = F$) als Funktionen des Hintergrunds ($x = B$) beschreibt, derart, daß die erste nicht-lineare Funktionsform: a) den vorher bestimmten Wert des Vordergrundparameters (F) hinsichtlich des vorher bestimmten Werts des Hintergrundparameters (B) annähert; b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern; und c) eine Einrichtung liefert, um einen gemessenen Vordergrundparameter (F_M), der einem ersten absorbierenden Material mit einer unbekanntem Dicke $t_{M1,U}$ in Kombination mit einem zweiten absorbierenden Material mit einer Dicke $t_{M2,U}$ zugeordnet ist, auf einen Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) zu extrapolieren, wodurch ein Referenzvordergrundwert ($y_1 = F_{R,U}$) bei dem Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) bestimmt wird; und Bestimmen einer zweiten nicht-linearen Funktionsform $y_2(x)$, die Referenzvordergrundwerte ($y_2 = F_{Ri}$) als eine Funktion entsprechender Dicken des ersten absorbierenden Materials ($x = t_{M1,i}$) beschreiben, derart, daß die zweite nicht-lineare Funktionsform: a) einen Referenzvordergrundwert ($y_2 = F_{R1}$) des Kalibrierungsstandards für die bekannte Dicke des ersten absorbierenden Materials ($t_{M1,1}$) bei dem Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) annähert; und b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern. Die Schritte des Bestimmens der Werte der Vordergrund- und Hintergrund-Parameter können ferner den Schritt des Simulierens der Werte der Vordergrund- und Hintergrund-Parameter unter Verwendung von einem oder mehreren der folgenden Simulationsfaktoren aufweisen: a) den spektralen Charakteristika des Röntgenstrahls; und/oder b) der Winkelverteilung der Röntgenstrahlen, die der Röntgenstrahl (das Röntgenstrahlbündel) aufweist; und/oder c) der Absorptionsfähigkeit und der spektralen Empfindlichkeit eines Röntgenstrahldetektors; und/oder d) den Röntgenstrahl-Dämpfungseigenschaften des ersten und des zweiten absorbierenden Materials als Funktionen von Röntgenstrahl-Energie/Wellenlänge. Bei diesem Verfahren können die Vorder-

grundparameter F_i durch eine allgemeine Funktionsform y_F beschrieben werden:

$$y_F = y_0 - \int \alpha(E) e^{-\beta(E)t_1} e^{-\gamma(E)t_2} dE$$

oder der diskreten Näherung derselben:

$$y_F = y_0 - \sum_i \alpha_i e^{-\beta_i t_1} e^{-\gamma_i t_2}$$

wobei t_1 und t_2 die Dicken des ersten absorbierenden Materials bzw. des zweiten absorbierenden Materials sind; y_0 eine Anpassungskonstante ist; und wobei in der allgemeinen Funktionsform: a) das Röntgenstrahl-Energiespektrum als eine Funktion der Energie verteilt ist, wobei Gewichtungen durch den Parameter $\alpha(E)$ bestimmt sind; und b) $\beta(E)$ und $\gamma(E)$ die Röntgenstrahl-Dämpfungskoeffizienten für das erste bzw. zweite absorbierende Material sind, und wobei in der diskreten Näherung: c) das Gesamt-röntgenstrahl-Energiespektrum in eine bestimmte Anzahl von Bändern i aufgeteilt ist, wobei die Gesamtquellenintensität unter den Bändern als eine Funktion der Röntgenstrahlenergie und der Detektorempfindlichkeit verteilt ist, wobei Gewichtungen für jedes Band i durch den Parameter α_i bestimmt sind; und d) β_i und γ_i die wirksamen linearen Dämpfungskoeffizienten für Röntgenstrahlen in dem Band i für das erste bzw. das zweite absorbierende Material sind. Der Schritt des Bestimmens einer nicht-linearen Funktionsform kann ferner den Schritt des Auswählens einer Funktion der folgenden Form aufweisen:

$$y_1 = \sqrt{(x-a)^2 + b^2} + c$$

wobei x dem Hintergrund B entspricht, y_1 der Differenz zwischen dem Vordergrund und dem Hintergrund ($F-B$) entspricht, und a , b und c Anpassungskonstanten sind. Das Verfahren kann ferner folgende Schritte aufweisen: Auswählen eines Referenzhintergrundpegels ($x = B_R$); Bestimmen der Werte des Vordergrunds minus den Hintergrund ($F_{Ri}-B_{Ri}$) bei dem Referenzhintergrundpegel (B_R) für mehrere bekannte Dicken des Kalibrierungsstandards unter Verwendung der glatt variierenden nicht-linearen Funktion y_1 , was den Wert des Vordergrunds minus den Hintergrund ($y_1 = F-B$) als eine Funktion des Hintergrunds ($x = B$) ausdrückt; und Bestimmen einer zweiten Funktionsform y_2 , die die Werte des Vordergrunds minus den Hintergrund ($F_{Ri}-B_{Ri}$) bei dem Referenzhintergrundpegel (B_R) für die mehreren bekannten Dicken des ersten absorbierenden Materials als eine Funktion der Dicke des ersten absorbierenden Materials ausdrückt. Der Schritt des Bestimmens einer zweiten Funktionsform y_2 kann ferner den Schritt des Auswählens einer Funktion aufweisen, die eine Summe von Exponentialfunktionen der folgenden Form ist:

$$y_2(t) = p - \sum_i q_i e^{-r_i t}$$

wobei p , q_i und r_i Anpassungskonstanten sind. Das Verfahren kann ferner den Schritt des Erzeugens einer Nachschlagtabelle für Werte von (Hintergrund) über (Vordergrund minus Hintergrund) über (Dicke) für eines oder beide des ersten und/oder zweiten absorbierenden Materials aufweisen. Der Schritt des Bestimmens einer nicht-linearen Funktionsform kann ferner folgenden Schritt aufweisen: Bestimmen einer Funktionsform einer nicht-linearen Funktion $y(x_1, x_2)$, die die Werte der Dicke des ersten Materials ($y = t_{M1}$) als eine Funktion des Vordergrunds und des Hintergrunds (beispielsweise $x_1 = F$, $x_2 = B$) beschreibt, derart, daß die nichtlineare Funktionsform: a) einen Satz von Kalibrierungsdatenpunkten $\{(t_{M1,i}, F_i, B_i)\}$ annähert, der die vorher bestimmten Dicken ($t_{M1,i}$) des ersten Materials, die Vordergrundparameter (F_i) und die Hintergrundparameter (B_i) enthält; b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern; und c) eine Einrichtung liefert, um über den Bereich des Kalibrierungsstandards hinaus Vordergrund- und Hintergrund-Parameter zu extrapolieren.

Ausführungsbeispiel

[0025] Bevorzugte Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden nachfolgend bezugnehmend auf die beiliegenden Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

[0026] **Fig. 1A** eine graphische Darstellung der Grauskalen-Bildintensität über der Lötmitteldicke für ein Röntgenbild eines Lötmittelmaterials;

[0027] **Fig. 1B** einen Kalibrierungsschritt-Keil eines Lötmittelmaterials, der zum Kalibrieren der Beziehung von Grauskalen-Bildintensität zu Dicke für Röntgenbilder des Lötmittelmaterials verwendet wird;

[0028] **Fig. 1C** eine graphische Darstellung der Beziehung der Grauskalen-Bildintensität zu der Dicke für den Lötmittelmateriale-Kalibrierungsschrittkeil, der in **Fig. 1B** gezeigt ist;

[0029] **Fig. 2** eine schematische Darstellung eines Laminographiesystems, das die Grundsätze der Technik zeigt;

- [0030] **Fig. 3A** ein Objekt mit einem Pfeil, einem Kreis und einem Kreuz, die an drei unterschiedlichen planaren Orten in das Objekt eingebettet sind;
- [0031] **Fig. 3B** ein Laminogramm (eine Schichtbildaufnahme) des Objekts in **Fig. 3A**, das auf die Ebene, die den Pfeil enthält, fokussiert ist;
- [0032] **Fig. 3C** ein Laminogramm des Objekts in **Fig. 3A**, das auf die Ebene, die den Kreis enthält, fokussiert ist;
- [0033] **Fig. 3D** ein Laminogramm des Objekts von **Fig. 3A**, das auf die Ebene, die das Kreuz enthält, fokussiert ist;
- [0034] **Fig. 3E** ein herkömmliches, zweidimensionales Röntgenprojektionsbild des Objekts in **Fig. 3A**;
- [0035] **Fig. 4A** eine schematische Querschnittsansicht eines Schaltungsplatinen-Inspektions-Laminographiesystems, die zeigt, wie das laminographische Bild erzeugt und durch eine Kamera betrachtet wird;
- [0036] **Fig. 4B** eine vergrößerte Draufsicht einer Inspektionsregion, die in **Fig. 4A** gezeigt ist;
- [0037] **Fig. 4C** eine perspektivische Ansicht des Schaltungsplatinen-Inspektions-Laminographiesystems, das in **Fig. 4A** gezeigt ist;
- [0038] **Fig. 5** eine schematische Querschnittsdarstellung eines Abschnitts einer Zweikomponentenanordnung **300**, die ein erstes Material **310** (beispielsweise Lötmaterial) in Kombination mit einem zweiten Material **320** (beispielsweise Kupfer, Kunststoff und dergleichen) aufweist;
- [0039] **Fig. 6** eine Draufsichtdarstellung eines Röntgenbilds der Zweikomponentenanordnung **300**, die in **Fig. 5** gezeigt ist;
- [0040] **Fig. 7** lineare Aufzeichnungen des Delta-Grau-Pegels (Delta Gray Level) aufgrund des Lötmaterials, das eine konstante Lötmaterialdicke (ΔG) aufweist, über dem Hintergrund-Grau-Pegel (BG);
- [0041] **Fig. 8** zwei Sätze von Kalibrierungsdaten und hyperbolischen Anpassungen an die Daten, die die Bedingungen der nicht-linearen Schattierungskorrekturtechnik der vorliegenden Erfindung zeigen;
- [0042] **Fig. 9** eine Aufzeichnung gemessener Delta-Grau-Über-Hintergrund-Pegel für neun Sätze von Kalibrierungsdaten für neun bekannte Lötmaterialdicken in Kombination mit fünfzehn unterschiedlichen bekannten Hintergrundpegeln;
- [0043] **Fig. 10A** die Ergebnisse der Lötmaterialdicke über dem Hintergrund, die durch die Anwendung einer linearen Schattierungskorrektur auf die Daten, die in **Fig. 9** gezeigt sind, bestimmt sind;
- [0044] **Fig. 10B** die Ergebnisse der Lötmaterialdicke über dem Hintergrund, die durch die Anwendung einer nicht-linearen Schattierungskorrektur auf die Daten, die in **Fig. 9** gezeigt sind, bestimmt sind;
- [0045] **Fig. 11A** ein Beispiel einer Hintergrund- (BG) über Delta-Grau (ΔG) über Lötmaterialdicke- (t) -Oberfläche (die aus den Kalibrierungsdaten, die in **Fig. 9** gezeigt sind, erzeugt wurde) gemäß der vorliegenden Erfindung;
- [0046] **Fig. 11B** eine graphische Darstellung einer Nachschlagtabelle (LUT; LUT = Look Up Table) für Hintergrund (BG) über Delta-Grau (ΔG) über Lötmaterialdicke (t) (die aus den Kalibrierungsdaten, die in **Fig. 9** gezeigt sind, erzeugt wurde) gemäß der vorliegenden Erfindung; und
- [0047] **Fig. 12** die Ergebnisse der Lötmaterialdicke über dem Hintergrund, die aus der Nachschlagtabelle (die aus den Kalibrierungsdaten, die in **Fig. 9** gezeigt sind, erzeugt wurde) gemäß der vorliegenden Erfindung bestimmt sind.

Beziehung zwischen Lötmaterialdicke und Röntgenbild-Grauegel

[0048] Obwohl die folgende Beschreibung hinsichtlich einer Zweikomponentenanordnung, die eine Schicht aus Lötmaterial und eine Schicht aus Kupfer aufweist, erfolgt, ist es klar, daß die vorliegende Erfindung auf jegliche Zweikomponentenanordnung anwendbar ist. Es ist ferner klar, daß die vorliegende Erfindung in gleicher Weise für eine Dreikomponentenanordnung anwendbar ist, bei der eine der drei Komponenten sich nicht ändert (beispielsweise das G10-Substrat einer gedruckten Schaltungsanordnung). Da der Einfluß der sich nicht ändernden dritten Komponente einfach darin besteht, das Quellenintensitätsspektrum zu ändern, wird dieselbe in der folgenden Beschreibung nicht explizit behandelt. Überdies müssen die zwei Komponenten nicht in unterschiedlichen Schichten vorliegen, sondern können vermischt sein. Fachleute werden erkennen, daß die Ausdrücke "Grauegel" und "Intensität", wie sie hierin verwendet werden, eng verwandt sind und häufig austauschbar sind. Allgemein bezieht sich "Grauegel" auf die durch einen Röntgenstrahldetektor gemessene Röntgenstrahlintensität, die in eine willkürliche Skala von Grauegeln umgewandelt wird. Folglich ist ein spezifischer Grauegel funktionell auf eine entsprechende Röntgenstrahlintensität bezogen. In gleicher Weise werden Fachleute erkennen, daß die Ausdrücke "Dämpfung" und "Absorption" bezüglich Röntgenstrahlen eng verwandt sind und häufig austauschbar in der Literatur verwendet werden. Allgemein umfaßt der Ausdruck "Dämpfung" üblicherweise sowohl eine "Absorption" als auch eine "Streuung" von Röntgenstrahlen, wobei dieselbe der hierin interessierende Parameter ist, ungeachtet dessen, ob sie durch eine Absorption oder eine Streuung bewirkt wird. Da die Ausdrücke jedoch häufig in der Technik austauschbar verwendet werden, kann "Absorption" manchmal auch verwendet sein, um sowohl eine "Absorption" als auch eine "Streuung" von Rönt-

genstrahlen zu beinhalten. Wenn eine Unterscheidung wesentlich ist, wird ein Fachmann allgemein in der Lage sein, die korrekte Absicht durch Bezugnahme auf den Zusammenhang, in dem die Ausdrücke verwendet werden, zu bestimmen.

[0049] Bei einem Röntgenbild eines Lötmittermaterials, typischerweise einer Kombination aus Blei und Zinn, existiert eine Beziehung zwischen den Intensitäten, die das Röntgenbild aufweist, und den Dicken des Lötmittermaterials, das das Röntgenbild bildet. **Fig. 1A** zeigt ein Beispiel dieser allgemeinen Beziehung. Bei diesem Beispiel ist zu sehen, daß die Bildintensität von Werten, die helleren Grauschattierungen (Weiß) zugeordnet sind, zu Werten, die dunkleren Grauschattierungen (Schwarz) zugeordnet sind, zunehmen, wenn die Dicke des Lötmittermaterials zunimmt. Das heißt, daß das Bild eines dünnen Lötmittelabschnitts einen Grauegel aufweisen wird, der geringer ist als der Grauegel des Bilds eines dickeren Lötmittelabschnitts. Das Bild des dünnen Abschnitts wird als eine hellere Grauschattierung erscheinen als das Bild des dickeren Abschnitts. (Diese Konvention wird typischerweise bei der elektronischen Bilddarstellung von Röntgenbildern verwendet, wobei jedoch auch die umgekehrte Konvention verwendet werden kann, d.h., bei der das Bild eines dünnen Lötmittelabschnitts einen Grauegel aufweist, der größer ist als der Grauegel des Bild eines dickeren Lötmittelabschnitts. Die letztgenannte Konvention wurde traditionell bei der Filmmradiographie, bei der die Röntgenbilder auf einem Röntgenfilm aufgezeichnet wurden, verwendet. Die vorliegende Erfindung kann unter Verwendung beider Konventionen implementiert werden.) Überdies liegt bei der folgenden Beschreibung die Grauskala in einem Bereich von 0 bis zu einem maximalen Wert, wobei die unteren Werte den helleren Grauschattierungen (Weiß) zugeordnet sind, und die Werte in der Nähe des maximalen Werts den dunkleren Grauschattierungen (Schwarz) zugeordnet sind. Es ist klar, daß andere Konventionen zum Darstellen der Grauskala ebenfalls verwendet werden können. Beispielsweise kann festgelegt werden, daß untere Werte den dunkleren Grauschattierungen (Schwarz) entsprechen, während festgelegt werden kann, daß die Werte in der Nähe des maximalen Werts den helleren Grauschattierungen (Weiß) zugeordnet sind.

Lötmitteldickenbestimmung unter Verwendung eines Kalibrierungsstufenkeils

[0050] Die Beziehung zwischen der Lötmitteldicke und dem Bildgrauegel kann unter Verwendung eines Kalibrierungsstufenkeils, der mehrere Stufen unterschiedlicher Dicke aufweist, kalibriert werden. Ein Beispiel eines solchen Stufenkeils **4** ist in **Fig. 1B** gezeigt. Der Stufenkeil **4** ist aus einem Lötmittermaterial aufgebaut und umfaßt zehn Stufen **8** mit Dicken in einem Bereich von 25,4 µm (0,001 Inch) bis 254 µm (0,010 Inch) in Schritten von 25,4 µm (0,001 Inch). Es ist möglich, den Stufenkeil **4** mit anderen Abmessungen (beispielsweise in Inkrementen von 50,8 µm (2 mil) bis 508 µm (20 mil), usw.) aufzubauen, abhängig von den Dicken der Lötstellen und dem Typ der Schaltungsplatine, die inspiziert werden soll. Ein Röntgenbild des Stufenkeils **4** zeigt eine Beziehung zwischen Bildintensität **8'** über der Lötmitteldicke, wie sie in **Fig. 1C** gezeigt ist. Da die Dicken der Stufen **8** bekannt sind, können die entsprechenden Intensitäten **8'** mit Intensitäten anderer Röntgenbilder eines Lötmittermaterials verglichen werden, bei denen die Dicken nicht bekannt sind, um die unbekanntenen Dicken zu bestimmen. Alternative Verfahren zum Kalibrieren der Lötmitteldicke eines Stufenkeils, um verschiedenen Bildintensitäten zu entsprechen, können genauere Ergebnisse liefern als diese Technik.

[0051] In dem Fall von Schaltungsplattenanordnungen ist das Lötmittel an einer Schaltungsplatine angebracht. Folglich beinhalten die Grauskalenwerte, die in den Röntgenbildern angezeigt werden, Beiträge von dem Lötmittel ebenso wie von dem Material, das die Schaltungsplatine aufweist. Typischerweise besteht das Schaltungsplatinensubstrat aus einem Kunststoff- oder Harz-Typmaterial und kann ferner Masseebenen und Schaltungsspuren, die aus einem leitfähigen Material, beispielsweise Kupfer, bestehen, aufweisen. In diesen Fällen ist die Bestimmung der Lötmitteldicke durch das Vorliegen der Schaltungsplatine und der zugeordneten Materialien, die zu einem Hintergrund in den Röntgenbildern beitragen, sehr kompliziert. Hintergrundschattierungskorrekturtechniken zum Beseitigen des Beitrags aufgrund eines Hintergrunds werden nachfolgend beschrieben.

[0052] Ein alternativer Kalibrierungsstandard für Lötmitteldicken-Kalibrierungsmessungen umfaßt mehrere isolierte Punkte oder kreisförmige Regionen von Lötmittel unterschiedlicher bekannter Dicken, die an einem Epoxid/Kunststoff-Substrat, das für eine Schaltungsplatine typisch ist, beispielsweise aus einem G-10-Material, befestigt sind. Typischerweise wird der Grauegel des Abschnitts des Röntgenbilds des Kalibrierungsstandards, der der mittleren Region jedes Punkts/jeder kreisförmigen Region von Lötmittel entspricht, als darstellend für den Grauegel des gesamten Punkts/der gesamten kreisförmigen Region ausgewählt, um mögliche Fehler aufgrund von Randeffekten und dergleichen zu beseitigen.

Röntgenbilderzeugung

[0053] **Fig. 2** zeigt eine schematische Darstellung einer typischen Laminographie-Geometrie, die mit der vorliegenden Erfindung verwendet werden kann. Ein Objekt **10**, das untersucht wird, beispielsweise eine Schaltungsplatine, ist an einer stationären Position bezüglich einer Röntgenquelle **20** und eines Röntgendetektors

30 gehalten. Eine synchrone Drehung der Röntgenquelle **20** und des Detektors **30** um eine gemeinsame Achse **40** bewirkt, daß ein Röntgenbild der Ebene **60** in dem Objekt **10** auf dem Detektor **30** gebildet wird. Die Bildebene **60** ist im wesentlichen parallel zu den Ebenen **62** und **64**, die durch die Drehung der Quelle **20** bzw. des Detektors **30** definiert sind. Die Bildebene **60** befindet sich an dem Schnittpunkt **70** eines mittleren Strahls **50** von der Röntgenquelle **20** und der gemeinsamen Drehachse **40**. Dieser Schnittpunkt **70** wirkt als ein Drehpunkt für den mittleren Strahl **50**, wodurch bewirkt wird, daß ein scharf eingestelltes Querschnitt-Röntgenbild des Objekts **10** in der Ebene **60** auf dem Detektor **30** erzeugt wird, wenn sich die Quelle und der Detektor synchron um den Schnittpunkt **70** drehen. Eine Struktur in dem Objekt **10**, die außerhalb der Ebene **60** liegt, bildet ein unscharfes Röntgenbild auf dem Detektor **30**.

[0054] Bei der Laminographiegeometrie, die in **Fig. 2** gezeigt ist, sind die Drehachse der Strahlungsquelle **20** und die Drehachse des Detektors **30** koaxial. Es ist jedoch nicht notwendig, daß diese Drehachsen der Strahlungsquelle **20** und des Detektors **30** koaxial sind. Die Bedingungen für eine Laminographie sind erfüllt, und ein Querschnittsbild der Schicht **60** wird erzeugt werden, solange die Drehebene **62** und **64** zueinander parallel sind, und die Drehachsen der Quelle und des Detektors zueinander parallel sind und eine feste Beziehung zueinander aufweisen. Eine koaxiale Ausrichtung reduziert die Anzahl von Beschränkungen hinsichtlich der mechanischen Ausrichtung der Vorrichtung. Es sollte klar sein, daß die vorliegende Erfindung nicht auf irgendeine spezifische Laminographiekonfiguration begrenzt ist. Fachleute werden erkennen, daß zahlreiche alternative Konfigurationen existieren, um Laminogramme (Schichtbildaufnahmen) zu erzeugen, die ebenfalls verwendet werden können. Ferner ist die vorliegende Erfindung nicht auf Querschnittsbilder einer Zweikomponentenanordnung begrenzt, sondern kann mit jeglichem Typ eines Röntgenbilds der Anordnung durchgeführt werden, einschließlich, jedoch nicht begrenzt auf, Laminogramme, CT-Bilder, Schattengraphbilder, und dergleichen.

[0055] Die **Fig. 3A** bis **3E** zeigen Laminogramme, die durch die oben beschriebene Laminographietechnik erzeugt werden. Das Objekt **10**, das in **Fig. 3A** gezeigt ist, besitzt Testmuster in der Form eines Pfeils **81**, eines Kreises **82** und eines Kreuzes **83**, die in drei unterschiedlichen Ebenen **60a**, **60b**, bzw. **60c** in das Objekt **10** eingebettet sind.

[0056] **Fig. 3B** zeigt ein typisches Laminogramm des Objekts **10**, das auf dem Detektor **30** erzeugt wird, wenn der Schnittpunkt **70** in der Ebene **60a** der **Fig. 3A** liegt. Das Bild **100** des Pfeils **81** ist scharf fokussiert, während die Bilder der anderen Merkmale in dem Objekt **10**, beispielsweise der Kreis **82** und das Kreuz **83**, eine unscharfe (verschwommene) Region **102** bilden, die das Pfeilbild **100** nicht stark verdunkelt.

[0057] Wenn der Schnittpunkt **70** in der Ebene **60b** liegt, ist in gleicher Weise das Bild **110** des Kreises **82** scharf fokussiert, wie in **Fig. 3C** zu sehen ist. Der Pfeil **81** und das Kreuz **83** bilden eine unscharfe Region **112**.

[0058] **Fig. 3D** zeigt ein scharfes Bild **120**, das von dem Kreuz **83** erzeugt wurde, wenn der Schnittpunkt **70** in der Ebene **60c** liegt. Der Pfeil **81** und der Kreis **82** bilden eine unscharfe Region **122**.

[0059] Zum Vergleich zeigt **Fig. 3E** ein Röntgenstrahl-Schattenbild des Objekts **10**, das durch herkömmliche Projektionsradiographietechniken erzeugt wird. Diese Technik erzeugt scharfe Bilder **130**, **132** und **134** des Pfeils **81**, des Kreises **82** bzw. des Kreuzes **83**, die einander überlappen. **Fig. 3E** zeigt lebhaft, wie viele Charakteristika, die in dem Objekt **10** enthalten sind, mehrere übereinanderliegende Schattierungsmerkmale in dem Röntgenbild erzeugen können, die einzelne Merkmale des Bilds verdunkeln.

[0060] **Fig. 4A** zeigt ein schematisches Diagramm einer typischen Laminographievorrichtung, die mit der vorliegenden Erfindung verwendbar ist. Bei dieser Konfiguration ist ein Objekt, das inspiziert wird, eine gedruckte Schaltungsplatine **210**, die mehrere elektronische Komponenten **212** aufweist, die auf der Platine **210** angebracht sind und über elektrische Verbindungen **214** (siehe **Fig. 4B**) elektrisch miteinander verbunden sind. Typischerweise bestehen die elektrischen Verbindungen **214** aus Lötstellen. Jedoch sind in der Technik verschiedene andere Techniken zum Herstellen der elektrischen Verbindungen **214** gut bekannt, wobei es, obwohl die Erfindung hinsichtlich Lötstellen beschrieben wird, klar sein sollte, daß andere Typen von elektrischen Verbindungen **214**, einschließlich, jedoch nicht begrenzt auf, leitfähige Epoxid-, mechanische, Wolfram- und eutektische Verbindungen, unter Verwendung der Erfindung inspiziert werden können. **Fig. 4B**, die eine vergrößerte Draufsicht einer Region **283** der Schaltungsplatine **210** ist, zeigt klarer die Komponenten **212** und die Lötstellen **214**.

[0061] Die Laminographievorrichtung nimmt unter Verwendung des vorher beschriebenen Laminographieverfahrens oder anderer Verfahren, die in der Lage sind, äquivalente Querschnittsbilder zu erzeugen, Querschnittsbilder der Lötstellen **214** auf. Die Querschnittsbilder der Lötstellen **214** werden automatisch ausgewertet, um die Qualität und die physikalischen Eigenschaften derselben zu bestimmen, einschließlich beispielsweise der Lötstelledicke. Basierend auf der Auswertung wird dem Benutzer ein Bericht der Lötstellenqualität und der physikalischen Charakteristika geboten.

[0062] Die Laminographievorrichtung, wie sie in **Fig. 4A** gezeigt ist, umfaßt eine Röntgenröhre **200**, die benachbart zu der gedruckten Schaltungsplatine **210** positioniert ist. Die Schaltungsplatine **210** wird von einer Spannvorrichtung **220** gehalten. Die Spannvorrichtung **220** ist an einem Positionierungstisch **230** befestigt, der in der Lage ist, die Spannvorrichtung **220** und die Platine **210** entlang dreier zueinander senkrechter Achsen X, Y und Z zu bewegen. Ein rotierender Röntgendetektor **240**, der einen fluoreszenten Schirm **250**, einen ers-

ten Spiegel **252**, einen zweiten Spiegel **254** und einen Drehtisch **256** umfaßt, ist benachbart zu der Schaltungsplatine **210** auf der Seite, die der Röntgenstrahlröhre **200** gegenüberliegt, positioniert. Eine Kamera **258** ist gegenüber dem Spiegel **252** positioniert, um Bilder, die von dem fluoreszenten Schirm **250** in die Spiegel **252**, **254** reflektiert werden, zu betrachten. Ein Rückkopplungssystem **260** besitzt eine Eingangsverbindung **262** von einem Sensor **263**, der die Winkelposition des Drehtisches **256** erfaßt, und eine Ausgangsverbindung **264** zu X- und Y-Ablenkungsspulen **281** auf der Röntgenröhre **200**. Ein Positionscodierer **265** ist an dem Drehtisch **256** angebracht. Der Positionssensor **263** ist benachbart zu dem Codierer **265** an einer festen Position relativ zu der Drehachse **40** angebracht. Die Kamera **258** ist über eine Eingangsleitung **276** mit einem Computer **270** verbunden. Der Computer **270** besitzt die Fähigkeit, eine Hochgeschwindigkeitsbildanalyse durchzuführen. Eine Ausgangsleitung **278** von dem Computer **270** verbindet den Computer mit dem Positionierungstisch **230**. [0063] Eine perspektivische Ansicht der Laminographievorrichtung ist in **Fig. 4C** gezeigt. Zusätzlich zu der Röntgenstrahlröhre **200**, der Schaltungsplatine **210**, dem fluoreszenten Schirm **250**, dem Drehtisch **256**, der Kamera **258**, dem Positionierungstisch **230** und dem Computer **270**, die in **Fig. 4A** gezeigt sind, sind ein Granitträgertisch **290**, ein Beladungs/Entladungs-Tor **292** und eine Bedienerstation **294** gezeigt. Der Granittisch **290** liefert eine starre, vibrationsfreie Plattform zum strukturellen Integrieren der Hauptfunktionselemente der Laminographievorrichtung, einschließlich der Röntgenstrahlröhre **200**, des Positionierungstisches **230** und des Drehtisches **256**, jedoch nicht begrenzt auf dieselben. Das Beladungs/Entladungs-Tor **292** liefert eine Einrichtung zum Einbringen und Beseitigen von Schaltungsplatten **210** in die und aus der Maschine. Die Bedienerstation **294** liefert eine Eingabe/Ausgabe-Fähigkeit zum Steuern der Funktionen der Laminographievorrichtung, ebenso wie zur Kommunikation der Inspektionsdaten zu einem Bediener.

[0064] Beim Betrieb der Laminographievorrichtung, wie sie in den **Fig. 4A** und **4C** gezeigt ist, werden Querschnittsröntgenbilder hoher Auflösung der Lötstellen **214**, die die Komponenten **212** auf der Schaltungsplatine **210** verbinden, unter Verwendung des Röntgenstrahl-Laminographieverfahrens, das vorher bezugnehmend auf die **Fig. 2** und **3** beschrieben wurde, aufgenommen. Speziell weist die Röntgenstrahlröhre **200**, wie sie in **Fig. 4A** gezeigt ist, einen rotierenden Elektronenstrahlpunkt **285** auf, der eine rotierende Quelle **280** von Röntgenstrahlen **282** erzeugt. Der Röntgenstrahl **282** beleuchtet eine Region **283** der Schaltungsplatine **210**, die die Lötstellen **214**, die in der Region **283** angeordnet sind, umfaßt. Röntgenstrahlen **284**, die die Lötstellen **214**, die Komponenten **212** und die Platine **210** durchdringen, treffen auf den rotierenden fluoreszenten Schirm **250**. [0065] Eine dynamische Ausrichtung der Position der Röntgenquelle **280** mit der Position des rotierenden Röntgendetektors **240** wird durch das Rückkopplungssystem **260** exakt gesteuert. Das Rückkopplungssystem korreliert die Position des rotierenden Drehtisches **256** mit kalibrierten X- und Y-Ablenkungswerten, die in einer Nachschlagtabelle (LUT) gespeichert sind. Treibersignale, die proportional zu den kalibrierten X- und Y-Ablenkungswerten sind, werden zu den Steuerspulen **281** der Röntgenröhre **200** übertragen. Ansprechend auf diese Treibersignale lenken die Steuerspulen **281** den Röntgenstrahl **285** auf Orte auf einer Zielanode **287** derart ab, daß sich die Position des Röntgenquellen-Punkts **280** synchron zu der Rotation des Detektors **240** dreht, auf die Art und Weise, die vorher in Verbindung mit **Fig. 2** erläutert wurde.

[0066] Röntgenstrahlen **284**, die die Platine **210** durchdringen und auf den fluoreszenten Schirm **250** treffen, werden in sichtbares Licht **286** umgewandelt, weshalb ein sichtbares Bild einer einzelnen Ebene in der Region **283** der Schaltungsplatine **210** erzeugt wird. Das sichtbare Licht **286** wird durch Spiegel **252** und **254** in die Kamera **258** reflektiert. Die Kamera **258** besitzt typischerweise eine Niederlichtpegel-CCTV-Kamera (CCTV = closed circuit TV = Betriebsfernsehen), die elektronische Videosignale, die dem Röntgenstrahl und den sichtbaren Bildern entsprechen, über die Leitung **276** zu dem Computer **270** überträgt. Das Bildanalysemerkmal des Computers **270** analysiert und interpretiert das Bild, um die Qualität der Lötstellen **214** zu bestimmen.

[0067] Der Computer **270** umfaßt einen oder mehrere Prozessoren, einen oder mehrere Speicher und verschiedene Eingabe- und Ausgabe-Vorrichtungen, einschließlich Bildschirmen, Plattenlaufwerken, Druckern und Tastaturen, jedoch nicht begrenzt auf dieselben. Es sei darauf hingewiesen, daß die Bildanalyseverfahren der vorliegenden Erfindung durch einen Fachmann auf eine Vielzahl von Arten implementiert werden können, wobei jedoch die Implementierung mit einem Computer oder einem speziell anwendungsspezifischen Bildprozessor bevorzugt ist. Zusätzlich sollte es klar sein, daß der Ausdruck "Bild" nicht auf Formate begrenzt ist, die visuell betrachtet werden können, sondern auch digitale oder analoge Darstellungen enthalten kann, die durch den Computer aufgenommen, gespeichert und analysiert werden können.

[0068] Der Computer **270** steuert ferner die Bewegung des Positionierungstisches **230** und folglich der Schaltungsplatine **210**, derart, daß unterschiedliche Regionen der Schaltungsplatine **210** automatisch in der Inspektionsregion **283** positioniert werden können.

[0069] Die Laminographie-Geometrie und -Vorrichtung, die bezugnehmend auf die **Fig. 2** bis **4** gezeigt und beschrieben sind, sind typisch für solche, die in Verbindung mit der vorliegenden Erfindung verwendet werden können. Jedoch sind spezifische Einzelheiten dieser Systeme für die Durchführung der vorliegenden Erfindung nicht kritisch, die die exakte Messung der Dicke einer Lötstelle, die auf einer Schaltungsplatine **210** positioniert ist, zum Gegenstand hat. Beispielsweise kann die Anzahl von Computern und die Zuordnung von Aufgaben zu spezifischen Computern von System zu System beträchtlich variieren, ebenso wie die spezifischen Einzel-

heiten der Röntgen-Quelle, des -Detektors, des Schaltungsplattenpositionierungsmechanismus, und dergleichen. Detailliertere Beschreibungen von Laminographie-Systemen sind in den folgenden US-Patenten zu finden: 4,926,452; 5,097,492; 5,081,656; 5,291,535; 5,621,811; 5,561,696; 5,199,054; 5,259,012; 5,583,904; und 5,687,209.

[0070] Ein Fachmann wird ebenfalls erkennen, daß andere Techniken, beispielsweise eine Computertomographie, verwendet werden können, um Querschnittbilder spezifischer Ebenen in einer Lötstelle zu erzeugen. Es sollte ebenfalls klar sein, daß die vorliegende Erfindung unter Verwendung herkömmlicher Röntgenstrahl-Schattengraphbilder (siehe Fig. 3E) von Lötstellen auf Schaltungsplatten oder anderen Mehr-Komponentenanordnungen durchgeführt werden kann. Überdies können spezifische Einzelheiten verschiedener Techniken und unterschiedliche Ausrüstungen zum Erzeugen der Querschnitt- oder Schattengraph-Röntgenbilder der Mehr-Komponentenanordnungen, die inspiziert werden, verwendet werden. Die vorliegende Erfindung ist auf alle Systemtypen anwendbar, die die Dicke oder die relative Menge eines ersten Materials beim Vorliegen eines zweiten Materials aus einer Analyse der Grauegel, die ein Röntgenbild der Anordnung aufweist, ableiten.

Physik der Röntgenstrahldämpfung

[0071] Fig. 5 zeigt eine schematische Querschnittsdarstellung eines Abschnitts einer Zweikomponentenanordnung 300, die ein erstes Material 310 (beispielsweise Lötmedium) in Kombination mit einem zweiten Material 320 (beispielsweise Kupfer, Kunststoff, usw.) aufweist. Das US-Patent 5,291,535 erläutert verschiedene Techniken zum Kalibrieren derartiger Konfigurationen, einschließlich 1) einer Hintergrundsubtraktion (additive Komponente); und 2) einer Kombination aus Hintergrundsubtraktion gefolgt von einer multiplikativen Komponente. Obwohl diese Lösungsansätze für bestimmte Anwendungen ausreichend sein können, erfordern andere Anwendungen genauere Techniken zum Ableiten einer Lötmitteldicke-Messung aus einem Röntgenbild beim Vorliegen eines Hintergrundmaterials. Es wurde herausgefunden, daß das lineare Schattierungskorrekturverfahren, das nachfolgend beschrieben wird, eine signifikante Verbesserung gegenüber den additiven und additiven/multiplikativen Korrekturen, die in dem US-Patent 5,291,535 beschrieben sind, liefert.

[0072] Wie in Fig. 5 gezeigt ist, werden Röntgenstrahlen 330, die eine Einfallsintensität I_0 aufweisen, von einer ersten Seite auf die Anordnung 300 gerichtet und treffen auf Regionen der Anordnung 300, die das erste Material 310 mit einer Dicke t_1 in Kombination mit dem zweiten Material 320 mit einer Dicke t_2 aufweisen, sowie weitere Regionen der Anordnung 300, die lediglich das zweite Material 320 aufweisen. In Regionen, in denen die Röntgenstrahlen lediglich durch das zweite Material 320 fallen, wird die Einfallsintensität I_0 auf eine Intensität I_1 gedämpft. In gleicher Weise wird in Regionen, in denen die Röntgenstrahlen sowohl durch das erste Material 310 als auch durch das zweite Material 320 fallen, die Einfallsintensität I_0 auf eine Intensität I_2 gedämpft. Die Absorption monochromatischer Röntgenstrahlen in der Region, die lediglich das zweite Material 320 enthält, wird durch folgende Gleichung gesteuert:

$$I_1 = I_0 e^{-\alpha_2 t_2}$$

wobei α_2 der Röntgenstrahl-Dämpfungskoeffizient für das zweite Material 320 ist. Die Absorption monochromatischer Röntgenstrahlen in der Region, die sowohl das erste Material 310 als auch das zweite Material 320 aufweist, wird durch folgende Beziehung gesteuert:

$$I_1 = I_0 e^{-\alpha_2 t_2} \quad (1)$$

wobei α_1 der Röntgenstrahl-Dämpfungskoeffizient für das erste Material 310 ist.

[0073] Fig. 5 zeigt die Röntgenstrahlen 330, die in einer Richtung, die senkrecht zu der ersten und der zweiten Schicht 310 und 320 ist, durch die Anordnung 300 fallen, wobei t_1 und t_2 die Dicken der ersten bzw. der zweiten Schicht 310 und 320 darstellen. Falls die Röntgenstrahlen in einem bestimmten anderen Winkel durch die Anordnung fallen, stellen t_1 und t_2 die Strecken dar, die die Röntgenstrahlen in der ersten bzw. der zweiten Schicht 310 und 320 zurückgelegt haben.

Lötmitteldickebestimmung unter Verwendung linearer Schattierungskorrekturen

[0074] Wie vorher erläutert wurde, erzeugt eine Röntgeninspektion gedruckter Schaltungsanordnungen typischerweise Grauskalenbilder von Verbindungen oder Schnitten derselben, die analysiert und untersucht werden, um untaugliche Verbindungsstellen zu erfassen und zu klassifizieren, und/oder um statistische Prozeßsteuerdaten zu gewinnen, die sich auf den Herstellungsprozeß beziehen. Es ist erwünscht, daß sich durchgeführte Messungen direkt auf physikalische Charakteristika der Verbindungsstelle, die inspiziert wird, beziehen. Beispielsweise ist es bei der Charakterisierung von Lötstellen bevorzugt, die gemessene Verbindungsstellen-

dicke, d.h. die Lötmittdicke, zu behandeln, und nicht Grauskalen-Pixelwerte. Die im folgenden beschriebene lineare Schattierungskorrekturtechnik wurde früher verwendet, um die Lötmittdick-Bild-Grauskalen-Pixelwerte in Lötmittdicken umzuwandeln. Da die vorliegende Erfindung eine Verbesserung und eine Erweiterung dieses linearen Schattierungskorrekturverfahrens ist, wird eine zusammenfassende Beschreibung geboten, um das Verständnis der vorliegenden Erfindung zu erleichtern.

[0075] In **Fig. 6** ist eine Draufsicht eines Röntgenbilds **350** der Zweikomponentenanordnung **300**, die in **Fig. 5** gezeigt ist, gezeigt, wobei das erste Material **310** ein Lötmittdick ist, während das zweite Material **320** Kupfer oder eine Kombination von Kupfer und Schaltungsplatinenmaterialien ist. Eine Vordergrund-Bildregion **360** stellt einen Abschnitt eines typischen Röntgenbilds einer Lötmittdickanschlußfläche, d.h. des ersten Materials **310** (beispielsweise des Lötmittdicks) in Verbindung mit dem zweiten Material **320** (beispielsweise des Kupfers), dar. In gleicher Weise stellen Hintergrundregionen **370** Abschnitte eines typischen Röntgenbilds eines Schaltungsplatinensubstrats dar, d.h. des zweiten Materials **320** (beispielsweise des Kupfers, des Kunststoffs usw.). Ein Grauskalenpegel, der den Graupegel aufgrund des Lötmittdicks darstellt, ΔG_i , wird erhalten, indem ein Hintergrundgraupegel B_i (Kupfer-Graupegel), d.h. der Graupegel des Röntgenbilds in den Regionen **370**, von einem Vordergrund-Graupegel F_i (Lötmittdick + Kupfer), d.h. den Graupegel des Röntgenbilds in der Region **360**, wie folgt subtrahiert wird:

$$\Delta G_i = F_i - B_i \quad (3)$$

[0076] Die lineare Schattierungskorrekturtechnik basiert auf den folgenden zwei Annahmen:

- 1) Aufzeichnungen des Delta-Grau-Pegels aufgrund von Lötmittdick mit konstanter Lötmittdicke (ΔG) über dem Hintergrundgraupegel (BG) können näherungsweise durch eine Reihe von geraden Linien angenähert werden, die die Hintergrundachse in einem einzelnen Punkt schneiden; und
- 2) bei einem "nominellen" oder Referenz-Hintergrundgraupegel (beispielsweise Null), kann die Funktion des Delta-Grau-Pegels aufgrund des Lötmittdicks (ΔG) über der Lötmittdicke (t) durch eine angepaßte Kurve einer bekannten Form, beispielsweise einer Summe von Exponentialfunktionen, angenähert werden. In den folgenden Beispielen wurde ein Referenzhintergrundgraupegel von Null der Bequemlichkeit halber ausgewählt. Es ist jedoch klar, daß andere von Null verschiedene Referenzhintergrundgraupegel ausgewählt werden können.

[0077] Entsprechend der Annahme **1**) der linearen Schattierungskorrekturtechnik werden drei Werte von ΔG_i für einen konstanten Wert einer Lötmittdicke beim Vorliegen dreier unterschiedlicher Dicken von Kupfer erhalten. In **Fig. 7** ist eine Aufzeichnung eines Beispiels gezeigt, bei dem eine Lötmittdicke von 101,6 μm (4 mil) durch Kupfer abgeschirmt ist, das Dicken von 127, 254 und 381 μm (5,10 und 15 mil) aufweist. Kalibrierungsdatenpunkte **410a**, **410b** und **410c** entsprechen (BG, ΔG)-Koordinaten (5, ΔG_1), (10, ΔG_2) bzw. (15, ΔG_3). Diese Werte von Lötmittdick- und Kupfer-Dicken sind lediglich zu Zwecken der Darstellung ausgewählt. Unterschiedliche Dickenwerte und Materialien können für spezielle Anwendungen verwendet werden. Das Anpassen einer geraden Linie **420** an die Punkte **410a**, **410b** und **410c** (bzw. das Einpassen) bestimmt einen BG-Achsen Schnittpunkt von BG_{MAX} und einen ΔG -Achsen-Schnittpunkt von $\Delta G_0(CAL)$. Die lineare Funktion, die die gerade Linie **420** beschreibt, lautet:

$$\Delta G = - \frac{\Delta G_0 (CAL)}{BG_{MAX}} BG + \Delta G_0 (CAL) \quad (4)$$

wobei die Konstanten BG_{MAX} und $\Delta G_0(CAL)$ aus der linearen Anpassung an die Kalibrierungspunkte **410a**, **410b** und **410c** bestimmt werden.

[0078] Wie vorher erwähnt wurde, nimmt die lineare Schattierungskorrekturtechnik an, daß Aufzeichnungen des Delta-Grau-Pegels aufgrund von Lötmittdick mit unterschiedlichen konstanten Lötmittdicken eine Reihe von geraden Linien erzeugen, die die Hintergrundachse an dem gleichen Punkt BG_{MAX} schneiden. Gemäß dieser Annahme stellen die geraden Linien **430** und **440** Aufzeichnungen von ΔG über BG für Lötmittdicken von 50,8 μm (2 mil) bzw. 254 μm (10 mil) dar. (Einzelne Datenpunkte sind für die Linien **430** und **440** nicht gezeigt.) Folglich ist für jeden Satz von gemessenen Koordinaten (BG, ΔG), die einer unbekanntem Lötmittdicke t_j entsprechen, der Lötmittdick-Delta-Graupegel bei einem "nominellen" oder Referenzhintergrundgraupegel (beispielsweise Null) $\Delta G_0(UNKNOWN)$ der ΔG -Achsen-Schnittpunkt einer geraden Linie **450**, die durch die gemessenen Koordinaten (BG, ΔG) und den BG-Achsen-Schnittpunkt ($BG_{MAX}, 0$) bestimmt ist. Die lineare Funktion, die die gerade Linie **450** beschreibt, lautet:

$$\Delta G = - \frac{\Delta G_0 (UNKNOWN)}{BG_{MAX}} BG + \Delta G_0 (UNKNOWN) \quad (5)$$

[0079] Unter Verwendung der gemessenen Daten (BG, ΔG), die der unbekanntem Lötmittdicke t_j zugeord-

net sind, kann der unbekannte ΔG -Achsen-Schnittpunkt $\Delta G_0(\text{UNKNOWN})$ durch Umordnen der Gleichung (5) wie folgt bestimmt werden:

$$\Delta G_0(\text{UNKNOWN}) = \frac{\Delta G}{1 - \frac{BG}{BG_{\text{MAX}}}} \quad (6)$$

[0080] Unter Anwendung der Annahme 2) der linearen Schattierungskorrekturtechnik kann dann die unbekannte Lötmitteldicke t_U bestimmt werden, indem der Lötmitte-Delta-graupegel bei einem "nominellen" oder Referenzhintergrundgraupegel (beispielsweise Null) für die unbekannte Lötmitteldicke $G_0(\text{UNKNOWN})$ in der folgenden Funktionsbeziehung verwendet wird:

$$\Delta G_0(\text{UNKNOWN}) = A(1 - e^{-k_1 t_U}) + B(1 - e^{-k_2 t_U}) \quad (7)$$

wobei Anpassungskonstanten A , B , k_1 und k_2 vorher unter Verwendung von Kalibrierungsdaten bestimmt wurden.

[0081] Zusammenfassend wird der gemessene Datenpunkt (BG , ΔG), der der unbekanntem Lötmitteldicke t_U entspricht, in der Gleichung (6) verwendet, um den unbekanntem ΔG -Achsen-Schnittpunkt, $\Delta G_0(\text{UNKNOWN})$, für die unbekanntem Dicke t_U zu berechnen. Die Gleichung (7) wird dann verwendet, um den Wert der unbekanntem Dicke t_U zu berechnen. Alternativ kann die Gleichung (7) verwendet werden, um eine Nachschlagtabelle (LUT) von Lötmitte-Delta-graupegeln (bei einem "nominellen" oder Referenzhintergrundgraupegel von Null) über der Dicke zu erzeugen, um die Berechnung zu beschleunigen. Da die LUT, die aus Gleichung (7) erzeugt wird, mehrere Paarungen von Graupegeln für Lötmitte verschiedener Dicken, die auf einen Hintergrund von Null korrigiert sind, ΔG_0 und entsprechenden Dicken t aufweist, ist es eine einfache Sache, die Dicke zu finden, die für einen gemessenen Datenpunkt $\Delta G_0(\text{UNKNOWN})$ entspricht. Das heißt, daß, sobald der Lötmitte-Delta-graupegel bei dem "nominellen" oder Referenzhintergrundgraupegel (bei diesem Beispiel Null) $\Delta G_0(\text{UNKNOWN})$ für einen gemessenen unbekanntem Punkt (BG , ΔG) unter Verwendung von Gleichung (6) bestimmt ist, die Dicke des Lötmitte, das durch den Wert von $\Delta G_0(\text{UNKNOWN})$ dargestellt wird, in der LUT zu finden ist, wo derselbe mit der entsprechenden Lötmitteldicke t paarweise dargestellt ist. Eine Interpolation zwischen Werten in der LUT kann verwendet werden, wenn der Wert von $\Delta G_0(\text{UNKNOWN})$ nicht exakt mit dem Eintrag in der LUT übereinstimmt.

[0082] Es wurde herausgefunden, daß das lineare Schattierungskorrekturverfahren, das oben beschrieben ist, nur über einen begrenzten Dickenbereich genau sein kann. Diese begrenzte Genauigkeit hat ihre Ursache darin, daß die tatsächlichen Aufzeichnungen der Kurven des Delta-Grau-Pegels aufgrund des Lötmitte bei einer konstanten Lötmitteldicke (ΔG) über dem Hintergrundgraupegel (BG) nur näherungsweise linear sind. Zusätzlich kann sich der BG -Achsen-Schnittpunkt BG_{MAX} , ändern, wenn die Röntgenkameraeinstellungen geändert werden (beispielsweise die Kameraverstärkung, das Sichtfeld, usw.), wodurch eine neue Kalibrierung erforderlich wird.

Lötmitteldickenbestimmung unter Verwendung einer nicht-linearen Schattierungskorrektur

[0083] Die vorliegende Erfindung verwendet eine nicht-lineare Schattierungskorrekturprozedur, um die Genauigkeit und Wiederholbarkeit des linearen Schattierungskorrekturverfahrens, das oben beschrieben ist, zu verbessern. Um die folgende Erläuterung der nicht-linearen Schattierungskorrekturprozedur zu vereinfachen, wird der spezielle Fall eines Lötmitte, das durch Kupfer schattiert ist, betrachtet. Es sollte jedoch verstanden werden, daß die Erfindung nicht auf diese Kombination von Materialien begrenzt ist und auch auf Anordnungen, die mehr als zwei Komponenten aufweisen, anwendbar ist.

[0084] Bei der vorliegenden Erfindung werden die Graupegel von Röntgenbildern einer Anzahl von Testabschnitten, die bekannte Dicken eines Lötmitte enthalten, das mit verschiedenen Mengen von Kupfer schattiert ist, gemessen. Durch eine Kombination theoretischer und empirischer Argumente wurde herausgefunden, daß der Einfluß der Schattierung durch eine spezielle nicht-lineare Gleichung mit drei freien Parametern beschrieben werden kann. Es wurde ferner herausgefunden, daß zwei der drei Parameter Charakteristika des AXI-Systems und nicht Funktionen der Menge an Kupfer oder Lötmitte in dem Röntgenstrahlweg sind. Ein Aspekt der Systemkalibrierung umfaßt die Abschätzung und die Speicherung dieser zwei Parameter. Vordergrund- und Hintergrund-Grauegelwerte von einer unbekanntem Probe sind ausreichend, um den dritten Parameter festzulegen, wodurch der Schattierungseffekt für diese Probe vollständig charakterisiert wird. Folglich ist es möglich, die zwei gespeicherten Systemparameter und die bekannte Funktionsform der Schattierungsgleichung zu verwenden, um die Werte zu extrapolieren, die unter "Standard"-Schattierungsbedingungen gemessen worden wären. (Typischerweise wird "keine Schattierung", d.h. ein Hintergrund von Null, als die Standardbedingung verwendet.) Da jede gemessene Probe unter Verwendung dieses Lösungsansatzes ohne wei-

teres auf Standardbedingungen umgewandelt werden kann, besteht kein Bedarf nach einer zweidimensionalen Dickenkalibrierung. Stattdessen reicht eine einfache eindimensionale Kurve aus, da Messungen stets auf einen Null-Hintergrund korrigiert werden können.

[0085] Die nicht-lineare Schattierungskorrekturtechnik der vorliegenden Erfindung basiert auf folgenden zwei Annahmen:

1) Aufzeichnungen des Delta-Grau-Pegels ($y = \Delta G = F - B$) aufgrund eines Lötmittels mit einer konstanten Lötmitteldicke (y -Achse) über einem Hintergrund-Grau-Pegel ($x = B$, x -Achse) können durch Punkte angenähert werden, die auf einem linken Zweig einer Reihe von hyperbolischen Kurven angeordnet sind, die folgendermaßen zwei gemeinsame Parameter aufweisen:

A) einen gemeinsamen x -Achsen-Wert (d.h. BG-Achsen-Wert) bei dem jede hyperbolische Kurven ihren minimalen y -Wert (d.h. ΔG) annimmt; und

B) einen gemeinsamen x -Achsen-Schnittpunkt bei einem maximalen Hintergrundgraupegel $x = BG_{MAX}$; und

2) Bei einem "nominellen" oder Referenzhintergrund-Graupegel (beispielsweise Null) kann die Funktion des Delta-Grau-Pegels aufgrund des Lötmittels (y_0) über der Lötmitteldicke (t) durch eine eingepaßte Kurve einer bekannten Form, beispielsweise eine Summe von Exponentialkurven, angenähert werden. Bei den folgenden Beispielen wurde ein Referenzhintergrund-Graupegel von Null der Bequemlichkeit halber ausgewählt. Es ist jedoch klar, daß andere von Null verschiedene Referenzhintergrund-Graupegel ausgewählt werden können.

[0086] Gemäß Annahme 1) der nicht-linearen Schattierungskorrekturtechnik wird jeder von mehreren Sätzen von Kalibrierungsdaten gemeinsam an hyperbolische Funktionen der folgenden Form angepaßt:

$$y = \Delta G = \sqrt{(x-a)^2 + b^2} + c \quad (8)$$

wobei a die x -Achsen-Koordinate ist, bei der y einen minimalen Wert aufweist.

[0087] Beispielsweise sind in **Fig. 8** eine erste Kalibrierungskurve **510** und eine zweite Kalibrierungskurve **520** gezeigt. Die erste Kalibrierungskurve **510** weist mehrere Kalibrierungsdatenpunkte **512** auf, während die zweite Kalibrierungskurve **520** mehrere Kalibrierungsdatenpunkten **514** aufweist. Auf der ersten Kalibrierungskurve **510** stellt jeder Kalibrierungsdatenpunkt **512** einen Deltagraupegel einer Lötmitteldicke von 195,6 μm (7,7 mil) in Kombination mit einem unbekanntem Hintergrundmaterial (beispielsweise unbekannte Dicken von Schaltungsplattenmaterialien einschließlich Kupfer) und unterschiedlichen Dicken eines Kupferhintergrunds dar. Beispielsweise ist der Kalibrierungsdatenpunkt **512a** der Deltagraupegel, der einer Lötmitteldicke von 195,6 μm (7,7 mil) eines Lötmittels in Kombination mit einer Hintergrundkupferdicke von 0 μm (0,0 mil) entspricht, während der Datenpunkt **512f** der Deltagraupegel ist, der dem Lötmittel einer Dicke von 195,6 μm (7,7 mil) in Kombination mit einer Kupferdicke von 635 μm (25 mil) entspricht, usw.. In gleicher Weise stellt auf der zweiten Kalibrierungskurve **520** jeder Kalibrierungsdatenpunkt **514** einen Deltagraupegel für eine Lötmitteldicke von 30,5 μm (1,2 mil) in Kombination mit unterschiedlichen Hintergrundkupferdicken dar. Beispielsweise ist der Kalibrierungsdatenpunkt **514a** der Deltagraupegel, der einer Lötmitteldicke von 30,5 μm (1,2 mil) in Kombination mit einer Hintergrundkupferdicke von 0,0 μm (0,0 mil) entspricht, während der Kalibrierungsdatenpunkt **514f** der Deltagraupegel ist, der dem Lötmittel einer Dicke von 30,5 μm (1,2 mil) in Kombination mit einer Hintergrundkupferdicke von 635 μm (25 mil) entspricht, usw.. Die Analyse der ersten und der zweiten Kalibrierungskurve **510** und **520** durch eine beliebige einer Vielzahl von empirischen und/oder analytischen Techniken kann verwendet werden, um eine beste Anpassung für jede hyperbolische Kalibrierungskurve, die in der Familie von Kalibrierungsdaten enthalten ist, zu erreichen, mit den Beschränkungen, daß jede hyperbolische Kurve ihren minimalen y -Wert bei dem gleichen x -Wert aufweist, d.h. $x = a$, und daß jede Kurve den gleichen x -Achsen-Schnittpunkt aufweist. Für die Datenpunkte, die in **Fig. 8** gezeigt sind, ist zu sehen, daß die Kurven **510** und **520**, die an die Datenpunkte **512** bzw. **514** angepaßt sind, durch die Verwendung eines Werts von $x = a = 455$ und eines x -Achsen-Schnittpunkts bei $x = BG_{MAX} = 222$ erhalten werden. Wie in **Fig. 8** gezeigt ist, ist die erste Kalibrierungskurve **510** eine Anpassung an die Datenpunkte **512** einer hyperbolischen Funktion der Form, die in Gleichung (8) gezeigt ist, wobei die hyperbolische Funktion, die durch die Kalibrierungskurve **510** dargestellt ist, einen minimalen y -Wert bei $x = a$ aufweist und die x -Achse bei $x = BG_{MAX}$ schneidet. Gemäß der Annahme (1) ist die zweite Kalibrierungskurve **520** eine Anpassung an die Datenpunkte **514** einer hyperbolischen Funktion der Form, die in Gleichung (8) gezeigt ist, wobei die hyperbolische Funktion, die durch die Kalibrierungskurve **520** dargestellt ist, ebenfalls einen minimalen y -Wert bei $x = a$ aufweist, und ebenfalls die x -Achse bei $x = x_0 = BG_{MAX}$ schneidet. Die y -Achsen-Schnittpunkte der angepaßten Kalibrierungskurven **510** und **520** werden durch eine Extrapolation der angepaßten Kurven bestimmt. Wie bei diesem Beispiel gezeigt ist, ist der extrapolierte y -Achsen-Schnittpunkt der ersten Kalibrierungskurve **510** bei näherungsweise $y_0 = 128$ angeordnet, während der extrapolierte y -Achsen-Schnittpunkt der zweiten Kalibrierungskurve **520** bei näherungsweise $y_0 = 30$ angeordnet ist. Wie vorher erläutert wurde, entsprechen die y -Achsen-Schnittpunkte der Kurven **510** und **520** "nominellen" oder Referenzhintergrundgraupegeln von Null für die jeweiligen Lötmitteldi-

cken, die durch die Kurven **510** und **520** dargestellt sind. Es sei bemerkt, daß die Dicken des Hintergrundkupfers, die verwendet sind, um die bekannten Lötmittekalibrierungsdicken zu schattieren, nicht bekannt sein müssen, um unbekannte Lötmitte-dicken zu bestimmen. Wenn es jedoch erwünscht ist, sowohl unbekannte Lötmitte- als auch unbekannte Kupfer-Dicken zu bestimmen, sollten sowohl die Lötmitte- als auch die Kupfer-Dicken, die bei der Kalibrierung verwendet werden, bekannt sein.

[0088] Nach dem Anpassen der Kalibrierungsdaten **512**, **514** und dem Erhalten der Werte für $x = a$ und $x = x_0 = BG_{MAX}$ aus diesen Anpassungen (wobei eine detaillierte Beschreibung der zwei Prozeduren zum Bestimmen der Werte für $x = a$ und $x = x_0 = BG_{MAX}$ nachfolgend dargelegt wird), die die Kurven **510** und **520** definieren, wird der Wert eines Deltagraupegels bei einem "nominellen" Hintergrundwert von Null für einen unbekanntem Datenpunkt (x,y) wie folgt erhalten. Es sei in Erinnerung gerufen, daß jede Kalibrierungskurve **510** und **520** durch eine Gleichung der Form der Gleichung (8) dargestellt ist, wobei $x = a$ die x-Achsen-Koordinate ist, bei der y (für jede Kalibrierungskurve) einen minimalen Wert besitzt. Überdies besitzen alle Kalibrierungskurven einen gemeinsamen x-Achsen-Schnittpunkt bei $x = x_0 = BG_{MAX}$. Folglich wird bei $x = x_0 = BG_{MAX}$ die Gleichung (8) zu:

$$(BG_{MAX} - a)^2 + b^2 = c^2 \quad (9)$$

oder

$$b^2 = c^2 - (BG_{MAX} - a)^2 = (y - c)^2 - (x - a)^2 \quad (10)$$

[0089] Ein Erweitern und Sammeln von Ausdrücken in der Gleichung (10) ergibt den folgenden Ausdruck für "c" bezüglich "x", "y", "a" und "BG_{MAX}":

$$c = \frac{y^2 - (x - BG_{MAX})(x + BG_{MAX}) + 2a(x - BG_{MAX})}{2y} \quad (11)$$

[0090] Somit können für jeden gegebenen unbekanntem Datenpunkt (x, y) Werte für "c" und "b" aus den Gleichungen (10) und (11) berechnet werden. Die Verwendung der bekannten Werte von "a", "b" und "c" in der Gleichung (8) bei $x = 0$ ergibt den Wert von y_0 , d.h. den Deltagraupegel bei einem "nominellen" Hintergrundwert von Null für den unbekanntem Datenpunkt (x, y) . Es sei beispielsweise die Messung eines unbekanntem (x, y) -Datenpunkts betrachtet, der bei $x = BG = 100$ und $y = \Delta G = 35$ angeordnet ist, für das System, das die Kalibrierungsdaten **512** und **514**, die in **Fig. 8** gezeigt sind, aufweist. Der Deltagraupegel bei einem "nominellen" Hintergrundwert von Null, y_0 , für den unbekanntem Datenpunkt (x, y) wird wie folgt berechnet. Wie vorher beschrieben wurde, gilt gemäß der Annahme 1) der nicht-linearen Schattierungskorrekturtechnik für dieses System: $a = 455$ und $BG_{MAX} = 222$. Die Verwendung dieser Werte in den Gleichungen (11) und (10) ergibt die Werte von $c = -1007,3$ und $b = 960.364$. Folglich lautet die Gleichung einer hyperbolischen Kurve, die den gemessenen Datenpunkt **(100, 35)** auf ihrem linken Zweig aufweist, und die ein Minimum bei $x = a = 455$ und einen x-Schnittpunkt bei $x = 222$ besitzt, wie folgt:

$$y = \sqrt{(x - 455)^2 + 960,364 - 1,007} \quad (12)$$

[0091] Die hyperbolische Kurve **530**, die durch die Gleichung (12) beschrieben ist, ist in **Fig. 8** gezeigt. Die Gleichung (12) besitzt einen y-Achsen-Schnittpunkt, d.h. einen Deltagraupegel bei einem "nominellen" Hintergrundwert von Null, von $y_0 = 73,5$.

[0092] Wie vorher erwähnt wurde, kann eine Analyse der ersten und der zweiten Kalibrierungskurven **510** und **520** durch eine beliebige Vielzahl von empirischen und/oder analytischen Techniken verwendet werden, um eine beste Anpassung für jede hyperbolische Kalibrierungskurve, die in der Familie von Kalibrierungsdaten enthalten ist, zu erreichen, mit den Beschränkungen, daß jede hyperbolische Kurve ihren minimalen y-Wert bei dem gleichen x-Wert, d.h. $x = a$, aufweist, und daß jede Kalibrierungskurve den gleichen x-Achsen-Schnittpunkt, d.h. $x = x_0 = BG_{MAX}$ aufweist. Eine erste Prozedur verwendet ein Versuchs- und Fehler-Verfahren, um Anpassungen nach der Methode der kleinsten Quadrate an einzelne Kurven zu kombinieren, während ein zweites bevorzugtes Verfahren alle Daten gleichzeitig anpaßt.

[0093] Bei dem Versuchs- und Fehler-Verfahren werden hyperbolische Kurven der Form, die durch die Gleichung (8) definiert ist, an einzelne Sätze von Kalibrierungsdaten angepaßt. x-Achsen-Schnittpunkte ($x = x_0 = BG_{MAX}$) für jede der einzelnen Kalibrierungskurven werden verglichen, und ein gemeinsamer Wert wird durch ein Versuchs- und Fehler-Verfahren (Sekantenverfahren) bestimmt. In gleicher Weise kann der x-Achsen-Wert, bei dem jede hyperbolische Kurve ihren minimalen y-Wert aufweist, d.h. $x = a$, durch ein Versuchs- und Fehler-Verfahren gefunden werden. Unter Verwendung dieses Werts von $x = a$ und eines Dummy-Datenpunkts an dem x-Schnittpunkt ($x = x_p = BG_{MAX}$) wird jeder Satz von Kalibrierungsdaten neu an eine Kalibrierungskurve

der Form, die durch Gleichung (8) definiert ist, angepaßt. Obwohl diese Prozedur für bestimmte Anwendungen wirksam ist, ist sie iterativ und etwas empirisch, wobei sie für eine Produktionsverwendung nicht ausreichend sein kann. Alternativ kann eine zweite Prozedur unter Verwendung nicht-linearer kleinster Quadrate, um alle Daten gleichzeitig anzupassen, verwendet werden.

[0094] Bei der zweiten Prozedur werden " x_0 " und " a " durch eine nicht-lineare Kleinste-Quadrate-Anpassung an die Kalibrierungsdatensätze bestimmt. Bei diesem Lösungsansatz wird Gleichung (8) umgeschrieben, derart, daß die Variablen " b^2 " und " c " durch " x_0 ", " a " und " y_0 " dargestellt sind, wobei " y_0 " der y-Achsen-Schnittpunkt einer speziellen hyperbolischen Kurve ist. Folglich ändert sich " y_0 " mit jeder Kurve in der Familie, während die gleichen Werte von " x_0 " und " a " durch alle Kurven in der Familie gemeinsam verwendet werden. Folglich lauten an dem y-Achsen-Schnittpunkt $(0, y_0)$ einer speziellen hyperbolischen Kurve die Gleichungen (11), (10) und (8) wie folgt:

$$c = \frac{x_0^2 + y_0^2 - 2ax_0}{2y_0} \quad (13)$$

$$b^2 = c^2 - (x_0 - a)^2 = \left[\frac{x_0^2 + y_0^2 - 2ax_0}{2y_0} \right]^2 - (x_0 - a)^2 \quad (14)$$

$$y = \left[(x - a)^2 + \left(\frac{x_0^2 + y_0^2 - 2ax_0}{2y_0} \right)^2 - (x_0 - a)^2 \right]^{1/2} + \frac{x_0^2 + y_0^2 - 2ax_0}{2y_0} \quad (15)$$

[0095] Folglich lauten die Ableitungen von " y " bezüglich " a ", " x_0 " und " y_0 " wie folgt:

$$\frac{dy}{da} = \frac{(x_0 - x)y_0 - x_0y}{y_0(y - c)} \quad (16)$$

$$\frac{dy}{dx_0} = \frac{(x_0 - a)(y - y_0)}{y_0(y - c)} \quad (17)$$

$$\frac{dy}{dy_0} = \frac{y(y_0^2 - x_0^2 + 2ax_0)}{2y_0^2(y - c)} \quad (18)$$

[0096] Es sei bemerkt, daß, da " c " durch eine Funktion von " a ", " x_0 " und " y_0 " in Gleichung (13) gegeben ist, die Gleichungen (16), (17) und (18) die Ableitungen von " y " als Funktionen von " a ", " x_0 " und " y_0 " ausdrücken. Folglich drücken die Gleichungen (8), (16), (17) und (18) " y " und seine Ableitungen als Funktionen von " a ", " x_0 " und " y_0 " aus. Unter Verwendung dieser Ausdrücke können angepaßte Werte für " a ", " x_0 " und " y_0 " aus den Kalibrierungsdatensätzen unter Verwendung einer nicht-linearen Kleinste-Quadrate-Anpassungstechnik, beispielsweise der Levenberg-Marquardt-Technik oder anderer nicht-linearer Standard-Optimierungstechniken, erhalten werden. Die Optimierungstechniken werden verwendet, um die Summe der Quadratfehler (oder x^2 , wenn Varianzen bekannt sind) zwischen der angepaßten Funktion und dem gesamten Satz von Kalibrierungsdatenpunkten für alle Kurven in der Familie zu minimieren. Beispiele von Optimierungstechniken können in einem Buch mit dem Titel "Numerical Recipes for C" von Press u. a., veröffentlicht durch Cambridge University Press 1992, gefunden werden.

[0097] Durch das Anwenden der Annahme 2) der nicht-linearen Schattierungskorrekturtechnik kann die Funktion des Delta-Grau-Pegels aufgrund des Lötmittels (y_0) über der Lötmitteldicke (t) durch eine angepaßte Kurve einer bekannten Form, beispielsweise einer Summe von Exponentialfunktionen, angenähert werden:

$$y_0(t) = p - \sum_i q_i e^{-r_i t} \quad (19)$$

wobei p , q_i und r_i Anpassungskonstanten sind. Wenn beispielsweise die Summe von zwei Exponentialkurven ausgewählt ist, kann die unbekannte Lötmitteldicke (t) durch die Verwendung der Lötmittel-Deltagraupegel bei einem "nominellen" oder Referenzhintergrund-Graupegel von Null (y_0) in der folgenden Funktionsform für die

Summe von zwei Exponentialfunktionen bestimmt werden:

$$y_0(t) = \alpha - \beta e^{-k_1 t} - \gamma e^{-k_2 t} \quad (20)$$

wobei Anpassungskonstanten α , β , γ , k_1 und k_2 durch das Anpassen an die Kalibrierungsdaten bestimmt werden. Die fünf Anpassungsparameter können basierend auf den folgenden physikalischen Charakteristika der Daten auf drei reduziert werden. Bei einer Lötmitteldicke von Null ist der Lötmedium-Delta-Gräupegel bei einem "nominellen" Hintergrundgräupegel von Null (y_0) Null, d.h. $y_0(0) = 0$. Der maximale Wert des Lötmedium-Delta-Gräupegels bei einem "nominellen" Hintergrundgräupegel von 0 ($y_{0\text{MAX}}$) ist BG_{MAX} , d.h. $y_{0\text{MAX}}(t \rightarrow \infty) = BG_{\text{MAX}}$ (basierend auf theoretischen und empirischen Beobachtungen). Unter Verwendung dieser Informationen können die fünf Anpassungsparameter in Gleichung (20) auf drei reduziert werden, da $y_0(0) = \alpha - \beta - \gamma = 0$ und $y_0(t \rightarrow \infty) = \alpha = BG_{\text{MAX}}$. Folglich lautet Gleichung (20) wie folgt:

$$y_0(t) = BG_{\text{MAX}} - \beta e^{-k_1 t} - (BG_{\text{MAX}} - \beta) e^{-k_2 t} \quad (21)$$

wobei die Anpassungskonstante β , k_1 und k_2 durch Anpassungen an bekannte Lötmitteldicken und entsprechende Delta-Gräupegel bei einem "nominellen" Hintergrundgräupegel von 0, die von dem hyperbolischen Anpassungen an die Kalibrierungsdaten abgeleitet werden, bestimmt werden. Bei Anwendungen, die einen größeren Durchsatz erfordern, kann es vorteilhaft sein, die oben beschriebene Kalibrierungsprozedur zu verwenden, um eine Nachschlagtabelle (LUT) oder eine Oberflächentabelle von Hintergrund (x) über Delta-Gräu (y) über Lötmitteldicke (t) zu erzeugen.

Typische Kalibrierungsdaten und Vergleich von linearen gegenüber nicht-linearen Schattierungskorrekturtechniken

[0098] Die linearen und nicht-linearen Schattierungskorrekturtechniken, die oben beschrieben sind, wurden auf Kalibrierungsabschnitte mehrerer Lötmitteldicken angewendet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen und ein Vergleich der zwei Techniken wird nachfolgend dargelegt. Ein Kalibrierungsfeld von Lötmitteldicken, das neun bekannte Lötmitteldicken aufweist, wurde mit verschiedenen Dicken von Kupfer gemessen. Die neun Lötmitteldicken in Mikrometern betragen 30,5; 40,6; 91,4; 144,8; 195,6; 246,4; 348,0; 396,2; und 508 (in mil: 1,2; 1,6; 3,6; 5,7; 7,7; 9,7; 13,7; 15,6; und 20). Delta-Gräupegel als eine Funktion der Hintergrundpegel wurden von fünfzehn unterschiedlichen bekannten Dicken von Kupfer in Kombination mit jeder der bekannten Lötmitteldicken gemessen. Die fünfzehn bekannten Kupferdicken, die bei diesen Messungen verwendet wurden, waren in mm: 0,127, 0,254, 0,381, 0,508, 0,635, 0,762, 1,041, 1,295, 1,549, 1,854, 2,108, 2,362, 2,514 und 2,794 (in mil: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 41, 51, 61, 73, 83, 93, 99 und 110).

[0099] **Fig. 9** zeigt eine Aufzeichnung der gemessenen Delta-Gräuwerte über den Hintergrundpegeln für diese neun Sätze von Kalibrierungsdaten, wobei der Hintergrundpegel durch die Anwendung der fünfzehn unterschiedlichen Dicken von Kupfer auf jeden Lötmitteldickenbereich, der oben beschrieben ist, geändert wurde. Wie in **Fig. 9** gezeigt ist, wurden neun hyperbolische Kurven gemäß der Annahme 1) der nicht-linearen Schattierungskorrekturtechnik an die Datenpunkte angepaßt.

[0100] Ein Vergleich der linearen Schattierungskorrekturtechnik mit der nicht-linearen Schattierungskorrekturtechnik ist in den **Fig. 10A** und **10B** dargestellt. **Fig. 10A** zeigt die berechnete Lötmitteldicke über der Kupferhintergrunddicke für die neun Sätze von Kalibrierungsdaten, wobei die Lötmitteldicken mit der linearen Schattierungskorrekturtechnik berechnet wurden. Aus **Fig. 10A** ist zu erkennen, daß die lineare Schattierungskorrekturtechnik eine zu hohe Abschätzung der Lötmitteldicken zur Folge hat, wenn die Hintergrundkupferdicken zunehmen. **Fig. 10B** zeigt die berechnete Lötmitteldicke über der Kupferhintergrunddicke für die neun Sätze von Kalibrierungsdaten, wobei die Lötmitteldicken mit der nicht-linearen Schattierungskorrekturtechnik (hyperbolischen Anpassungen) berechnet wurden. Die nicht-lineare Schattierungskorrekturtechnik hat deutlich genauere Bestimmung der Lötmitteldicken zur Folge, speziell wenn die Hintergrundkupferdicken zunehmen.

Zweidimensionale (2-D) Lötmitteldickenbestimmung

[0101] Es ist häufig hinsichtlich der Berechnungsgeschwindigkeiten und dergleichen vorteilhaft, Lötmediumkalibrierungsinformationen hinsichtlich einer Oberfläche oder einer Nachschlagtabelle (LUT) die durch Hintergrund (x oder BG) über Delta-Gräu (y oder ΔG) über Lötmitteldicke (t) definiert ist, darzustellen. Eine solche Oberfläche oder LUT kann durch folgende Prozedur erzeugt werden:

- 1) Messen einer Anzahl von Kalibrierungspunkten, beispielsweise der neun Sätze von Daten, die in **Fig. 9** gezeigt sind; und
- 2) Aufbauen einer DeLaunay-Triangulation der x -über- y -Ebene (d.h. BG über ΔG) und Verwenden einer linearen oder polynomischen Interpolation, um die Dickenwerte auf einem regelmäßigen Gitter von x über y

(d.h. BG über ΔG) aufzufüllen, was eine zweidimensionale Nachschlagtabelle (LUT) der Lötmitteldicke (t) als eine Funktion des Hintergrunds (x oder BG) über Delta-Grau (y oder ΔG) zur Folge hat.

[0102] Dieser Lösungsansatz kann jedoch mehrere Probleme zur Folge haben, einschließlich: 1) einer Koordinatensingularität bei $x = BG = BG_{MAX} = x_0$; 2) künstliche Wellen, Extrema, Grate, usw., in der Oberfläche; und 3) keine physikalisch bedeutsame Oberfläche außerhalb der Abtastregion, es sei denn, eine Extrapolation wird verwendet, wobei in diesem Fall dieselbe hochgradig ungenau und unzuverlässig sein kann.

[0103] Viele dieser Probleme können durch die folgende Prozedur gelöst werden: es sei die Erinnerung der Physik einer Röntgenstrahldämpfung in Verbindung mit einer Zweikomponentenanordnung, wie sie in **Fig. 5** beschrieben ist, in Erinnerung gerufen, bei der eine Vordergrundintensität (d.h. ein Bildgraupegel) y_f durch folgende allgemeine Funktionsform beschrieben ist:

$$y_f = y_0 - \int \alpha(E) e^{-\beta(E)t_1} e^{-\gamma(E)t_2} dE \quad (22)$$

oder ihre diskrete Näherung

$$y_f = y_0 - \sum_i \alpha_i e^{-\beta_i t_1} e^{-\gamma_i t_2} \quad (23)$$

wobei t_1 und t_2 die Dicken des ersten Materials bzw. des zweiten Materials sind. Bei der allgemeinen Funktionsform: 1) ist das Röntgenquellen-Energiespektrum als eine Funktion der Energie verteilt, wobei Gewichtungen durch den Parameter $\alpha(E)$ bestimmt sind; und (2) sind $\beta(E)$ und $\gamma(E)$ die Röntgenstrahldämpfungskoeffizienten für das erste bzw. das zweite Material. Bei der diskreten Näherung gilt: 1) das gesamten Röntgenquellen-Energiespektrum ist in eine bestimmte Anzahl von Bändern i aufgeteilt, wobei die gesamte Quellenintensität als eine Funktion der Röntgenquellenenergie und der Detektorempfindlichkeit unter den Bändern verteilt ist, wobei Gewichtungen für jedes Band i durch den Parameter α_i bestimmt sind; und 2) β_i und γ_i sind die effektiven linearen Dämpfungskoeffizienten für Röntgenstrahlen in einem Band i für das erste bzw. das zweite Material. Die folgende Erläuterung findet hinsichtlich der diskreten Näherung statt, wobei es für einen Fachmann jedoch klar ist, daß ein gleichartiges Verfahren auch für die allgemeine Funktionsform gilt. Eine Hintergrundintensität (d.h. ein Bildgraupegel) $y_b(t_2 = 0)$ wird in der diskreten Näherungsform wie folgt beschrieben:

$$y_b = y_0 - \sum_i \alpha_i e^{-\beta_i t_1} \quad (24)$$

[0104] Delta-Grau, die Differenz zwischen Vordergrund und Hintergrund, ist wie folgt gegeben:

$$\Delta G = y_f - y_b = \sum_i \alpha_i e^{-\beta_i t_1} - \sum_i \alpha_i e^{-\beta_i t_1} e^{-\gamma_i t_2} \quad (25)$$

[0105] Unter Verwendung der gemessenen Werte des Vordergrunds (y_f) und des Hintergrunds (y_b), oder gleichbedeutend ΔG , für eine Reihe von Kalibrierungsstandards mit bekannten Werten von t_1 und/oder t_2 für jeden Kalibrierungsstandard werden die Hintergrundmessungen verwendet, um eine Kleinste-Quadrate-Anpassung bezüglich y_0 , α_i und β_i für $i = 1$ bis n , wobei n , die Anzahl von Bändern, im voraus spezifiziert wird, gemäß Gleichung (24) durchzuführen. Unter Verwendung dieser angepaßten Werte von y_0 , α_i und β_i für $i = 1$ bis n können die Vordergrundmessungen verwendet werden, um eine Kleinste-Quadrate-Anpassung für γ_i für $i = 1$ bis n gemäß Gleichung (23) durchzuführen.

[0106] Eine in sich konsistente Näherung für die tatsächliche Hintergrund- (BG) über Delta-Grau- (ΔG) über Lötmitteldicke(t) – Oberfläche oder -Nachschlagtabelle (LUT), die frei von Wellen ist und eine konsistente Extrapolation unterstützt, kann unter Verwendung dieser angepaßten Werte der Parameter y_0 , α_i , β_i und γ_i erzeugt werden. Alternativ sei angemerkt, daß diese Parameter auch durch eine Simulation erhalten werden können, und nicht eine Regression, oder durch eine Kombination der zwei Verfahren. Beispielsweise könnte man die Parameter α_i , β_i und γ_i simulieren und y_0 anpassen, oder y_0 anpassen und α_i , β_i und γ_i skalieren. Man kann auch die nicht-lineare Schattierungskorrekturprozedur, die oben beschrieben ist, verwenden, um eine Oberfläche oder eine LUT zu erzeugen, die konsistent und frei von Wellen sind. **Fig. 11A** zeigt ein Beispiel einer solchen Hintergrund- (BG) über Delta-Grau- (ΔG) über Lötmitteldicke- (t) -Oberfläche (die aus den Kalibrierungsdaten, die in **Fig. 9** gezeigt sind, erzeugt ist) gemäß der obigen Erläuterung.

[0107] Ungeachtet dessen, wie die Parameter y_0 , α_i , β_i und γ_i erhalten werden, kann eine in sich konsistente Nachschlagtabelle erzeugt werden. Für jeden Hintergrundwert, der in der Nachschlagtabelle erwünscht ist, wird Gleichung (24) für t_1 gelöst. Dies kann unter Verwendung des Newton-Verfahrens oder einer einfachen Golden Section Search erfolgen. Da es bekannt ist, daß eine Lösung existiert und die Funktion konvex ist, ist eine binäre Suche besser als eine Golden Section Search. Der Durchsatz ist nicht kritisch, da dies nur beim Aufbau der Nachschlagtabelle geschieht. Für jeden Vordergrundwert, der in der Nachschlagtabelle erwünscht

ist, wird Gleichung (23) für t_2 unter Verwendung des vorher bestimmten Werts von t_1 gelöst. Folglich wird der Eintrag t_1 an der Zeile y_b und der Spalte y_f in der zweidimensionalen Nachschlagtabelle plaziert. Es sei bemerkt, daß nur die Hälfte eines quadratischen Arrays in den meisten Fällen benötigt wird. Wenn es jedoch erwünscht ist, die Fähigkeit zu besitzen, Werte von t_2 auszulesen, können die Werte von t_2 in der anderen Hälfte des Arrays gespeichert werden.

[0108] Im Betrieb wird die Nachschlagtabelle wie folgt verwendet. Es sei angenommen, daß die Nachschlagtabelle unter Verwendung von ganzzahligen Grauwerten von 0 bis 255 für Vordergrund- und Hintergrund-Einträge aufgebaut ist. Um die Dicke t , die einem spezifischen Hintergrund/Vordergrund-Paar (BG, FG) entspricht, nachzuschlagen, sei:

$$R_1 = \lfloor \text{LBG} \rfloor$$

$$R_2 = \lceil \text{BG} \rceil$$

$$C_1 = \lfloor \text{LFG} \rfloor$$

$$C_2 = \lceil \text{FG} \rceil$$

wobei $\lfloor x \rfloor$ gleich der größten ganzen Zahl $\leq x$ ist, und $\lceil x \rceil$ gleich der kleinsten ganzen Zahl $\geq x$ ist. Die Dicke, die (BG, FG) entspricht, kann dann durch eine bilineare Interpolation abgeschätzt werden. Beispielsweise sei:

$$t_a = t[R_2, C_1]$$

$$t_b = t[R_2, C_2]$$

$$t_c = t[R_1, C_2]$$

$$t_d = t[R_1, C_1]$$

und

$$u = (\text{BG} - R_1) / (R_2 - R_1)$$

$$v = (\text{FG} - C_1) / (C_2 - C_1)$$

somit

$$t(\text{BG}, \text{FG}) \approx uv t_b + (1-u)v t_c + (1-u)(1-v) t_d + u(1-v) t_a$$

[0109] Andere Interpolationsschemata können verwendet werden, einschließlich einer linearen Interpolation von den drei nächstliegenden Punkten, oder Schemata höherer Ordnung. Es sei ferner bemerkt, daß, wenn entweder FG oder BG eine ganze Zahl ist, die Interpolation in dieser Achse (Zeile oder Spalte) für einen größeren Durchsatz weggelassen werden kann. Wenn sowohl FG als auch BG ganze Zahlen sind, kann der entsprechende Dickenwert direkt nachgeschlagen werden. **Fig. 11B** zeigt eine graphische Darstellung einer Nachschlagtabelle LUT für Hintergrund (BG) über Delta-Grau (ΔG) über Lötmitteldicke (t) gemäß der vorliegenden Erfindung (die aus den Kalibrierungsdaten, die in **Fig. 9** gezeigt sind, erzeugt wurde). In **Fig. 12** sind die Ergebnisse von Lötmitteldicke über Hintergrund, die aus einer Nachschlagtabelle (die aus den Kalibrierungsdaten, die in **Fig. 9** gezeigt sind, erzeugt wurde) gemäß der obigen Erläuterung bestimmt wurden, gezeigt.

[0110] Die obigen Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung wurden hinsichtlich des Erzeugens einer Prozedur, einer Nachschlagtabelle oder einer Oberfläche, aus denen eine unbekannte Dicke, die bekannten Hintergrund- und Delta-Grau-Werten entspricht, bestimmt werden kann. Jedoch sind diese Techniken umkehrbar dahingehend, daß: 1) ein unbekannter Hintergrundwert, der bekannten Dicke- und Delta-Grau-Werten entspricht, ebenfalls bestimmt werden kann; und 2) ein unbekannter Delta-Grau-Wert, der bekannten Dicke-Werten und Hintergrund-Werten entspricht, ebenfalls bestimmt werden kann.

Einzel-Material-Kalibrierung

[0111] Die vorherigen Beschreibungen fanden im Zusammenhang mit einem ersten Material, beispielsweise einem Lötmittel, das durch ein zweites Material, beispielsweise ein G10-Schaltungsplattenmaterial, schattiert ist, statt. Jedoch ist die Erfindung auch auf eine Einzel-Material-Kalibrierung anwendbar, beispielsweise für ein Lötmittel, das durch ein Lötmittel schattiert ist. Ein Beispiel, wo dies auftreten könnte, ist die Inspektion von Lötstellen auf einer BGA-Komponente, wo ein signifikanter Teil des Hintergrunds, der die Bilder spezifischer Lötstellen umgibt, aufgrund des Lötmittels, das die Lötstellen umgibt, vorliegt.

[0112] Die Prozedur für diese Situation ist ähnlich den Prozeduren, die oben beschrieben sind. Zuerst werden die Grauegel einer Mehrzahl unterschiedlicher, bekannter Dicken eines Lötmittels T_i , das auf einem geeigneten Substrat angebracht ist, gemessen. Eine Kurve der folgenden Form (oder ein Äquivalent derselben):

$$y_F = y_0 - \sum_i \alpha_i e^{-\beta_i T_i} \quad (26)$$

wird an die gemessenen Werte bekannter Dicken angepaßt. In vielen Fällen sind wahrscheinlich zwei Energiebänder ausreichend, wobei jedoch zusätzliche Energiebänder verwendet werden können, wenn es erforder-

derlich ist, um eine gewünschte Genauigkeit zu erhalten. Die Anpassung kann durch Anpassen von sowohl y_0 , α_i als auch β_i erreicht werden. Wenn jedoch y_0 bekannt ist, müssen nur die übrigen Parameter angepaßt werden. Bei einer gegebenen Lötmitte-Hintergrundmessung B und einer Lötmitte-Vordergrundmessung F kann somit die Gleichung (26) invertiert werden, um die zwei entsprechenden Dicken T_F und T_B zu finden. Die interessierende Dicke, d.h. die Dicke der Lötstelle, ist dann durch $T_F - T_B$ gegeben.

[0113] Wie vorher kann diese Prozedur ebenfalls mit simulierten Kalibrierungsdaten implementiert werden. Simulationsfaktoren können folgende umfassen: a) spektrale Charakteristika der Röntgenquelle; und/oder b) die Winkelverteilung der Röntgenstrahlen, die durch die Röntgenquelle erzeugt werden; und/oder c) die Absorptionsfähigkeit und die spektrale Empfindlichkeit des Röntgendetektors; und/oder d) die Röntgenstrahl-Dämpfungseigenschaften der absorbierenden Materialien als Funktionen von Röntgenstrahl-Energie/Wellenlänge. Zusätzlich kann die Prozedur mit dem Aufbau einer Nachschlagtabelle implementiert werden.

Zusammenfassung Verzweigungen und Schutzbereich

[0114] Folglich wird der Leser erkennen, daß die vorliegende Erfindung viele der spezifischen Probleme, die bei der Inspektion von Lötmitteverbindungen auf Schaltungsplatinenanordnung angetroffen werden, löst. Besonders wichtig ist, daß dieselbe die Genauigkeit von Lötmitte-Dickenmessungen, die von Röntgenbildern der Lötmitteverbindung abgeleitet werden, verbessert. Überdies besitzt die vorliegende Erfindung zusätzliche Vorteile dahingehend, daß

dieselbe eine einzige, global konsistente Kalibrierung für jedes gewählte Material beim Vorliegen verschiedener Schattierungsbeträge durch ein zweites Material liefert;
 dieselbe bezüglich der Berechnungsanforderungen schnell ist;
 dieselbe bezüglich der Speicheranforderungen kompakt ist;
 dieselbe genauer ist als frühere Verfahren;

dieselbe numerisch invertierbar ist, derart, daß bei einem Drei-Parametersystem jeder der Parameter aus bekannten Werten der anderen zwei Parameter bestimmt werden kann;

dieselbe auf bekannte Standardkriterien zurückführbar ist, beispielsweise des National Institute of Standards & Technology (NIST) oder ähnlicher Standardorgane. Dieses Merkmal ermöglicht, daß Verfahreningenieure Dicken, die durch das Röntgensystem gemessen werden, auf physische Verbindungsstellenabmessungen beziehen. Eine Zurückführbarkeit kann erreicht werden, indem der Kalibrierungsstandard aus Materialien bekannter Reinheit aufgebaut wird, und indem Dicken des Kalibrierungsstandards unter Verwendung von Geräten, die selbst eine zurückführbare Kalibrierung aufweisen, gemessen werden;

dieselbe übertragbar ist, in dem Sinn, daß eine Messung der gleichen Verbindungsstelle auf mehreren Systemen gleichartige oder identische Dicken ergibt. Eine Übertragbarkeit erfordert, daß die Kalibrierung physikalisch signifikante Abweichungsquellen zwischen Systemen kompensiert; und dieselbe mehrere Kalibrierungen unterstützt. Mit dem Erscheinen von bleifreien Lötmitte können die Verbindungs- und Hintergrund-Zusammensetzungen von Platine zu Platine oder sogar innerhalb einer Platine variieren. Folglich ist es erwünscht, in der Lage zu sein, mehrere Kalibrierungen gleichzeitig zu speichern und es dem Benutzer zu ermöglichen, die geeignete Kalibrierung auf einer Stift-, Komponenten- oder Platinen-Ebene auszuwählen.

[0115] Obwohl die obige Beschreibung viele spezielle Merkmale enthält, sollten diese nicht als den Schutzbereich der Erfindung begrenzend, sondern lediglich als Beispiele für bestimmte gegenwärtig bevorzugte Ausführungsbeispiele der Erfindung betrachtet werden. Beispielsweise können alternative Techniken zum Anpassen der Kalibrierungsdaten verwendet werden; alternative Techniken können zum Bestimmen der Anpassungsparameter verwendet werden; alternative Interpolationstechniken können verwendet werden; alternative Techniken können verwendet werden, um die Querschnittsbilder aufzunehmen; Schattengraph-Röntgenbilder (Nicht-Querschnitt) können verwendet werden; die Simulation kann verwendet werden, um bestimmte der Anpassungsparameter zu bestimmen; die Erfindung kann auf Anordnungen mit mehr als zwei Schichten angewendet werden; usw..

[0116] Es ist klar, daß die Verfahren der vorliegenden Erfindung durch einen Fachmann auf eine Vielzahl von Arten implementiert werden können, wobei jedoch eine Implementierung auf einem Computer oder einem speziell zweckgebundenen Bildprozessor bevorzugt ist. Ein typischer Computer, der für eine solche Analyse verwendet wird, umfaßt einen oder mehrere Prozessoren, einen oder mehrere Speicher und verschiedene Eingabe- und Ausgabe-Vorrichtungen, einschließlich Monitoren, Plattenlaufwerken, Druckern und Tastaturen, jedoch nicht begrenzt auf dieselben. Zusätzlich sollte es klar sein, daß der Ausdruck "Bild" nicht auf Formate begrenzt ist, die visuell betrachtet werden können, sondern auch digitale oder analoge Darstellungen, die durch den Computer aufgenommen, gespeichert und analysiert werden können, enthalten kann.

Bezugszeichenliste

4	Stufenkeil
8	Stufenkeilstufen
8'	Stufenkeil-Bildintensitäten
10	Objekt unter Inspektion
20	Quelle von Röntgenstrahlen
30	Röntgendetektor
40	gemeinsame Drehachse
50	mittlerer Strahl
60	Bildebene in dem Objekt 10
60a	Pfeil-Bildebene
60b	Kreis-Bildebene
60c	Kreuz-Bildebene
62	Ebene der Röntgenquelle
64	Ebene des Röntgendetektors
70	Schnittpunkt
81	Pfeil-Testmuster
82	Kreis-Testmuster
83	Kreuz-Testmuster
100	Bild des Pfeils 81
102	unscharfe Region
110	Bild des Kreises 82
112	unscharfe Region
120	Bild des Kreuzes 83
122	unscharfe Region
130	Bild des Pfeils 81
132	Bild des Kreises 82
134	Bild des Kreuzes 83
200	Röntgenröhre
210	gedruckte Schaltungsplatine
212	elektronische Komponenten
214	elektrische Verbindungen
220	Trägervorrichtung
230	Positionierungstisch
240	rotierender Röntgenstrahldetektor
250	fluoreszenter Schirm
252	erster Spiegel
254	zweiter Spiegel
256	Drehtisch
258	Kamera
260	Rückkopplungssystem
262	Eingangsverbindung
263	Sensor
264	Ausgangsverbindung
265	Positionscodierer
270	Computer
276	Eingangsleitung
278	Ausgangsleitung
280	rotierender Quellenpunkt
281	Ablenkspulen
282	Röntgenstrahlen
283	Region der Schaltungsplatine
284	Röntgenstrahlen
285	rotierender Elektronenstrahl
286	Licht
287	Zielanode
290	Granitträgertisch
292	Ladungs/Entladungs-Tor
294	Bedienerstation

300	Zweikomponentenanordnung
310	erstes Material
320	zweites Material
330	einfallende Röntgenstrahlen
350	Röntgenbild
360	Vordergrundbildregion
370	Hintergrundbildregionen
410	(BG, ΔG)-Kalibrierungspunkte
420	lineare Anpassung an t_1 -Kalibrierungsdaten
430	lineare Anpassung an t_2 -Kalibrierungsdaten
440	lineare Anpassung an t_3 -Kalibrierungsdaten
450	Linie unbekannter Dicke
510	hyperbolische Kalibrierungskurve
512	Kalibrierungsdatenpunkte
520	hyperbolische Kalibrierungskurve
514	Kalibrierungsdatenpunkte
530	hyperbolische Datenkurve

Patentansprüche

1. Verfahren zur Kalibrierung eines Röntgenbilderzeugungssystems zum quantitativen Bestimmen der Dicke eines ersten absorbierenden Materials (**310**) beim Vorliegen eines zweiten absorbierenden Materials (**320**), wobei ein Einfall-Röntgenstrahl (**330**) mit einer Einfall-Röntgenstrahl-Intensität (I_0) durch das erste und das zweite absorbierende Material (**310**, **320**) transmittiert wird, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:

Bereitstellen eines Kalibrierungsstandards (**300**) zum Charakterisieren des Bilderzeugungssystems, wobei der Kalibrierungsstandard (**300**) zumindest eine bekannte Dicke $t_{M1,i}$ des ersten absorbierenden Materials (**310**) in Kombination mit zumindest einer Dicke $t_{M2,i}$ des zweiten absorbierenden Materials (**320**) enthält;

Bestimmen eines Werts eines Vordergrund- und eines Hintergrund-Parameters (F, B), wobei: a) der Vordergrundparameter (F) die Intensität (I_2) eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität (I_0) entspricht, der durch das erste absorbierende Material (**310**) mit der Dicke $t_{M1,i}$ in Kombination mit dem zweiten absorbierenden Material (**320**) mit einer Dicke $t_{M2,i}$ transmittiert wird; und b) der Hintergrundparameter (B) die Intensität (I_1) eines transmittierten Röntgenstrahls darstellt, die einem Teil der Einfall-Röntgenstrahl-Intensität (I_0) entspricht, der durch lediglich das zweite absorbierende Material (**320**) mit der Dicke $t_{M2,i}$ transmittiert wird; und

Bestimmen einer nicht-linearen Funktionsform, die Vordergrund- und/oder Hintergrund- und/oder Materialdicke-Werte beschreibt, derart, daß die nicht-lineare Funktionsform: a) mit dem vorher bestimmten Vordergrundparameter (F), dem Hintergrundparameter (B) und den Dickewerten konsistent ist; b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern; und c) eine Einrichtung liefert, um den Vordergrund und/oder den Hintergrund und/oder die Materialdicken über den Bereich des Kalibrierungsstandards (**300**) hinaus zu extrapolieren.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der Schritt des Bestimmens einer nicht-linearen Funktionsform ferner folgende Schritte aufweist:

Bestimmen einer ersten nicht-linearen Funktionsform $y_1(x)$, die Vordergrundwerte ($y_1 = F$) als Funktionen des Hintergrunds ($x = B$) beschreibt, derart, daß die erste nicht-lineare Funktionsform: a) den vorher bestimmten Wert des Vordergrundparameters (F) hinsichtlich des vorher bestimmten Werts des Hintergrundparameters (B) annähert; b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern; und c) eine Einrichtung liefert, um einen gemessenen Vordergrundparameter (F_M), der einem ersten absorbierenden Material (**310**) mit einer unbekanntem Dicke $t_{M1,U}$ in Kombination mit einem zweiten absorbierenden Material (**320**) mit einer Dicke ($T_{M2,U}$) zugeordnet ist, auf einen Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) zu extrapolieren, wodurch ein Referenzvordergrundwert ($y_1 = F_{R,U}$) bei dem Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) bestimmt wird; und

Bestimmen einer zweiten nicht-linearen Funktionsform $y_2(x)$, die Referenzvordergrundwerte ($y_2 = F_{Ri}$) als eine Funktion entsprechender Dicken ($x = t_{M1,i}$) des ersten absorbierenden Materials (**310**) beschreibt, derart, daß die zweite nicht-lineare Funktionsform: a) einen Referenzvordergrundwert ($y_2 = F_{R1}$) des Kalibrierungsstandards (**300**) für die bekannte Dicke $t_{M1,1}$ des ersten absorbierenden Materials (**310**) bei dem Referenzhintergrundwert ($x = B_R$) annähert; und b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern.

3. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Schritte des Bestimmens der Werte des Vordergrund- und des Hintergrund-Parameters ferner den Schritt des Simulierens der Werte des Vordergrund- und des Hintergrund-Parameters unter Verwendung von einem oder mehreren der folgenden Simulationsfaktoren aufweisen: a) den spektralen Charakteristika des Röntgenstrahls (**330**); und/oder b) der Winkelverteilung der Röntgenstrahlen, die der Röntgenstrahl (**330**) aufweist; und/oder c) der Absorptionsfähigkeit und der spektralen Empfindlichkeit eines Röntgendetektors; und/oder d) der Röntgenstrahl-Dämpfungseigenschaften des ersten und des zweiten absorbierenden Materials (**310, 320**) als Funktionen von Röntgenstrahl-Energie/Wellenlänge.

4. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Vordergrundparameter (F_i) durch eine allgemeine Funktionsform y_F beschrieben sind:

$$y_F = y_0 - \int \alpha(E) e^{-\beta(E)t_1} e^{-\gamma(E)t_2} dE$$

oder die diskrete Näherung derselben

$$y_F = y_0 - \sum_i \alpha_i e^{-\beta_i t_1} e^{-\gamma_i t_2}$$

wobei t_1 und t_2 die Dicke des ersten absorbierenden Materials (**310**) bzw. des zweiten absorbierenden Materials (**320**) sind; y_0 eine Anpassungskonstante ist; und wobei bei der allgemeinen Funktionsform: a) das Energiespektrum des Röntgenstrahls (**330**) als eine Funktion der Energie verteilt ist, wobei Gewichtungen durch den Parameter $\alpha(E)$ bestimmt sind; und b) $\beta(E)$ und $\gamma(E)$ die Röntgenstrahl-Dämpfungskoeffizienten für das erste bzw. zweite absorbierende Material (**310, 320**) sind, und wobei bei der diskreten Näherung: c) das gesamte Röntgenstrahlenergiespektrum in eine bestimmte Anzahl von Bändern i aufgeteilt ist, wobei die gesamte Quellenintensität als eine Funktion der Röntgenstrahlenergie und der Detektorempfindlichkeit unter den Bändern verteilt ist, wobei Gewichtungen für jedes Band i durch den Parameter α_i bestimmt sind; und d) β_i und γ_i die effektiven linearen Dämpfungskoeffizienten für Röntgenstrahlen in einem Band (i) für das erste bzw. zweite absorbierende Material (**310, 320**) sind.

5. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der Schritt des Bestimmens einer nicht-linearen Funktionsform den Schritt des Auswählens einer Funktion der folgenden Form aufweist:

$$Y_1 = \sqrt{(x-a)^2 + b^2} + c$$

wobei x dem Hintergrund (B) entspricht, y_1 der Differenz zwischen dem Vordergrund und dem Hintergrund ($F-B$) entspricht, und a , b und c Anpassungskonstanten sind.

6. Verfahren nach Anspruch 5, das ferner folgende Schritte aufweist:

Auswählen eines Referenzhintergrundpegels ($x = B_R$);

Bestimmen der Werte des Vordergrunds minus den Hintergrund ($F_{Ri} - B_{Ri}$) bei dem Referenzhintergrundpegel (B_R) für mehrere bekannte Dicken des Kalibrierungsstandards (**300**) unter Verwendung der sich glatt ändernden nichtlinearen Funktion y_1 , die den Wert des Vordergrunds minus den Hintergrund ($y_1 = F-B$) als eine Funktion des Hintergrunds ($x = B$) ausdrückt; und

Bestimmen einer zweiten Funktionsform y_2 , die die Werte des Vordergrunds minus den Hintergrund ($F_{Ri} - B_{Ri}$) bei dem Referenzhintergrundpegel (B_R) für die mehreren bekannten Dicken des ersten absorbierenden Materials (**310**) als eine Funktion der Dicke des ersten absorbierenden Materials (**310**) ausdrückt.

7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem der Schritt des Bestimmens einer zweiten Funktionsform y_2 ferner den Schritt des Auswählens einer Funktion aufweist, die eine Summe von Exponentialfunktionen folgender Form ist:

$$y_2(t) = p - \sum_i q_i e^{-r_i t}$$

wobei p , q_i und r_i Anpassungskonstanten sind.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, das ferner den Schritt des Erzeugens einer Nachschlagetabelle für Werte von (Hintergrund) über (Vordergrund minus Hintergrund) über (Dicke) für eines oder beide des ersten und/oder zweiten absorbierenden Materials (**310, 320**) aufweist.

9. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der Schritt des Bestimmens einer nicht-linearen Funktionsform fer-

ner folgenden Schritt aufweist:

Bestimmen einer Funktionsform einer nicht-linearen Funktion $y(x_1, x_2)$, die die Werte der Dicke des ersten Materials (**310**) ($y = t_{M1}$) als eine Funktion des Vordergrunds und des Hintergrunds (z.B. $x_1 = F$, $x_2 = B$) beschreibt, derart, daß die nicht-lineare Funktionsform: a) einen Satz von Kalibrierungsdatenpunkten ($t_{M1,i}$, F_i , B_i) annähert, der die vorher bestimmten Dicken $t_{M1,i}$ des ersten Materials (**310**), die Vordergrundparameter (F_i) und die Hintergrundparameter (B_i) enthält; b) eine oder mehrere zusätzliche Beschränkungen beinhaltet, die durch das physikalische Verhalten des Röntgenbilderzeugungssystems bestimmt sind oder dasselbe annähern; und c) eine Einrichtung liefert, um Vordergrund- und Hintergrund-Parameter über den Bereich des Kalibrierungsstandards (**300**) hinaus zu extrapolieren.

Es folgen 13 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

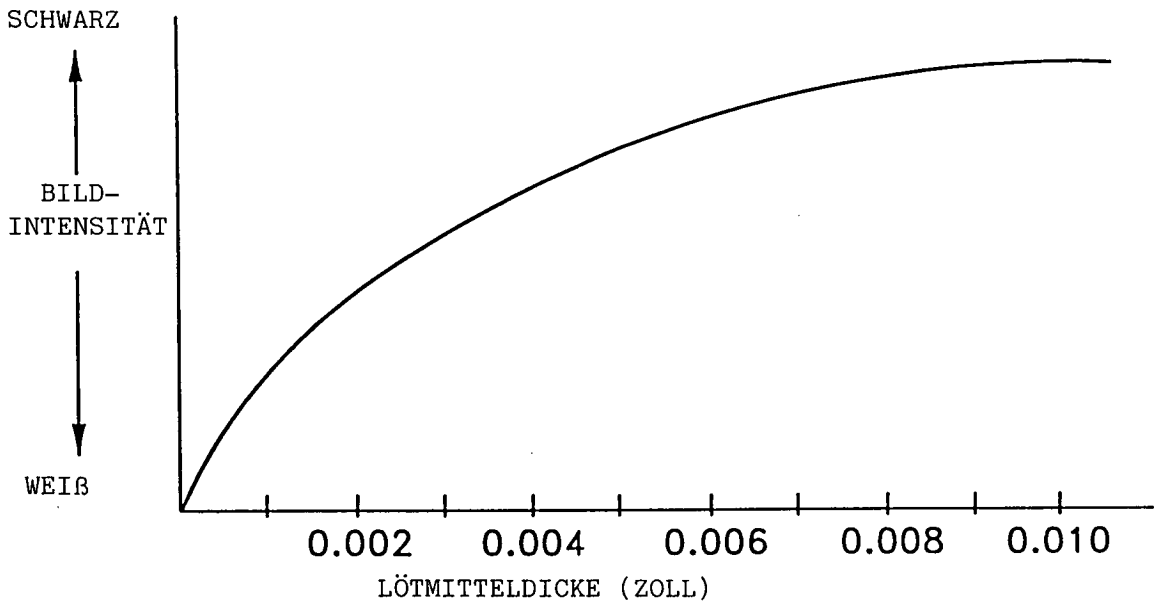


FIG. 1A

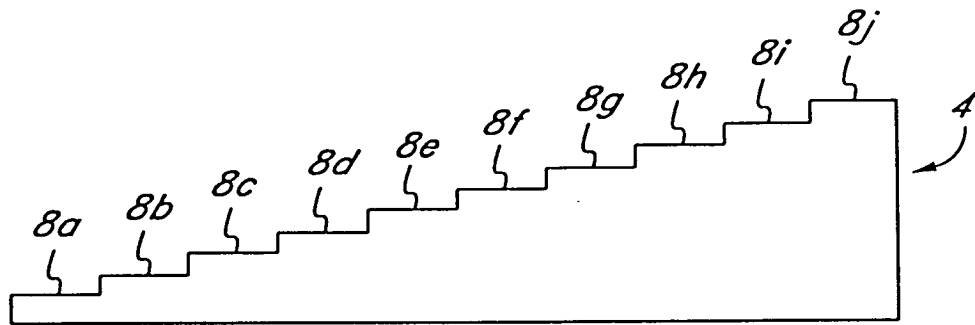


FIG. 1B

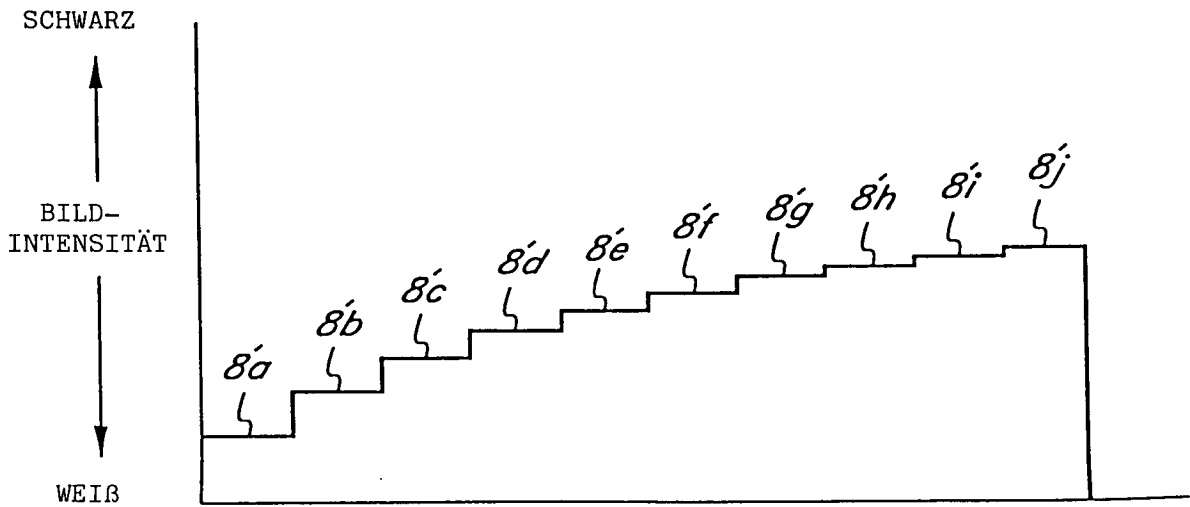
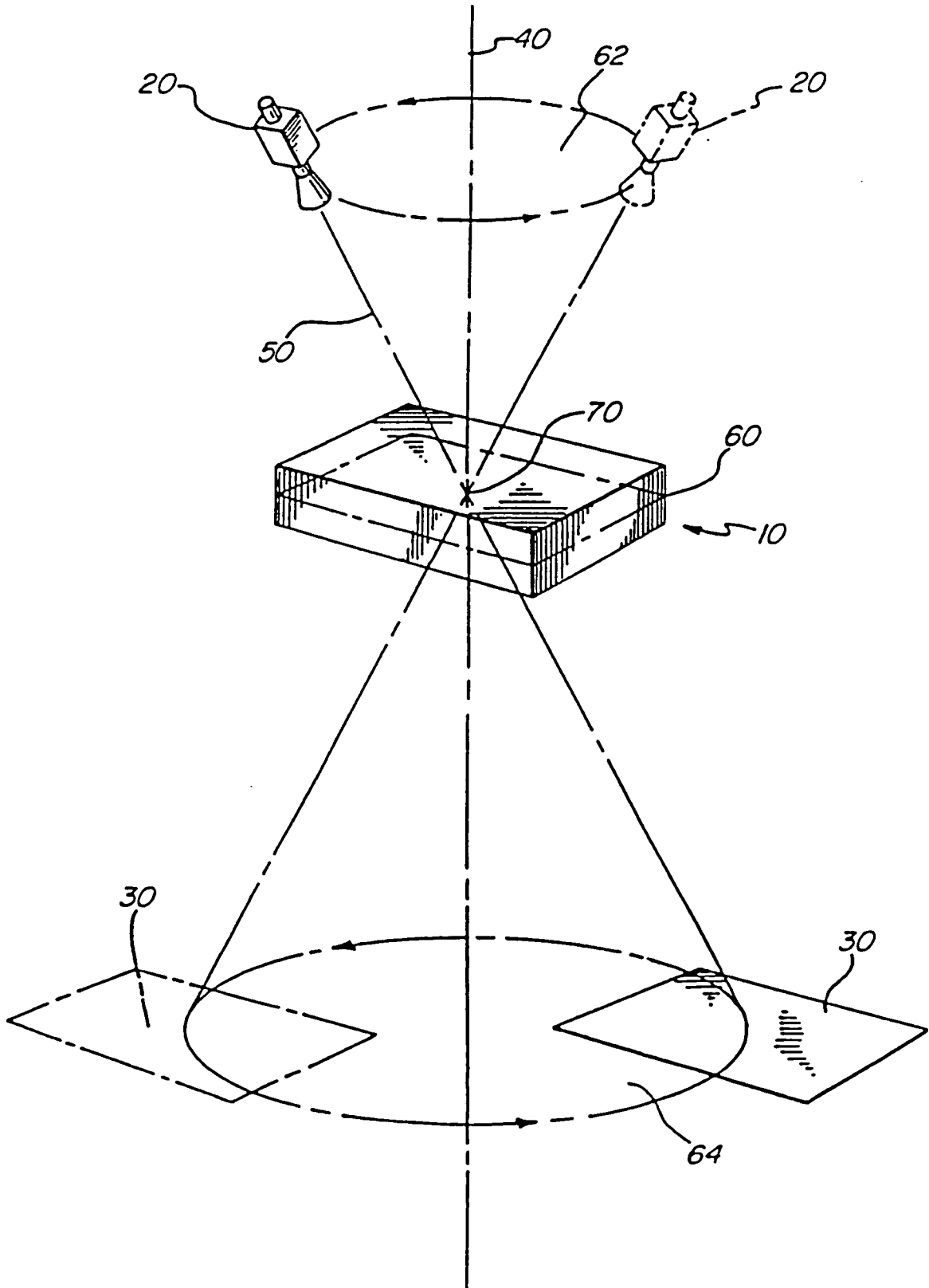


FIG. 1C

FIG. 2



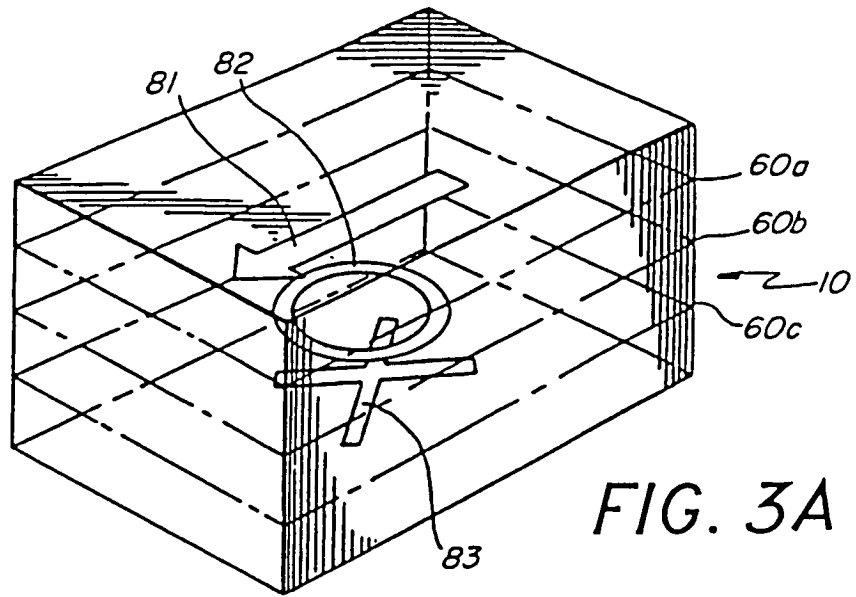


FIG. 3A

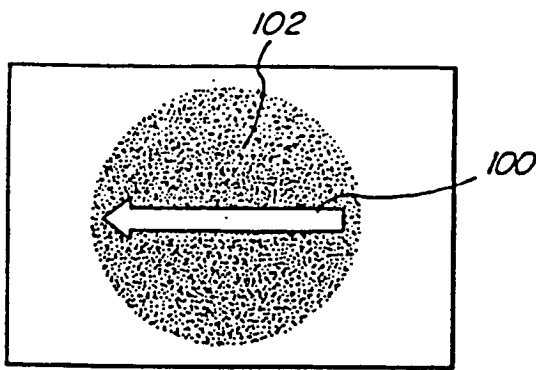


FIG. 3B

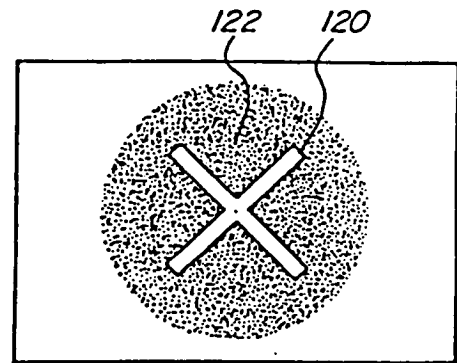


FIG. 3D

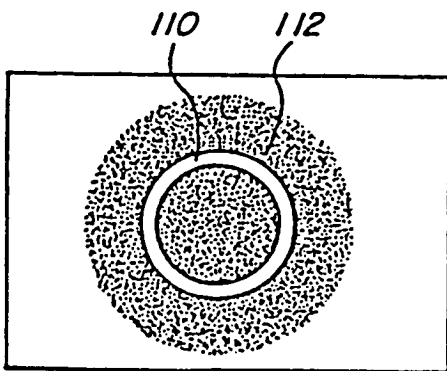


FIG. 3C

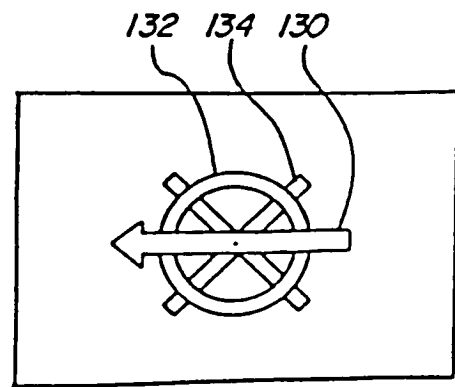


FIG. 3E

FIG. 4B

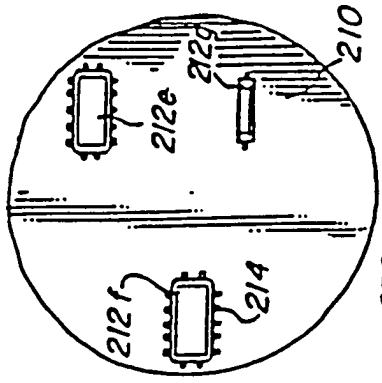
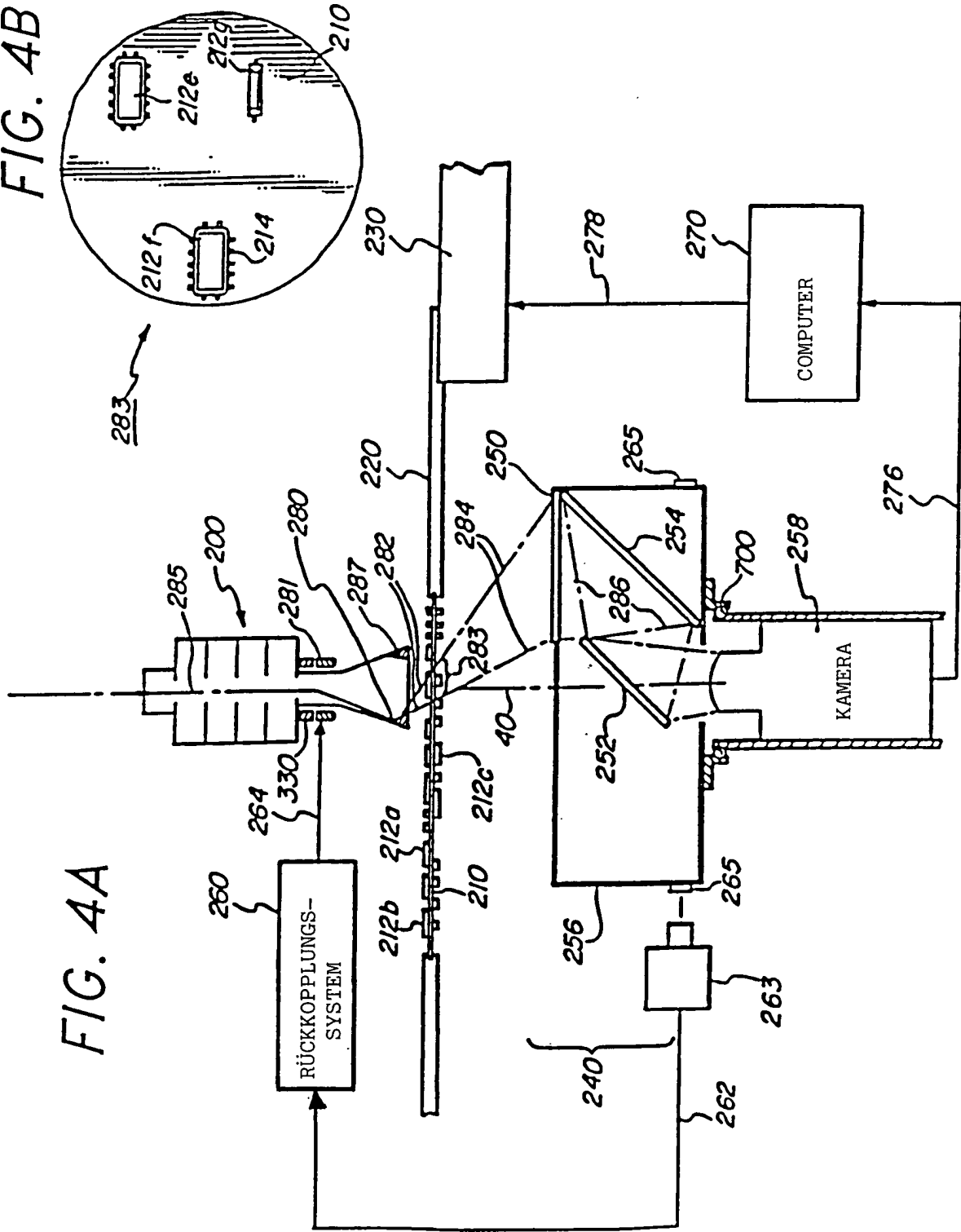


FIG. 4A



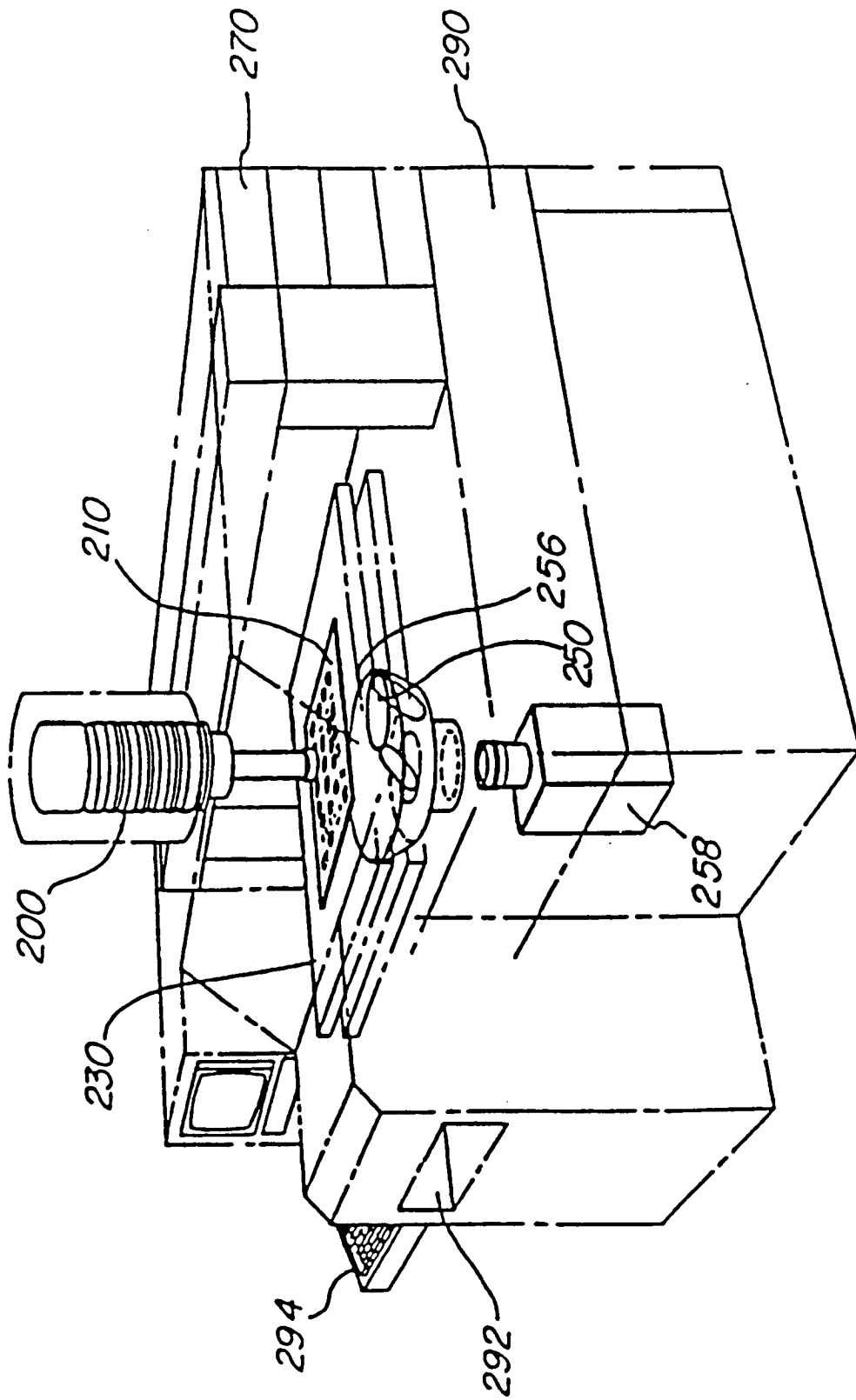


FIG. 4C

FIG. 5

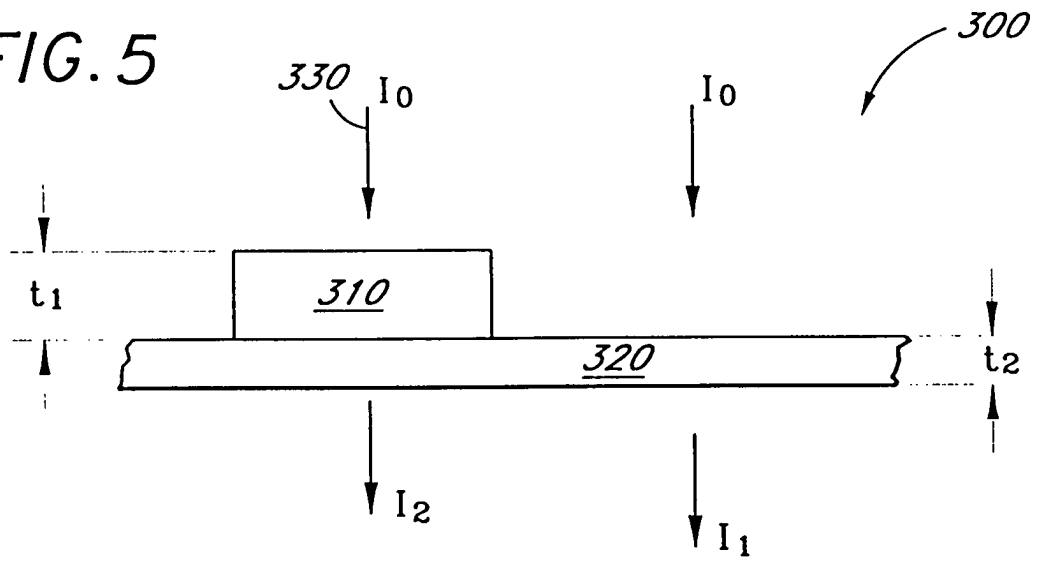


FIG. 6

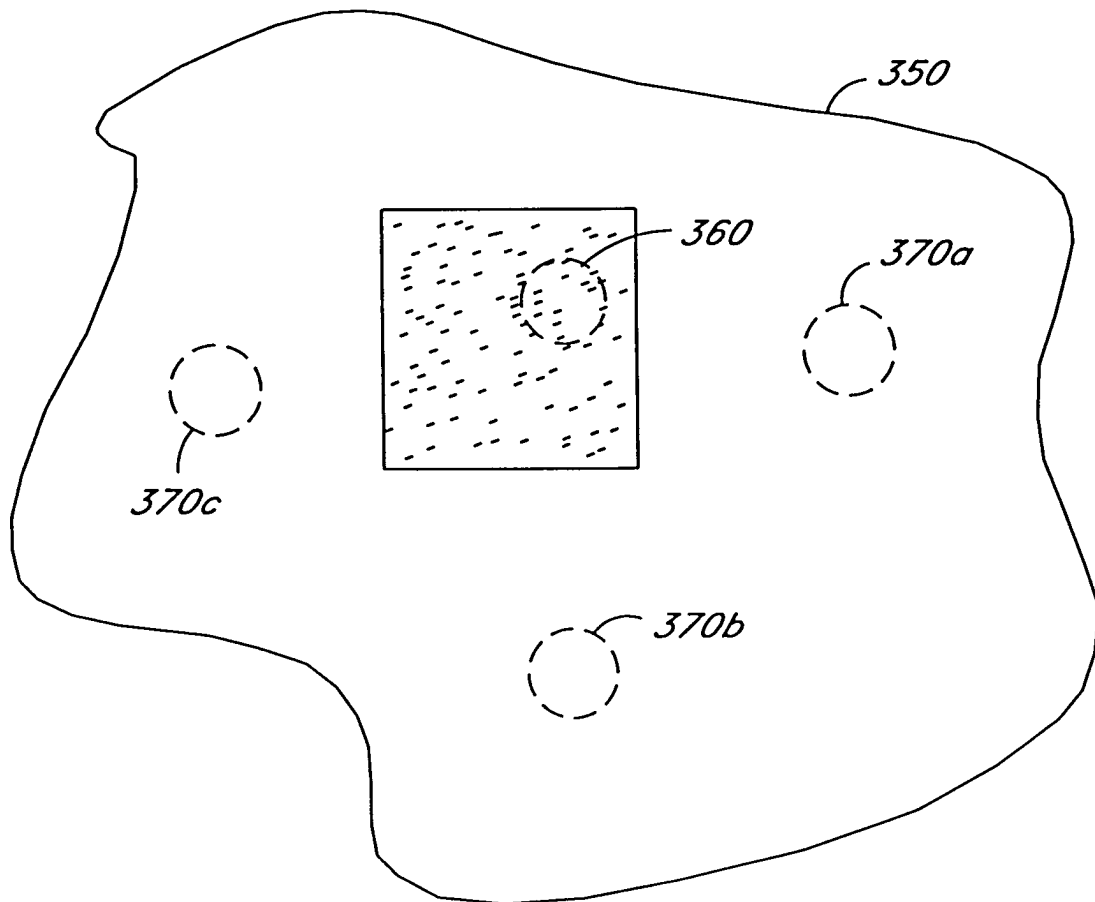


FIG. 7

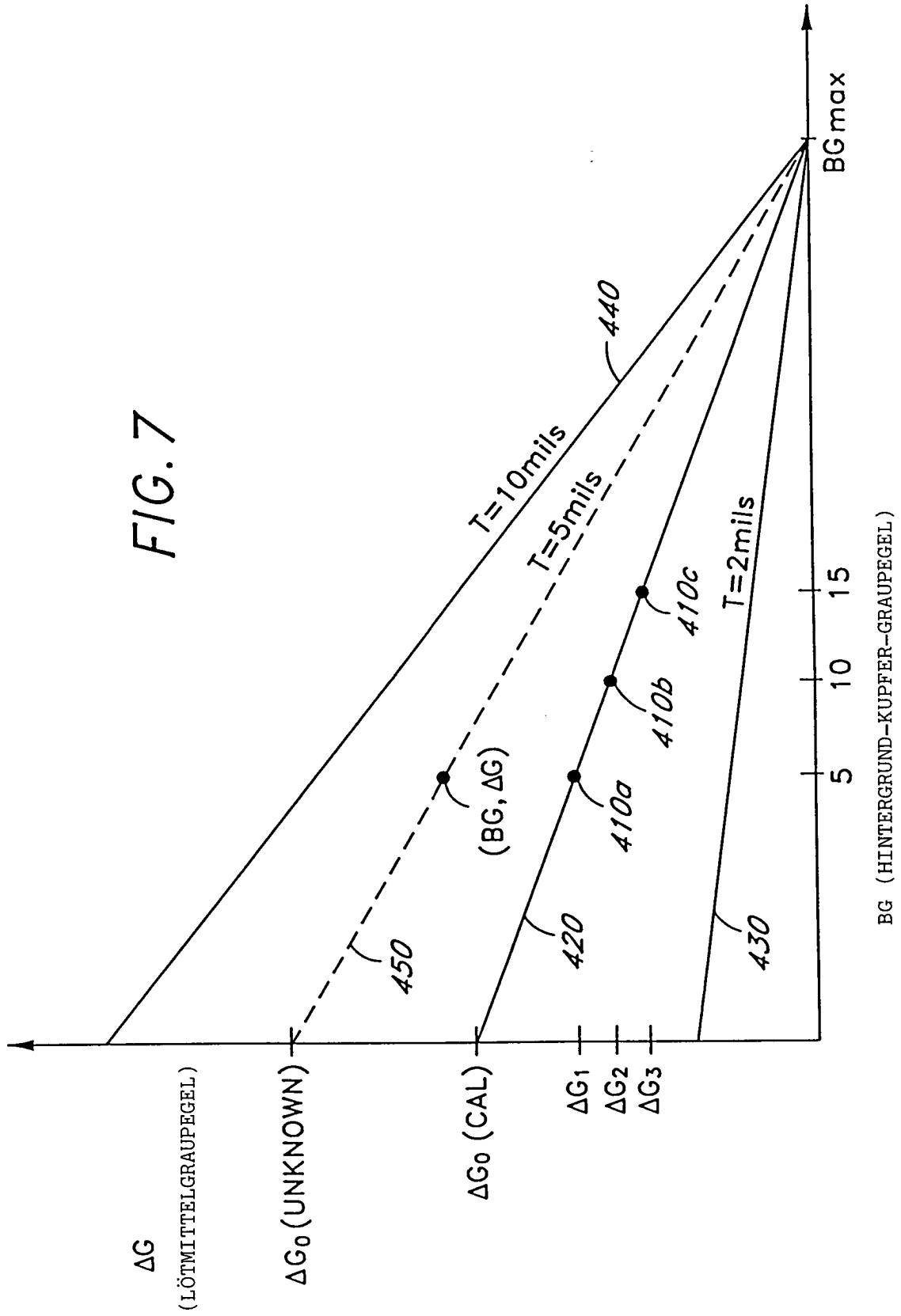
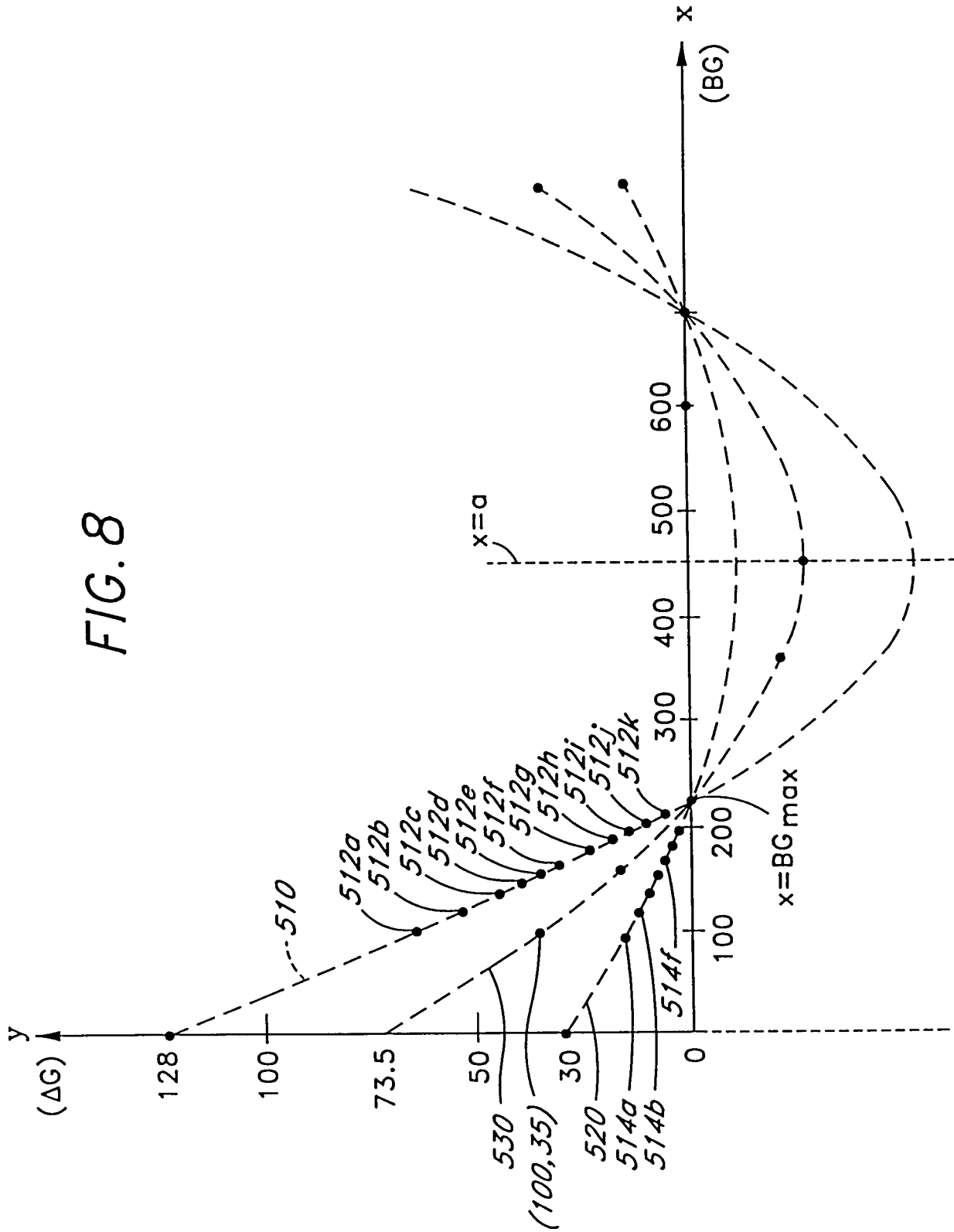


FIG. 8



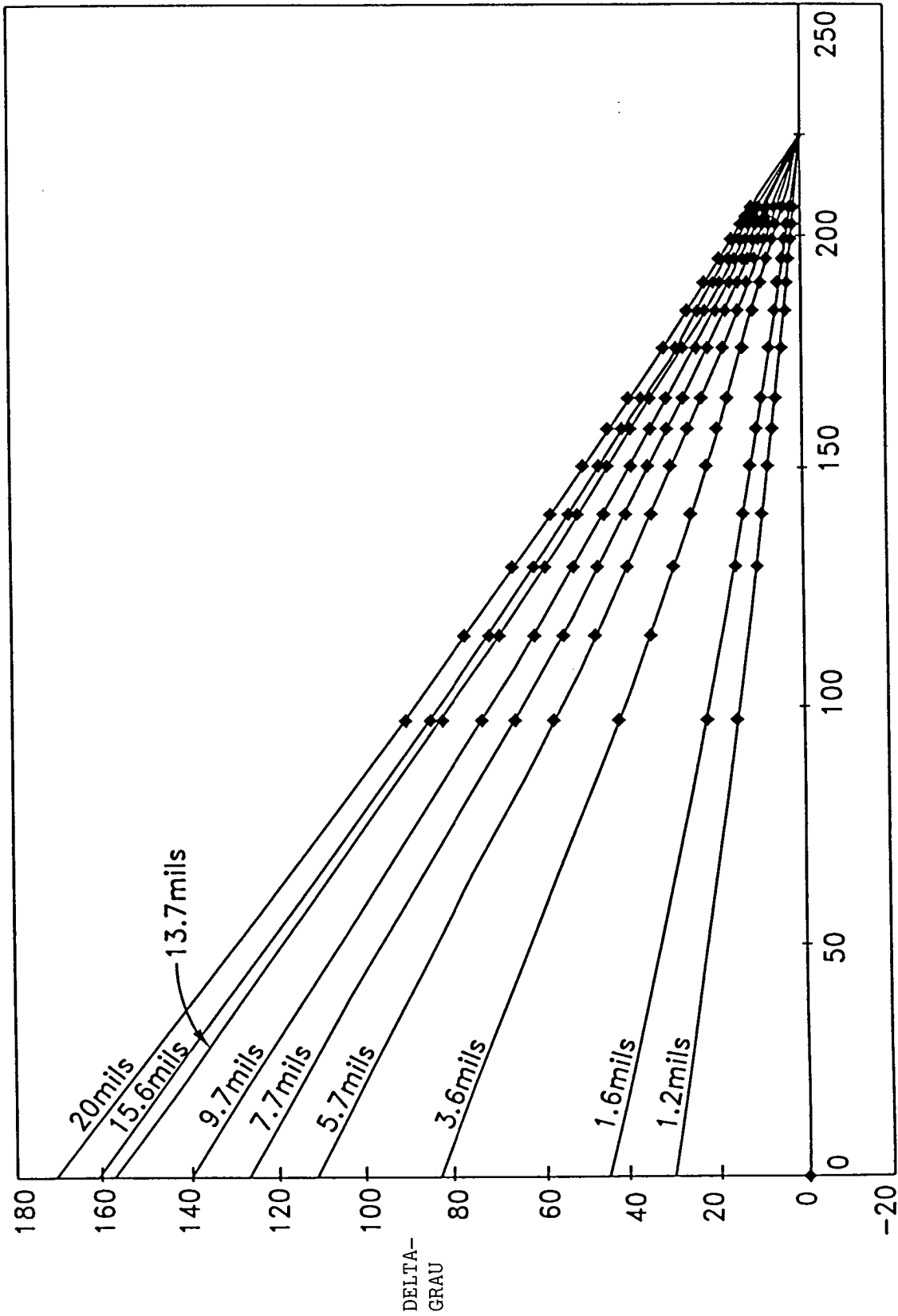


FIG. 9

HINTERGRUND

FIG. 10A

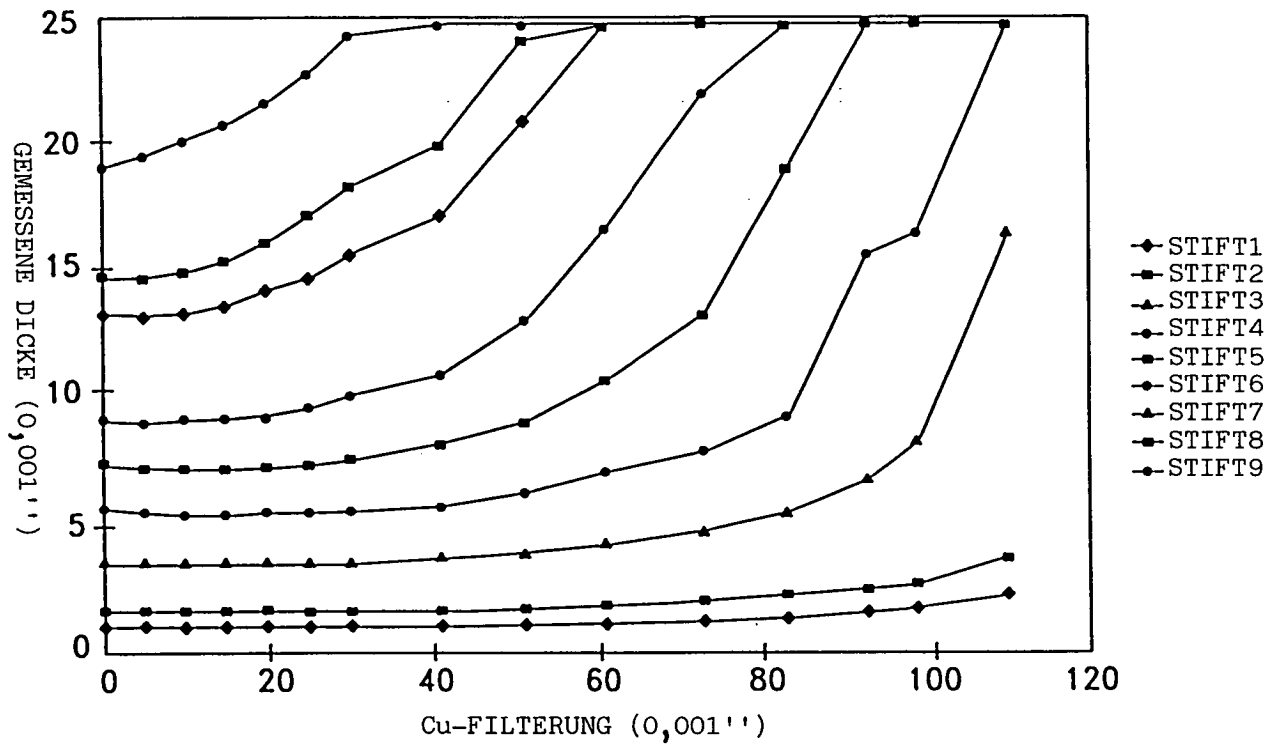
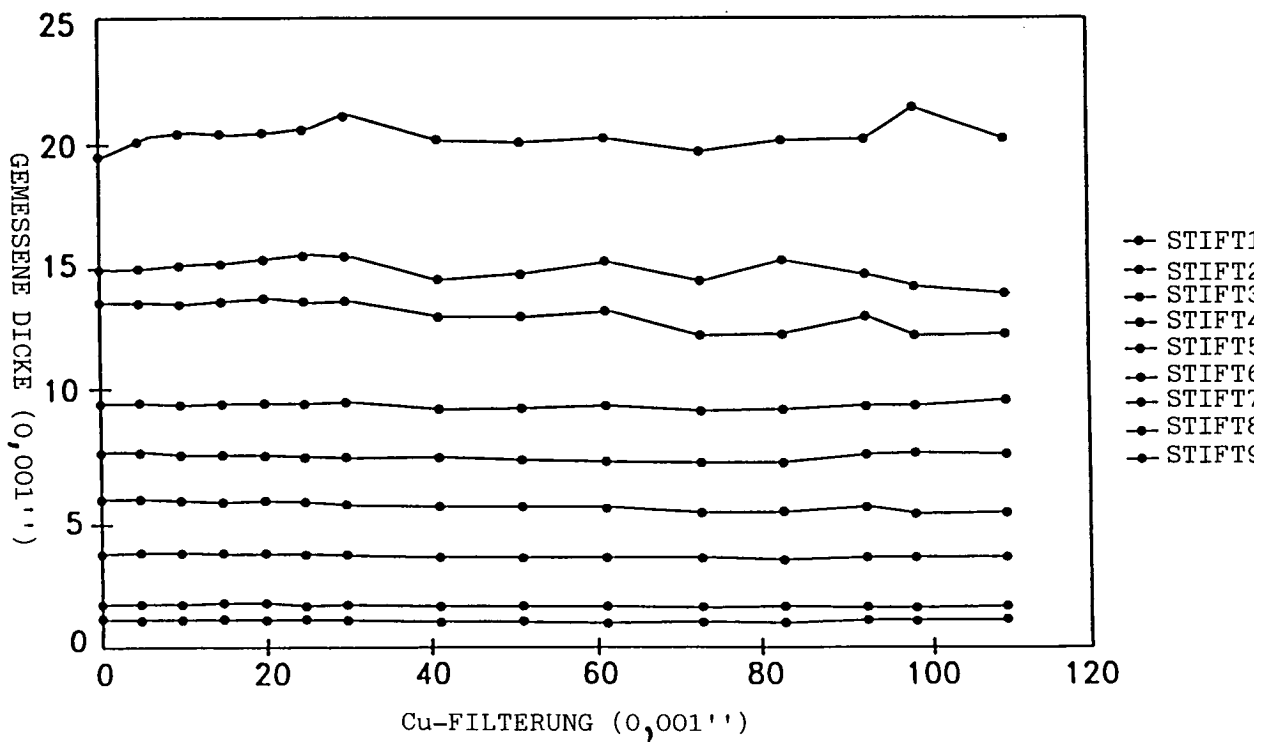


FIG. 10B



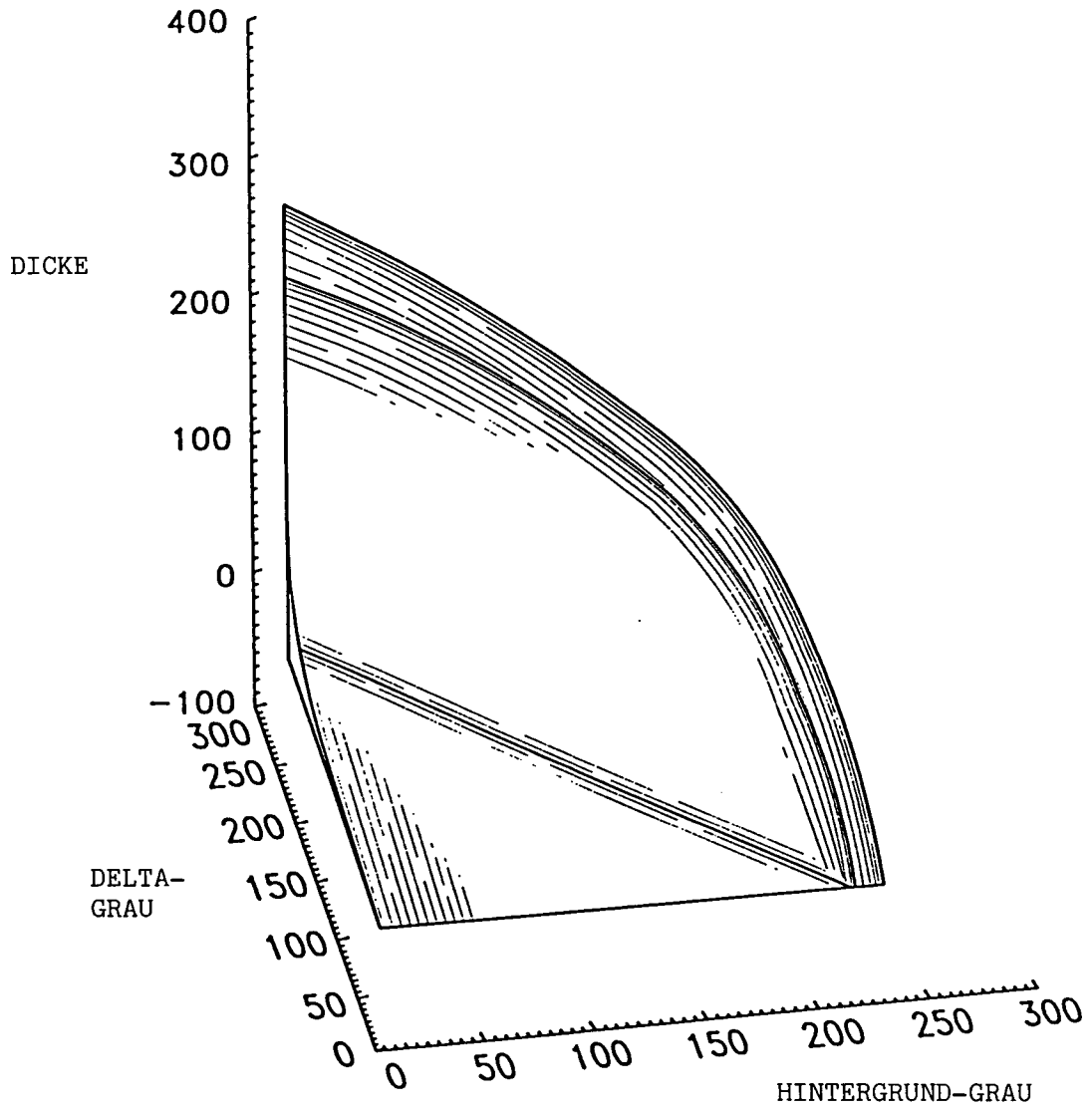


FIG. IIA

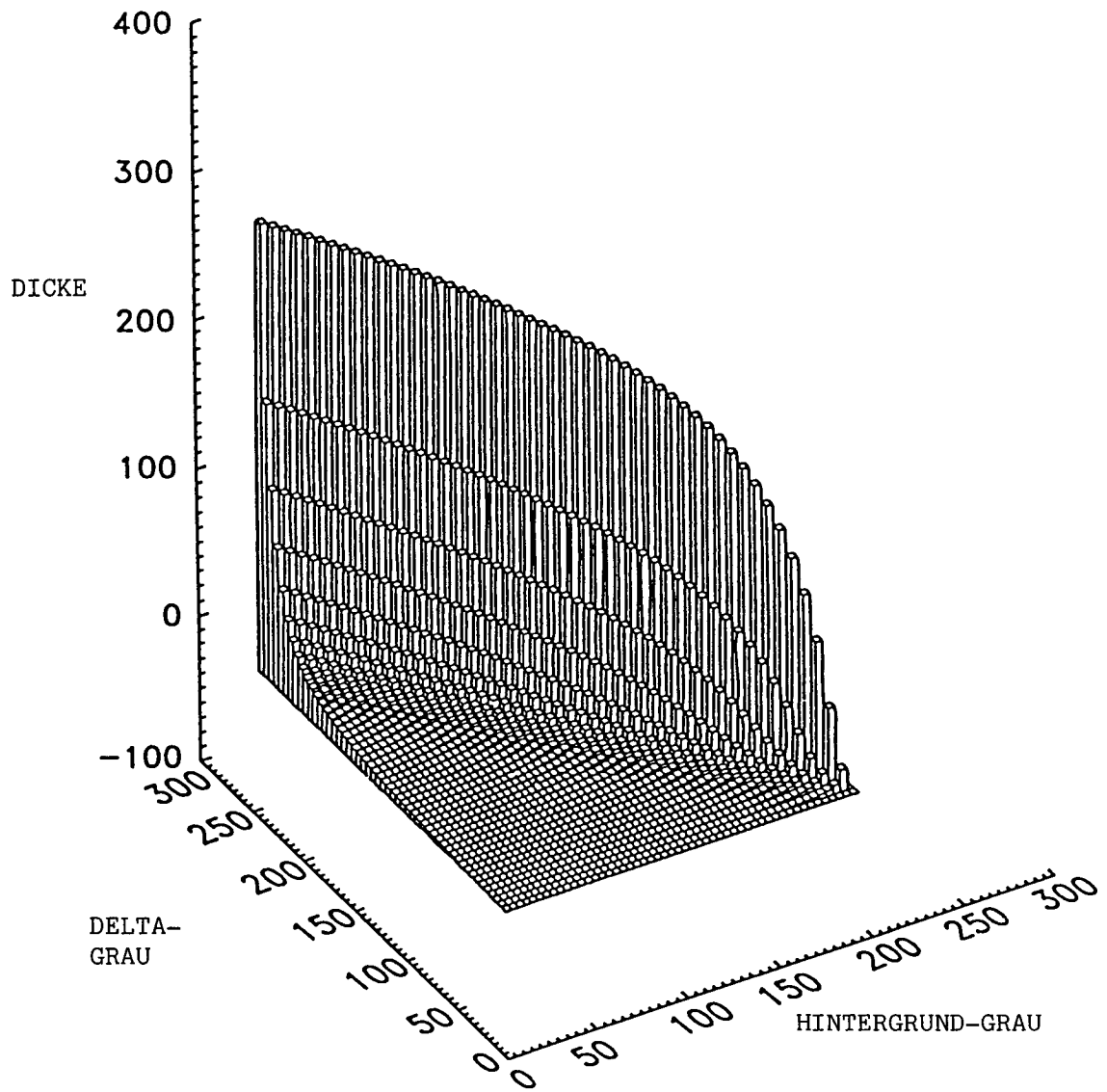


FIG. IIB

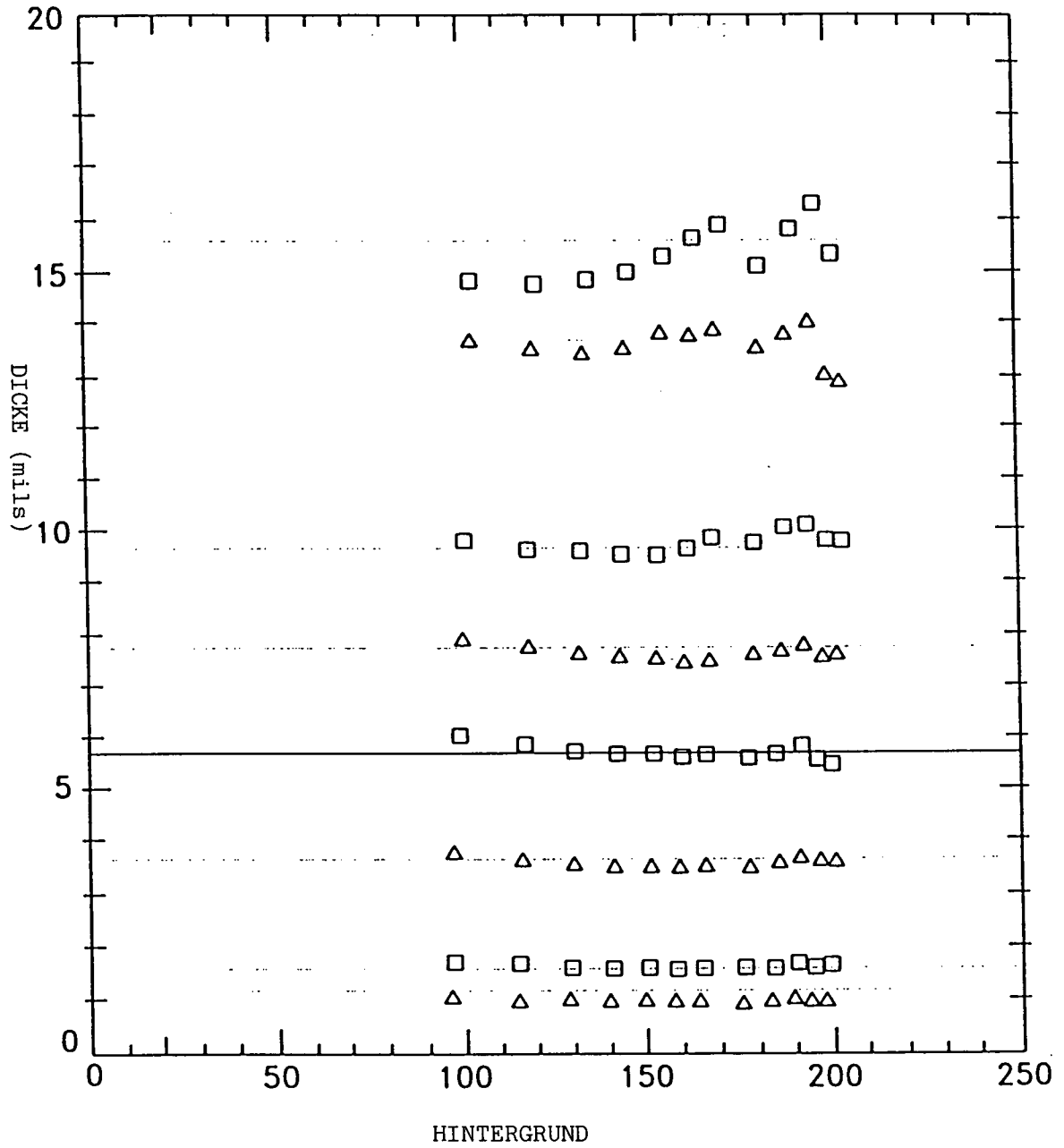


FIG. 12