



(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2013 105 696.2**

(22) Anmeldetag: **03.06.2013**

(43) Offenlegungstag: **12.12.2013**

(51) Int Cl.: **G01T 1/29 (2013.01)**

**G01T 1/202 (2013.01)**

**A61B 6/03 (2013.01)**

**A61N 5/10 (2013.01)**

(30) Unionspriorität:

**13/492,439**

**08.06.2012 US**

(71) Anmelder:

**General Electric Company, Schenectady, N.Y., US**

(74) Vertreter:

**Rüger, Barthelt & Abel Patentanwälte, 73728,  
Esslingen, DE**

(72) Erfinder:

**Kim, Chang Lyong, Waukesha, Wis., US;**

**McDaniel, David Leo, Waukesha, Wis., US;**

**Malaney, James Lindgren, Waukesha, Wis., US;**

**Peterson, William Todd, Sussex, Wis., US; Tran,**

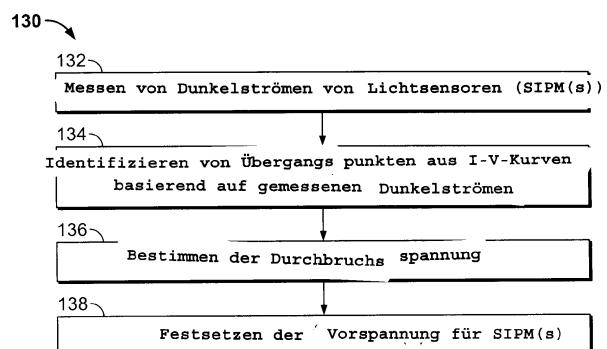
**Vi-Hoa, Waukesha, Wisc., US; Wagadarikar,**

**Ashwin Ashok, Niskayuna, NY, US**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Systeme zur Verstärkungskalibrierung von Gammastrahlendetektoren**

(57) Zusammenfassung: Verfahren (130) und Systeme zur Verstärkungskalibrierung eines Gammastrahlendetektors werden angegeben. Ein Verfahren schließt das Messen (132) von Dunkelströmen für einen oder mehrere Lichtsensoren eines Gammastrahlendetektors und das Erzeugen (134) einer oder mehrerer Dunkelstromkurven unter Benutzung der gemessenen Dunkelströme ein. Das Verfahren schließt auch das Identifizieren (134) eines Übergangspunktes in der einen oder den mehreren Dunkelstromkurven und das Bestimmen (136) einer Durchbruchsspannung des einen oder der mehreren Lichtsensoren unter Nutzung des identifizierten Übergangspunktes ein. Das Verfahren schließt weiter das Festsetzen (138) einer Vorspannung des einen oder der mehreren Lichtsensoren auf der Grundlage der bestimmten Durchbruchsspannung ein.



**Beschreibung****HINTERGRUND DER ERFINDUNG**

**[0001]** Gegenstand der verliegenden Erfindung sind allgemein Gammastrahlendetektoren und, spezieller, Systeme und Verfahren zur Verstärkungskalibrierung von Gammastrahlendetektoren.

**[0002]** Gammastrahlendetektoren können in verschiedenen Anwendungen eingesetzt werden, wie in Positronenemissionstomografie(PET)-Systemen. PET-Systeme führen medizinische Nuklearabbildungen aus, die eine dreidimensionale Abbildung oder ein solches Bild funktioneller Prozesse innerhalb eines Körpers erzeugen. So erzeugt z.B. ein PET-System Abbildungen, die die Verteilung Positronen emittierender Nuklide innerhalb des Körpers eines Patienten representieren. Wenn ein Positron mit einem Elektron durch Annihilation in Wechselwirkung tritt, dann wird die gesamte Masse des Positron-Elektron-Paars in zwei 511 keV Photonen umgewandelt. Die Photonen werden in entgegengesetzte Richtungen entlang einer Verbindungs- bzw. Reaktionslinie emittiert. Die Annihilationsphotonen werden durch Detektoren nachgewiesen, die auf einem Detektorring entlang der Reaktionslinie angeordnet sind. Wenn diese Photonen gleichzeitig ankommen und an den Detektorelementen nachgewiesen werden, wird dies als Koinzidenz bezeichnet. Eine Abbildung wird dann auf der Grundlage der erfassten Bilddaten erzeugt, die die Information des Nachweises der Annihilationsphotonen einschließt.

**[0003]** In PET-Systemen werden die Gammastrahlen durch einen Szintillator in dem Abtastsystem nachgewiesen, der Licht erzeugt, das durch einen Fotosensor (z.B. eine Fotoverstärker-bzw. Fotomultiplierröhre (PMT), eine Silicium-Lawinenfotodiode oder einen Festkörperphotoverstärker) nachgewiesen wird. PET-Detektoren auf der Grundlage von Vakuumphotoverstärker-Fotosensoren erfordern eine Verstärkungs/Energie-Kalibrierung, um richtig zu arbeiten. Benutzt man eine kleine Kristallanordnung (z.B. eine 4 × 4-Anordnung) auf PET-Detektoren auf der Grundlage von Festkörperphotoverstärkern mit Multianoden (z.B. 6 Anoden in einer 2 × 3-Anordnung), dann ist es häufig schwierig, Bezugskristalle zu definieren, da die Anordnung sehr empfindlich auf die relative Positionierung von Kristallen über den Anoden reagiert. Zusätzlich ist es mit zunehmender Anzahl von Anoden, z.B. wenn sechs oder mehr Anoden benutzt werden, schwieriger, konventionelle iterative PET-Algorithmen anzuwenden, um die Verstärkungs- und Energiekalibrierung auszuführen. Die Verfahren können z.B. komplexer und zeitaufwändiger sein.

**[0004]** Für den Fall einer 1-zu-1-Kopplung zwischen dem Fotosensor von PET-Detektoren auf Festkö-

perfotoverstärker-Grundlage und dem Detektorkristall (z.B. einem Cer-dotierten Lutetium-Yttrium-Orthosilicat(LYSO)-Kristall), können der 511 keV-Energiepeak oder bekannte, dem LYSO innewohnende Hintergrundpeaks zur Kalibrierung benutzt werden. In manchen Designs, z.B. einen lichtanteiligen Blockdesign zwischen mehreren Anoden, ist dies jedoch nicht möglich. Zusätzlich kann eine typische Verstärkungskalibrierung für PET-Detektoren auf der Grundlage von Festkörperphotoverstärkern durch Messen einer einzigen Photonenimpulshöhe ausgeführt werden, wenn die Dunkelzählung/der Dunkelstrom gering ist. Um diese Messungen auszuführen, ist ein Verstärker mit sehr hoher Verstärkung/geringem Rauschen erforderlich. Nimmt jedoch die Größe der Fotosensoren in diesen PET-Detektoren auf der Grundlage von Festkörperphotoverstärkern zu z.B. größer als 3 × 3 mm<sup>2</sup>, oder werden mehr als eine Million Zählungen pro Sekunde im Dunkeln erzeugt, dann können diese Messungen auch nicht ausgeführt werden, weil der einzelne Photonenimpuls aufgrund der Zählungssammlung nicht richtig identifiziert werden kann. So können z.B. in einer 4 × 6 mm<sup>2</sup>-Vorrichtung mehr als 10 Millionen Zählungen pro Sekunde nachgewiesen werden.

**[0005]** Bekannte Verfahren zur Verstärkungs- oder Energie-Kalibrierung können für einige Konfigurationen von Gammendetektoren, wie Gammendetektoren, die in Kombination mit Fotosensoren benutzt werden, wie in PET-Detektoren auf der Grundlage von Festkörperphotoverstärkern, nicht zufriedenstellend arbeiten.

**KURZE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG**

**[0006]** In einer Ausführungsform wird ein Verfahren zum Kalibrieren eines Gammastrahlendetektors bereitgestellt. Das Verfahren schließt das Messen von Signalen, die durch ein oder mehrere Lichtsensoren eines Gammastrahlendetektors erzeugt werden, das Erzeugen einer oder mehrerer abgeleiteter Kurven unter Einsatz der gemessenen Signale als eine Funktion der Vorspannung und das Identifizieren eines Übergangspunktes in der einen oder den mehreren abgeleiteten Kurven ein. Das Verfahren schließt auch das Bestimmen einer Durchbruchsspannung des einen oder der mehreren Lichtsensoren unter Benutzung des identifizierten Übergangspunktes und das Festlegen einer Vorspannung des einen oder der mehreren Lichtsensoren auf der Grundlage der bestimmten Durchbruchsspannung ein.

**[0007]** In einer anderen Ausführungsform wird ein Positronenemissionstomografie(PET)-System bereitgestellt, das eine Vielzahl von Gammastrahldetektorelementen einschließt, die zum Erfassen von Scandaten konfiguriert sind, wobei die Detektorelemente Szintillatorkristalle mit einer Vielzahl von Lichtsensoren aufweisen. Das PET-System

schließt auch einen Prozessor ein, der zum Messen von Signalen, die von einem oder mehreren der Vielzahl von Lichtsensoren des Gammastrahlendetektors erzeugt werden, zum Erzeugen einer oder mehrerer abgeleiteter Kurven unter Einsatz der gemessenen Signale als eine Funktion der Vorspannungsspannung, zum Identifizieren eines Übergangspunktes in der einen oder den mehreren abgeleiteten Kurven, zum Bestimmen einer Durchbruchsspannung des einen oder der mehreren der Vielzahl von Lichtsensoren unter Benutzung des identifizierten Übergangspunktes und zum Festlegen einer Vorspannung eines oder mehrerer der Vielzahl von Lichtsensoren auf der Grundlage der bestimmten Durchbruchsspannung konfiguriert ist.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNG

**[0008]** [Fig. 1](#) ist eine perspektivische Ansicht einer Positronenemissionstomografie(PET)-Detektoreinheit gemäß einer Ausführungsform.

**[0009]** [Fig. 2](#) ist ein perspektivische Ansicht einer Detektoreinheit, die gemäß einer Ausführungsform gebildet ist.

**[0010]** [Fig. 3](#) ist ein schematisches Blockdiagramm von Silicium-Fotoverstärkern (SIPMs) gemäß einer Ausführungsform.

**[0011]** [Fig. 4](#) ist eine grafische Darstellung von Dunkelströmen gemäß einer Ausführungsform.

**[0012]** [Fig. 5](#) ist ein Blockdiagramm der Ausleseelektronik gemäß einer Ausführungsform.

**[0013]** [Fig. 6–Fig. 9](#) sind grafische Darstellungen von Dunkelströmen gemäß einer Ausführungsform.

**[0014]** [Fig. 10](#) ist ein Fließbild eines Verfahrens zum Kalibrieren von Gammadetektoren gemäß verschiedenen Ausführungsformen.

**[0015]** [Fig. 11](#) ist eine grafische Darstellung einer Kurve einer normalisierten Rate des Dunkelstromes in Abhängigkeit von einer angelegten Vorspannung.

**[0016]** [Fig. 12](#) ist eine grafische Darstellung einer Kurve einer gemessenen mittleren Grundlinie als eine Funktion der Vorspannung.

**[0017]** [Fig. 13](#) ist eine grafische Darstellung einer Kurve entsprechend einer normalisierten Rate der Änderung von Dunkelströmen in Abhängigkeit von der Vorspannung.

**[0018]** [Fig. 14](#) ist ein Diagramm eines PET-Systems gemäß einer Ausführungsform.

#### DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

**[0019]** Die folgende detaillierte Beschreibung gewisser Ausführungsformen wird beim Lesen in Verbindung mit der beigefügten Zeichnung besser verstanden werden. Zu dem Ausmaß, dass die Figuren Diagramme funktionaler Module verschiedener Ausführungsformen veranschaulichen, zeigen die funktionalen Blöcke nicht notwendigerweise die Unterscheidung zwischen der Hardwareschaltung. So können z.B. einer oder mehrere funktionale Blöcke (z.B. Prozessoren oder Speicher) durch ein einziges Stück Hardware (z.B. einen Signalprozessor für allgemeine Zwecke oder einen Block eines Speichers mit beliebigem Zugriff zu jeder Speicherzelle, eine Speicherplatte oder Ähnliches) verwirklicht werden. In ähnlicher Weise können die Programme für sich stehen oder sie können als Unterprogramme in einem Betriebssystem einbezogen sein, sie können Funktionen in einer installierten Softwarepackung und Ähnliches sein. Es sollte klar sein, dass die verschiedenen Ausführungsformen nicht auf die in der Zeichnung gezeigten Anordnungen und Instrumente beschränkt sind.

**[0020]** Ein Element oder eine Stufe, die, wie hierin benutzt, in Singular angegeben ist oder dem/der das Wort „ein“ oder „eine“ vorausgeht, sind nicht dahingehend zu verstehen, dass sie die Mehrzahl dieser Elemente oder Stufen ausschließen, außer ein solcher Ausschluss ist ausdrücklich erklärt. Weiter sind Bezugnamen auf „eine Ausführungsform“ der vorliegenden Erfindung nicht dahingehend zu interpretieren, dass sie die Existenz zusätzlicher Ausführungsformen ausschließen, die die genannten Merkmale ebenfalls beinhalten. Sofern nicht ausdrücklich das Gegenteil erklärt ist, können Ausführungsformen, die ein Element oder eine Mehrzahl von Elementen mit einer besonderen Eigenschaft „umfassen“ oder „aufweisen“, zusätzlich Elemente einschließen, die diese Eigenschaft nicht aufweisen.

**[0021]** Verschiedene Ausführungsformen stellen Systeme und Verfahren zum Ausführen der Kalibrierung für Gammastrahlendetektoren (z.B. Energie- und Verstärkungs-Kalibrierung) bereit, wie für Positronenemissionstomografie(PET)-Systeme. Verschiedene Ausführungsformen benutzen den Strom einschließlich von Dunkelströmen, was auch irgend ein Signal einschließen kann, das von einer natürlichen Hintergrundstrahlung oder einem externen Signal hinzugefügt ist, um die Durchbruchsspannung von Fotosensoren der Gammadetektoren zu messen, die in einigen Ausführungsformen Siliciumfotoverstärker (SIPMs) sind. Eine Verstärkung wird dann auf der Grundlage der Messung eingestellt. Eine Zunahme im Strom würde z.B. als eine Grundlinienverschiebung oder eine mittlere Peakverschiebung in der Probenelektronik präsentiert werden. Mindestens

ein technischer Effekt verschiedener Ausführungsformen ist es, die Verstärkungs- und/oder Energiekalibrierung mit SIPMs mit mehreren Anoden bereitzustellen und dies kann im lichtanteiligen Blockdesign erfolgen.

**[0022]** Verschiedene Ausführungsformen können in Kombination mit Gammastrahlendetektoren (hierin auch als Gammendetektoren bezeichnet) in einem PET-System eingesetzt werden, das eine PET-Detektorbaueinheit **20** aufweist, die in perspektivischer Ansicht in [Fig. 1](#) gezeigt ist. Es sollte jedoch klar sein, dass die Gammendetektoren und verschiedene Ausführungsformen in verschiedenen Arten von Abbildungs- und Nichtabbildungssystemen verwirklicht werden können. In der dargestellten Ausführungsform ist die PET-Detektorbaueinheit **20** mit einem Verstärkungs-Kalibrierungsmodul **50** (oder -baueinheit) gekoppelt, die Elektronik zum Verarbeiten empfangener Strommessungen, einschließlich Dunkelströmen, einschließt, um Fotoverstärker-Fotosensoren, wie SIPMs der PET-Baueinheit **20**, zu kalibrieren. So kann das Verstärkungs-Kalibrierungsmodul **50** z.B. ein oder mehrere Messsignale von einer Vielzahl anwendungsspezifischer integrierter Schaltungen (ASICs), die mit der PET-Detektorbaueinheit **20** verbunden sind, empfangen. Die PET-Detektorringbaueinheit **20** kann somit zum Bereitstellen von Signalen für das Verstärkungs-Kalibrierungsmodul **50** benutzt werden.

**[0023]** In verschiedenen Ausführungsformen schließt die PET-Detektorbaueinheit **20** eine Vielzahl von Detektormodulen **22** ein, die in einem Ring angeordnet sind, um die PET-Detektorringbaueinheit **20** zu bilden. Jedes Detektormodul **22** ist aus einer Vielzahl von Detektoreinheiten **24** zusammengesetzt. Eine Vielzahl von Detektoreinheiten **24** ist zur Bildung eines einzelnen Detektormoduls **22** zusammengesetzt und eine Vielzahl von Detektormodulen **22** ist zur Bildung der Detektorringbaueinheit **20** zusammengesetzt. In einer Ausführungsform schließt die Detektorbaueinheit **20** achtundzwanzig Detektormodule **22** ein, die miteinander gekoppelt sind, sodass die Detektorbaueinheit **20** eine Ringgestalt aufweist. In einigen Ausführungsformen schließt jedes Detektormodul **22** zwanzig Detektoreinheiten **24** ein, die in einer 4×5-Matrix angeordnet sind. Es sollte realisiert werden, dass die Quantität der Detektormodule **22**, die zum Bilden der Detektorbaueinheit **20** benutzt wird, beispielhaft ist, und dass die Detektorbaueinheit **20** mehr oder weniger als achtundzwanzig Detektormodule **22** aufweisen kann. Weiter sollte es realisiert werden, dass die Quantität der Detektoreinheiten **24**, die zum Bilden jedes Detektormoduls **22** eingesetzt wird, beispielhaft ist, und dass das Detektormodul **22** mehr oder weniger als zwanzig Detektoreinheiten **24** aufweisen kann.

**[0024]** [Fig. 2](#) ist eine perspektivische Ansicht einer beispielhaften Detektoreinheit **24**, die einen Teil des in [Fig. 1](#) gezeigten Detektormoduls **22** bilden kann. In verschiedenen Ausführungsformen schließt die Detektoreinheit **24** einen Szintillatorblock **30** ein, der ein oder mehrere Szintillatorkristalle **32** aufweist, die entlang einer x-Achse und einer z-Achse angeordnet sind. In einer Ausführungsform hat der Szintillatorblock **30** sechsunddreißig Kristalle **32**, die in einer 4×9-Matrix angeordnet sind. Es sollte jedoch realisiert werden, dass der Szintillatorblock **30** weniger oder mehr als sechsunddreißig Kristalle **32** aufweisen kann, und dass die Kristalle **32** in einer Matrix irgendeiner geeigneten Größe angeordnet werden können. Es ist auch zu bemerken, dass die Szintillatorkristalle **32** aus irgendeinem geeigneten Material, wie Wismutgerminat (BGO), Cer-dotiertem Lutetium-Yttrium-Orthosilicat (LYSO) oder Gadolinium-oxyorthosilicat (GSO), neben anderen, gebildet werden können.

**[0025]** Die Detektoreinheit **24** schließt auch eine Vielzahl von Lichtsensoren **34** ein, die als eine Vielzahl von Fotosensoren veranschaulicht sind, die irgendwelche geeigneten Fotodetektoren sein können, die Licht oder andere elektromagnetische Energie anzeigen oder nachweisen. In der dargestellten Ausführungsform sind die Lichtsensoren **34** SIPMs. Die Vielzahl von Lichtsensoren **34** ist an ein Ende des Szintillatorblockes **30** gegenüber einer Detektorfläche **38** gekoppelt. Die Oberflächen des Kristallblocks **30**, die nicht mit den Lichtsensoren **34** gekoppelt sind, sind mit einer reflektierenden Schicht, wie Teflon, mit  $\text{TiO}_2$  beladenem Epoxyharz oder einem Spektralreflektor, abgedeckt. Es ist zu bemerken, dass in einigen Ausführungsformen ein Reflektor oder ein reflektierendes Material zwischen einigen Kristallen in dem Kristallblock **30** angeordnet sein kann.

**[0026]** In verschiedenen Ausführungsformen hat die Detektoreinheit **24** achtzehn Lichtsensoren **34** an jedem Ende des Szintillatorblockes **30**, die in einer 3×6-Matrix angeordnet sind. Es sollte jedoch realisiert werden, dass die Detektoreinheit **24** weniger oder mehr als achtzehn Lichtsensoren **34** aufweisen kann, und dass die Lichtsensoren **34** in einer Matrix irgendeiner geeigneten Größe angeordnet sein können. So schließen z.B. einige Ausführungsformen sechsunddreißig, vierundfünfzig oder hundert Kristalle **32** mit entsprechenden Lichtsensoren **34** ein, die in einer 6×6-Matrix, 9×6-Matrix bzw. 10×10-Matrix angeordnet sind. Es ist jedoch zu bemerken, dass es in verschiedenen Ausführungsformen kein 1-zu-1-Koppeln zwischen dem Lichtsensor **34** (z.B. einem Fotosensor) und dem Kristall **32** gibt, sodass es ein 1-zu-mehr-fach-Koppeln zwischen dem Lichtsensor **34** und dem Kristall **32** gibt. In einigen Ausführungsformen kann es jedoch ein 1-zu-1-Koppeln zwischen dem Lichtsensor **34** (z.B. einem Fotosensor) und dem

Kristall **32** geben. Die Lichtsensoren **34** können auch eine verschiedene Größe oder Gestalt aufweisen. In einigen Ausführungsformen sind die Lichtsensoren **34** größer als  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ . In anderen Ausführungsformen können jedoch größere oder kleinere Lichtsensoren **34** benutzt werden, wie  $4 \times 6 \text{ mm}^2$ -Lichtsensoren **34**.

**[0027]** In einer Ausführungsform sind die Lichtsensoren **34** Lawinenfotodiode, die parallel verbunden sind und oberhalb einer Durchbruchsspannung in einem Geigermodus betrieben werden. Die Lichtsensoren **34** können z.B. in verschiedenen Ausführungsformen, die als Einzelphotonen-empfindliche Vorrichtungen konfiguriert sind, gebildet aus einer Lawinenfotodiodenanordnung auf einem Siliciumsubstrat, SIPMs sein. Es ist jedoch zu bemerken, dass die Lichtsensoren **34** von irgendeiner Art Lichtsensor sein können, in dem eine normalisierte Rate der Änderung des Dunkelstromes in Abhängigkeit von der Vorspannung einen Peak aufweist und worin die Verstärkung aus der angelegten Spannung und der Position dieses Peaks bestimmt werden kann.

**[0028]** Im Betrieb wandeln die Szintillatorkristalle **32** die Energie von einem Gammastrahl, der auf den Szintillatorkristall **32** auftrifft, in sichtbare (oder nahe UV) Lichtphotonen um. Die Photonen werden dann durch die Lichtsensoren **34** in elektrische Analogsignale umgewandelt. Wenn ein Gammastrahl auf irgendeinen der Szintillatorkristalle **32** in einer Detektoreinheit **24** trifft, wandelt der den Gammastrahl nachweisende Szintillator die Energie des Gammastrahls in sichtbares Licht um, das durch die Lichtsensoren **34** in der Detektoreinheit **24** nachgewiesen wird. In der beispielhaften Ausführungsform ist jede Detektoreinheit **24** zur Abgabe von „n“ Analogsignalen **40** konfiguriert.

**[0029]** Um die richtige Verstärkung zu erzielen, sind während des Betriebes die Lichtsensoren **34**, z.B. die SIPMs, bei einer Betriebsspannung oberhalb der Durchbruchsspannung des SIPM in einem Geigermodus vorgespannt. [Fig. 3](#) veranschaulicht eine Anordnung **60** von SIPMs **62** (als eine  $2 \times 3$ -Anordnung veranschaulicht) gemäß einer Ausführungsform. Jede der SIPMs **62** repräsentiert eine separate Anode und jede der SIPMs **62** ist vorgespannt, d.h. es ist eine Vorspannung daran angelegt. Die grafische Darstellung **70** der [Fig. 4](#) zeigt I-V-Kurven **72** entsprechend jeder der Anoden, d.h. jeder der SIPMs **62**. Es ist zu bemerken, dass die horizontale Achse in der grafischen Darstellung **70** die Spannung repräsentiert und die vertikale Achse den Dunkelstrom repräsentiert. Wie ersichtlich, liegt der Übergangspunkt in jeder der Kurven **72** bei etwa 71,5 Volt, was die Durchbruchsspannung repräsentiert. Wie detaillierter beschrieben werden wird, kann jedoch mehr als ein Übergangspunkt vorhanden sein. Es ist auch ersicht-

lich, dass die Durchbruchsspannung jeder SIPMs **62** etwas verschieden ist.

**[0030]** Der Unterschied zwischen der Betriebsspannung und der Durchbruchsspannung wird als Überspannung bezeichnet und ist proportional der Verstärkung. Im Besonderen ist Verstärkung gleich Oberspannung  $X$  Kapazität. Diese Charakteristik zeigt, dass es unterhalb der Durchbruchsspannung fast keine Dunkelströme gibt und oberhalb der Durchbruchsspannung die Verstärkung mit der Überspannung zunimmt, da die Kapazität des SIPM **62** (z.B. jede einzelne Anode oder Zelle) fixiert ist. Die I-V-Kurven **72** (wie in [Fig. 4](#) gezeigt) sollten allgemein eine lineare Zunahme von der Durchbruchsspannung aus und mehr aufweisen, doch haben die I-V-Kurven **72**, wie in der grafischen Darstellung **70** ersichtlich (gezeigt in [Fig. 4](#)), eine exponentielle Gestalt als ein Resultat der höheren Wahrscheinlichkeit der Lawine für freie Elektronen, einer vergrößerten Verarmungsregion, einer optischen Kreuzkopplung zwischen Mikrozellen und nach Impulsen, die nicht linear zur Vorspannung sind.

**[0031]** Die Dunkelströme oder Gesamtströme können demgemäß folgendermaßen definiert sein: Dunkelströme (oder Gesamtstrom) =  $f(\text{Verstärkung})$  oder  $f(\text{Überspannung})$

**[0032]** In verschiedenen Ausführungsformen wird die charakteristische Gestalt der I-V-Kurven **72** für die Dunkelströme zum Errechnen der Durchbruchsspannung benutzt, die dann in der Verstärkungskalibrierung durch das Verstärkungs-Kalibrierungsmodul **50** (in [Fig. 1](#) gezeigt) benutzt wird. In verschiedenen Ausführungsformen wird, nachdem die Durchbruchsspannung bestimmt ist, die gleiche Überspannung als eine Vorspannung an jedes der SIPMs **62** angelegt.

**[0033]** In verschiedenen Ausführungsformen kann eine oder können mehrere der I-V-Kurven **72** aus der Änderung in der Grundlinie des Ausgangssignals von der Ausleseelektronik erhalten werden, während die Vorspannung über die Durchbruchsspannung hinweg verändert wird. In verschiedenen Ausführungsformen können die I-V-Kurven **72** aus einer Kombination von Signalen von natürlicher Hintergrundstrahlung oder externen Strahlungsquellen und dem Dunkelstrom erhalten werden. In diesen Ausführungsformen wird die Änderung in dem zeitgemittelten Ausgangssignal der Ausleseelektronik als eine Funktion der angelegten Vorspannung gemessen. Da das aufgrund eines Photons durch das SIPM **62** erzeugte Signal das gleiche Signal ist, das durch ein Dunkelzähl-Geschehen erzeugt wird, ist die Gestalt der I-V-Kurve, die aus dem zeitgemittelten Signal erzeugt wird, im Wesentlichen die gleiche wie die Gestalt der I-V-Kurve, die aus der Änderung in der Grundlinie des Ausgangssignals erzeugt wird. Das zeitgemittelte Signal aus der Ausleseelektronik wird größer sein als

die Grundlinie dieses Signals. Für eine gegebene Änderung in der Vorspannung wird die Änderung in dem zeitgemittelten Signal daher größer sein als die Änderung in der Grundlinie des Signals. Wenn daher der Dunkelstrom vom SIPM **62** sehr gering ist, kann die Benutzung des zeitgemittelten Signalwertes eine genauere Messung der I-V-Kurve ergeben.

**[0034]** Verschiedene Ausführungsformen bieten eine Verstärkungskalibrierung für PET-Detektoren auf SIPM-Grundlage. Das Verstärkungs-Kalibrierungsmodul **50** kann Interfaceelektronik **52** einschließen, die die Messung eines Grundliniensignals in Abhängigkeit von der angelegten Spannung gestattet, da Untergruppen der SIPM-Anoden ermöglicht sind. In verschiedenen Ausführungsformen errechnet das Verstärkungs-Kalibrierungsmodul **50** auch die Durchbruchsspannung aus der erhaltenen Abhängigkeit des Dunkelstrom-/Grundliniensignals von der Vorspannung. Im Betrieb kann eine Online-Kalibrierung und/oder ein kontinuierliches Überwachen der Verstärkung erfolgen.

**[0035]** Eine Ausführungsform der Ausleseelektronik **80** ist in [Fig. 5](#) gezeigt. Die Ausleseelektronik **80** schließt eine Vielzahl von Pufferverstärkern **82** ein. In der dargestellten Ausführungsform ist ein Pufferverstärker **82** mit einem entsprechenden SIPM **62** derart verbunden, dass der Ausgang des SIPM **62**, der in einer Ausführungsform ein Strom ist, als eine Eingabe an den Pufferverstärker **82** gegeben wird. Zusätzlich ist auch ein Digital-zu-Analog-Konverter (DAC) **84** mit einem Eingang des Pufferverstärkers **82** verbunden, der in einigen Ausführungsformen mit einem Anoden-vorspannungs-Regelsignal versehen wird. Die Ausgänge der Pufferverstärker **82** sind mit einem Signalprozessor **86** verbunden, der einen Digitalisierer, Integrator und/oder Komparator einschließen kann. Eine Vorspannungsquelle **88** ist auch mit jedem der SIPMs **62** verbunden, um eine Kathodenvorspannung bereitzustellen, wie detaillierter hierin beschrieben ist.

**[0036]** Im Betrieb werden die Vorspannung von der Kathodenvorspannungsquelle **88** und die Anoden-vorspannung von dem DAC **84** zum Einstellen der Vorspannung für die SIPMs **62** benutzt. Durch Einstellen der Kathodenvorspannung, der an die SIPMs **62** angelegten Vorspannung und/oder der Anoden-vorspannung von den DAC **84** kann die I-V-Kurve, z.B. die I-V-Kurven **72** (gezeigt in [Fig. 4](#)) für die SIPMs **62** gemessen werden. Es ist zu bemerken, dass in einigen Ausführungsformen der gemessene Strom ( $I$ ) von den SIPMs **62** den Strom von den Dunkelimpulsen und den durch Photonen erzeugten Strom repräsentiert, die in den Szintillatorkristallen **32** produziert werden.

**[0037]** In verschiedenen Ausführungsformen kann der Strom  $I$  als eine Grundlinienverschiebung (durch

Digitalisieren oder Integrieren) der Ausgangssignale von den Pufferverstärkern **82** gemessen werden. Es ist zu bemerken, dass der Mittelwert einer Anzahl regellosen Proben des Ausgleichs benutzt werden kann, um die Messung zu verbessern, was irgendeine natürliche oder Hintergrund-Strahlungsquelle einschließen kann, da diese Quelle das gemessene Durchschnittssignal verstärkt. Wenn eine Anzahl regellosen Proben der Grundlinie gemessen wird, dann kann die Varianz der Grundlinie errechnet werden. Die Änderung in der Varianz der Grundlinie als eine Funktion der Vorspannung, wie in den [Fig. 8](#) und [Fig. 9](#) gezeigt, kann dann dazu benutzt werden, die Durchbruchsspannung zu bestimmen. Durch Extrapolieren der I-V-Kurve(n) können danach eine Durchbruchsspannung gemessen und die gleichen Überspannungen für jedes der SIPMs **62** eingestellt werden.

**[0038]** In verschiedenen Ausführungsformen schließt der Signalprozessor **86** eine Feld-programmierbare Toranordnung (FPGA) ein, die konfiguriert sein kann, die Kalibrierungs-Aufzeichnungen (z.B. ein oder mehrere Kalibrierungsmessungen) zu speichern und die auch reprogrammiert werden kann, wie benötigt oder erwünscht. Zusätzlich kann die FPGA benutzt werden, die Durchbruchsspannung unter Benutzung einer oder mehrerer gemessener I-V-Kurven zu errechnen. Es ist zu bemerken, dass die Durchbruchsspannung unter Anwendung irgend-eines geeigneten Verfahrens aus I-V-Kurven errechnet werden kann. Es ist auch zu bemerken, dass in einigen Ausführungsformen I-V-Kurven nicht erzeugt und verarbeitet werden, statt dessen wird ein Zielniveau für die Grundlinie oder der zeitgemittelte Wert des Ausgangssignals von der Ausleseelektronik bestimmt und die Vorspannung wird über den geeigneten Bereich geführt, um den Vorspannungswert zu bestimmen, der die Grundlinie (oder das zeitgemittelte Signal) erzeugt, das gleich dem gewählten Ziel ist. Die Durchbruchsspannung kann dann aus diesem Vorspannungswert bestimmt werden. Die verschiedenen SIPMs **62** in dem Detektor können verschiedene Zielwerte aufweisen. So kann, z.B., der Zielwert für einen SIPM **62** gleich einer Konstanten sein, die größer als der einfache Wert der Grundlinie (oder des zeitgemittelten Signals) ist, der bei einer sehr geringen Vorspannung gemessen wurde. Es ist auch zu bemerken, dass der Vergleich ausgeführt werden kann, nachdem das Ausgabesignal von der Ausleseelektronik digitalisiert worden ist oder ein Analog-Komparator kann auf das Signal angewendet werden, bevor das Signal digitalisiert worden ist.

**[0039]** In verschiedenen Ausführungsformen können Grundlinie, zeitgemitteltes Signal und Varianz-messungen für die Kalibrierung benutzt werden. So veranschaulichen, z.B. [Fig. 6](#) und [7](#) grafische Darstellungen **90** und **92** der gemessenen Grundlinien in Abhängigkeit von der Überspannung an dem SIPM

**62** bzw. derart verschobene Grundlinienkurven, dass die Kurven einen Wert von null bei einer Vorspannung von 70 Volt aufweisen. Zusätzlich veranschaulichen [Fig. 8](#) und [Fig. 9](#) grafische Darstellungen **94** und **96** der gemessenen Grundlinienvarianz bzw. der Varianz, die bei einer Vorspannung von 70 Volt auf einen Wert von 1 normalisiert wurde. Zusätzlich veranschaulichen [Fig. 6–Fig. 9](#), dass die verschobene Grundlinie und die normalisierte Grundlinienvarianz (wie in den grafischen Darstellungen **94** und **96** gezeigt) allgemein dem gleichen Trend oder den gleichen Kurvencharakteristika folgen. In verschiedenen Ausführungsformen können die Übergangspunkte **100–107** unter Anwendung irgendeines Verfahrens bestimmt werden, das die Punkte identifiziert, bei denen sich eine Kurve des Satzes von Kurven **108, 110, 112, 114** von einer allgemeinen oder im Wesentlichen flachen oder horizontalen (wenig oder keine Zunahme) sich zu einer gekrümmten ändert. Das heißt, die erste Ableitung der Kurve ändert von einem Wert nahe null bis zu einem Wert, der beträchtlich größer ist. Es ist zu bemerken, dass, während die Übergangspunkte von Kurven von verschiedenen Anoden (z.B. Übergangspunkte **100** und **101**) bei verschiedenen Vorspannungen auftreten können, die Übergangspunkte der verschiedenen grafischen Darstellungen für eine gegebene Anode im Wesentlichen gleich sind (z.B. Übergangspunkte **100, 102, 104** und **106**).

**[0040]** In verschiedenen Ausführungsformen können die Übergangspunkte durch Anwenden einer Kurvenanpassfunktion bestimmt werden. In einigen Ausführungsformen können die Übergangspunkte **100–107** durch Bestimmen einer Zunahme oberhalb eines definierten Wertes identifiziert werden, wie auf der Grundlage eines vorbestimmten Durchbruchstromwertes. In einer Ausführungsform können die Übergangspunkte **100** und **101**, z.B. als der Punkt auf den Kurven bestimmt werden, bei dem der Grundlinienwert 20 Mikroampere oberhalb des Wertes bei einem Vorspannungswert von 70 Volt liegt.

**[0041]** Es ist zu bemerken, dass in verschiedenen anderen Ausführungsformen ein anderer Übergangspunkt benutzt werden kann, z.B. die Übergangspunkte **116, 118, 120** bzw. **122** des Satzes von Kurven **108, 110, 112** bzw. **114**. Die Übergangspunkte **116, 118, 120, 122** entsprechen im Allgemeinen einer scharfen Änderung in der Krümmung der Kurven **108, 110, 112, 114** derart, dass sich die Kurven **108, 110, 112, 114** nach den Übergangspunkten **116, 118, 120** und **122** allgemein oder im Wesentlichen vertikal erstrecken. Zusätzlich kann eine Kombination der Übergangspunkte **100, 102, 104, 106** und der Übergangspunkte **116, 118, 120, 122** benutzt werden.

**[0042]** Es ist zu bemerken, dass jede der SIPMs **62** eine Vielzahl von Mikrozellen (z.B. 10.000 Mikrozellen) einschließen kann. Dementsprechend können,

z.B., gemessene Grundlinienströme von SIPM **62** zu SIPM **62** als ein Resultat des Herstellungsverfahrens variieren.

**[0043]** Ein Verfahren **130** zum Kalibrieren von Gammadetektoren ist in [Fig. 10](#) gezeigt. Das Verfahren **130** schließt das Messen von Dunkelströmen eines oder mehrerer Lichtsensoren bei **132** ein. So werden in verschiedenen Ausführungsformen, z.B., Dunkelströmen von einem oder mehreren SIPMs der Gammadetektoren gemessen (was gemessene Hintergrundstrahlung einschließen kann), wie hierin beschrieben, was eine Funktion der Vorspannung sein kann. Danach werden bei **134** ein oder mehrere Übergangspunkte entlang einer oder mehreren I-V-Kurven bestimmt, die auf der Grundlage der gemessenen Dunkelströme erzeugt sind. Der Übergangspunkt kann, z.B. als der Punkt bestimmt werden, bei dem sich die Kurve(n) von allgemein horizontal ändert und nach oben zu steigen beginnt oder wo die Kurve sich allgemein vertikal zu erstrecken beginnt. In verschiedenen Ausführungsformen kann eine vorbestimmte Änderung in der Neigung einer oder mehrerer der Kurven bestimmt werden.

**[0044]** Unter Einsatz des/der bestimmten Übergangspunkte(s) wird bei **136** eine Durchbruchsspannung der SIPMs bestimmt. So kann die Durchbruchsspannung, z.B. auf der Grundlage des gemessenen Wertes bei dem/den Übergangspunkt(en) oder eines vorbestimmten Ausmaßes unterhalb dieses Punktes bestimmt werden. Die bestimmte Durchbruchsspannung wird dann benutzt, die Vorspannung der SIPMs bei **138** einzustellen, wie hierin beschrieben, z.B. als eine Spannung bei einer definierten Menge oberhalb der gemessenen Spannung an dem/den Übergangspunkt(en).

**[0045]** Variationen und Modifikationen sind vorgesehen. So können, z.B., in einigen Ausführungsformen ein oder mehrere alternative Übergangspunkte jenseits des ersten Durchbruchphänomens benutzt werden. Im Besonderen wird zuerst die Rate der Änderung des Dunkelstromes mit Bezug auf die Überspannung ( $di/dv$ ) erhalten, um die abgeleitete I-V-Kurve zu ergeben, die, wenn sie weiter durch den Dunkelstrom ( $di/dv$ )/I normalisiert ist, ein standardisiertes Maß der Verstärkungsänderung ergibt. Dieser alternative Übergang oder diese Übergangspunkte können als alternative Bezugspunkte benutzt werden, um die Betriebsspannung für SIPMs festzulegen, weil diese Punkte in bekannter Weise zu dem ersten Durchbruchspunkt versetzt sind. So veranschaulicht, z.B., die grafische Darstellung **140** der [Fig. 11](#) eine Kurve einer normalisierten Rate des Dunkelstromes in Abhängigkeit von der angelegten Vorspannung. Wie ersichtlich, erfolgt die erste Spalte **142** aufgrund eines Lawinendurchbruches und eine zweite Spalte **144** hauptsächlich durch feldunterstütztes Durchtunnellen. Es ist somit ersichtlich, dass

der Beginn aufgrund des feldunterstützten Durchtunnels nach dem Durchbruchsimpuls (bei dem ersten Peak 142) bei 146 identifiziert ist. Verschiedene Ausführungsformen können einen alternativen Übergang oder alternative Übergangspunkte benutzen.

**[0046]** Es ist zu bemerken, dass die Bestimmung der Übergangspunkte über eine Anpassung einer geeigneten Modellform an die gemessenen Daten (wie in [Fig. 12](#) gezeigt) oder über ein Interpolationsverfahren von zwei nächsten gemessenen Punkten zu einem gegebenen Schwellenwert (gezeigt in [Fig. 13](#)) ausgeführt werden kann. Die grafische Darstellung 150 von [Fig. 12](#), z.B., veranschaulicht eine Kurve 152 einer gemessenen mittleren Grundlinie als einer Funktion der Vorspannung und die grafische Darstellung 160 von [Fig. 13](#) veranschaulicht eine Kurve 162, entsprechend der normalisierten Änderung des Dunkelstromes in Abhängigkeit von der Vorspannung. In verschiedenen Ausführungsformen wird die Spannung am Beginn durch Interpolation für eine Schelle bestimmt, die in der dargestellten Ausführungsform 30% (identifiziert durch den Punkt 164 in [Fig. 13](#)) beträgt.

**[0047]** In verschiedenen Ausführungsformen können abgeleitete I-V-Kurven so erhalten und Übergangspunkte bestimmt werden. So kann, z.B., der Übergangspunkt auf einem zweiten Peak zusätzlich zum ersten Peak (erster Durchbruch) gemessen und als alternativer Bezugspunkt benutzt werden.

**[0048]** In verschiedenen Ausführungsformen wird Strom als eine Funktion der angelegten Spannung über jedem SiPM gemessen und die gemessene Beziehung wird analysiert, um die Durchbruchsspannung für den SiPM zu lokalisieren. Nachdem die Durchbruchsspannung für jeden SiPM bekannt ist, kann ein fixierter Ausgleich hinzugefügt werden, um die Verstärkung aller SiPMs auf irgendeinen erwünschten gemeinsamen Wert einzustellen. Verschiedene Ausführungsformen können ein Verfahren zur Verstärkungskalibrierung für Gammastrahlendetektoren bieten, wie Gammastrahlendetektoren, die SiPMs benutzen. Durch Praktizieren mindestens einer Ausführungsform werden die Verstärkungen der SiPMs innerhalb eines Detektorblockes ausgeglichen, sodass die Energie- und Zeitauflösung des Detektorblockes nicht gefährdet wird. Zusätzlich kann die Kalibrierung jedes Detektorblockes innerhalb eines PET-Scanners, der im Freien eingesetzt wird, ausgeführt werden, selbst wenn keine frühere Information über die optimalen Vorspannungen, die zum Ausgleichen der Verstärkungen in der SiPM-Anordnung notwendig sind, vom Hersteller der Anordnung angegeben sind. In verschiedenen Ausführungsformen wird eine externe Kalibrierungsquelle nicht eingesetzt.

**[0049]** [Fig. 14](#) ist ein Blockdiagramm einer beispielhaften Ausführungsform eines PET-Systems 200, in dem verschiedene Ausführungsformen der Erfindung verwirklicht werden können. Das PET-System 200 schließt einen PET-Scanner 201 und einen Regler 203 ein, um Verfahren zur Bildrekonstruktion zu regeln. Der Regler 203 ist auch konfiguriert, die Verstärkungskalibrierung, wie hierin detailliert beschrieben, auszuführen, die teilweise durch das Verstärkungs-Kalibrierungsmodul 50 ausgeführt werden kann (in [Fig. 1](#) gezeigt) oder darin verkörpert ist. Der Regler 203 schließt eine Bedienungsperson-Arbeitsstation 204 und einen Prozessor 205 ein. Der Prozessor 205 schließt einen Datenerfassungs-Prozessor 206 und einen Bildrekonstruktions-Prozessor 208 ein. Der PET-Scanner 201, die Bedienungsperson-Arbeitsstation 204, der Datenerfassungs-Prozessor 206 und der Bildrekonstruktions-Prozessor 208 sind mittels eines Kommunikationsgliedes 210 (z.B. eines seriellen Kommunikations- oder drahtlosen Gliedes) miteinander verbunden. Der PET-Scanner 201, der typischerweise ein (nicht gezeigtes) Gerüst einschließt, erfasst Scandaten und überträgt die Daten zu dem Datenerfassungs-Prozessor 206. Der Betrieb des PET-Scanners 201 wird von der Bedienungsperson-Arbeitsstation 204 aus geregelt. Die durch den Datenerfassungs-Prozessor 206 erfassten Daten werden unter Einsatz des Bildrekonstruktions-Prozessors 208 rekonstruiert.

**[0050]** Der PET-Scanner 201 kann, z.B., eine Vielzahl von Detektorringen betreiben. Ein solcher Detektorring, Detektorring 212, ist in [Fig. 14](#) veranschaulicht, und er kann als die Detektorring-Baueinheit 20 (gezeigt in [Fig. 1](#)) verkörpert sein. Der Detektorring 212 schließt eine zentrale Öffnung ein, in der ein Gegenstand 214 (z.B. ein Patient) unter Einsatz, z.B., eines motorisierten Tisches angeordnet werden kann, der mit der zentralen Achse des Ringes 212 ausgerichtet ist. Der motorisierte Tisch bewegt den Gegenstand 214 in die zentrale Öffnung des Detektorringes 212 aufgrund einer oder mehrerer Anweisungen, die von der Bedienungsperson-Arbeitsstation 204 erhalten werden. Ein PET-Scannerregler 216, auch als ein Gerüstregler bezeichnet, ist in dem PET-Scanner 201 vorgesehen (z.B. montiert). Der PET-Scannerregler 216 spricht auf die durch die Kommunikationsverbindung 210 von der Bedienungsperson-Arbeitsstation 204 erhaltenen Anweisungen an. Der Betrieb des PET-Scanners 201 wird daher von der Bedienungsperson-Arbeitsstation 204 durch den PET-Scannerregler 216 geregelt.

**[0051]** Der Detektorring 212 schließt eine Vielzahl von Detektorelementen zum Ausführen eines PET-Scans des Gegenstandes 214 ein. Es können, z.B., 420 Kristalle pro Ring und 24 Ringe in dem Scanner vorhanden sein. Wie in [Fig. 14](#) gezeigt, schließt der Detektorring 212 ein erstes Detektorelement 217, ein zweites Detektorelement 219 und verschiedene an-

dere Detektoren ein. Es ist zu bemerken, dass die Detektorelemente als das erste Detektorelement und das zweite Detektorelement nur deshalb bezeichnet werden, um die Stelle in [Fig. 14](#) zu unterscheiden. Das erste Detektorelement **217**, wie die anderen Detektoren, schließt einen Satz von Szintillatorkristallen ein, die in einer Matrix angeordnet sind, die vor einer Vielzahl von Fotosensoren (z.B. den Lichtsensoren **34**) angeordnet ist, wie detaillierter hierin beschrieben. Kollidiert ein Photon mit einem Kristall auf einem Detektor, dann produziert das Photon eine Szintillation auf dem Kristall. Jeder Fotosensor erzeugt ein Analogsignal auf der Kommunikationslinie **218**, wenn eine Szintillations-Geschehnis auftritt. Ein Satz von Erfassungsschaltungen **220** ist innerhalb des PET-Scanners **201** vorhanden, um diese Analogsignale zu empfangen. Die Erfassungsschaltungen **220** schließen Analog-Zu-Digital-Konverter, um Analogsignale zu digitalisieren, Verarbeitungselektronik, um Geschehnis-Signale zu quantifizieren, und eine Zeitmesseinheit ein, um die Zeit der Geschehnisse mit Bezug auf andere Geschehnisse in dem System zu bestimmen. Diese Information zeigt, z.B., wann ein Geschehnis stattfand und die Identität des Szintillationskristalles, der das Geschehnis nachgewiesen hat. Die Erfassungsschaltungen erzeugen Digitaldaten, die die Stelle, Zeit und Gesamtenergie des Geschehnisses angeben. Diese Geschehnis-Daten werden durch eine Kommunikationsverbindung, z.B., ein Kabel, zu einem Koinzidenz-Detektor oder -Prozessor **226** übertragen.

**[0052]** Der Koinzidentdetektor **226** empfängt Datenpakete der Geschehnisse von den Erfassungsschaltungen **220** und bestimmt, ob irgendwelche zwei der nachgewiesenen Geschehnisse koinzident sind. In diesem Kontext ist Koinzidenz bestimmt durch eine Anzahl von Faktoren. Zuerst müssen die Zeitmarkierungen in jedem Geschehnis-Datenpaket innerhalb einer vorbestimmten Zeitdauer voneinander liegen, z.B. 6 ns. Zweitens sollte die LOR (Verbindungsleitung), die durch eine gerade Linie gebildet wird, die die beiden Detektoren verbindet, die das Koinzidenzgeschehnis nachweisen, durch das Gesichtsfeld im PET-Scanner **201** hindurchgehen. Geschehnisse, die nicht gepaart werden können, werden verworfen. Koinzidente Geschehnispaare werden als ein Koinzidenz-Datenpaket aufgezeichnet, das durch eine Kommunikationsverbindung zu einem Sortierer **230** in dem Bildrekonstruktions-Prozessor **208** übertragen wird.

**[0053]** Der Bildrekonstruktions-Prozessor **208** schließt den Sortierer **230**, ein Speichermodul **232**, eine Bild-CPU **234**, einen Anordnungsprozessor **236** und eine Hinterebenen-Sammelleitung **238** ein. Der Sortierer **230** zählt alle Geschehnisse, die entlang jedes Projektionsstrahles auftreten, und organisiert sie zu einem Koinzidenz-Datensatz. In einer Ausführungsform wird dieser Datensatz als eine Datenan-

ordnung **240** organisiert, die als ein Sinogramm bezeichnet wird. Die Datenanordnung **240** wird in dem Speichermodul **232** gespeichert. Der Hinterebenen-Sammelleiter **238** wird durch die Bild-CPU **234**, die die Verbindung durch den Hinterebenen-Sammelleiter **238** regelt, mit der Kommunikationsverbindung **210** verbunden. Der Anordnungsprozessor **236** ist auch mit dem Hinterebenen-Sammelleiter **238** verbunden und empfängt die Datenanordnung **240** als eine Eingabe und rekonstruiert Abbildungen in der Form der Bildanordnungen **242**. Die resultierenden Bildanordnungen **242** werden in dem Speichermodul **232** gespeichert.

**[0054]** Die in der Bildanordnung **242** gespeicherten Abbildungen werden durch die Bild-CPU **234** zu der Bedienungsperson-Arbeitsstation **204** geleitet. Die Bedienungsperson-Arbeitsstation **204** schließt eine CPU **244**, eine Anzeigevorrichtung **246** und eine Eingabevorrichtung **248** ein. Die CPU **244** verbindet mit der Kommunikationsverbindung **210** und empfängt Eingaben (z.B. Benutzeranweisungen) von der Eingabevorrichtung **248**, die, z.B. eine Tastatur, Maus oder ein Berührungsdisplay sein kann. Die Bedienungsperson kann die Kalibrierung des PET-Scanners **201**, die Konfiguration des PET-Scanners **201** und die Positionierung des Gegenstandes **214** für einen Scan durch die Eingabevorrichtung **248** und dazugehörige Regelplattenschalter regeln. In ähnlicher Weise kann die Bedienungsperson auch die Anzeige der resultierenden Abbildung auf der Anzeigevorrichtung **246** regeln und Bildverbesserungs-Funktionen unter Benutzung von Programmen ausführen, die durch die Arbeitsstation-CPU **244** ausgeführt werden.

**[0055]** Der Prozessor **205** ist konfiguriert zum Verarbeiten der Scandaten, die von den Detektorelementen empfangen werden. Die Scandaten schließen, z.B. Sinogramm und Zeitinformation ein, die durch Prozessor **205** von den Detektorelementen während eines abbildenden Scans empfangen werden. Die Zeitinformation ist in einer Ausführungsform der Unterschied in der Zeit, zu der zwei Photonen, die in einem Annihilierungs-Geschehnis emittiert werden, durch Detektorelemente nachgewiesen werden. Die Zeitinformation kann eine Zeitmarkeninformation einschließen, die sich auf ein gemessenes Photonengeschehnis bezieht, das durch ein Paar von Detektorelementen nachgewiesen wird, z.B. das erste Detektorelement **217** und das zweite Detektorelement **219** für das PET-System **200**. Die Zeitmarkeninformation ist in verschiedenen Ausführungsformen die Zeit, bei der jedes Photon durch ein Detektorelement nachgewiesen wird.

**[0056]** Die Zeitinformation wird durch Detektoren empfangen, die, z.B. einen Block von **36** Szintillatorkristallen einschließen, die an einer Anordnung von Fotosensoren angebracht sind. Die Szintillatorkristal-

le wandeln das von dem Patienten eintreffende Photonen in eine Vielzahl (z.B. mehrere Tausend) von Lichtphotonen (z.B. sichtbares Licht oder nahe UV) um, die durch die Fotosensoren nachgewiesen werden. Der Anteil der Lichtphotonen, der durch jeden Fotosensorkanal nachgewiesen wird, wird zur Bestimmung benutzt, welcher der **36** Kristalle das auftreffende Photon empfangen hat. Das Zeitsignal wird bestimmt durch Verarbeiten der Vorderkante der Signale, um die Ankunft der Lichtphotonen an den Lichtsensoren **34** von, z.B. dem SiPM abzuschätzen. Dieses Zeitsignal wird dann digitalisiert und danach verarbeitet.

**[0057]** Die Energie- und Zeitinformationen werden zum Rekonstruieren einer Abbildung des Gegenstandes **214** benutzt, der durch das PET-System **200** ge-scannt worden ist. Die Rekonstruktion kann, z.B. eine zweidimensionale oder dreidimensionale Rekonstruktion einschließen. Die Zeitdaten jedes Detektor-elementes können als eine Zeit-Vorspannungsmatrix mit einem Zeit-Wiedergewinnungswert für jeden Satz von Projektionsstrahlen des PET-Systems **200** konfiguriert sein. Es ist zu bemerken, dass ein Detektor-elementpaar die Projektionsstrahlen von einem Photonengeschehnis nachweist. Die Zeit-Vorspannungsdaten jedes Detektorelementpaars, die dem Projektionsstrahl entsprechen, werden in dem Speichermodu-l **232** des PET-Systems **200** gespeichert.

**[0058]** Es ist zu bemerken, dass die verschiedenen Ausführungsformen in Hardware, Software oder einer Kombination davon verwirklicht werden können. Die verschiedenen Ausführungsformen und/oder Komponenten, z.B. die Module oder Komponenten und Regler darin, können auch als ein Teil eines oder mehrerer Computer oder Prozessoren ver-wirklicht werden. Der Computer oder Prozessor kann eine Computervorrichtung, eine Eingabevorrichtung, eine Anzeigeeinheit und, z.B. ein Interface einschließen, um in das Internet zu gelangen. Der Computer oder Prozessor kann einen Mikroprozessor einschließen. Der Mikroprozessor kann mit einer Kommunikations-Sammelleitung verbunden sein. Der Computer oder Prozessor kann auch einen Speicher einschließen. Der Speicher kann einen Speicher mit will-kürlichem Zugang zu jeder Speicherzelle (RAM) und einen Lesespeicher (ROM) einschließen. Der Computer oder Prozessor kann weiter eine Speichervorrichtung einschließen, die ein Magnetplattenlaufwerk oder ein entfernbare Speicherlaufwerk sein kann, wie ein Festkörperlaufwerk, Optikplattenlaufwerk und Ähnliche. Die Speichervorrichtung kann auch ande-re ähnliche Einrichtungen zum Laden von Computer-programmen oder anderen Instruktionen in den Computer oder Prozessor sein.

**[0059]** Der Begriff „Computer“ oder „Modul“, wie er hierin benutzt wird, kann irgendein System auf Prozessorgrundlage oder Mikroprozessor-Grundla-

ge einschließlich Systeme sein, die Mikrokontroller, Computer mit verringertem Instruktionssatz (RISC), ASICs, Logikschaltungen und irgendeine andere Schaltung oder irgendeinen anderen Prozessor be-nutzen, die zum Ausführen der hierin beschriebenen Funktionen in der Lage sind. Die obigen Beispiele sind nur exemplarisch und sie sollen daher in keiner Weise die Definition und/oder Bedeutung des Begrif-fes „Computer“ beschränken.

**[0060]** Der Computer oder Prozessor führt einen Satz von Instruktionen aus, die in einem oder meh-reen Speicherelementen gespeichert sind, um Einga-bedaten zu verarbeiten. Die Speicherelemente kön-nen auch Daten oder andere Information, wie er-wünscht oder benötigt, speichern. Das Speicherele-ment kann in der Form einer Informationsquelle oder eines physischen Speicherelementes innerhalb einer Verarbeitungsvorrichtung vorliegen.

**[0061]** Der Satz von Instruktionen kann verschie-dene Anweisungen einschließen, die den Computer oder Prozessor als eine Verarbeitungsvorrichtung in-struieren, spezifische Operationen auszuführen, wie die Verfahren und Prozesse der verschiedenen Aus-führungsformen der Erfindung. Der Satz von Instruk-tionen kann in der Form eines Softwareprogramms vorliegen. Die Software kann in verschiedenen For-men sein, wie Systemsoftware oder Anwendungs-software, und die wie ein greifbares und nichttransis-torisches computerlesbares Medium verkörpert sein können. Weiter kann die Software in der Form ei-ner Sammlung separater Programme oder Modu-le, eines Programmmoduls innerhalb eines größe-ren Programms oder ein Teil eines Programmmoduls vorliegen. Die Software kann auch modulares Pro-grammieren in der Form von objektorientiertem Pro-grammieren einschließen. Das Verarbeiten von Ein-gabedaten durch die Verarbeitungsvorrichtung kann aufgrund von Bedienungsperson-Anweisungen oder aufgrund von Resultaten früheren Verarbeitens oder aufgrund einer von einer anderen Verarbeitungsvor-richtung gemachten Anfrage erfolgen.

**[0062]** Die Begriffe „Software“ und „Firmware“, wie sie hierin benutzt werden, sind austauschbar und schließen irgendein Computerprogramm ein, das in einem Speicher zur Ausführung durch einen Com-puter gespeichert ist, einschließlich RAM-Speicher, ROM-Speicher, EPROM-Speicher, EEPROM-Spei-cher und nicht-flüchtigen RAM (NVRAM)-Speicher. Die obigen Speichertypen sind nur beispielhaft und sie begrenzen die Arten des Speichers, die für die Speicherung eines Computerprogramms brauchbar sind, nicht.

**[0063]** Es sollte klar sein, dass die obige Beschrei-bung veranschaulichend und nicht einschränkend ist. So können, z.B., die oben beschriebenen Ausführungsformen (und/oder Aspekte davon) in Kombina-

tion miteinander benutzt werden. Zusätzlich können viele Modifikationen ausgeführt werden, um eine besondere Situation oder ein besonderes Material an die Lehren der verschiedenen Ausführungsformen anzupassen, ohne deren Umfang zu verlassen. Während die Abmessungen und Arten von Materialien, die hierin beschrieben sind, die Parameter der verschiedenen Ausführungsformen definieren, sind sie in keiner Weise beschränkend und lediglich beispielhaft. Dem Fachmann sind beim Durchsehen der obigen Beschreibung viele andere Ausführungsformen zugänglich. Der Umfang der verschiedenen Ausführungsformen sollte daher unter Bezug auf die beigefügten Ansprüche bestimmt werden, zusammen mit dem vollen Umfang von Äquivalenten, zu dem solche Ansprüche berechtigt sind. In den beigefügten Ansprüchen sind die Begriffe „einschließend“ und „in welchem/welcher/welchen“ als englische Äquivalente der entsprechenden Begriffe „umfassend“ und „worin“ benutzt. In den folgenden Ansprüchen werden die Begriffe „erster“, „zweiter“ und „dritter“ usw. nur als Markierungen benutzt und sie sollen ihren Gegenständen keine numerischen Anforderungen auferlegen. Die Beschränkungen der folgenden Ansprüche sind nicht im Mittel-plus-Funktions-Format geschrieben und sie sollen nicht auf der Grundlage von 35 U.S.C. § 112, sechster Absatz interpretiert werden, außer und bis eine solche Anspruchseinschränkung ausdrücklich den Ausdruck „Einrichtung für“, gefolgt von einer Erklärung der Funktion ohne weitere Struktur benutzt.

**[0064]** Diese Beschreibung benutzt Beispiele zum Offenbaren der verschiedenen Ausführungsformen einschließlich der besten Art und auch, um es einem Fachmann zu ermöglichen, die verschiedenen Ausführungsformen auszuführen, einschließlich des Herstellens und Benutzens irgendwelcher Vorrichtungen und Systeme und des Ausführen irgendwelcher dazugehöriger Verfahren. Der patentierbare Umfang der verschiedenen Ausführungsformen wird durch die Ansprüche definiert und er kann andere Beispiele einschließen, die sich dem Fachmann ergeben. Solche anderen Beispiele sollen in den Umfang der Ansprüche fallen, wenn die Beispiele strukturelle Elemente aufweisen, die sich nicht von dem Wortlaut der Ansprüche unterscheiden, oder wenn die Beispiele äquivalente Strukturelemente mit unwe sentlichen Unterschieden zum Wortlaut der Ansprüche einschließen.

**[0065]** Verfahren 130 und Systeme zur Verstärkungskalibrierung eines Gammastrahlendetektors werden angegeben. Ein Verfahren schließt das Messen 132 von Dunkelströmen für einen oder mehrere Lichtsensoren eines Gammastrahlendetektors und das Erzeugen 134 einer oder mehrerer Dunkelstromkurven unter Benutzung der gemessenen Dunkelströme ein. Das Verfahren schließt auch das Identifizieren 134 eines Übergangspunktes in der einen

oder den mehreren Dunkelstromkurven und das Bestimmen 136 einer Durchbruchsspannung des einen oder der mehreren Lichtsensoren unter Nutzung des identifizierten Übergangspunktes ein. Das Verfahren schließt weiter das Festsetzen 138 einer Vorspannung des einen oder der mehreren Lichtsensoren auf der Grundlage der bestimmten Durchbruchsspannung ein.

### Patentansprüche

1. Verfahren (130) zum Kalibrieren eines Gammastrahlendetektors, wobei das Verfahren umfasst: Messen (132) von Dunkelströmen für einen oder mehrere Lichtsensoren eines Gammastrahlendetektors; Erzeugen (134) einer oder mehrerer Dunkelstromkurven unter Benutzung der gemessenen Dunkelströme; Identifizieren (134) eines Übergangspunktes in der einen oder den mehreren Dunkelstromkurven; Bestimmen (136) einer Durchbruchsspannung des einen oder der mehreren Lichtsensoren unter Benutzung des identifizierten Übergangspunktes und Festsetzen einer Vorspannung des einen oder der mehreren Lichtsensoren auf der Grundlage der bestimmten Durchbruchsspannung.
2. Verfahren (130) nach Anspruch 1, worin der Übergangspunkt ein Punkt entlang der einen oder der mehreren Dunkelstromkurven ist, wo sich ein Verlauf der Kurve von etwa horizontal zu gekrümmmt ändert.
3. Verfahren (130) nach Anspruch 1, worin der Übergangspunkt ein Punkt entlang der einen oder den mehreren Dunkelstromkurven ist, wo sich ein Verlauf der Kurve zu etwa vertikal ändert.
4. Verfahren (130) nach Anspruch 4, worin die Dunkelstromkurven I-V-Kurven umfassen und I-V-Kurven Grundlinienkurven oder gemittelte Impulshöhenkurven umfassen.
5. Verfahren (130) nach Anspruch 4, worin die Dunkelstromkurven I-V-Kurven umfassen und I-V-Kurven Grundlinienvarianz-Kurven umfassen.
6. Verfahren (130) nach Anspruch 1, worin der Übergangspunkt durch Mitteln einer Vielzahl von Übergangspunkten in einer Vielzahl von Dunkelstromkurven bestimmt wird.
7. Verfahren (130) nach Anspruch 1, worin der Übergangspunkt als ein Punkt an einem definierten Ausmaß oberhalb einer Schwelle bestimmt wird.
8. Verfahren (130) nach Anspruch 1, worin die gemessenen Dunkelströme Signale von mindestens einem einer natürlichen Hintergrundstrahlung oder einer externen Strahlungsquelle einschließen.

9. Positronenemissionstomografie(PET)-System (200), umfassend:  
eine Vielzahl von Gammastrahlen-Detektorelementen (22, 24), konfiguriert zum Erfassen von Scandaten, wobei die Detektorelemente Szintillatorkristalle (32) mit einer Vielzahl von Lichtsensoren (34) aufweisen und

einen Prozessor (50), konfiguriert zum Messen von Dunkelströmen für einen oder mehrere der Vielzahl von Lichtsensoren, zum Erzeugen einer oder mehrerer Dunkelstromkurven unter Benutzung der gemessenen – Dunkelströme, zum Identifizieren eines Übergangspunktes in der einen oder den mehreren Dunkelstromkurven, zum Bestimmen einer Durchbruchsspannung des einen oder der mehreren Lichtsensoren unter Benutzung des identifizierten Übergangspunktes und zum Festsetzen einer Vorspannung des einen oder der mehreren Lichtsensoren auf der Grundlage der bestimmten Durchbruchsspannung.

10. PET-System (200) nach Anspruch 9, worin der Übergangspunkt ein Punkt entlang der einen oder den mehreren Dunkelstromkurven ist, bei dem sich eine Neigung der Kurve von etwa horizontal zu gekrümmmt ändert, oder ein Punkt entlang der einen oder den mehreren Dunkelstromkurven, bei dem sich der Verlauf der Kurve zu etwa vertikal ändert.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

## Anhängende Zeichnungen

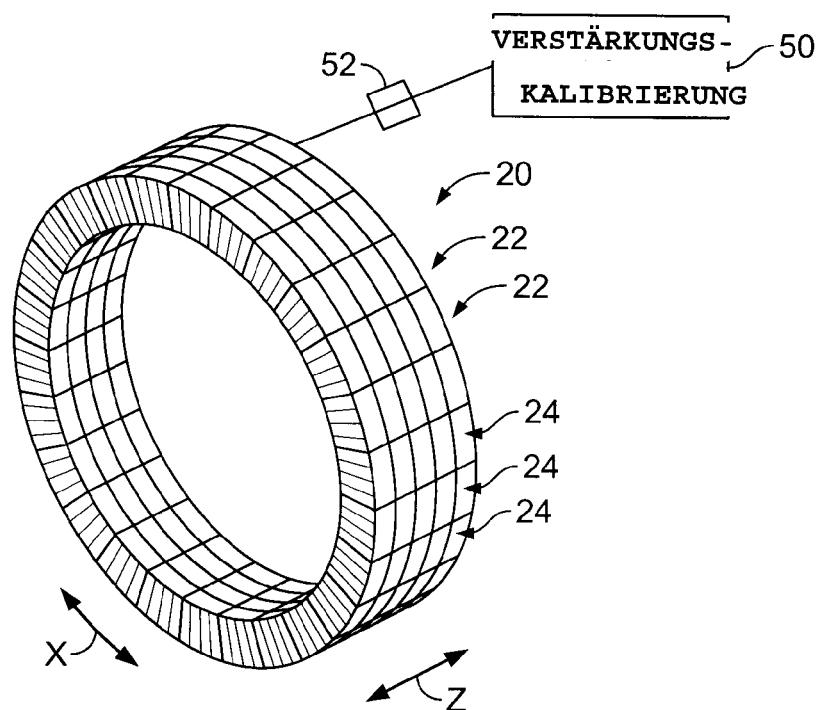


FIG. 1

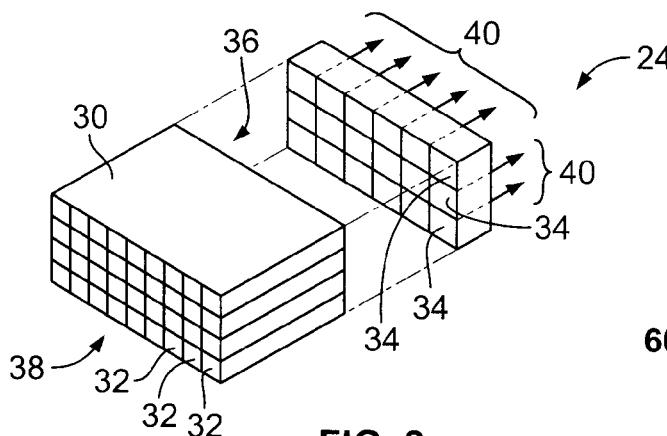


FIG. 2

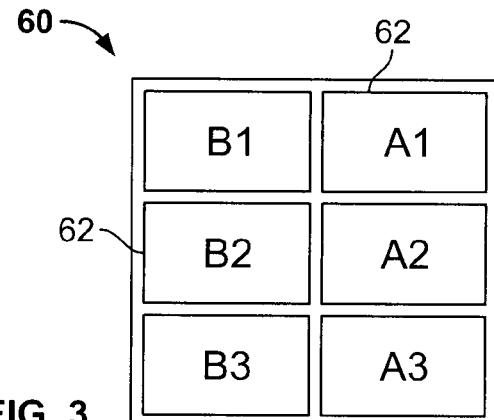


FIG. 3

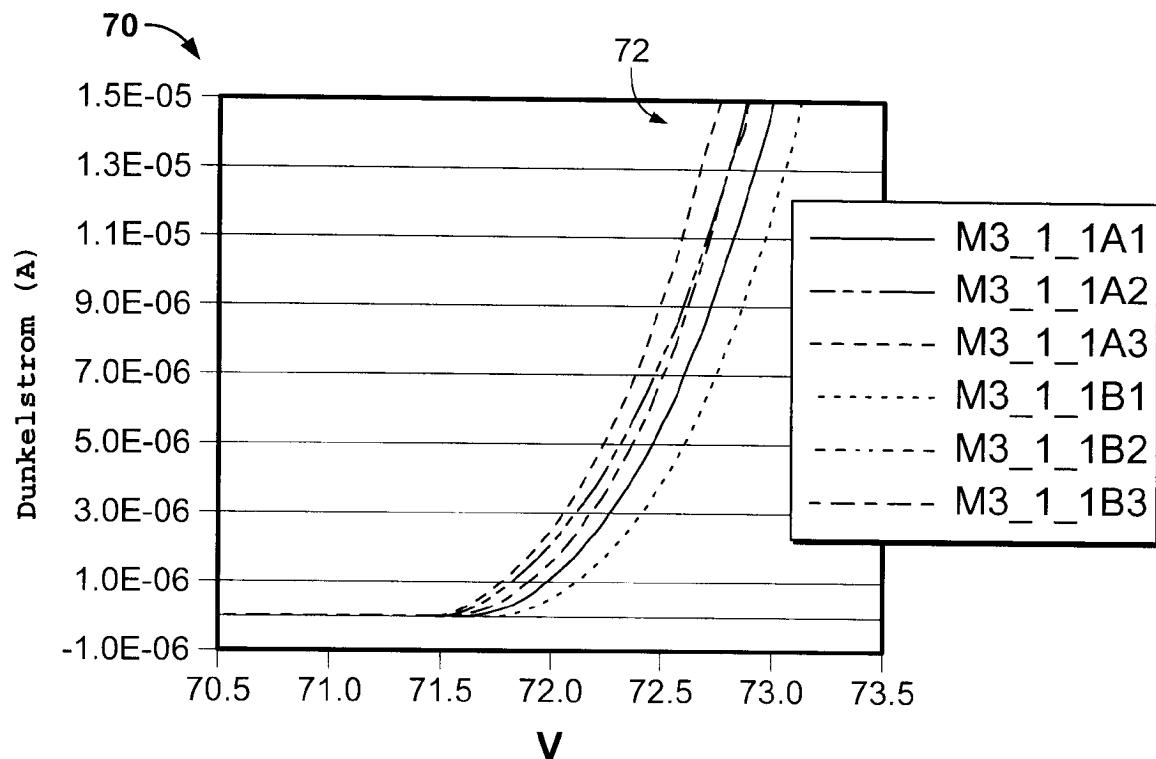


FIG. 4

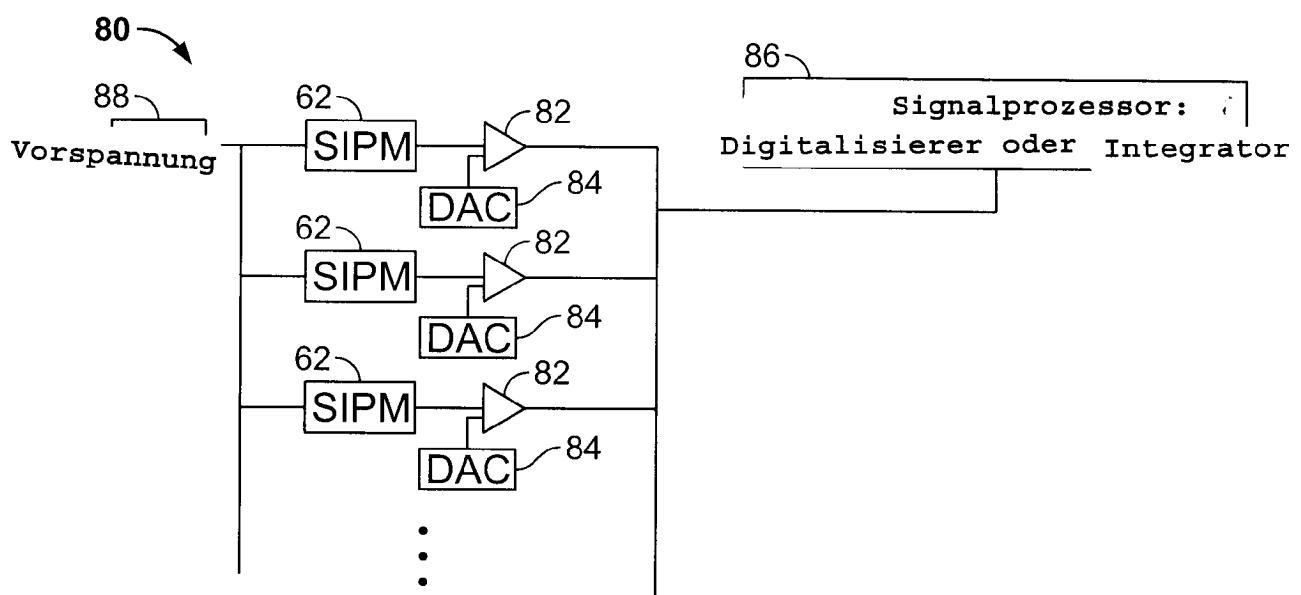


FIG. 5

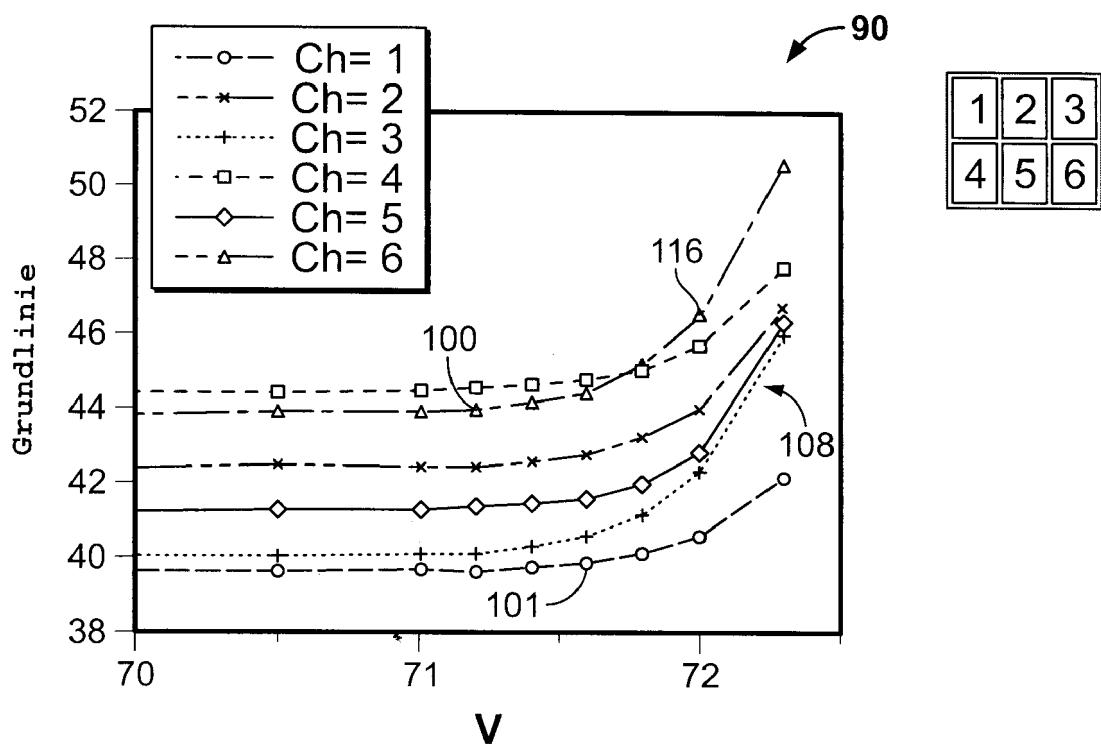


FIG. 6

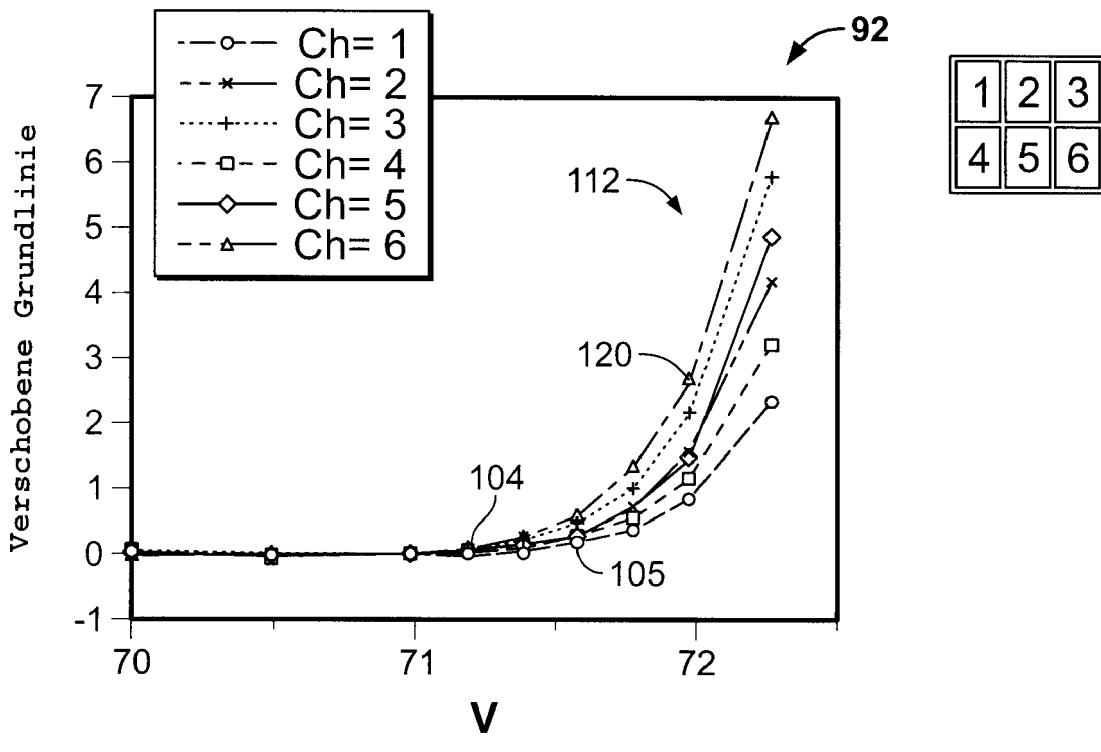


FIG. 7

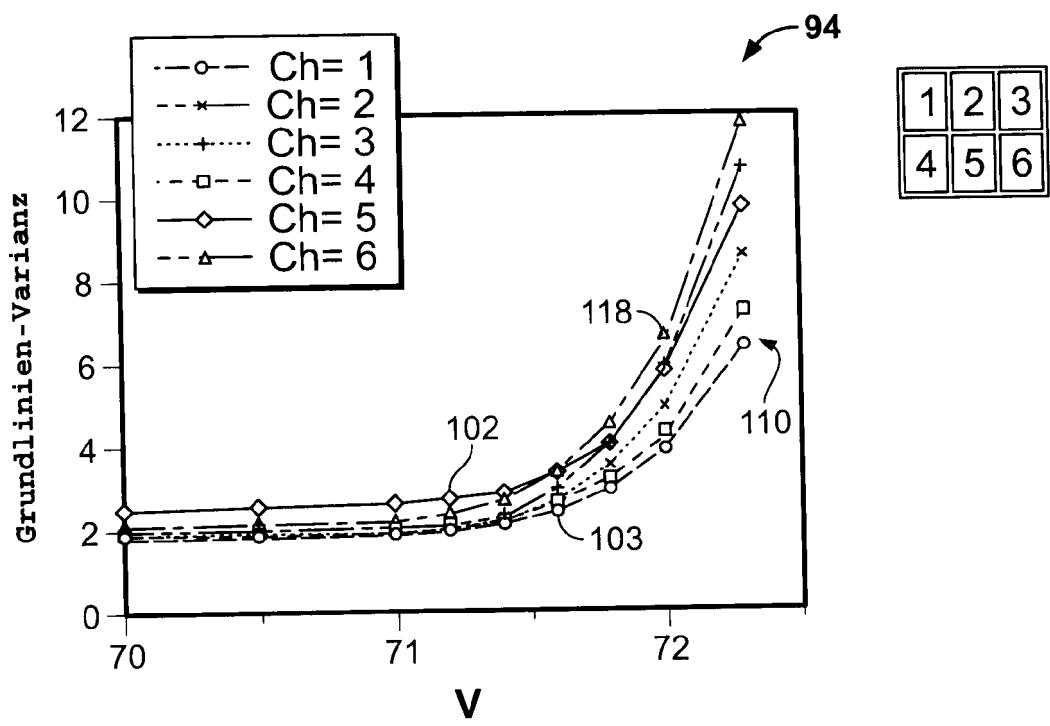


FIG. 8

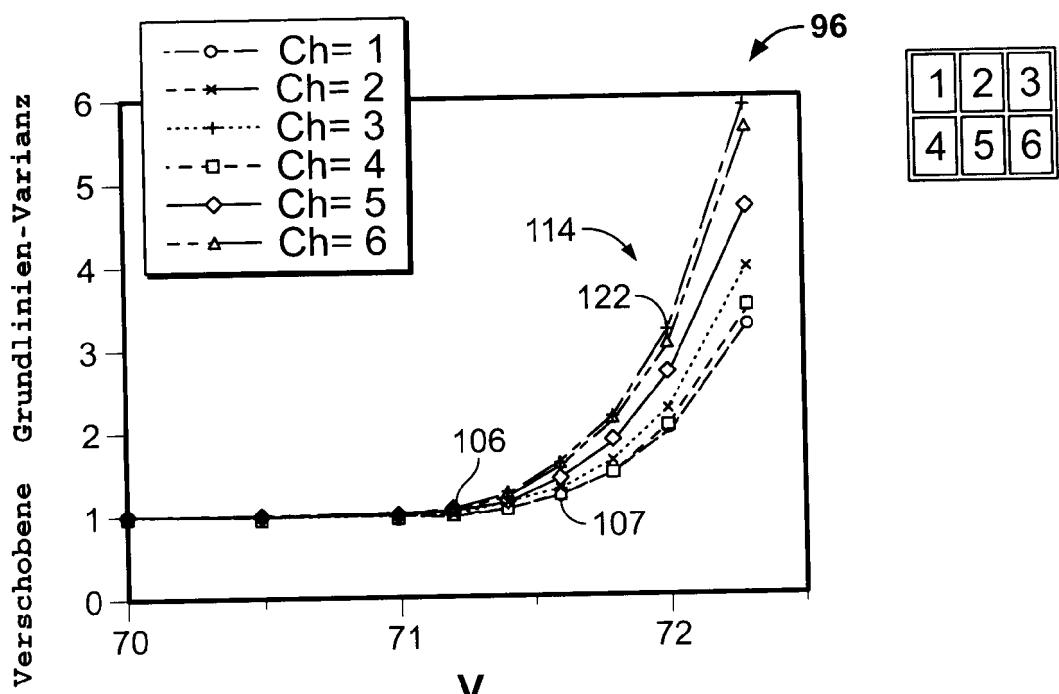


FIG. 9

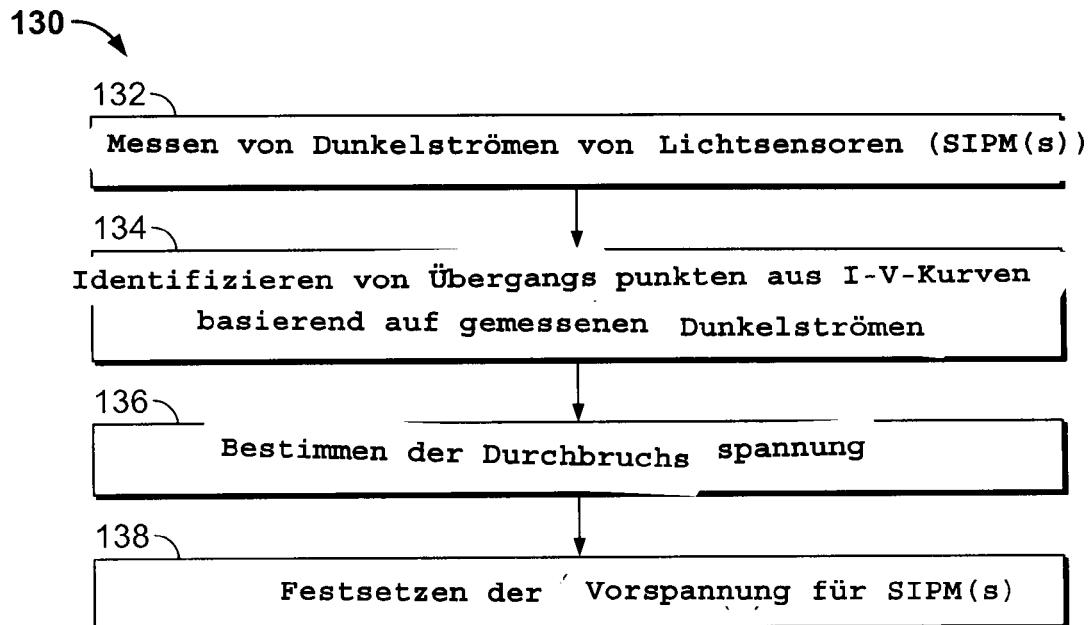


FIG. 10

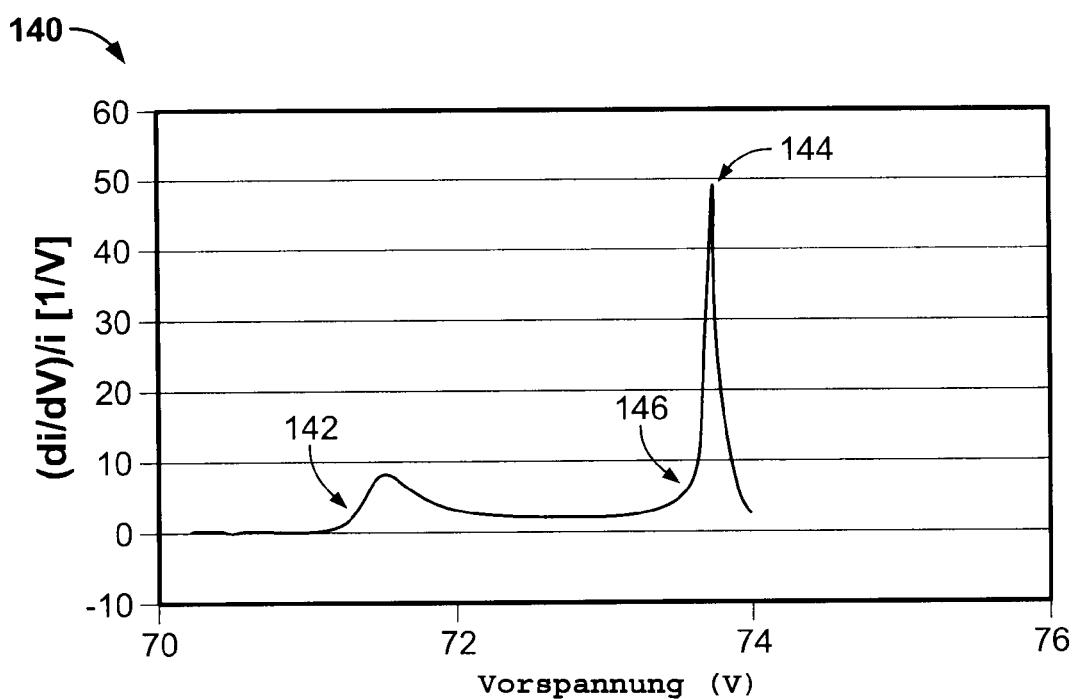


FIG. 11

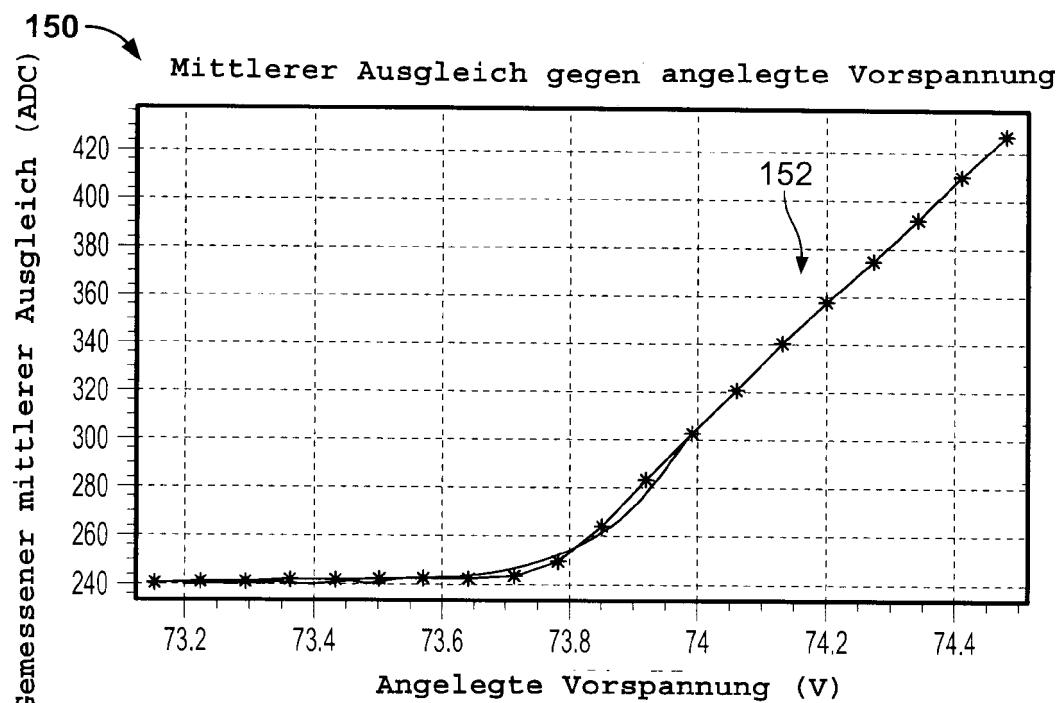


FIG. 12

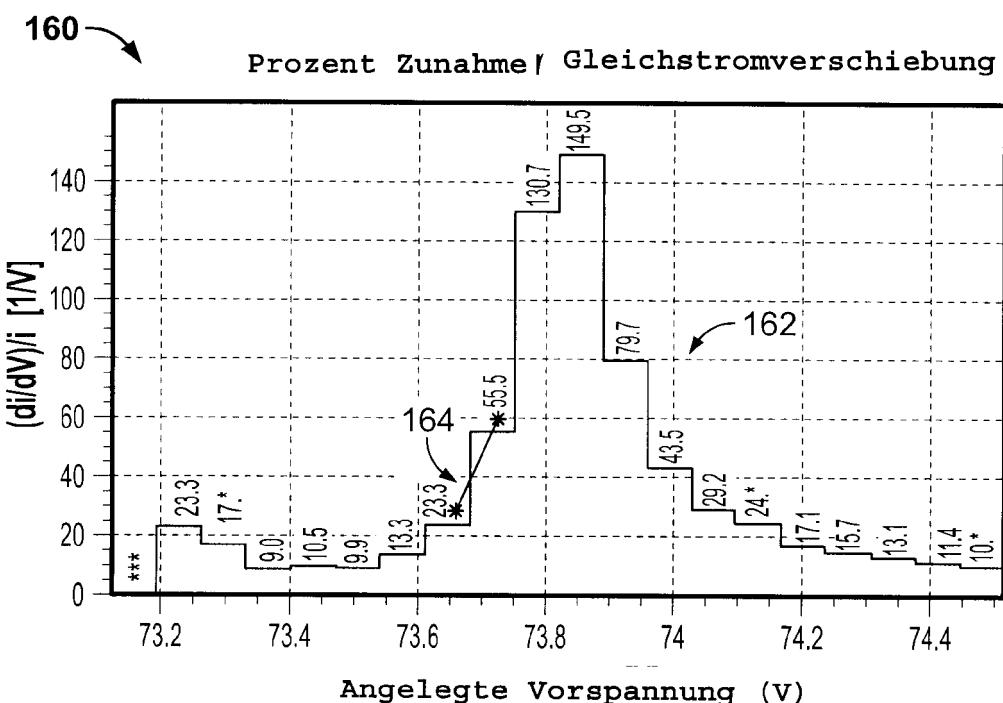


FIG. 13

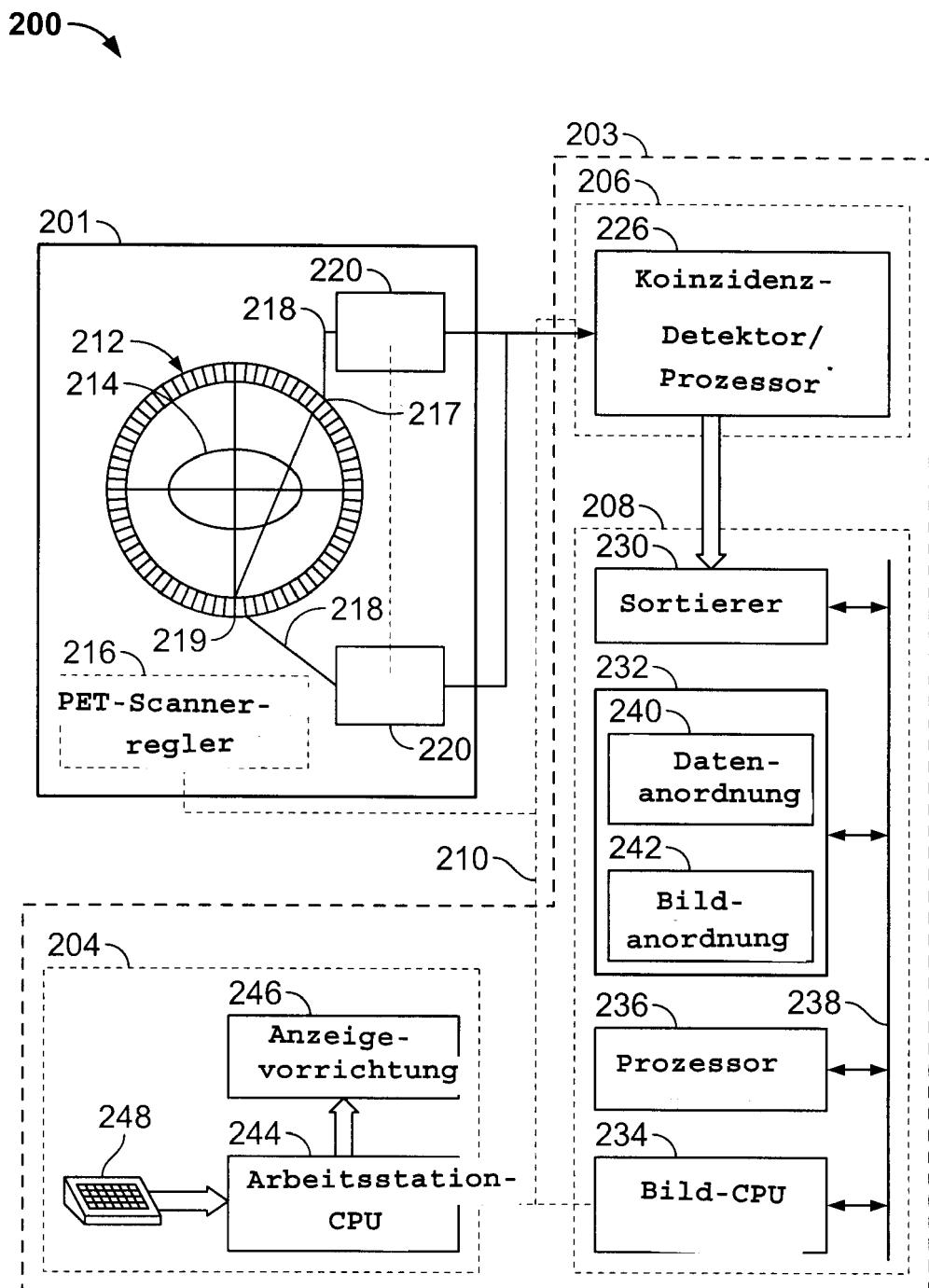


FIG. 14