



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 117 484.5**
 (22) Anmeldetag: **02.07.2020**
 (43) Offenlegungstag: **05.01.2022**

(51) Int Cl.: **G01N 23/087** (2006.01)
G01N 23/04 (2018.01)
A61B 6/03 (2006.01)
G01T 1/29 (2006.01)
G01V 5/00 (2006.01)

(71) Anmelder:
Smiths Heimann GmbH, 65205 Wiesbaden, DE

(74) Vertreter:
Klunker IP Patentanwälte PartG mbB, 80796 München, DE

(72) Erfinder:
Riehn, Eric J., Dr., 65205 Wiesbaden, DE

(56) Ermittelte Stand der Technik:

US	8 433 036	B2
US	9 329 301	B2
US	10 386 502	B2
US	2019 / 0 179 038	A1

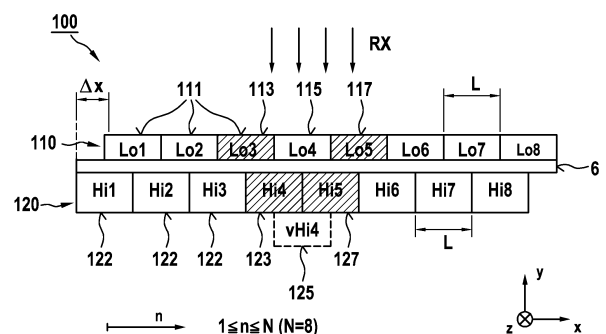
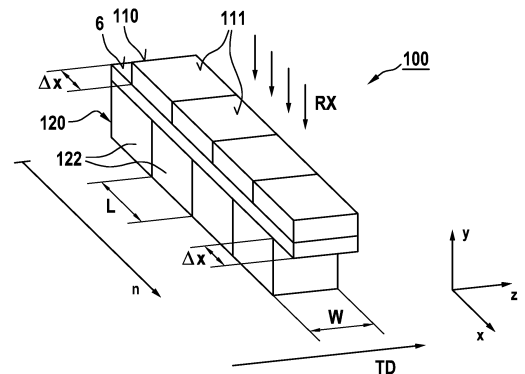
LI, Jim S. Jimmy ; RANDHAWA, Sharmil: Color filter array demosaicking using high-order interpolation techniques with a weighted median filter for sharp color edge preservation. In: IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 18, 2009, No. 9, S. 1946-1957. - ISSN 1057-7149 (P); 1941-0042 (E). DOI: 10.1109/TIP.2009.2022291. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=5109690&tag=1> [abgerufen am 2020-07-29]

Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **DUAL-ENERGIE-DETEKTOR UND AUFBEREITUNGSVERFAHREN FÜR DETEKTORDATEN**

(57) Zusammenfassung: Offenbart wird ein Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor (100) mit einer ersten Detektorzeile (110) mit ersten Detektorelementen (111) und einer dazu parallel angeordneten zweiten Detektorzeile (120) mit zweiten Detektorelementen (122), wobei die Detektorzeilen (110, 120) zueinander in Zeilenrichtung parallel angeordnet und in Richtung der zu erfassenden Röntgenstrahlen (RX) so hintereinander angeordnet sind, dass die Projektion der ersten und der zweiten Detektorzeilen (110, 120) in Richtung eines der zu erfassenden Röntgenstrahlen (RX), der durch den Flächenschwerpunkt eines Referenzdetektorelements der ersten oder der zweiten Detektorzeile (110, 120) verläuft, sich überlappend zueinander um einen effektiven Versatz (Δx ; Δy) versetzt sind. Weiter wird eine Röntgeninspektionsanlage (200) mit einem solchen Detektor (100) offenbart sowie Verfahren zur Aufbereitung von mittels des Detektors (100) bereitgestellter Detektordaten.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die vorliegende Offenbarung betrifft allgemein die räumliche Auflösung von Röntgenbildern in der bildgebenden, zerstörungsfeien Inspektion von Objekten zum Auffinden von Zielgegenständen mittels Dual-Energie-Röntgenradiographie, insbesondere Maßnahmen zur Erhöhung der räumlichen Auflösung eines dabei erzeugten Röntgenbildes. Die Offenbarung betrifft im Besonderen einen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor mit verbesserter räumlicher Auflösung, eine Röntgeninspektionsanlage mit einem solchen Detektor sowie Verfahren zur Aufbereitung von mit dem Detektor erfassten Detektordaten.

Hintergrund

[0002] Die folgenden einleitenden Hintergrundinformationen zur vorliegenden Offenbarung sollen lediglich ein besseres Verständnis der nachfolgend beschriebenen Zusammenhänge ermöglichen und stellen nur im Umfang des Inhalts eines genannten Dokuments Stand der Technik dar.

[0003] Die Diskriminierung von Materialien mittels Dual-Energie-Röntgenradiographie ist bekannt; die grundsätzlichen Überlegungen dazu sind beispielsweise in den folgenden Dokumenten beschrieben: S. Kolkoori et al. „Dual High-EnergyX-ray Digital Radiography for Material Discrimination in Cargo Containers“, 11th European Conference on Non Destructive Testing, 2014, Prague, Proceedings; Polad M. Shikhaliev, „Material Decomposed Cargo Imaging with Dual Energy Megavoltage Radiography“, arXiv:1709.10406 [physics.ins-det].

[0004] Jer Wang CHAN et al, „Wire transfer function analysis for castellated dual-energy x-ray detectors“, APPLIED OPTICS, Band 43, Nummer 35, 10. Dezember 2004, Seiten 6413-6420, zeigt in **Fig. 1 (a)** eine Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektorzeile mit pro Bildpunkt jeweils einem hochenergetischen Detektorelement und einem niedrigenergetischen Detektorelement, die in Richtung der zu erfassenden Röntgenstrahlen übereinander angeordnet sind. EP 1 010 021 B1 zeigt eine Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektorzeile, bei der eine Zeile mit hochenergetischen Detektorelementen und eine Zeile mit niedrigenergetischen Detektorelementen in Abtastrichtung so hintereinander angeordnet sind, dass die beiden Zeilen einfallende Röntgenstrahlen voneinander unabhängig erfassen können.

[0005] Bei Röntgeninspektionsanlagen, bei denen ein Inspektionsobjekt mit einer vorbestimmten Transportgeschwindigkeit durch eine Abtastanordnung, die aus einer quer zur Transportrichtung angeordnete-

ten Detektorzeile und einen auf die Detektorzeile gerichtete Röntgenstrahlenfächer besteht, für eine zeilenweise Abtastung des Inspektionsobjekts durch den Röntgenstrahlenfächer hindurchgeführt wird, ist die Auflösung eines dabei erzeugten Röntgenbildes im Wesentlichen von der Fläche der einzelnen jeweils einem Bildpunkt (Pixel) entsprechenden Detektorelemente und deren Anzahl pro Längeneinheit oder pro Flächeneinheit der Detektorzeile sowie dem Verhältnis aus Auslesefrequenz der Detektorelemente und Transportgeschwindigkeit des Inspektionsobjekts in Transportrichtung bestimmt.

[0006] Da bei der Dual-Energie-Röntgenradiographie je Bildpunkt jeweils ein niedrigenergetisches und ein hochenergetisches Detektorelement benötigt werden, benötigt man für den gesamten Detektor entsprechend die doppelte Anzahl der für die gewünschte räumliche Auflösung erforderlichen Detektorelemente. Daher haben Dual-Energie-Detektoren bereits entsprechend höhere Systemkosten. Um eine höhere räumliche Auflösung beim erzeugten Röntgenbild zu erhalten, könnte die Anzahl der Detektorelemente pro Längen- oder Flächeneinheit entsprechend erhöht werden. Dies führt jedoch zu einer entsprechenden Erhöhung der Systemkosten für den Detektor sowie, da die Erhöhung der Dichte der Detektorelemente eine entsprechende Verringerung der Fläche jedes Detektorelements erfordert, einer Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses bei den erfassten Detektordaten.

[0007] Als Alternative zur Erhöhung der Anzahl der Detektorelemente könnte bei den oben genannten Röntgeninspektionsanlagen die räumliche Auflösung des Röntgenbildes in der der Transportrichtung entsprechenden Abtastrichtung durch eine verringerte Transportgeschwindigkeit oder eine erhöhte Auslesefrequenz erreicht werden. Ersteres wirkt sich nachteilig auf den Durchsatz der an der Röntgeninspektionsanlagen kontrollierten Inspektionsobjekte aus, zweiteres verschlechtert wieder das Signal-Rausch-Verhältnis.

Zusammenfassung

[0008] Es ist eine mögliche Aufgabe, einen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor bzw. eine Röntgeninspektionsanlage mit einem solchen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor vorzuschlagen, mit dem bzw. bei der eine höhere räumliche Auflösung bei den erzeugten Röntgenbildern erreicht werden kann.

[0009] Bevorzugt sollte dazu die Anzahl der Detektorelemente des Detektors pro Längen- bzw. Flächeneinheit nicht erhöht und/oder die Abtastgeschwindigkeit des Inspektionsobjekts durch die Röntgeninspektionsanlage nicht reduziert werden.

[0010] Beispielsweise wäre es eine Verbesserung für einen Dual-Energie-Detektor, wenn bei gleich bleibender Anzahl von (zumindest hochenergetische Röntgenstrahlen erfassenden, kurz „hochenergetischen“) Hi(gh)- und (zumindest niederenergetische Röntgenstrahlen erfassenden, kurz „niedrigerenergetischen“) Lo(w)-Detektorelementen aus den mit dem Detektor erfassten Detektordaten ein Röntgenbild mit einer höheren räumlichen Auflösung in der Bildrichtung orthogonal zu und/oder längst der Abtastrichtung abgeleitet werden kann.

[0011] Die oben genannte Aufgabe kann mit den Merkmalen des Anspruchs 1 betreffend einen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor gelöst werden. Weitere Ausführungsbeispiele und Weiterbildungen sind in den sich anschließenden abhängigen Ansprüchen definiert.

[0012] Der Erfinder hat erkannt, dass ein definierter effektiver Versatz zwischen den sich noch überlappenden Wirkflächen der Hi(gh)-Detektorelemente einer Hi-Detektorzeile und der Lo(w)-Detektorelemente einer Lo-Detektorzeile, von denen bei einem konventionellen Dual-Energie-Röntgendetektor jeweils ein Hi- und ein Lo-Detektorelement genau ein und demselben Bildpunkt zugeordnet sind, sich vorteilhaft für eine Verbesserung der räumlichen Auflösung nutzen lässt. Der effektive Versatz kann in Richtung der Detektorzeile und/oder orthogonal zur Detektorzeile eingerichtet sein; die jeweiligen damit erreichbaren Möglichkeiten sind weiter unten erläutert. Die räumliche Auflösung des Detektors kann so ohne Erhöhung der Gesamtanzahl der Detektorelemente entsprechend in Richtung der Detektorzeile und/oder orthogonal zu der Detektorzeile vergrößert werden.

[0013] Es sei angemerkt, dass „effektiver Versatz“ im Zusammenhang mit der vorliegenden Offenbarung bedeuten soll, dass der Versatz nicht nur als ein tatsächlicher örtlicher Versatz zwischen den Wirkflächen der Hi-Detektorelemente der Hi-Detektorzeile und der Lo-Detektorelemente der Lo-Detektorzeile sondern alternativ oder zusätzlich durch eine gezielte Ausrichtung des Detektors bestehend aus der Hi-Detektorzeile und der Lo-Detektorzeile, die dazu zueinander nicht örtlich versetzten sein müssen, gegenüber den im Betrieb auf den Detektor gerichteten Röntgenstrahlen bewirkt werden kann. Selbstverständlich können diese Maßnahmen auch kombiniert zum Einsatz kommen.

[0014] Der Kerngedanke des hier vorgeschlagenen zeilenförmigen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors besteht darin, den Detektoraufbau so auszugestalten und/oder die Detektorzeilen des Detektors zueinander und gegenüber der Röntgenstrahlenquelle so anzuordnen, dass im Betrieb mit Bezug auf den Strahlengang der von einer Röntgenstrah-

lenquelle auf den Detektor ausgesandten Röntgenstrahlen die Projektionen der Hi-Detektorelemente der Hi-Detektorzeile und der Lo-Detektorelemente der Lo-Detektorzeile in Richtung eines Referenzröntgenstrahls sich überlappend zueinander versetzt sind; der „Referenzröntgenstrahl“ kann z.B. der Röntgenstrahl sein, der durch den Flächenschwerpunkt der Detektorzeile oder eines Referenzdetektorelements der Detektorzeile verläuft; als Referenzdetektorelement kann ein Detektorelement in der Mitte der Detektorzeile verwendet werden, dass somit im Wesentlichen zu allen Rändern der Detektorzeile einen annähernd gleichen Abstand hat. Im Ergebnis sind bei dem neuen Detektor in den (für die Ableitung eines zugehörigen Röntgenbildes auszuwertenden) erfassten Dual-Energie-Detektordaten gegenüber denjenigen eines Detektors mit der konventionellen Anordnung und Ausrichtung zum Röntgenstrahlengenerator oder Referenzröntgenstrahl Pärchen aus Hi- und Lo-Detektordaten nicht mehr 1:1, d.h. ausschließlich genau einem Bildpunkt, zuordenbar. D.h., an der Stelle eines Lo-Detektorelements fehlt ein eindeutig 1:1 zuordenbares Hi-Detektorelement und umgekehrt.

[0015] Unter „Flächenschwerpunkt der Detektorzeile“ sei hier der geometrische Schwerpunkt der von den Wirkflächen eines Typs der Detektorelemente gebildeten geometrischen Figur verstanden, deren Flächenschwerpunkt der Mittelung aller Punkte innerhalb dieser Figur entspricht. Den Flächenschwerpunkt der Detektorzeile oder des Referenzdetektorelements der Detektorzeile kann man bei den in der Praxis üblicherweise eine Rechteckform aufweisenden Detektorzeilen als Kreuzpunkt der die Wirkfläche der Detektorzeile in Längs- und Breitenrichtung halbierenden Geraden ermitteln oder allgemein mathematisch durch Integration berechnen.

[0016] Der Erfinder hat erkannt, dass die aufgrund des effektiven Versatzes der nicht mehr 1:1 einander zuordenbaren Hi- und Lo-Detektorelemente fehlenden Detektordaten für jedes einzelne reale Detektordatum eines Typs mit für diese Stelle berechneten virtuelle Detektordaten des anderen Typs ergänzt werden können. D.h., basierend auf dem vorbestimmten effektiven überlappenden Versatz zwischen den Hi-Detektorelementen der Hi-Detektorzeile und den Lo-Detektorelementen der Lo-Detektorzeile können für die Stellen der fehlenden Detektorelemente als Ersatz virtuelle Detektordaten mit einer hinreichenden Genauigkeit berechnet werden. Die Berechnung hat sich als überraschend gut implementierbar und die von den realen und virtuellen Detektordaten abgeleiteten Röntgenbilder als eine praxistaugliche Verbesserung herausgestellt.

[0017] Gemäß einem ersten Aspekt wird ein zeilenförmiger Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor (im

Folgenden kurz Detektor genannt) zur Verwendung in einer Röntgeninspektionsanlage (beispielsweise eine Röntgeninspektionsanlage gemäß dem unten beschriebenen zweiten Aspekt), die zur Durchführung eines Verfahrens zur Dual-Energie-Röntgenradiographie eines Inspektionsobjekts eingerichtet ist, bereitgestellt.

[0018] In Zusammenhang mit dem hier vorgeschlagenen Detektor sei unter „zellenförmig“ zunächst verstanden, dass der Detektor für eine Erfassung von Detektordaten für eine Vielzahl von Bildpunkten in Längsrichtung des Detektors und für eine geringere Anzahl von Bildpunkten, aber mindestens für einen Bildpunkt, orthogonal zur Längsrichtung eingerichtet ist. In der einfachsten Ausführung weist der Detektor damit zwei Detektorzeilen mit jeweils einer gleichen Anzahl von Hi(gh)- und Lo(w)-Detektorelementen in Längsrichtung auf, die orthogonal dazu jeweils ein einziges Hi- und ein einziges Lo-Detektorelement aufweisen. Grundsätzlich kann der Detektor in der Richtung orthogonal zur Längsrichtung auch mehrere Hi- und Lo-Detektorelemente aufweisen; die hier vorgeschlagenen Prinzipien sind dann entsprechend anwendbar.

[0019] Der hier vorgeschlagene zeilenförmige Detektor weist mindestens auf: Eine erste Detektorzeile mit ersten Detektorelementen und eine dazu parallel angeordnete zweite Detektorzeile mit zweiten Detektorelementen. Die Detektorzeilen sind konfiguriert, auf das Spektrum zu erfassender Röntgenstrahlen unterschiedlich spektral selektiv anzusprechen. Die Detektorzeilen sind zueinander in Zeilenrichtung parallel angeordnet. Die Detektorzeilen sind in Richtung der zu erfassenden Röntgenstrahlen so hintereinander angeordnet, dass die Projektion der ersten und der zweiten Detektorzeilen in Richtung eines der zu erfassenden Röntgenstrahlen als Referenzröntgenstrahl sich überlappend zueinander versetzt sind. Die Projektion der ersten und der zweiten Detektorzeilen kann in Richtung eines der zu erfassenden Röntgenstrahlen, der durch den Flächenschwerpunkt eines Referenzdetektorelements der ersten oder der zweiten Detektorzeile verläuft, erfolgen. Der Referenzröntgenstrahl kann der durch den Flächenschwerpunkt der Gesamtheit der Wirkflächen der Detektorelemente der in Bezug auf die zu erfassenden Röntgenstrahlen vordersten Detektorzeile verlaufende Röntgenstrahl sein oder der durch den Flächenschwerpunkt der Wirkflächen eines Referenzdetektorelements der in Bezug auf die zu erfassenden Röntgenstrahlen vordersten Detektorzeile verlaufende Röntgenstrahl sein.

[0020] Die erste Detektorzeile kann zugehörige erste oder Lo(w)-Detektorelemente zum primären Erfassen niedrigerenergetischer Röntgenstrahlen und die zweite Detektorzeile zugehörige zweite oder Hi

(gh)-Detektorelemente zum primären Erfassen hochenergetischer Röntgenstrahlen aufweisen.

[0021] Die Lo- und die Hi-Detektorelemente können konfiguriert sein, jeweilige zugehörige Lo-Detektordaten oder Hi-Detektordaten zu erzeugen. Grundsätzlich könnten die Lo- und die Hi-Detektorelemente im Wesentlichen gleich sein, bereits deshalb, weil ein Lo-Detektorelement üblicherweise näher an der Röntgenstrahlenquelle liegt, und daher mehr niederenergetische Quanten absorbiert als ein darunterliegendes Hi-Detektorelement. Damit ergibt sich bereits durch die Übereinander-Anordnung eine (wenn auch kleine) Aufspaltung der Röntgenspektren, welche die Lo- und Hi-Detektorelemente erfassen. Für eine Verstärkung der Aufspaltung kann zusätzlich zwischen den ersten und zweiten Detektorelementen ein Filtermaterial zur Aufhärtung (d.h. Filterung der niedrigerenergetischen Röntgenstrahlen) angeordnet sein.

[0022] In einer ersten Ausführung sind die erste Detektorzeile und die zweite Detektorzeile in der Zeilenrichtung um einen ersten (örtlichen) Versatz zueinander versetzt. Mit dieser ersten Ausführung kann eine Erhöhung der räumlichen Auflösung der abzuleitenden Röntgenbilder in Zeilenrichtung (d.h. quer zur Abtastrichtung) erreicht werden.

[0023] In einer zweiten Ausführung sind die erste Detektorzeile und die zweite Detektorzeile orthogonal zu der Zeilenrichtung um einen zweiten (örtlichen) Versatz zueinander versetzt. Mit der zweiten Ausführung kann eine Erhöhung der räumlichen Auflösung der abzuleitenden Röntgenbilder orthogonal zur Zeilenrichtung (d.h. in Abtastrichtung) erreicht werden. Im Ergebnis kann mit der zweiten Ausführung die räumliche Auflösung der abzuleitenden Röntgenbilder in Abtastrichtung erhöht werden, ohne die Transportgeschwindigkeit bzw. das Verhältnis aus Transportgeschwindigkeit und Abtastfrequenz für das Inspektionsobjekt reduzieren zu müssen. In einer alternativen Anwendung der zweiten Ausführung kann bei gleichbleibender räumlicher Auflösung des abgeleiteten Röntgenbilds die Transportgeschwindigkeit bzw. das Verhältnis aus Transportgeschwindigkeit und Abtastfrequenz für das Inspektionsobjekt und entsprechend der Durchsatz an der Röntgeninspektionsanlage entsprechend erhöht werden. Auch Kombinationen beider Wirkungen sind bei entsprechender Konfiguration möglich.

[0024] Die erste und die zweite Ausführung können alternativ oder sich ergänzend, d.h. gleichzeitig zur Anwendung kommen.

[0025] Alternativ oder zusätzlich zu den vorstehend beschriebenen ersten und zweiten Ausführungen, bei der die erste und die zweite Detektorzeile gegeneinander (örtlich) versetzt angeordnet werden, können in einer dritten Ausführung die erste und die

zweite Detektorzeile auch mit Bezug auf den Referenzröntgenstrahl um einen entsprechenden Neigungswinkel geneigt werden, um den effektiven Versatz zu erreichen.

[0026] Der gewünschte effektive Versatz kann auf diese Weise auch mit einem konventionellen Detektor erreicht werden, bei dem die ersten und die zweiten Detektorelemente eindeutig 1:1 zuordenbar - also nicht örtlich zueinander versetzt - angeordnet sind. Es ist natürlich möglich die dritte Ausführung in Kombination mit der ersten und/oder der zweiten Ausführung zu nutzen, um damit die Wirkung der jeweils anderen Ausführung zu erreichen; d.h. die dritte Ausführung kann verwendet werden, um die Wirkung sowohl der ersten als auch der zweiten Ausführung zu erreichen.

[0027] Zur dritten Ausführung sei Folgendes angemerkt: Bei dem konventionellen Detektor sind die erste und die zweite Detektorzeile üblicherweise so hintereinander angeordnet, dass eine Verbindungslinie zwischen einem Lo-Detektorelement und dem zugehörigen Hi-Detektorelement genau auf den Brennfleck des zugehörigen auf den Detektor ausgerichteten Röntgenstrahlengenerators zeigt. Da die hintereinander angeordneten Lo- und Hi-Detektorelemente vom Röntgenstrahlengenerator aus gesehen einen vorbestimmten Abstand (z.B. von ca. 1 cm) zueinander haben, kann der ganze Detektor einfach um einen geeigneten Neigungswinkel (beispielsweise um 5°-6°) mit Bezug auf den Referenzröntgenstrahl in Richtung der Längsrichtung des Detektors und/oder orthogonal dazu geneigt werden. Durch diese Neigung des Detektors verläuft die Verbindungslinie zwischen den Flächenschwerpunkten eines Paares aus einem Hi- und einem Lo-Detektorelement am Röntgenstrahlengenerator vorbei.

[0028] Beispielsweise kann bei einer Neigung in Längsrichtung des Detektors die Neigung besonders so eingestellt werden, dass die Verbindungslinie zwischen dem Flächenschwerpunkt eines Lo-Detektorelements und der Lücke zwischen zwei benachbarten Hi-Detektorelementen auf den Röntgenstrahlengenerator zeigt.

[0029] Beispielsweise kann bei einer Neigung orthogonal zur Längsrichtung des Detektors die Neigung besonders so eingestellt werden, dass die Verbindungslinie zwischen dem Flächenschwerpunkt eines Lo-Detektorelements und dem Rand eines dahinter liegenden Hi-Detektorelementen auf den Röntgenstrahlengenerator zeigt.

[0030] Somit kann mit der dritten Ausführung grundsätzlich der gleiche Effekt (daher „effektiver Versatz“) erzeugt werden, wie mit dem linearen (örtlichen) Versatz der ersten und zweiten Detektorzeile in Längs-

richtung des Detektors und/oder orthogonal zur Längsrichtung zueinander.

[0031] Im Ergebnis kann mit der vorstehend erläuterten ersten, zweiten und dritten Ausführung ein beliebiger benötigter effektiver Versatz zwischen den ersten und zweiten Detektorelementen erreicht werden, um einen der oben beschriebenen Wirkungen oder eine Kombination davon zu erreichen.

[0032] Besonders kann mit allen drei Ausführungen oder Kombinationen davon der effektive Versatz so eingestellt werden, dass im Betrieb bei aus einem realen und einem berechneten virtuellen Detektorelement gebildeten Detektorpaaren die Verbindungslinie durch die zugehörigen Flächenschwerpunkte der beiden Detektorelemente auf den Röntgenstrahlengenerator ausgerichtet ist, d.h. auf den Brennfleck des Generators fokussiert ist.

[0033] An dieser Stelle sei für die folgende Beschreibung angemerkt, dass in der Praxis eine I-, L- oder U-förmige Detektorzeile in einer Röntgeninspektionsanlage aus einer Vielzahl von einzelnen zeilenförmigen Detektoren gebildet sein kann, die jeweils individuell mit Bezug auf einen Referenzröntgenstrahl auf den jeweils zugeordneten Röntgen-generator der Anlage ausgerichtet sind. Daher sind die Projektionen der ersten und zweiten Detektorzeilen entlang des Referenzröntgenstrahls bei der dritten Ausführung in der Praxis zumindest an den Detektorzeilenenden aufgrund der Geometrie bereits gegeneinander verschoben (um ca. 14-15%). Daher empfiehlt es sich, dass der Überlapp zwischen den Detektorelementen der ersten und der zweiten Detektorzeile maximal 80% und mindestens 20% beträgt.

[0034] Die ersten Detektorelemente und die zweiten Detektorelemente können im Wesentlichen in der Richtung der zu erfassenden Röntgenstrahlen eine gleiche Querschnittsform und eine gleiche Querschnittsfläche (Wirkfläche) aufweisen. Mit anderen Worten können ein erstes Detektorelement und ein zweites Detektorelement für eine konventionelle Anordnung hintereinander angeordnet zur Deckung gebracht werden.

[0035] Unter der „Wirkfläche“ eines Detektorelements sei hier die effektive Fläche des Detektorelements verstanden, auf die in bestimmungsgemäßer Anordnung die zu erfassenden Röntgenstrahlen, die das Inspektionsobjekt durchlaufen haben, einfallen.

[0036] Die ersten Detektorelemente und die zweiten Detektorelemente weisen in Zeilenrichtung jeweils eine Länge und orthogonal dazu eine Breite auf.

[0037] In einer besonders bevorzugten ersten Ausführung entspricht der erste Versatz in Zeilenrichtung

der halben Länge der ersten und zweiten Detektorelemente. Im Ergebnis wird mit der bevorzugten ersten Ausführung ein Detektor mit der doppelten räumlichen Auflösung in Zeilenrichtung bereitgestellt.

[0038] In einer besonders bevorzugten zweiten Ausführung bestimmt sich der zweite Versatz basierend auf der Auslesefrequenz f in $[1/s]$ für das Auslesen der Detektordaten aus den Detektorelementen und der Transportgeschwindigkeit b in cm/s eines Inspektionsobjekts gegenüber dem Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor gemäß der Formel (1):

$$\Delta z = (m b) / (2 f) \quad (1),$$

wobei m eine ungerade ganze Zahl ($m=1, 3, 5, 7, \dots$) ist.

[0039] Im Ergebnis wird mit der bevorzugten zweiten Ausführung ein Detektor mit der doppelten räumlichen Auflösung senkrecht zur Zeilenrichtung bei unverändertem Verhältnis aus Transportgeschwindigkeit des Inspektionsobjekts vorbei an dem Detektor und Auslesefrequenz der Detektorelemente bereitgestellt. Alternativ könnte bei einem Detektor gemäß der bevorzugten zweiten Ausführung die Abtastgeschwindigkeit für Inspektionsobjekte in der Röntgeninspektionsanlage mit dem Detektor bei gleichbleibender räumlicher Auflösung entsprechend verringert, ggf. halbiert, werden. D.h. mit dem Aufbau gemäß der zweiten bevorzugten Ausführung sind wahlweise höhere Bandgeschwindigkeiten bei gleichbleibender Bildqualität oder eine verbesserte Ortsauflösung bei gleichbleibender Bandgeschwindigkeit möglich. Im Prinzip kann das Verhältnis aus Bandlaufgeschwindigkeit zu Abtastfrequenz nach Bedarf eingestellt werden. Lässt man bei der besonders bevorzugten zweiten Ausführung die Bandlaufgeschwindigkeit und die Abtastfrequenz gleich, wird die räumliche Auflösung mit dem neuen Detektor verbessert. Wird die Bandgeschwindigkeit konstant gehalten und die Abtastfrequenz verringert, dann bleibt die Auflösung unverändert, aber das Signal-zu-Rausch-Verhältnis wird verbessert, sodass beispielsweise feine Strukturen, wie dünne Drähte, besser im Röntgenbild aufgelöst werden. Wird die Abtastfrequenz gleich gehalten und die Bandgeschwindigkeit erhöht, bleibt die Auflösung ebenfalls unverändert, aber der Durchsatz an Inspektionsobjekten pro Zeiteinheit an der Anlage wird erhöht. Die bevorzugte zweite Ausführung bietet damit eine besonders hohe Flexibilität, mit der Anlagen für verschiedene Anforderungen ausgelegt werden können.

[0040] Ohne Versatz der Detektoren legt ein Gepäckstück zwischen zwei Auslesevorgängen auf dem Förderband eine Strecke von $\Delta s = b / f$ zurück und es werden aus den gemessenen Werten Lo_1 ,

$Hi_1, Lo_2, Hi_2, Lo_n, Hi_n, \dots, Lo_N, Hi_N$ Wertepaare der Form $((Lo_1, Hi_1), (Lo_2, Hi_2), \dots, (Lo_N, Hi_N))$ erzeugt.

[0041] Bei einem Versatz $\Delta z = (m b) / (2 f)$ und $m = 1$ kann die räumliche Auflösung, wie oben beschrieben, in Förderrichtung verdoppelt werden, da Zwischenwerte im Abstand $\Delta s/2$ erzeugt werden. Die Wertepaare sind in diesem Fall der Form $((Lo_1, vHi_1), (vLo_1, Hi_1), (Lo_2, vHi_2), (vLo_2, Hi_2) \dots, (Lo_N, vHi_N), (vLo_N, Hi_N))$. Bei halber Bandlaufgeschwindigkeit (oder doppelter Auslesefrequenz) halbiert sich Δs und das führt bei gleichem Versatz Δz dazu, dass zwar immer noch Detektordaten in der Reihenfolge $Lo_1, Hi_1, Lo_2, Hi_2, Lo_n, Hi_n, \dots, Lo_N, Hi_N$ erzeugt werden, jetzt aber Lo_1 und Hi_2 räumlich deckungsgleich sind. Die gemessenen Werte können nun dementsprechend, beispielsweise der Form $((Lo_2, Hi_1), (Lo_3, Hi_2), \dots, (Lo_N, Hi_{N-1}))$ kombiniert werden, sodass man auf eine Berechnung von Zwischenwerten verzichten kann. D.h., bei einem derartigen Einsatz der bevorzugten zweiten Ausführung kann durch die geschickte Kombination aus räumlichen Versatz der Detektorelemente orthogonal zur Zeilenrichtung und dem Verhältnis aus Auslesefrequenz und Bandgeschwindigkeit der räumlicher Versatz zwischen zugehörigen ersten und zweiten Detektordaten aufgrund der seriellen Auslesung kompensiert werden.

[0042] Wie bereits festgestellt, können (je nach Zielrichtung) die beiden besonders bevorzugten Ausführungen unabhängig voneinander oder in Kombination eingesetzt werden. Wie ebenfalls oben angemerkt, kann die dritte Ausführung alternativ oder ergänzend zur ersten und/oder zweiten Ausführung mit entsprechend den oben erläuterten Auswirkungen und Einsatzmöglichkeiten verwendet werden.

[0043] In der besonders bevorzugten ersten oder entsprechend dritten Ausführung sind also die hochenergetischen Hi- und niedrigerenergetischen Lo-Detektorelemente gegenüber der konventionellen Anordnung effektiv um ein halbes Detektorelement verschoben. In der alternativen oder zusätzlichen bevorzugten zweiten oder entsprechenden dritten Ausführung können das Verhältnis aus Auslesefrequenz und Bandgeschwindigkeit und entsprechend dazu passend der effektive Versatz in Transport- oder Abtastrichtung wie oben angemerkt nach Bedarf eingestellt werden.

[0044] Obwohl die Hi- und die Lo-Detektorelemente konfiguriert sind, unterschiedlich (spektral selektiv) auf die einfallenden zu erfassenden Röntgenstrahlen anzusprechen, können aufgrund des definierten effektiven Versatzes der Hi- und Lo-Detektorelemente in Zeilenrichtung und/oder orthogonal zur Zeilenrichtung, sowie des bekannten Verhältnisses aus Auslesefrequenz und Bandgeschwindigkeit bei Bedarf die zu einem realen Lo-Detektorelement feh-

lenden Hi-Detektordaten als virtuelle Hi-Detektordaten basierend auf den erfassten benachbarten realen Hi- und/oder realen Lo-Detektordaten berechnet werden. Möglichkeiten für ein konkretes Vorgehen werden weiter unten im Zusammenhang mit dem Verfahren gemäß des dritten Aspekts zur Aufbereitung von mit dem Detektor des ersten Aspekts gewonnenen ersten und zweiten Detektordaten erläutert.

[0045] Hinsichtlich der Realisierung der ersten Detektorelemente und der zweiten Detektorelemente sei angemerkt: Prinzipiell können die ersten und zweiten Detektorelemente in an sich bekannter Weise für die benötigte spektrale Selektivität für ein Spektrum verwendeter Röntgenstrahlen aufgebaut sein. Beispielsweise können die ersten und zweiten Detektorelemente jeweils eine Fotodiode aufweisen, vor der in Bezug auf die einfallenden, zu erfassenden Röntgenstrahlen ein Szintillatormaterial angeordnet ist. Das Szintillatormaterial kann zur Einstellung der benötigten spektral-selektiven Empfindlichkeit für Röntgenstrahlen des verwendeten Spektrums ausgewählt sein und/oder in der von der Röntgenstrahlung zu durchlaufenden Dicke entsprechend dimensioniert sein. Beispielsweise können als Szintillatormaterialien YAG (Yttrium Aluminium Granat), YGAG (Yttrium-Gadolinium-Aluminium-Granat), GOS (Gadoliniumoxysulfid) oder physikalisch mit Röntgenstrahlung ähnlich wirkende Materialien verwendet werden. Für einen niedrigerenergetischen Szintillator werden bevorzugt Schichtdicken in der Größenordnung kleiner 1 mm und für einen hochenergetischen Szintillator bevorzugt zweite Schichtdicken in der Größenordnung größer 1 mm eingestellt. Die von den einfallenden Röntgenstrahlen im jeweiligen Szintillatormaterial erzeugten Lichtquanten werden von der zugehörigen Fotodiode erfasst und in eine Ausgangsspannung umgewandelt, die von dem Zeitintervall, nach dessen Ablauf das von der Fotodiode erzeugte Ausgangssignal jeweils ausgelesen wird, abhängt. Die auf diese Weise regelmäßig ausgelesenen Ausgangssignale entsprechen den zugehörigen Detektordaten.

[0046] Zwischen den ersten Detektorelemente als Lo-Detektorelemente und den zweiten Detektorelement kann zusätzlich ein Filter zur Aufhärtung der einfallenden Röntgenstrahlen, beispielsweise aus Kupfer, Titan, Aluminium oder dergleichen, angeordnet sein, der niederenergetische Röntgenstrahlen besonders stark abschwächt, sodass die zweiten Detektorelemente überwiegend von hochenergetischen Röntgenstrahlen erreicht werden und damit Hi-Detektorelemente sind.

[0047] Die ersten und die zweiten Detektorelemente können zur Bildung des hier vorgeschlagenen Detektors auf derselben Seite eines Trägers gemäß einer der genannten ersten und zweiten Ausführung oder

einer Kombination davon angeordnet sein. Alternativ können sich die ersten Detektorelemente auf der einen Seite des Trägers und die zweiten Detektorelemente auf der anderen Seiten des Trägers befinden. Als Träger kann beispielsweise eine Schaltungsplatte (PCB, printed circuit board) verwendet werden, auf der sich die Leiterbahnen und ggf. funktionale Elektronik zur Kontaktierung und Auslesung der Detektorelemente befinden.

[0048] Im Vergleich zum herkömmlichen Aufbau bekannter Dual-Energie-Detektoren werden mit dem hier vorgeschlagenen vorbestimmten effektiven überlappenden Versatz zwischen den in Richtung der zu erfassenden Röntgenstrahlen hintereinander liegenden Hi- und Lo-Detektorelementen bei gleichen Systemkosten zahlreiche Vorteile erzielt.

[0049] Der hier vorgeschlagene Dual-Energie-Detektor erreicht eine höhere räumliche Auflösung, ohne die Anzahl der Hi- und Lo-Detektorelemente pro Längeneinheit oder Flächeneinheit erhöhen zu müssen.

[0050] Der hier vorgeschlagene Dual-Energie-Detektor hat im Vergleich zu einem Aufbau mit Detektorelementen mit einer kleineren Wirkfläche zur Erhöhung der Anzahl der Hi- und Lo-Detektorelemente pro Längeneinheit oder Flächeneinheit ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis.

[0051] Der hier vorgeschlagene Dual-Energie-Detektor besitzt eine besondere Einfachheit. Es sind grundsätzlich keine umfangreichen Änderungen an bestehenden Detektoren notwendig, um das Konzept in die Praxis umzusetzen. Im Prinzip müssen die Hi- und Lo-Detektorelemente um den gewünschten vorbestimmten effektiven überlappenden relativen Versatz, beispielsweise bevorzugt um eine halbe Länge und/oder Breite eines Detektorelements verschoben werden.

[0052] Ein zweiter Aspekt der vorliegenden Offenbarung stellt eine Röntgeninspektionsanlage mit dem zeilenförmigen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor (Detektor) gemäß dem ersten Aspekt bereit.

[0053] Die Röntgeninspektionsanlage ist für einen Transport eines Inspektionsobjekts in einer Transportrichtung durch die Inspektionsanlage eingerichtet. Die Zeilenrichtung des Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors ist bevorzugt orthogonal zu der Transportrichtung angeordnet, sodass die Transportrichtung der Abtastrichtung für das Inspektionsobjekt entspricht. Die Röntgeninspektionsanlage stellt erfasste erste Detektordaten in Form von Lo-Detektordaten und zweite Detektordaten in Form von Hi-Detektordaten des Inspektionsobjekts bereit.

[0054] Mit der Röntgeninspektionsanlage des zweiten Aspekts kann eine bildgebende Dual-Energie-Röntgenradiographie für eine zerstörungsfreie Inspektion des Inspektionsobjekts durchgeführt und das Inspektionsobjekt beschreibende Lo- und Hi-Detektordaten bereitgestellt werden. Die Lo- und Hi-Detektordaten basieren auf dem Erfassen der das Inspektionsobjekt durchdringenden Röntgenstrahlen mit dem Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor des ersten Aspekts. Dazu wird das Inspektionsobjekt mit einer vorbestimmten oder wahlweise eingestellten Transportgeschwindigkeit durch eine Abtastanordnung, bestehend aus dem orthogonal zur Transportrichtung angeordneten zeilenförmigen Detektor und einem auf die Detektorzeile ausgerichteten Röntgenstrahlenfächer, für die entsprechende zeilenweise Abtastung mit einer ebenfalls vorbestimmten oder wahlweise eingestellten Auslesefrequenz der Detektorelemente durch den Röntgenstrahlenfächer hindurchgeführt. Wie oben mehrfach angemerkt, kann dazu das Verhältnis aus Bandgeschwindigkeit und Auslesefrequenz sinnvoll nach Bedarf (hoher Durchsatz oder höhere räumliche Auflösung) eingestellt werden.

[0055] Für die folgende Beschreibung werden die mit dem Detektor erfassten und bereit gestellten Detektordaten über eine Ortsvariable n , die in Zeilenrichtung des Detektors beginnend an einem Ende verläuft, indiziert. Die ersten Detektorelemente, d.h. die Lo-Detektorelemente, erfassen erste reale Detektordaten, d.h. reale Lo-Detektordaten $Lo_1, Lo_2, Lo_n, \dots, Lo_N$ des Inspektionsobjekts, wobei $1 \leq n \leq N$ gilt und N die Anzahl der Lo-Detektorelemente in Zeilenrichtung des Detektors ist. Die zweiten Detektorelemente, d.h. die Hi-Detektorelemente, erfassen entsprechende zweite reale Detektordaten, d.h. reale Hi-Detektordaten $Hi_1, Hi_2, Hi_3, \dots, Hi_N$ des Inspektionsobjekts, wobei ebenfalls $1 \leq n \leq N$ gilt und N die Anzahl der Detektorelemente in Zeilenrichtung des Detektors ist.

[0056] Der Erfinder hat weiter gefunden, dass eine ähnliche Auswirkung auf die erzielte räumliche Auflösung oder das Verhältnis aus Transportgeschwindigkeit und Auslesefrequenz der Detektorelemente, wie sie mit der zweiten oder entsprechenden dritten Ausführung des Detektors gemäß dem ersten Aspekt auch bei einer Röntgeninspektionsanlage mit einem konventionellen Detektor vermittelt eines bestimmten Auslesemusters für die Hi- and Lo-Detektordaten an dem konventionellen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor erzielt werden kann. D.h., das nachstehende Ausleseverfahren verwendet einen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektorzeile mit pro Bildpunkt jeweils einem hochenergetischen Hi-Detektorelement und einem niedrigenergetischen Lo-Detektorelement, die in Richtung der zu erfassenden Röntgenstrahlen im Wesentlichen deckungsgleich übereinander angeordnet sind.

[0057] Zur genauen Beschreibung des Ausleseverfahrens werden die real ausgelesenen Hi- und Lo-Detektordaten der ersten und zweiten Detektorzeile wie oben bereits erläutert indiziert: Hi oder Lo stehen für ein jeweiliges Hi- oder Lo-Detektordatum mit der Ortsvariablen $n=1, 2, 3, \dots, N$ für die jeweilige Position des zugehörigen Detektorelements in der Detektorzeile, wobei $1 \leq n \leq N$ gilt und N die Anzahl der Detektorelemente des zugehörigen Typs (Hi oder Lo) in der Zeilenrichtung ist.

[0058] Der Erfinder hat gefunden, dass mit einer Auslesereihenfolge, bei der zunächst alle Detektorelemente eines Typs (Hi oder Lo) entlang der Ortsvariablen n und anschließend alle anderen Detektorelemente des anderen Typs entlang der Ortsvariablen n ausgelesen werden, also zunächst alle Hi-Detektordaten $Hi_1, Hi_2, Hi_3, \dots, Hi_N$, und dann alle Lo-Detektordaten $Lo_1, Lo_2, Lo_3, \dots, Lo_N$ (oder umgekehrt) dasselbe Ergebnis erreicht werden kann, wie es mit der Verschiebung der ersten und der zweiten Detektorzeile zueinander gemäß der zweiten Ausführung erreicht werden kann. Damit ist das vorstehende Ausleseverfahren eine äquivalente Software-Lösung zur Hardware-Lösung mit effektiv zueinander überlappend versetzten Hi- und Lo-Detektorelementen gemäß der zweiten und/oder entsprechend konfigurierten dritten Ausführung des ersten Aspekts.

[0059] Somit betrifft ein weiterer Aspekt der vorliegenden Offenbarung ein Ausleseverfahren für Hi and Lo-Detektorelemente eines Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors und ebenso eine Röntgeninspektionsanlage mit den Merkmalen der Röntgeninspektionsanlage des zweiten Aspektes aber dem nachfolgend beschriebenen konventionellen Detektor, der wenigstens eine Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektorzeile mit pro Bildpunkt jeweils einem hochenergetischen Hi-Detektorelement und einem niedrigenergetischen Lo-Detektorelement, die in Richtung der zu erfassenden Röntgenstrahlen im Wesentlichen deckungsgleich (1:1) übereinander angeordnet sind, wobei die auszulesenden Hi- und Lo-Detektordaten der Detektorzeile definiert sind als Hi_n oder Lo_n für ein jeweiliges Hi- oder Lo-Detektordatum mit der Ortsvariablen $n=1, 2, 3, \dots, N$ für die jeweilige Position des zugehörigen Detektorelements in der Detektorzeile, wobei $1 \leq n \leq N$ gilt und N die jeweilige Anzahl der Hi- und Lo-Detektorelemente in der Zeilenrichtung ist, wobei das Ausleseverfahren aufweist: Auslesen der Hi- und Lo-Detektorelemente derart, dass zunächst alle Detektorelemente eines Typs entlang der Ortsvariablen n und anschließend alle anderen Detektorelemente des anderen Typs entlang der Ortsvariablen n ausgelesen werden.

[0060] Ein dritter Aspekt der vorliegenden Offenbarung betrifft ein Verfahren zur Aufbereitung der von der Röntgeninspektionsanlage des zweiten Aspekts

oder der vorstehend beschriebenen Röntgeninspektionsanlage mit konventionellem Detektor und dem vorstehend beschriebenen Ausleseverfahren bereitgestellten Lo-Detektordaten und Hi-Detektordaten, damit aus den aufbereiteten Detektordaten ein Röntgenbild mit einer verbesserten räumlichen Auflösung abgeleitet werden kann.

[0061] Wie hier bereits angemerkt, besteht bei den mit dem Detektor des ersten Aspekts oder der Röntgeninspektionsanlage des zweiten Aspekts oder einer Röntgeninspektionsanlage mit konventionellem Detektor und dem vorstehend beschriebenen Ausleseverfahren erfassten Hi- und Lo-Detektordaten für einzelne Bildpunkte kein unmittelbarer 1:1 Zusammenhang mehr. Der Erfinder hat jedoch gefunden, dass sich aufgrund des vorbestimmten überlappenden Versatzes zwischen den Hi- und Lo-Detektorelementen, beispielsweise das zu einem realen Lo-Detektorelement fehlende Hi-Detektordatum als virtuelles Hi-Detektordatum und entsprechend zu einem realen Hi-Detektorelement das dazu fehlende Lo-Detektordatum als virtuelles Lo-Detektordatum berechnen lässt.

[0062] Das Verfahren des dritten Aspekts weist grundsätzlich auf: Berechnen eines jeweiligen virtuellen Lo-Detektordatums an der Position eines realen Hi-Detektorelement. Es versteht sich, dass alternativ oder ergänzend auch ein jeweiliges virtuelles Hi-Detektordatum an der Position eines realen Lo-Detektorelements berechnet werden kann.

[0063] Beispielsweise kann das Berechnen eines virtuellen Lo-Detektordatums an der Position eines realen Hi-Detektorelements aufweisen: Berechnen des virtuellen Lo-Detektordatums basierend auf einer bestimmten ersten Anzahl benachbarter realer Lo-Detektordaten und einer bestimmten zweiten Anzahl benachbarter realer Hi-Detektordaten. Entsprechend kann das alternative Berechnen eines virtuellen Hi-Detektordatums an der Position eines realen Lo-Detektorelements aufweisen: Berechnen eines virtuellen Hi-Detektordatums basierend auf einer bestimmten ersten Anzahl benachbarter realer Hi-Detektordaten und einer bestimmten zweiten Anzahl benachbarter realer Lo-Detektordaten.

[0064] Der Erfinder hat gefunden, dass für die Berechnung der virtuellen Hi- und/oder Lo-Detektordaten verschiedenen Ansätze möglich sind, die allein oder in Kombination zur Anwendung kommen können.

[0065] Beispielsweise kann ein virtuelles Lo- oder Hi-Detektordatum basierend auf einem Mittelwert oder Median aus benachbarten Hi- und/oder Lo-Detektordaten berechnet werden. Beispielsweise kann das zu einem Lo-Detektorelement fehlenden Hi-Detektordatum als virtuelles Hi-Detektordatum gemäß

eines ersten Ansatzes wie folgt berechnet werden: Basierend auf einer bestimmten ersten Anzahl (z.B. zwei) unmittelbar benachbarter realer Hi-Detektordaten (d.h. z.B. den Detektordaten der beiden Hi-Detektorelemente, die mit dem Lo-Detektorelement überlappen, also in der Zeile links und rechts dazu benachbart sind) und einer bestimmten zweiten Anzahl (z.B. drei) nächster realer Lo-Detektordaten (d.h. z.B. den Detektordaten des betrachteten Lo-Detektorelements sowie der beiden dazu links und rechts benachbarten Lo-Detektorelementen).

[0066] Beispielsweise kann ein virtuelles Lo-Detektordatum unter Berücksichtigung des Verlaufs der Werte der Hi-Detektordaten berechnet werden und/oder ein virtuelles Hi-Detektordatum unter Berücksichtigung des Verlaufs der Werte der Lo-Detektordaten berechnet werden.

[0067] Die vorstehend genannten Ansätze können mittels eines Algorithmus zum maschinellen Lernen implementiert werden. Beispielsweise können die virtuellen Hi- oder Lo-Detektordaten basierend auf den bereitgestellten Lo- und Hi-Detektordaten unter Verwendung eines Deep-Learning-Algorithmus erzeugt werden.

[0068] Der Erfinder hat überraschender Weise gefunden, dass sich für die Berechnung der virtuellen Detektordaten ein Ansatz aus dem Bereich der Aufbereitung der Bilddaten eines digitalen Bildsensors mit einem sogenannten Bayer-Farbfiler eignet. Bei einem optischen Bildsensor mit Bayer-Farbfiler können die an der Stelle eines Bildpunktes fehlenden Farbinformationen mittels eines sogenannten Demosaicking-Algorithmus (d.h. einem Algorithmus zur Mosaikentfernung) berechnet werden. Ein solcher Algorithmus ist beispielsweise beschrieben in: „Color filter array demosaicking using high-order interpolation techniques with a weighted median filter for sharp color edge preservation“ von J. S. J. Li und S. Randhawa, IEEE Transactions on image processing, Vol. 18, No. 9, September 2009; zur Bezugnahme wird das Dokument im Folgenden mit Li/Randhawa abgekürzt und sein Inhalt durch Bezugnahme aufgenommen.

[0069] Bei einem Bildsensor mit Bayer-Farbfiler sind die Filterelemente für die Grundfarben Rot, Grün und Blau des Farbfilters als sogenannte Bayer-Matrix (oder Bayer-Muster) angeordnet (vgl. **Fig. 1** in Li/Randhawa), in der die einzelnen Farbfiler schachbrettartig angeordnet sind, wobei 50% der Filterelemente Grün und je 25% der Filterelemente Rot und Blau sind. Die „Bayer-Matrix“ und das „Bayer-Filter“ sind nach ihrem Erfinder Bryce E. Bayer benannt und beispielsweise in US 3 971 065 A beschrieben.

[0070] Zur Anwendung dieses Ansatzes werden die mit dem Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor des ersten Aspekts erfassten und bereit gestellten Detektordaten über die o.g. Ortsvariable n , die in Zeilenrichtung des Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor beginnend an einem Ende verläuft, derart indiziert, dass die Lo-Detektorelemente reale Lo-Detektordaten $Lo_1, Lo_2, \dots, Lo_n, \dots, Lo_N$ des Inspektionsobjekts erfassen und die Hi-Detektorelemente entsprechende reale Hi-Detektordaten $Hi_1, Hi_2, \dots, Hi_n, \dots, Hi_N$ des Inspektionsobjekts erfassen, wobei $1 \leq n \leq N$ gilt und N jeweils die Anzahl der Hi- und Lo-Detektorelemente in Zeilenrichtung des Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor ist.

[0071] Die realen Hi- und Lo-Detektorelemente des Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors werden paarweise in der Reihenfolge $Hi_1, Lo_1, Hi_2, Lo_2, \dots, Hi_n, Lo_n, \dots, Hi_N, Lo_N$ ausgelesen, wobei mehrere derart ausgelesenen Reihenfolgen eine zweidimensionale Hi/Lo-Matrix bilden. Je nachdem, wie der Versatz in Bezug auf die Ausleserichtung der Detektorelemente tatsächlich umgesetzt wurde, kann die obige Reihenfolge auch mit dem Element Lo_1 beginnen und dann mit dem Element Hi_N enden.

[0072] Der virtuellen Hi- und/oder Lo-Detektordaten können unter Verwendung eines angepassten Demosaicking-Algorithmus, beispielsweise dem in Li/Randhawa beschriebenen Algorithmus, berechnet werden.

[0073] Zur geeigneten Anpassung des Demosaicking-Algorithmus, beispielsweise des in Li/Randhawa beschriebene Algorithmus, wird zunächst das dem dort beschriebenen Algorithmus zugrunde liegende drei Farben aufweisende Bayer-Muster auf ein zweifarbiges Schachbrett-Muster reduziert und die eine Farbe des Schachbretts den Hi-Detektordaten und die andere Farbe des Schachbretts den Lo-Detektordaten zugeordnet.

[0074] Anschließend wird der auf das Schachbrett-Muster angepasste Demosaicking-Algorithmus entsprechend auf die um 45° gedrehte zweidimensionale Hi/Lo-Matrix mit den erfassten realen Hi- und Lo-Detektordaten angewendet, um jeweils zu einem realen Detektordatum zugehöriges virtuelles Detektordatum zu berechnen.

[0075] Ein vierter Aspekt der vorliegenden Offenbarung betrifft eine Verarbeitungsvorrichtung zur Aufbereitung der von der Röntgeninspektionsanlage des zweiten Aspekts bereitgestellter Lo-Detektordaten $Lo_1, Lo_2, Lo_3, \dots, Lo_N$ und Hi-Detektordaten $Hi_1, Hi_2, Hi_3, \dots, Hi_N$, wobei die Verarbeitungsvorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens des dritten Aspekts eingerichtet ist.

[0076] Ein fünfter Aspekt der vorliegenden Offenbarung betrifft ein System bestehend aus einer Röntgeninspektionsanlage des zweiten Aspekts und der Verarbeitungsvorrichtung des vierten Aspekts, wobei die Röntgeninspektionsanlage zur Bereitstellung der Hi- und Lo-Detektordaten basierend auf der Abtastung eines Inspektionsobjekts an die Verarbeitungsvorrichtung eingerichtet ist und dazu mit der Verarbeitungsvorrichtung für eine entsprechende Datenkommunikation verbunden ist.

[0077] Ein sechster Aspekt der vorliegenden Offenbarung betrifft ein Computerprogrammprodukt mit einem Computerprogramm, das Softwaremittel zur Durchführung eines Verfahrens des dritten Aspekts aufweist, wenn das Computerprogramm auf einem Computer, wie beispielsweise der Verarbeitungsvorrichtung des vierten Aspekts, ausgeführt wird.

[0078] Ein siebter Aspekt der vorliegenden Offenbarung betrifft einen Datenträger mit einem Computerprogrammprodukt des sechsten Aspekts.

[0079] Ein achter Aspekt der vorliegenden Offenbarung betrifft einen Datenstrom mit elektronisch lesbaren Steuersignalen, die mit einem programmierbaren Computer derart interagieren können, dass, wenn der Computer die elektronisch lesbaren Steuersignale ausführt, der Computer ein Verfahren des dritten Aspekts durchführt.

Figurenliste

[0080] Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der her vorgeschlagenen Lösung(en) ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung, in der unter Bezugnahme auf Zeichnungen Ausführungsbeispiele im Einzelnen beschrieben sind. Dabei können die in den Ansprüchen und in der Beschreibung erwähnten Merkmale jeweils einzeln für sich oder in beliebiger Kombination wesentlich sein. Ebenso können die vorstehend genannten und die hier weiter ausgeführten Merkmale je für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Funktionsähnliche oder identische Bauteile oder Komponenten sind teilweise mit gleichen Bezugszeichen versehen. Die in der Beschreibung der Ausführungsbeispiele verwendeten Begriffe „links“, „rechts“, „oben“ und „unten“ beziehen sich auf die Zeichnungen in einer Ausrichtung mit normal lesbaren Figurenbezeichnung oder normal lesbaren Bezugszeichen. Die gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen sind nicht als abschließend zu verstehen, sondern haben beispielhaften Charakter zur Erläuterung der hier vorgeschlagenen Lösung. Die detaillierte Beschreibung dient der Information des Fachmanns, daher werden bei der Beschreibung bekannte Strukturen und Verfahren nicht im Detail gezeigt oder erläutert, um das Verständnis der Beschreibung nicht zu erschweren.

Fig. 1a ist eine vereinfachte perspektivische Darstellung des Aufbaus eines konventionellen Dual-Energie-Detektors.

Fig. 1b ist eine Querschnittansicht des Schnitts durch die xy-Ebene des Detektors der **Fig. 1a**.

Fig. 2a ist eine vereinfachte perspektivische Darstellung des Aufbaus eines ersten Ausführungsbeispiels gemäß der ersten Ausführung des hier vorgeschlagenen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors.

Fig. 2b ist eine Querschnittansicht des Schnitts durch die xy-Ebene des Detektors der **Fig. 2a**.

Figure 2c ist eine seitliche Darstellung eines Detektors gemäß der ersten Ausführung mit zu einander beabstandeter erster und zweiter Detektorzeile.

Fig. 3 ist eine vereinfachte perspektivische Darstellung des Aufbaus eines zweiten Ausführungsbeispiels basierend auf der zweiten Ausführung des hier vorgeschlagenen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors.

Fig. 4 ist eine vereinfachte perspektivische Darstellung des Aufbaus eines dritten Ausführungsbeispiels basierend auf einer Kombination der ersten und der zweiten Ausführung des hier vorgeschlagenen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors.

Fig. 5 ist eine seitliche Darstellung eines geneigten Detektors gemäß einem Ausführungsbeispiels der dritten Ausführung, bei dem ein effektiver Versatz erreicht wird, wie bei dem Ausführungsbeispiel gemäß der ersten Ausführung, dass in der **Fig. 2c** veranschaulicht ist.

Fig. 6 ist eine vereinfachte Seitenansicht einer Röntgeninspektionsanlage mit einem hier vorgeschlagenen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor, wie beispielsweise einem Detektor der **Fig. 2a-5**.

Fig. 7 veranschaulicht die Auslesesituationen der Detektordaten bei einem Detektor der **Fig. 1a** und **Fig. 1b** als Referenz (**Fig. 7** oben) und der **Fig. 2a** und **Fig. 2b** (oder 5) gemäß der ersten Ausführung (**Fig. 7** unten).

Fig. 8 veranschaulicht die Auslesesituationen der Detektordaten bei einem Detektor der **Fig. 1a** und **Fig. 1b** als Referenz (**Fig. 8** oben) und der **Fig. 3** mit einem Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor gemäß der zweiten Ausführung (**Fig. 8** unten).

Fig. 9 veranschaulicht die Auslesesituationen der Detektordaten bei einem Detektor der **Fig. 1a** und **Fig. 1b** als Referenz (**Fig. 9** oben) und, wie eine Auslesesituation ähnlich zu der in der **Fig. 8** gezeigten Darstellung bei einem

Detektor der **Fig. 1** mittels einer modifizierten Auslesereihenfolge der Hi- und Lo-Detektorelemente erreicht werden kann (**Fig. 9** unten).

Fig. 10 veranschaulicht die Auslesesituationen der Detektordaten bei einem Detektor der **Fig. 1a** und **Fig. 1b** als Referenz (**Fig. 10** oben) sowie der **Fig. 3** als zweite Referenz (**Fig. 10** Mitte) und zusätzlich der **Fig. 3** (**Fig. 10** unten) mit einem Versatz der Pixel in z-Richtung dem doppelten Versatz dessen aus **Fig. 8** entspricht.

Fig. 11-13 veranschaulichen ein Ausführungsbeispiel für einen Ansatz zur Aufbereitung der mit einem hier vorgeschlagenen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor erfassten Detektordaten basierend auf einem Demosaicing-Algorithmus.

Fig. 14-17 veranschaulichen Verfahren zur Verarbeitung und Aufbereitung von mit den in den **Fig. 1a-5** gezeigten Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektoren erfassten realen Detektordaten zur zusätzlichen Bereitstellung benötigter virtueller Detektordaten.

Detaillierte Beschreibung von Ausführungsbeispielen

[0081] Die Dual-Energie-Röntgenradiographie basiert darauf, dass der Schwächungskoeffizient eine Materialeigenschaft des durchstrahlten Materials ist. Mittels Abtasten eines Inspektionsobjekts mittels Röntgenstrahlen gelangt man zunächst zu einem Graustufenbild, bei dem der Grauwert eines Bildpunkts der jeweiligen gemessenen Intensität der Röntgenstrahlen entspricht. Durch einen Vergleich der Intensität der verwendeten Röntgenstrahlen mit der an dem Bildpunkt gemessenen Intensität kann der Schwächungskoeffizient des dort durchstrahlten Materials ermittelt werden. Der Schwächungskoeffizient ist eine Funktion der Kernladungszahl und der Dichte des durchstrahlten Materials sowie der ursprünglichen Energie der verwendeten Röntgenstrahlen. Wird das Inspektionsobjekt zweimal spektral selektiv abgetastet, z.B. mit spektral unterschiedlichen Röntgenenergien, kann die Abhängigkeit von der Materialdichte aus den zugehörigen Gleichungen eliminiert werden.

[0082] Um die benötigten zwei spektral selektiven Messungen gleichzeitig durchzuführen, haben sich sogenannte Dual-Energie-Detektoren mit einem Aufbau, der im Wesentlichen zwei spektral selektive Energiekanäle aufweist, etabliert. Ein solcher Detektor stellt damit gleichzeitig von hochenergetischen Röntgenstrahlen verursachte Hi(gh)-Detektordaten und von niederenergetischen Röntgenstrahlen verursachte Lo(w)-Detektordaten eines durchstrahlten Inspektionsobjekts bereit. Mit dem Größenunterschied zwischen den Lo- und den Hi-Detektordaten

kann für jeden, einem Detektorelement entsprechenden Bildpunkt (Pixel), auf die Kernladungszahl (auch Atomzahl, Ordnungszahl) des dort durchstrahlten Materials bzw. die effektive Kernladungszahl der dort durchstrahlten Materialien in einem Inspektionsobjekt rückgeschlossen werden.

[0083] Organische Materialien haben weitestgehend eine Kernladungszahl von etwa 10 oder weniger und metallische Materialien eine Kernladungszahl von über 10. Die Materialien in einem Inspektionsobjekt können damit entsprechend der ermittelten effektiven Ordnungszahl klassifiziert und zur optischen Materialdiskriminierung die Pixel in einem angezeigten Röntgenbild entsprechend eingefärbt werden. Dieses Prinzip wird beispielsweise bei der visuellen Auswertung von Röntgenbildern von Gepäck an Flughafenkontrollstellen eingesetzt, indem an Inspektionsanlagen dem Bedienpersonal in angezeigten Röntgenbildern zur optischen Materialdiskriminierung Bildpunkte mit überwiegend organischen Verbindungen orange, mit überwiegend metallischem Material blau und mit einer Mischung aus organisch und metallisch grün eingefärbt werden.

[0084] Der nachfolgenden Beschreibung der **Fig. 1a** bis **Fig. 6** sei vorausgeschickt, dass in den Figuren zur Orientierung und gegenseitigen Bezugnahme ein xyz-Koordinatensystem angetragen ist. Gemäß dem jeweils angetragenen xyz-Koordinatensystem verläuft die Längsrichtung der dargestellten Detektorzeilen immer in x-Richtung, während die Richtung von auf die Detektorelemente einfallenden zu erfassenden Röntgenstrahlen RX (vereinfacht als Pfeilbündel dargestellt) in y-Richtung und bei Verwendung der Detektorzeilen eine der Abtastrichtung entsprechende Richtung orthogonal zur Detektorzeile in z-Richtung verläuft. Die Abtastrichtung entspricht üblicherweise der Transportrichtung TD eines Inspektionsobjekts vorbei an der Detektorzeile und durch eine Röntgeninspektionsanlage (wie sie der in **Fig. 6** vereinfacht dargestellt ist). D.h., die Längsrichtung (x-Richtung) des hier vorgeschlagenen Detektors ist üblicherweise in der Anwendung quer zu der Abtastrichtung (z-Richtung) angeordnet.

[0085] Es sei angemerkt, dass die hier verwendet Darstellung des Detektors eine Vereinfachung gegenüber der in der Praxis üblicherweise eingesetzten U- oder L-förmigen Detektorzeilen ist. Bei einer U- oder L-förmigen Detektorzeile und einem darauf ausgerichteten fächerförmigen Röntgenstrahlenfächer verläuft die Detektorzeile nicht ausschließlich in der Transportebene der Inspektionsobjekte. Aber die Schenkel der Detektorzeile verlaufen immer orthogonal zu den erfassten Röntgenstrahlen und ebenfalls orthogonal zur Transport- oder Abtastrichtung z. Damit sind die hier ausgeführten Überlegungen für eine I-förmige lediglich in der xz-Ebene

verlaufende Detektorzeile auf die in der Praxis eingesetzten U- und L-förmigen Detektorzeilen problemlos übertragbar.

[0086] Die **Fig. 1a** und **Fig. 1b** veranschaulichen den Aufbau eines konventionellen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors 1 (nachfolgend kurz Detektor 1) in Form eines Ausschnitts aus einer Detektorzeile 2. **Fig. 1a** ist eine vereinfachte perspektivische Darstellung des Detektors 1 und **Fig. 1b** ist, zur Veranschaulichung des Aufbaus, eine Projektion eines Detektors 1 der **Fig. 1a** auf die xy-Ebene.

[0087] Die Detektorzeile 2 besteht aus nebeneinander angeordneten Dual-Energie-Detektorelementen 3; aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nur vier solcher Elemente gezeigt, wobei die Anzahl in der Realität üblicherweise höher (z.B. 1.000) ist. Jedes Detektorelementen 3 besteht dazu jeweils aus niederenergetischen Lo(w)-Detektorelementen 4 und hochenergetischen Hi(gh)-Detektorelementen 5, die in Bezug auf zu erfassende Röntgenstrahlung RX sandwichartig mit einer dazwischen liegenden Filterschicht 6 (z.B. aus Kupfer) übereinander angeordnet sind. Während der Abtastung eines Inspektionsobjekts erzeugen die Lo-Detektorelemente 4 Lo-Detektordaten, die hauptsächlich auf niederenergetische Röntgenstrahlen RX zurückgehen, während die Hi-Detektorelemente 5 Hi-Detektordaten erzeugen, die auf energiereiche Röntgenstrahlen RX zurückgehen. Der Detektor 1 besitzt damit wenigstens zwei Ausgangskanäle: einen, an dem die Hi-Detektordaten bereitgestellt werden, und einen, an dem die Lo-Detektordaten bereitgestellt werden.

[0088] Die Wirkfläche A4 der Lo-Detektorelemente 4 und die Wirkfläche A5 der Hi-Detektorelemente 5 sind im Wesentlichen gleich groß. Die Wirkflächen der Lo-Detektorelementen 4 und der Hi-Detektorelemente 5 haben in Zeilenrichtung (d.h. Längsrichtung der Detektorzeile 2) eine Länge L und orthogonal dazu eine Breite W.

[0089] Beispielsweise kann die Wirkfläche eines Detektorelements 0,8 mm (Länge L in Zeilenrichtung) mal 0,8 mm (Breite W quer zur Zeilenrichtung) betragen. Eine typische Detektorzeile kann beispielsweise insgesamt in Zeilenrichtung 80 cm betragen, sodass die Zeile ungefähr aus 1.000 Detektorelementen besteht. Grundsätzlich sind die Maße der Detektorelemente in einem technisch sinnvollen Bereich und die Länge der Detektorzeile frei wählbar.

[0090] Die Detektorzeile 2 ist im Einsatz üblicherweise quer zu einer Transportrichtung TD für ein Inspektionsobjekt angeordnet, damit das Inspektionsobjekt zeilenweise mit den Röntgenstrahlen RX abgetastet werden kann. Der Detektor 1 kann grundsätzlich aus mehreren Detektorzeilen 2 bestehen.

D.h., mit dem Detektor 1 der **Fig. 1a** und **Fig. 1b** können mittels einer einzigen zeilenweisen Abtastung eines Inspektionsobjekts gleichzeitig ein auf der Durchstrahlung mit niederenergetischen Röntgenstrahlen basierendes Niedrigenergie-Röntgenbild und ein auf der Durchstrahlung mit hochenergetischen Röntgenstrahlen basierendes Hochenergie-Röntgenbild erfasst werden.

[0091] **Fig. 1b** veranschaulicht zusätzlich die mittels der einzelnen Detektorelemente 4 und 5 bereitgestellten realen Hi-Detektordaten $Hi_1, Hi_2, Hi_3, \dots, Hi_N$ und Lo-Detektordaten $Lo_1, Lo_2, Lo_3, \dots, Lo_N$. Zur genauen Beschreibung der in der nachstehenden Beschreibung erläuterten Aufbereitungsverfahren für die realen Detektordaten sowie der zugehörigen Ausleseverfahren sind die real ausgelesenen Hi- und Lo-Detektordaten entlang der Detektorzeile 2 indiziert: Hi oder Lo klassifiziert ein jeweiliges Hi- oder Lo-Detektordatum indiziert mit der Ortsvariablen $n=1, 2, \dots, N$ für die jeweilige Position des zugehörigen Detektorelements in der Detektorzeile 2, wobei $1 \leq n \leq N$ gilt und N die Anzahl der Detektorelemente des zugehörigen Typs (Hi oder Lo) in der Zeilenrichtung ist. In dem stark vereinfachten Beispiel der **Fig. 1b** gilt $N=8$, d.h. die Detektorzeile 2 besteht aus 8 entlang der Detektorzeile angeordneten Hi-Detektorelementen und Lo-Detektorelementen.

[0092] Die übliche Auslesung zur Bereitstellung der mit dem Detektor 1 erfassten Hi- und Lo-Detektordaten ist jeweils im linken Teil der **Fig. 6-8** in Laufrichtung der Ortsvariablen n entlang der Detektorzeile und über der Zeit t veranschaulicht.

[0093] Die **Fig. 2a-4** zeigen jeweils ein bestimmtes Ausführungsbeispiel des hier vorgeschlagenen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor 100, der im Wesentlichen jeweils aus einer ersten Detektorzeile 110 mit ersten Detektorelementen 111 und einer dazu parallel angeordneten zweiten Detektorzeile 120 mit zweiten Detektorelementen 122 besteht. In allen Ausführungsbeispielen sind die beiden Detektorzeilen 110 und 120 konfiguriert, auf ein Spektrum der zu erfassenden Röntgenstrahlen RX unterschiedlich spektral selektiv anzusprechen. Dazu sind in der ersten Detektorzeile 110 zugehörige erste Detektorelemente 111 in Form von Lo-Detektorelementen zum primären Erfassen niederenergetischer Röntgenstrahlen nebeneinander angeordnet und in der zweiten Detektorzeile 120 zugehörige zweite Detektorelemente 122 in Form von Hi-Detektorelementen zum primären Erfassen hochenergetischer Röntgenstrahlen nebeneinander angeordnet. Grundsätzlich sind gemäß der hier vorgeschlagenen Verbesserung die beiden Detektorzeilen 110 und 120 zueinander in Zeilenrichtung parallel angeordnet und in der Richtung der zu erfassenden Röntgenstrahlen RX so hintereinander angeordnet, dass die

Detektorzeilen 110 und 120 sich überlappend zueinander versetzt sind.

[0094] In den gezeigten Ausführungsbeispielen hat jedes Hi- und jedes Lo-Detektorelement in Zeilenrichtung also Längsrichtung des Detektors 100 dieselbe Länge L und orthogonal dazu dieselbe Breite W . In den gezeigten Ausführungsbeispielen sind die Längen L_{Hi} und L_L , sowie die Breiten W_{Hi} und W_{Lo} gleich groß, d.h. die Wirkflächen der Hi- und Lo-Detektorelemente 111 und 122 sind gleich groß.

[0095] **Fig. 2a** zeigt eine vereinfachte perspektivische Darstellung eines ersten Ausführungsbeispiels basierend auf der ersten Ausführung des hier vorgeschlagenen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors 100 zur Veranschaulichung des prinzipiellen Aufbaus. **Fig. 2b** ist eine Querschnittsansicht durch die xy -Ebene eines Detektors 100, wie er ausschnittsweise in der **Fig. 2a** dargestellt ist.

[0096] In den **Fig. 2a** und **Fig. 2b** sind die erste Detektorzeile 110 und die zweite Detektorzeile 120 in der Zeilenrichtung um einen ersten Versatz Δx zueinander versetzt angeordnet. Der Versatz Δx entspricht im gezeigten Ausführungsbeispiel genau der halben Länge L , d.h. $\Delta x=L/2$.

[0097] **Fig. 2b** veranschaulicht (ähnlich wie in der **Fig. 1b**) die mittels der einzelnen Detektorelemente 111 und 122 bereitgestellten realen Hi-Detektordaten $Hi_1, Hi_2, Hi_3, \dots, Hi_N$ und Lo-Detektordaten $Lo_1, Lo_2, Lo_3, \dots, Lo_N$. Zur genauen Beschreibung der in der nachstehenden Beschreibung erläuterten Aufbereitungsverfahren für die realen Detektordaten sowie der zugehörigen Ausleseverfahren sind die real ausgelesenen Hi- und Lo-Detektordaten entlang der Detektorzeile wie in der **Fig. 1b** indiziert. Hi oder Lo klassifiziert ein jeweiliges Hi- oder Lo-Detektordatum indiziert mit der Ortsvariablen $n=1, 2, \dots, N$ für die jeweilige Position des zugehörigen Detektorelements in der Detektorzeile 2, wobei $1 \leq n \leq N$ gilt und N die Anzahl der Detektorelemente des zugehörigen Typs (Hi oder Lo) in der Zeilenrichtung ist. In der stark vereinfachten Darstellung der **Fig. 2b** gilt $N=8$, d.h. die Detektorzeile besteht aus 8 entlang der Detektorzeile angeordneten Hi-Detektorelementen und Lo-Detektorelementen.

[0098] In der ersten Detektorzeile 110 ist ein Lo-Detektorelement 115 gezeigt, das ein Lo-Detektordatum Lo_4 bereitstellt. Im Unterschied zu den Detektorzeilen 1 der **Fig. 1a** und **Fig. 1b** gibt es jedoch zum Lo-Detektorelement 115 kein zugehöriges Hi-Detektorelement. Zur Lösung wird hier vorgeschlagen aus den vorhandenen Hi- und Lo-Detektordaten das zum Lo-Detektordatum Lo_4 fehlende Hi-Detektordatum in Form eines virtuellen Detektordatums vHi_4 zu berechnen.

[0099] Wie bereits erläutert hat der Erfinder gefunden, dass für die Berechnung der virtuellen Hi-Detektordaten $vHi\#$ und Lo-Detektordaten $vLo\#$ verschiedenen Ansätze möglich sind, die allein oder in Kombination zur Anwendung kommen können.

[0100] Beispielsweise kann in einem besonders einfachen Ansatz ein virtuelles Lo-Detektordatum $vLo\#$ oder Hi-Detektordatum $vHi\#$ basierend auf dem Mittelwert oder Median benachbarter Hi- und/oder Lo-Detektordaten berechnet werden. Beispielsweise kann das zu dem realen Detektordatum Lo_4 , das von dem Lo-Detektorelement 113 erfasst und bereitgestellt wird, fehlende Hi-Detektordatum als virtuelles Hi-Detektordatum vHi_4 wie folgt berechnet werden:

Basierend auf zwei als eine bestimmte erste Anzahl unmittelbar benachbarten realen Hi-Detektordaten Hi_4 und Hi_5 , d.h. den Detektordaten der beiden Hi-Detektorelemente 123 und 127, die sich mit dem betrachteten Lo-Detektorelement 115 überlappen, also in der Zeile links und rechts dazu benachbart sind, und den drei als eine bestimmte zweite Anzahl nächster realer Lo-Detektordaten Lo_3 , Lo_4 und Lo_5 , d.h. den Detektordaten des betrachteten Lo-Detektorelements 115 sowie der beiden dazu links und rechts benachbarten Lo-Detektorelemente 113 und 117, kann das virtuelle Hi-Detektordatum vHi_4 berechnet werden.

[0101] Damit kann bei der Berechnung des virtuellen Hi-Detektordatum vHi_4 der Verlauf der Werte der Lo-Detektordaten, vermittelt der Werte Lo_3 , Lo_4 und Lo_5 berücksichtigt werden. Die Werte Hi_3 und Hi_4 können gemittelt werden und als Basiswert für das virtuelle Hi-Detektordatum vHi_4 eingehen. Dieser Ansatz kann auch als Grundlage für einen Algorithmus zum maschinellen Lernen, z.B. Deep-Learning-Algorithmus, verwendet werden.

[0102] Im Ergebnis kann mit dem Dual-Energie--Röntgenstrahlendetektors 100 des Ausführungsbeispiels der **Fig. 2a** und **Fig. 2b** eine verdoppelte räumliche Auflösung bei den aus den Detektordaten abgeleiteten Röntgenbildern in Zeilenrichtung des Detektors 100 erreicht werden.

[0103] **Fig. 2c** ist eine seitliche Darstellung eines Detektors 100 gemäß der ersten Ausführung, wobei die erste Detektorzeile 110 mit den Lo-Detektorelementen 111 und zweiten Detektorzeile 120 mit den Hi-Detektorelementen 122 zueinander in einem Abstand D (z.B. $D = 1$ cm) angeordnet sind. Die Detektorzeilen 110 und 120 sind in Zeilenrichtung um den effektiven Versatz Δx zueinander überlappend versetzt. Die auf den Detektor 100 auftreffenden und die Detektorelemente durchlaufenden Röntgenstrahlen RX verlaufen im Wesentlichen orthogonal zu der ersten und der zweiten Detektorzeile 110, 120.

[0104] In der **Fig. 3** ist ein Ausführungsbeispiel gemäß der zweiten Ausführung des hier vorgeschlagenen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors 100 gezeigt. Die erste Detektorzeile 110 und die zweite Detektorzeile 120 sind jetzt orthogonal zu der Zeilenrichtung um einen zweiten Versatz Δy zueinander versetzt angeordnet. Der Versatz Δy entspricht in dem gezeigten Ausführungsbeispiel genau der halben Breite W , d.h. $\Delta y = W/2$.

[0105] Zur Berechnung der fehlenden Detektordaten können, ähnlich wie bei den **Fig. 2a** und **Fig. 2b** erläutert, die bereitgestellten Detektordaten aufbereitet werden, indem zu jedem realen Detektordatum $Hi\#$ oder $Lo\#$ ein zugehöriges virtuelles Detektordatum $vLo\#$ oder $vHi\#$ berechnet wird.

[0106] Im Ergebnis kann mit dem Dual-Energie--Röntgenstrahlendetektors 100 des Ausführungsbeispiels der **Fig. 3** unter Berücksichtigung des Verhältnisses aus Abtast- oder Bandgeschwindigkeit eine Erhöhung der räumlichen Auflösung bei den aus den Detektordaten abgeleiteten Röntgenbildern in Abtastrichtung und/oder eine Erhöhung der Bandgeschwindigkeit erreicht werden.

[0107] In der **Fig. 4** ist ein Ausführungsbeispiel mit einer Kombination der ersten Ausführung (**Fig. 2a** und **Fig. 2b**) und zweiten Ausführung (**Fig. 3**) des hier vorgeschlagenen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors 100 gezeigt. D.h. die erste Detektorzeile 110 und die zweite Detektorzeile 120 sind in der Zeilenrichtung um den ersten Versatz Δx zueinander versetzt angeordnet, wobei der Versatz Δx der halben Länge L entspricht, d.h. $\Delta x = L/2$. Die erste Detektorzeile 110 und die zweite Detektorzeile 120 sind außerdem orthogonal zur Zeilenrichtung um den zweiten Versatz Δy zueinander versetzt angeordnet, wobei der Versatz Δy in dem gezeigten Ausführungsbeispiel genau der halben Breite W entspricht, d.h. $\Delta y = W/2$. Wie an anderer Stelle angemerkt, kann $L = W$ sein. Damit können mit dem Ausführungsbeispiel der **Fig. 4** sowohl die Wirkungen der besonders bevorzugten ersten und zweiten Ausführungen, die beispielhaft in den **Fig. 2a-3b** dargestellt sind, gleichzeitig erreicht werden.

[0108] **Fig. 5** ist eine seitliche Darstellung des konventionellen Detektors 1 der **Fig. 1**, als Beispiel für die Verwendung eines konventionellen Detektors mittels Anordnung gemäß der dritten Ausführung der vorliegenden Offenbarung zur Erzielung eines effektiven Versatzes. Im strengen Vergleich zur **Fig. 1** sind als Unterschied die Lo-Detektorelemente 4 und die Hi-Detektorelemente 5 der Detektorzeile 2 des Detektors 1 zueinander mit einem Abstand D (z.B. $D = 1$ cm) beabstandet; dies ermöglicht eine gute Vergleichbarkeit mit der **Fig. 2c**.

[0109] Bei dem Detektor 1 der **Fig. 5** gibt es keinen örtlichen Versatz zwischen den 1:1 einander zugeordneten Lo- und Hi-Detektorelementen 4, 5. Ein gewünschter effektive Versatz zwischen den Lo-Detektorelementen 4 und den Hi-Detektorelementen 5 - beispielsweise wie der bei dem Detektor 100 der **Fig. 2c** - kann aber mittels der dritten Ausführung der vorliegenden Offenbarung erreicht werden, indem die Detektorzeile 2 gegenüber den einfallenden Röntgenstrahlen RX um einen Winkel α geneigt wird. **Fig. 5** zeigt dazu stark vereinfacht, dass allein mittels dieser geneigten Anordnung einer konventionellen Detektorzeile 2 gegenüber den darauf einfallenden Röntgenstrahlen RX, der gewünschte effektive Versatz erreicht werden kann, wie er beispielsweise bei dem Ausführungsbeispiel für die erste Ausführung der **Fig. 2c** erreicht wird.

[0110] Zum besseren Verständnis ist in der **Fig. 5** eine Normale N, die durch die Mitten der beiden durch die einander zugeordneter Hi- und Lo-Detektorelemente gebildeten Zeilen verläuft, eingetragen. Ebenso ist ein Referenzröntgenstrahl RXref der auf den Detektor 1 einfallenden Röntgenstrahlen RX angetragen, der auf den Punkt des Detektors 1 trifft, durch den die Normale N verläuft. Der Neigungswinkel α ist somit zwischen der Normalen N und dem Referenzröntgenstrahl RXref gebildet.

[0111] In der **Fig. 5** ist der Neigungswinkel α so eingestellt, dass sich zwischen den Lo- und Hi-Detektorelementen 4, 5 der gewünschte effektive Versatz Δx ergibt. Im Beispiel der **Fig. 5** wird somit effektiv derselbe Versatz erreicht, wie in dem entsprechenden Ausführungsbeispiel der ersten Ausführung in der **Fig. 2c**.

[0112] Das Prinzip der dritten Ausführung, das somit in der **Fig. 5** veranschaulicht ist, kann entsprechend auch auf die zweite Ausführung übertragen werden. Ebenso kann die dritte Ausführung mit der ersten und/oder zweiten Ausführung kombiniert werden. Schließlich kann mittels entsprechender Neigung des Detektors auch die Wirkung der kombinierten erst und zweiten Ausführung allein mittels der dritten Ausführung erreicht werden.

[0113] **Fig. 6** zeigt ein System 400, das im Wesentlichen aus einer Röntgeninspektionsanlage 200 und einer Verarbeitungsvorrichtung 300 besteht.

[0114] Die stark vereinfacht dargestellte Röntgeninspektionsanlage 200 weist Strahlenschutzvorhänge 202, 204 auf, von denen je einer an einem Eingang 206 und einem Ausgang 208 eines Strahlentunnels 210 der Röntgeninspektionsanlage 200 angeordnet ist. Zwischen den Strahlenschutzvorhängen 202, 204 befindet sich innerhalb des Strahlentunnels 210 ein Strahlungsbereich 212 mit wenigstens einer Strahlenquelle 214, beispielsweise eine Röntgen-

röhre mit Kollimator zur Erzeugung eines Röntgenstrahlenfächers 215, der auf den hier vorgeschlagenen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor 100 ausgerichtet ist. Zum Transport eines Gepäckstückes 216 als Inspektionsobjekt in der Transportrichtung TD durch den Strahlentunnel 210 dient eine Transporteinrichtung 218, beispielsweise ein Gleitgurtförderer, der die Inspektionsobjekte in der Transportrichtung TD durch den Strahlungsbereich 212 fördert. Der zeilenförmige Detektor 100 ist L-förmig oder U-förmig und mit seiner Längsrichtung orthogonal zur Transportrichtung TD angeordnet, sodass die Transportrichtung TD der Abtastrichtung des Inspektionsobjekts 216 entspricht.

[0115] Die Verarbeitungsvorrichtung 300 ist im Wesentlichen für die Durchführung wenigstens eines der hier vorgeschlagenen Verfahren zur Aufbereitung der mit dem hier vorgeschlagenen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor erfassten Hi- und Lo-Detektordaten eingerichtet. Der Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor 100 ist beispielsweise einer, wie er in den **Fig. 2a-5** vereinfacht gezeigt ist. Die vom Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor 100 bereitgestellten und von der Verarbeitungsvorrichtung 300 aufbereiteten Detektordaten können verwendet werden, um ein basierend auf Materialklassen eingefärbtes Röntgenbild des Inspektionsobjekt 216 zu erzeugen, welches einer Bedienperson auf einem Bildschirm (nicht dargestellt) in an sich bekannter Weise angezeigt wird.

[0116] Die Verarbeitungsvorrichtung 300 kann, wie in der **Fig. 6** dargestellt, Teil einer Steuereinrichtung 220 der Röntgeninspektionsanlage 100 sein. Die Verarbeitungsvorrichtung 300 kann sich grundsätzlich auch völlig getrennt zur Röntgeninspektionsanlage 200 befinden, beispielsweise an einem zentralen Ort, an dem die Rohdetektordaten mehrerer Inspektionsanlagen 200 zusammenlaufen und dort zentral verarbeitet werden. Dies macht für die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Aufbereitung der Detektordaten keinen Unterschied.

[0117] Die Verarbeitungseinheit 300 kann auch Teil des Detektors 100 sein, sodass die von dem Detektor 100 erzeugten Detektordaten bereits am Detektor 100 gemäß den hier vorgeschlagenen Maßnahmen aufbereitet werden. Damit kann der hier vorgeschlagene Detektor 100 grundsätzlich kompatibel zu bestehenden Röntgeninspektionsanlagen mit herkömmlichen Detektoreinheiten gemacht werden. D.h., im Ergebnis könnte bei einer im Übrigen hinreichend baugleichen Röntgeninspektionsanlage eine Ausführung des hier vorgeschlagenen neuen Detektors 100 mit integrierter Aufbereitung der Detektordaten mit geringeren Systemkosten mit einer gleichbleibenden Bildqualität eingesetzt werden. Alternativ könnte bei nahezu gleichbleibenden Systemkosten

die räumliche Auflösung einer vorhandenen Röntgeninspektionsanlage erhöht werden.

[0118] Mit den **Fig. 2b** und **Fig. 7-10** wird nun ein besonders bevorzugter Ansatz zur Aufbereitung der mit einem hier vorgeschlagenen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor 100 bereitgestellten Hi- und Lo-Detektordaten vorgestellt. Grundsätzlich sind für die Berechnung virtueller Detektordaten für die aufgrund des Versatzes fehlenden Detektorelemente verschiedenste Ansätze denkbar. Die wesentliche Erkenntnis der hier vorgeschlagenen Verbesserung liegt in der überlappend zueinander versetzt angeordneten Hi- und Lo-Detektorelementen des Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor 100, wie er beispielsweise in den **Fig. 2a-5** veranschaulicht ist.

[0119] Anhand der **Fig. 2b** wird zunächst die der Aufbereitung der bereitgestellten realen Hi- und Lo-Detektordaten zugrunde liegende Aufgabenstellung verdeutlicht.

[0120] Der in der **Fig. 2a** veranschaulichte Detektoraufbau mit zueinander überlappend versetzten Hi- und Lo-Detektorzeilen 110 und 120 führt zu dem Problem, dass nicht mehr jedem realen Lo-Detektordatum, beispielsweise dem Lo-Detektordatum Lo_4 , genau ein Hi-Detektordatum - und umgekehrt - zugeordnet werden kann. Daher muss das jeweilige zu einem bestimmten realen Detektordatum des einen Typs (Hi oder Lo) zugehörige Detektordatum des anderen Typs als virtuelles Detektordatum geeignet durch Berechnung oder in anderer Weise ermittelt ergänzt werden. In der **Fig. 2b** ist als Beispiel zu dem realen Detektordatum Lo_4 das virtuelle Detektordatum vHi_4 eingezeichnet.

[0121] Unter einem „realen Detektordatum“ wird hier ein tatsächlich mit einem bestimmten an dem Detektor 100 physikalisch vorhandenen Detektorelement erfasster Intensitätswert für gemessenen Röntgenstrahlen verstanden.

[0122] Unter einem „virtuellen Detektordatum“ wird hier ein für an einer bestimmten Stelle eines an dem Detektor 100 physikalisch fehlenden Detektorelements durch Berechnung oder anderweitig erzeugter virtueller Intensitätswert verstanden.

[0123] Nimmt der Wert eines bestimmten Lo-Detektorelements 111, beispielsweise das Detektordatum Lo_4 , den Wert x an, kann das zugehörige Hi-Detektordatum je nach durchstrahltem Material Werte von x bis $x+a$ annehmen. Für Plastik wäre der Unterschied a sehr klein, d.h. das gesuchte Hi-Detektordatum vHi_4 und das Lo-Detektordatum Lo_4 wären annähernd identisch. Für Stahl wäre der in a gefasste Unterschied erheblich. Genau dieser Umstand wird - wie oben erläutert - für die Materialerkennung mittels Dual-Energie-Radiographie verwendet. D.h., um

an einem Ort Stahl von Plastik oder Aluminium unterscheiden zu können, werden für diesen Ort die Information aus dem Hi- und dem Lo-Kanal des Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors 100 benötigt. Könnte von einem Hi-Detektordatum unmittelbar auf den Wert des zugehörigen Lo-Detektordatums geschlossen werden, wären keine zwei unterschiedlich spektral selektiven Messungen nötig.

[0124] Der Erfinder hat gefunden, dass an der Stelle eines realen Lo- oder Hi-Detektordatums der zugehörige fehlende Wert als virtuelles vLo - oder vHi -Detektordatum mit einer hinreichenden Genauigkeit ermittelt werden kann. Dabei ist es für die Praxis-tauglichkeit erstrebenswert, mit möglichst wenig Rechenleistung ein Ergebnis möglichst nahe an der Realität zu erzielen.

[0125] Ein einfacher Ansatz wäre es, z.B. das fehlende reale Hi-Detektordatum zu dem realen Lo-Detektordatum Lo_4 als Mittelwert der beiden benachbarten realen Hi-Detektordaten Hi_4 und Hi_5 zu berechnen. Dieser simple Ansatz erreicht jedoch nicht die benötigte Genauigkeit.

[0126] Der Erfinder hat weiter gefunden, dass der Verlauf der Hi-Detektordaten im Hi-Kanal und der Verlauf der Lo-Detektordaten im Lo-Kanal des Detektors 100 sich ähnlich sind. Mit anderen Worten heißt das, wenn das Signal im Hi-Kanal sinkt, sinkt es unter realen Bedingungen auch im Lo-Kanal und umgekehrt. Je nach durchstrahltem Material stärker oder weniger stark. D.h., der Verlauf der Detektordaten im Lo-Kanal, d.h. der Lo-Detektorzeile 110 kann beim Bestimmen des virtuellen Hi-Detektorwertes vHi_4 genutzt werden. Beispielsweise könnte, wie an anderer Stelle bereits genannt, ein Deep-Learning-Algorithmus verwendet werden, der trainiert wird, um die fehlenden virtuellen Hi- und Lo-Detektordaten zu berechnen.

[0127] Bevor hier ein besonders bevorzugter Ansatz im Detail erläutert wird, der sich als überraschend gut implementierbar gezeigt hat und einer geringen Rechenleistung bedarf, um praxistaugliche Ergebnisse zu liefern, werden anhand der **Fig. 7-10** gezeigt, wie sich vermittle der verschiedenen hier vorgeschlagenen möglichen Konfigurationen des Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors 100 (wie er in den **Fig. 2a-5** gezeigt ist) die angestrebte Verbesserung der räumlichen Auflösung bei den erzeugten Röntgenbildern erreichen lässt.

[0128] In den **Fig. 7-10** ist jeweils im linken Teil der Figur der zeitliche Ablauf eines Auslesevorgangs an einem stark vereinfachten Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor 100 (kurz Detektor 100) gezeigt, wie er beispielsweise in der **Fig. 2a** gezeigt ist und dessen Hi- und Lo-Detektorzeilen jeweils nur 4 zugehörige reale Detektorelemente aufweisen. Die realen

Hi-Detektorelemente sind als leere/weiße Kreise und die realen Lo-Detektorelemente als gefüllte/schwarze Kreise dargestellt.

[0129] Mit Bezug auf die als Beispiel in der **Fig. 6** gezeigte Röntgeninspektionsanlage 200 sei die Bereitstellung der realen Hi- und Lo-Detektordaten kurz beschrieben. Das Auslesen des Detektors 100 erfolgt sequenziell. Die von den einzelnen Hi- und Lo-Detektorelemente ausgehenden realen Detektordaten sind indiziert mit dem Typ Hi oder Lo, die erste Ziffer nach Hi oder Lo ist die Ortsvariable n in der Detektorzeile und die zweite Ziffer ist die sequentielle Nummerierung der erfolgten Auslesungen des Detektors. Beispielsweise ist Lo_{32} ein Lo-Detektordatum des 3ten ($n=3$) Lo-Detektorelements in der 2ten ($t=2$) Auslesung.

[0130] Wie beispielsweise in **Fig. 6** gezeigt, bewegt sich das Förderband 218 kontinuierlich und transportiert dabei das Inspektionsobjekt 216 kontinuierlich in Transportrichtung TD durch den Röntgenstrahlenfächer 215. Aufgrund der kontinuierlichen Bewegung des Inspektionsobjekts 216 relativ zum Detektor 100 sowie die zeitlich sequenzielle Auslesung der einzelnen Detektorelemente, ergibt sich die jeweilige links in den **Fig. 7-10** veranschaulichte Auslesesituation für die realen Hi- und Lo-Detektordaten.

[0131] In der oberen Hälfte der **Fig. 7-9** und dem oberen Drittel der **Fig. 10** ist jeweils die Auslesesituation für den konventionellen Detektor 1 veranschaulicht, der in den **Fig. 1a** und **Fig. 1b** gezeigt ist. Dabei wird das Hi-Detektordatum Hi_{11} des ersten Hi-Detektorelements ausgelesen, zeitlich danach das Lo-Detektordatum Lo_{11} , des ersten Lo-Detektorelements; dann wird das Hi-Detektordatum Hi_2 , des zweiten Hi-Detektorelements ausgelesen, zeitlich danach das Lo-Detektordatum Lo_2 , des zweiten Lo-Detektorelements; usw. Ist das Lo-Detektordatum Lo_{n1} des letzten Lo-Detektorelements ausgelesen, wird wieder beim ersten Hi-Detektorelement angefangen und dort das Hi-Detektordatum Hi_{12} ausgelesen.

[0132] Der rechte Teil der **Fig. 7-10** zeigt jeweils eine zweidimensionale Matrix $M\#$, deren Felder jeweils die erfassten realen Hi- und Lo-Detektordaten zugeordnet sind. Je ein Feld der Matrix $M\#$ mit den zugehörigen Detektordaten entspricht einem jeweiligen Bildpunkt eines aus den Detektordaten abzuleitenden Röntgenbilds. Daher kann man an der Matrix $M\#$ der jeweiligen **Fig. 6-9** unmittelbar die erreichte Wirkung der jeweiligen vorgeschlagenen Modifikation des zugehörigen Detektors 100 auf die räumliche Auflösung des aus den jeweiligen Detektordaten abgeleiteten Röntgenbilds erkennen. Die obere rechte Hälfte eines jeden Bildes mit der Vermittlung des konventionellen Detektors 1 der **Fig. 1a** und **Fig. 1b** bereitgestellten Matrix $M0$ dient als Referenz für die Matrizen $M6-M10$ der **Fig. 7-10**.

[0133] Die kontinuierliche Bewegung des Inspektionsobjekts beim Abtasten als auch das sequenzielle Auslesen der realen Detektorelemente führt effektiv bei den einzelnen Detektordaten zugeordneten Bildpunkten eines Röntgenbilds sowohl zu einem zeitlichen Versatz zwischen zwei benachbarten Auslesevorgängen als auch zu einem räumlichen Versatz. In den Matrizen $M0$ und $M6-M10$ der rechten Teile der **Fig. 7-10** ist dieser effektive Versatz nicht mehr dargestellt, wäre aber in einem zugehörigen Röntgenbild noch sichtbar, würde er nicht standardmäßig durch entsprechendes Verschieben der einzelnen Bildzeilen zueinander wieder kompensiert werden.

[0134] Nun wird mit Bezug auf den oberen Abschnitt der **Fig. 7** die Auslesesituation bei einem Detektor 100 gemäß der ersten Ausführung der **Fig. 2a** und **Fig. 2b** veranschaulicht. An dem Detektor 100 ist die Hi-Detektorzeile zur Lo-Detektorzeile in Zeilenrichtung und damit senkrecht zur Transportrichtung TD (**Fig. 6**) um einen Versatz Δx , der einer halben Länge L eines Detektorelements entspricht, überlappend versetzt. Die realen Hi- und Lo-Detektordaten werden in derselben Reihenfolge, wie beim Detektor 1 (obere Hälfte der **Fig. 7**), ausgelesen. Die Auslesesituation der **Fig. 7** zeigt, dass jetzt nicht mehr jedem realen Hi-Detektordatum ein Lo-Detektordatum und umgekehrt zugeordnet werden kann.

[0135] Anhand der Matrix $M6$ der **Fig. 7** ist im Vergleich zur Matrix $M0$ derselben Figur erkennbar, dass die Auflösung in Richtung der Detektorzeile, d.h. senkrecht zur Bandlaufrichtung oder Abtastrichtung verbessert, nämlich verdoppelt ist.

[0136] Die Konfiguration der Detektorzeile 100 und die Auslesesituation der **Fig. 7** ist für die Praxis interessant, wenn die räumliche Auflösung der aus den Detektordaten abgeleiteten Röntgenbilder in Zeilenrichtung des Detektors 100 (d.h. orthogonal zur Transportrichtung oder Abtastrichtung) erhöht werden soll. Die Auflösung in diese Dimension der Röntgenbilder kann nicht einfach durch eine höhere Auslesefrequenz erreicht werden. Die einzige Alternative wäre, mehr und kleinere Detektorelemente einzusetzen, wobei sich dann die Kosten pro Detektor erhöhen und das Rauschen in den Detektordaten ansteigt, mithin sich das Signal/Rauschen-Verhältnis verschlechtert.

[0137] Die **Fig. 8** zeigt die Auslesesituation für einen Detektor 100 gemäß der zweiten Ausführung der **Fig. 3**, d.h. am Detektor 100 wurden die Hi-Detektorzeile 120 und die Lo-Detektorzeile 110 orthogonal zur Zeilenrichtung, d.h. in Transportrichtung TD (vgl. **Fig. 5**), um einen Versatz Δy , der einer halben Breite W der Detektorelemente entspricht, zueinander überlappend versetzt. Werden die realen Hi- und Lo-Detektorelemente in der gleichen Reihenfolge,

wie in **Fig. 7**, sequenziell ausgelesen, entsteht die in der **Fig. 8** veranschaulichte Auslesesituation.

[0138] Anhand der Matrix M7 der **Fig. 8** ist im Vergleich zur Matrix M0 derselben Figur zu erkennen, dass ähnlich wie in der Auslesesituation der **Fig. 7**, auch bei der Auslesesituation der **Fig. 7** nicht mehr jedem Hi-Detektordatum genau ein Lo-Detektordatum eindeutig zugeordnet werden kann. Die Matrix M7 der **Fig. 8** zeigt aber, dass die räumliche Auflösung in einem aus den Detektordaten ableitbaren Röntgenbild in Abtastrichtung (oder in Transportrichtung TD, **Fig. 6**) verbessert, nämlich verdoppelt ist.

[0139] Die Auslesesituation der **Fig. 8** ist interessant, wenn entweder die räumliche Auflösung des abgeleiteten Röntgenbilds in Abtastrichtung respektive in Transportrichtung (TD, **Fig. 6**) oder bei gleichbleibender Auflösung die Transportgeschwindigkeit für die Inspektionsobjekte durch die Röntgeninspektionsanlage bei entsprechender Einstellung des Verhältnisses aus Auslesefrequenz und Bandgeschwindigkeit erhöht werden soll.

[0140] Für den überlappenden Versatz Δy zwischen den der Hi-Detektorzeile 120 und der Lo-Detektorzeile 110 in Abtastrichtung (orthogonal zur Zeilenrichtung des Detektors 100) hat sich als besonders geeignet erwiesen, den Versatz Δz als $(m b)/(2 f)$ zu definieren, wobei b die Bandlaufgeschwindigkeit in cm/s und f die Auslesefrequenz in 1/s und m eine ungerade Ganzzahl ($m=1, 3, 5, 7, \dots$) ist. Alternativ oder ergänzend kann die räumliche Auflösung in Abtastrichtung oder orthogonal zur Zeilenrichtung des Detektors erhöht werden, indem die Auslesefrequenz f erhöht wird.

[0141] Nun wird mit Bezug auf die **Fig. 9** eine weitere pfiffige Überlegung des Erfinders veranschaulicht. Der Erfinder hat erkannt, dass eine ähnliche Auswirkung auf die erzielte räumliche Auflösung (oder alternativ die einzustellende Transportgeschwindigkeit respektive Abtastgeschwindigkeit), wie sie quasi hardwaremäßig mit der zweiten Ausführung des Detektors 100 auch bei einer Röntgeninspektionsanlage mit einem konventionellen Detektor 1, wie er in den **Fig. 1a** und **Fig. 1b** gezeigt ist, vermittelt eines modifizierten Auslesemusters (d.h. Auslesereihenfolge) für die Hi- und Lo-Detektordaten an dem konventionellen Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor 1 der **Fig. 1a** und **Fig. 1b** erzielt werden kann.

[0142] Die in der **Fig. 9** veranschaulichte Auslesesituation entsteht bei der Verwendung einer Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektorzeile mit pro Bildpunkt jeweils einem hochenergetischen Hi-Detektorelement und einem niedrigerenergetischen Lo-Detektorelement, die in Richtung der zu erfassenden Rönt-

genstrahlen im Wesentlichen deckungsgleich übereinander oder hintereinander angeordnet sind.

[0143] Wie im linken Teil der **Fig. 9** gezeigt, ist die Auslesereihenfolge am Detektor 100 so modifiziert, dass zunächst alle Detektorelemente eines Typs (Hi oder Lo) entlang der Ortsvariablen n der Detektorzeile und anschließend alle Detektorelemente des anderen Typs entlang der Ortsvariablen n der Detektorzeile ausgelesen werden. D.h., beispielsweise, wie in der **Fig. 9** dargestellt, zunächst werden alle Hi-Detektordaten $Hi_1, Hi_2, Hi_3, \dots, Hi_N$, und dann alle Lo-Detektordaten $Lo_1, Lo_2, Lo_3, \dots, Lo_N$ ausgelesen (oder umgekehrt).

[0144] Der Vergleich der Matrizen M7 und M8 zeigt, dass mit der modifizierten Auslesereihenfolge der **Fig. 9** dasselbe Ergebnis erreicht werden kann, wie es mit der Verschiebung der ersten Detektorzeile 110 und der zweiten Detektorzeile 120 zueinander beim Detektor 100 gemäß der zweiten Ausführung erreicht wird. Damit ist das Ausleseverfahren der **Fig. 9** eine äquivalente Software-Lösung zur Hardware-Lösung der **Fig. 3** und **Fig. 8**, mit zueinander überlappend versetzten Hi- und Lo-Detektorelementen. Mit anderen Worten heißt dies, dass, wenn man die Hi- und die Lo-Detektorzeilen 110, 120 am Detektor nicht zueinander in Abtastrichtung versetzt, aber die Auslesereihenfolge der Hi- und Lo-Detektorelemente geeignet ändert, man dieselbe Wirkung auf die räumliche Auflösung erreicht wie mit der Detektorzeile 100 der **Fig. 3** und **Fig. 8**. Im Ergebnis wird auch in diesem Fall die räumliche Auflösung in Transportrichtung respektive Abtastrichtung verbessert.

[0145] Die Auslesesituation der **Fig. 9** ist elegant, da im Wesentlichen keine Modifikationen an einem konventionellen Detektor 1 (vgl. **Fig. 1a** und **Fig. 1b**) erforderlich sind. Um die modifizierte zeitliche Auslesereihenfolge zu implementieren, könnte ein Neudesign der Leiterplatte des Detektors 1 oder ein Neudesign des Auslesechips erforderlich sein. Wenn ein mit dem Detektor 1 verschalteter Auslesechip in der Lage ist, intern die zeitliche Abfolge der Auslesungen der einzelnen realen Hi- und Lo-Detektorelemente beliebig zu ändern, ist die Implementierung der Auslesesituation der **Fig. 9** ohne größere Maßnahmen möglich.

[0146] Ein weiterer Vorteil der zweiten Ausführung soll nun anhand der **Fig. 10** verdeutlicht werden. Zu einem bestimmten Wertepaar (b_1, f_1) lässt sich ein Versatz $\Delta z = (m b) / (2 f)$ berechnen, der zu einer Situation führt, wie sie in der Mitte der **Fig. 10** gezeigt ist und bei der fehlende Werte berechnet werden müssen.

[0147] Da Röntgenanlagen oft in ein komplexes System aus Fördereinrichtungen eingebunden sind, kann es mitunter wünschenswert sein, die Bandge-

schwindigkeit diesen Rahmenbedingungen anzupassen.

[0148] Der Erfinder hat erkannt, dass für die Realisierung mehrere Fördergeschwindigkeiten nicht verschiedene Anlagentypen entwickelt werden müssen, da die zweite Ausführung der vorliegenden Offenbarung eine hohe Flexibilität bietet. Nun wird mit Bezug auf die **Fig. 9** eine weitere pfiffige Überlegung des Erfinders veranschaulicht, die, wie im Folgenden erläutert, genutzt werden kann.

[0149] Zu demselben Versatz Δz gehören andere Wertepaare (b_2, f_2) bei denen sich eine Situation einstellt, wie sie unten in **Fig. 10** gezeigt ist. Es gilt dabei entweder $b_2 = b_1 / 2$ oder $f_2 = 2 f_1$, was der halben Bandlaufgeschwindigkeit oder der doppelten Auslesefrequenz entspricht. Hier entspricht der Vorschub des Gepäckstücks in Förderrichtung genau dem Versatz Δz und zu jedem gemessenen Hi-Detektordatum existiert wieder ein real gemessenes Lo-Detektordatum und umgekehrt. Eine Röntgenanlage kann also mit einem Versatz Δz in zwei unterschiedlichen Modi betrieben werden.

[0150] Nun wird mit Bezug auf die **Fig. 11-14** ein Ausführungsbeispiel eines Ansatzes für die Aufbereitung der erfassten realen Hi- und Lo-Detektordaten mit einem hier vorgeschlagenem Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor 100 erläutert.

[0151] Für einen Kompromiss zwischen einem guten und einem effizienten Algorithmus zur Aufbereitung der realen Hi- und Lo-Detektordaten hat der Erfinder gefunden, dass sich ein Algorithmus aus dem Bereich der digitalen optischen Fotografie eignet. Bei der digitalen Fotografie werden Bildsensoren mit vorgeschaltetem Color Filter Array (CFA) verwendet, sodass jeder einzelne Pixel des Bildsensors nur eine der drei Grundfarben (rot, blau oder grün) erfassen kann. Das meist verwendete Muster eines derartigen CFA ist das hier weiter oben bereits genannte Bayer-Pattern.

[0152] Der Erfinder hat erkannt, dass der Aufbau der Matrizen M6-M10, die mit den hier vorgeschlagenen Detektoren 100 (**Fig. 2a-6**, und **Fig. 7-8**) oder dem modifizierten Ausleseverfahren (**Fig. 9**) bereitgestellt werden, bezüglich der darin enthaltenen Hi- und Lo-Detektordaten möglicherweise ähnlich aufbereitet werden kann, wie die Aufbereitung der mit einem Bildsensor mit Bayer-CFA erfassten Bilddaten.

[0153] Bei den von dem Bildsensor mit Bayer-CFA erzeugten Bilddaten müssen für jeden Pixel, die jeweils zwei anderen Farbinformationen durch eine geeignete Berechnung ergänzt werden. Bei den Hi- und Lo-Detektordaten der **Fig. 7-9** muss jeweils zu dem realen Detektordatum eines Typs (Hi oder Lo)

ein virtuelles Detektordatum des anderen Typs berechnet werden.

[0154] Der Erfinder schlägt vor, ein bei digitalen Bildsensoren eingesetztes CFA-Demosaicing für eine Aufbereitung der realen Detektordaten der hier vorgeschlagenen Detektoren 100 zu modifizieren. Da es für das CFA-Demosaicing zahlreiche bekannte Implementierungen gibt, sollte es hier ausreichend sein, das Grundprinzip der Adaption zu erläutern. Die vorliegende Offenbarung ist nämlich keines Falls auf eine bestimmte einzige oder besondere Umsetzung beschränkt.

[0155] Der Kerngedanke des CFA-Demosaicing besteht darin, für jeden Pixel eines Bayer-Musters die fehlenden beiden Farben aus den bekannten tatsächlich erfassten Farben in der näheren Umgebung zu berechnen.

[0156] Entsprechend bedeutet dies für die Matrix M6*, dass z.B. an der Stelle des realen Lo-Detektordatums 44 das fehlende virtuelle Hi-Detektordatum 44 aus den tatsächlich erfassten Hi- und Lo-Detektordaten in der näheren Umgebung berechnet werden kann.

[0157] **Fig. 11** zeigt zunächst einen Vergleich des Bayer-Musters BAYER (**Fig. 11**, links) mit der Hi-/Lo-Detektordaten-Matrix M6* (**Fig. 11**, rechts), wie sie sich beispielsweise bei der Auslesesituation der **Fig. 7** mit dem Detektor der **Fig. 2a** und **Fig. 2b** ergibt. Bei dem Bayer-Muster BAYER (**Fig. 11**, links) stehen die weißen Kästchen für blaue Pixel, die schraffierten Kästchen für grüne Pixel und die kreuzschraffierten Kästchen für rote Pixel. In der Matrix M6* (**Fig. 11**, rechts) sind die Lo-Detektordaten durch schraffierte Kästchen und die Hi-Detektordaten durch kreuzschraffierte Kästchen dargestellt.

[0158] In der **Fig. 12** wurde das Bayer-Muster BAYER der **Fig. 11** auf zwei Farben reduziert. D.h., das modifizierte Bayer-Muster BAYER* ist nun ein Schachbrett mit den verbleibenden zwei Farben Rot und Grün.

[0159] In der **Fig. 13** wurde im Vergleich zur **Fig. 12** lediglich die Matrix BAYER* um 45° im Uhrzeigersinn gedreht, um eine geeignete Zuordnung der Daten der Matrix M6* zu den Daten des modifizierten Bayer-Musters BAYER** zu verdeutlichen. **Fig. 13** veranschaulicht weiterhin, dass das modifizierte Bayer-Muster BAYER** und die Matrix M6* eine ähnliche, alternierende Struktur haben. Beispielsweise können die Pixel in den markierten Bereichen im modifizierten Bayer-Muster BAYER** den Detektordaten in den markierten Bereichen der Matrix M6* zugeordnet werden.

[0160] Basierend auf den vorstehenden Überlegungen kann der CFA-Demosaicing-Algorithmus für das Bayer-Muster auf die Detektordaten der Matrix $M6^*$ angewendet werden.

[0161] Der Erfinder hat festgestellt, dass die Ergebnisse etwas schlechter ausfallen, da die Detektordaten in horizontaler und vertikaler Richtung weiter voneinander entfernt sind als die Pixel im Bayer-Muster. Dies kann aber dadurch ausgeglichen werden, dass bei der Matrix $M6^*$ noch die vertikale Detektordatenreihe betrachtet werden kann, die es beim Bayer-Muster BAYER** nicht gibt.

[0162] Der Algorithmus zur Berechnung der fehlenden Werte orientiert sich an der Veröffentlichung „Color filter array demosaicking using high-order interpolation techniques with a weighted median filter for sharp color edge preservation“ von Li und Randhawa (IEEE Transactions on image processing, Vol. 18, No. 9, September 2009), deren Inhalt hiermit durch Bezugnahme aufgenommen wird.

[0163] Dabei wird zunächst für eine bestimmte Anzahl von Raumrichtungen je ein interpolierter Wert für den fehlenden Pixel, basierend auf einer Taylor-Reihenentwicklung der gemessenen Daten in der näheren Umgebung bestimmt. Dann wird für jede dieser Raumrichtungen ein Gradient berechnet, der ein Maß dafür ist, wie stark sich das Signal in der jeweiligen Richtung ändert. Mit Hilfe dieser Gradienten wird in einem letzten Schritt der gewichtete Mittelwert aus allen interpolierten Werten gebildet.

[0164] Die Matrizen der von den hier vorgeschlagenen Detektoren 100 bereitgestellten Detektordaten liefern mit dem angepassten Demosaicking-Verfahren überraschend gute Ergebnisse bei einem nicht erwarteten geringem Rechenaufwand.

[0165] Abschließend veranschaulichen die folgenden **Fig. 14-17** verschiedene Aspekte der hier vorgeschlagenen Verfahren zur Aufbereitung der realen Lo- und Hi-Detektordaten, die mittels eines der hier beschriebenen Detektoren 100 von einem Inspektionsobjekt erfasst worden sind.

[0166] **Fig. 14** illustriert die Grundstruktur eines Verfahrens 1300 zur Aufbereitung der von beispielsweise der Röntgeninspektionsanlage 200 der **Fig. 6** bereitgestellter Lo-Detektordaten $Lo_1, Lo_2, Lo_3, \dots, Lo_N$ und Hi-Detektordaten $Hi_1, Hi_2, Hi_3, \dots, Hi_N$. Dabei weist das Verfahren folgende grundlegende Schritte auf: einen Schritt S1 zum Berechnen eines jeweiligen virtuellen Lo-Detektordatums vLo an der Position eines realen Hi-Detektorelements 122 (vgl. z.B. **Fig. 2b**); und einen Schritt S2 zum Berechnen eines jeweiligen virtuellen Hi-Detektordatums vHi an der Position eines realen Lo-Detektorelements 111 (vgl. z.B. **Fig. 2b**).

[0167] Bei dem Verfahren 1300 weist der Schritt S1 zum Berechnen eines virtuellen Lo-Detektordatums vLo an der Position eines realen Hi-Detektorelements 122 auf: Einen Schritt S11 zum Berechnen des virtuellen Lo-Detektordatums basierend auf einer bestimmten ersten Anzahl zu dem realen Hi-Detektorelement 122 benachbarten realen Lo-Detektordaten und einer bestimmte zweiten Anzahl zu dem realen Hi-Detektorelement 122 benachbarten realen Hi-Detektordaten.

[0168] Bei dem Verfahren 1300 weist der Schritt S2 zum Berechnen eines virtuellen Hi-Detektordatums vHi an der Position eines realen Lo-Detektorelements 111 auf: Einen Schritt S21 zum Berechnen eines virtuellen Hi-Detektordatums basierend auf der bestimmten ersten Anzahl zu dem realen Lo-Detektorelement 111 benachbarten realen Hi-Detektordaten und der bestimmten zweiten Anzahl zu dem realen Lo-Detektorelement 111 benachbarten realen Lo-Detektordaten.

[0169] Der Schritt S11 weist einen Schritt S12 zum Berechnen der virtuellen Lo-Detektordaten als Mittelwert aus benachbarten Hi- und Lo-Detektordaten auf.

[0170] Der Schritt S21 weist einen Schritt S22 zum Berechnen der virtuellen Hi-Detektordaten als Mittelwert aus benachbarten Hi- und Lo-Detektordaten auf.

[0171] **Fig. 15** veranschaulicht ein modifiziertes Verfahren 1400, wobei der Schritt S1 einen Schritt S14 zum Berechnen der virtuellen Lo-Detektordaten unter Berücksichtigung des Verlaufs der Werte der Hi-Detektordaten und der Schritt S2 einen Schritt S24 zum Berechnen der virtuellen Hi-Detektordaten unter Berücksichtigung des Verlaufs der Werte der Lo-Detektordaten aufweist.

[0172] Bei den in den **Fig. 14** und **Fig. 15** veranschaulichten Verfahren 1300, 1400 können die genannten Berechnungsschritte für die virtuellen Hi- oder Lo-Detektordaten basierend auf den bereitgestellten Lo- und Hi-Detektordaten unter Verwendung eines Deep-Learning-Algorithmus (DLA) umgesetzt werden

[0173] **Fig. 16** veranschaulicht ein Verfahren 1500 als besondere Ausführung des Verfahrens 1300 der **Fig. 14**. Als Voraussetzung für das Verfahren 1500 werden, beispielsweise in der Inspektionsanlage 200 der **Fig. 6**, die mit dem Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor 100 erfassten und bereit gestellten Detektordaten über eine Ortsvariable n , die in Zeilenrichtung des Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor 100 beginnend an einem Ende verläuft, derart indiziert, dass die Lo-Detektorelemente reale Lo-Detektordaten $Lo_1, Lo_2, \dots, Lo_n, \dots, Lo_N$ des Inspektionsob-

jekts erfassen und die Hi-Detektorelemente entsprechende reale Hi-Detektordaten $Hi_1, Hi_2, \dots, Hi_n, \dots, Hi_N$ des Inspektionsobjekts erfassen, wobei $1 \leq n \leq N$ gilt und N jeweils die Anzahl der Hi- und Lo-Detektorelemente in Zeilenrichtung des Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor (100) ist. Das Verfahren 1500 der **Fig. 15** weist folgende Schritte auf:

Einen Schritt S31 zum Auslesen der realen Hi- und Lo-Detektorelemente 111, 122 (vgl. **Fig. 2b**) des Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors 100 paarweise in der Reihenfolge $Hi_1, Lo_1, Hi_2, Lo_2, \dots, Hi_n, Lo_n, \dots, Hi_N, Lo_N$ oder umgekehrt in der Reihenfolge $Lo_1, Hi_1, Lo_2, Hi_2, \dots, Lo_n, Hi_n, \dots, Lo_N, Hi_N$.

[0174] Einen Schritt S32 zum Bilden mittels mehrerer derart ausgelesener Reihenfolgen $Hi_1, Lo_1, Hi_2, Lo_2, \dots, Hi_n, Lo_n, \dots, Hi_N, Lo_N$ oder $Lo_1, Hi_1, Lo_2, Hi_2, \dots, Lo_n, Hi_n, \dots, Lo_N, Hi_N$ einer zweidimensionalen Hi/Lo-Detektordaten-Matrix $M5-M10; M6^*$ (vgl. **Fig. 7-10**).

[0175] Einen Schritt S33 zum Berechnen der virtuellen Hi- und/oder Lo-Detektordaten unter Verwendung eines angepassten Demosaicking-Algorithmus. Die Anpassung und Anwendung des Demosaicking-Algorithmus weisen folgende Schritte auf:

Einen Schritt S331 zum Reduzieren eines dem Demosaicking-Algorithmus zugrunde liegenden drei Farben aufweisenden Bayer-Musters BAYER auf ein zweifarbiges Schachbrett-Muster BAYER*.

Einen Schritt S332 zum rechnerischen Drehen des Schachbrett-Muster BAYER* um 45° im Uhrzeigersinn.

[0176] Einen Schritt S333 zum Zuordnen der einen Farbe des gedrehten Schachbrett-Musters BAYER** zu den Hi-Detektordaten und der anderen Farbe des Schachbretts zu den Lo-Detektordaten.

[0177] Einen Schritt S334 zum Anwenden des Demosaicking-Algorithmus auf das gedrehte Schachbrett-Muster BAYER** auf die erfassten realen Hi- und Lo-Detektordaten der zweidimensionalen Hi/Lo-Detektordaten-Matrix $M6-M10; M6^*$.

[0178] Im Ergebnis werden die benötigten virtuellen (d.h. fehlenden) Detektordaten mittels des angepassten Demosaicking-Algorithmus in ähnlicher Weise berechnet, wie die bei einem Fotosensorchip mit BAYER-Farbfilter, die zu einem bestimmten Pixel fehlenden anderen beiden Grundfarben berechnet werden können.

[0179] **Fig. 17** veranschaulicht ein Ausleseverfahren 1600 für das Auslesen von Hi- und Lo-Detektorelemente eines Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors 1, wie er beispielsweise in der **Fig. 1b** gezeigt

ist und beispielsweise in einer Röntgeninspektionsanlage 200 der **Fig. 6** verbaut sein kann. Gemäß **Fig. 1b** weist der Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors 1 wenigstens auf: eine Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektorzeile 2 mit pro Bildpunkt jeweils einem hochenergetischen Hi-Detektorelement 5 und einem niedrigerenergetischen Lo-Detektorelement 4, die in Richtung der zu erfassenden Röntgenstrahlen RX im Wesentlichen deckungsgleich übereinander angeordnet sind. Die auszulesenden Hi- und Lo-Detektordaten der Detektorzeile 2 sind definiert als $Hi(n)$ oder $Lo(n)$ für ein jeweiliges Hi- oder Lo-Detektordatum mit der Ortsvariablen $n=1, 2, 3, \dots, N$ für die jeweilige Position des zugehörigen Detektorelements in der Detektorzeile 2, wobei $1 \leq n \leq N$ gilt und N die jeweilige Anzahl der Hi- und Lo-Detektorelemente in der Zeilenrichtung ist.

[0180] Das Ausleseverfahren 1600 der **Fig. 17** weist im Wesentlichen einen Schritt S4 zum Auslesen der Hi- und Lo-Detektorelemente auf, in dem zunächst alle Detektorelemente eines Typs, d.h. Lo oder Hi, entlang der Ortsvariablen n ausgelesen werden und anschließend alle anderen Detektorelemente des anderen Typs entlang der Ortsvariablen n ausgelesen werden.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- EP 1010021 B1 [0004]
- US 3971065 A [0069]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Wang CHAN et al, „Wire transfer function analysis for castellated dual-energy x-ray detectors“, APPLIED OPTICS, Band 43, Nummer 35, 10. Dezember 2004, Seiten 6413-6420 [0004]
- J. S. J. Li und S. Randhawa, IEEE Transactions on image processing, Vol. 18, No. 9, September 2009 [0068]
- Li und Randhawa (IEEE Transactions on image processing, Vol. 18, No. 9, September 2009) [0162]

Patentansprüche

1. Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor (100) mit einer ersten Detektorzeile (110) mit ersten Detektorelementen (111) und einer dazu parallel angeordneten zweiten Detektorzeile (120) mit zweiten Detektorelementen (122), wobei die Detektorzeilen (110, 120) zueinander in Zeilenrichtung parallel angeordnet und in Richtung der zu erfassenden Röntgenstrahlen (RX) so hintereinander angeordnet sind, dass die Projektion der ersten und der zweiten Detektorzeilen (110, 120) in Richtung eines der zu erfassenden Röntgenstrahlen (RX), der durch den Flächenschwerpunkt eines Referenzdetektorelements der ersten oder der zweiten Detektorzeile (110, 120) verläuft, sich überlappend zueinander um einen effektiven Versatz (Δx ; Δy) versetzt sind.

2. Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor (100) gemäß Anspruch 1, wobei die Detektorzeilen (110, 120) konfiguriert sind, auf ein Spektrum zu erfassender Röntgenstrahlen (RX) unterschiedlich spektral selektiv anzusprechen, indem die erste Detektorzeile (110) zugehörige erste Detektorelemente (111) in Form von L_0 -Detektorelementen zum primären Erfassen niederenergetischer Röntgenstrahlen aufweist und die zweite Detektorzeile (120) zugehörige zweite Detektorelemente (122) in Form von H_i -Detektorelementen zum primären Erfassen hochenergetischer Röntgenstrahlen aufweist.

3. Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor (100) gemäß Anspruch 1 oder 2, wobei wenigstens eines von:

die erste Detektorzeile (110) und die zweite Detektorzeile (120) in der Zeilenrichtung um einen ersten Versatz (Δx) versetzt sind;

die erste Detektorzeile (110) und die zweite Detektorzeile (120) orthogonal zu der Zeilenrichtung um einen zweiten Versatz (Δz) zueinander versetzt sind; und

die erste Detektorzeile mit den ersten Detektorelementen (4) und die zweite Detektorzeile mit den zweiten Detektorelementen (5) zueinander mit einem vorbestimmten Abstand (D) beabstandet und gegen über einem Referenzröntgenstrahl (RX_{ref}) in Zeilenrichtung und/oder orthogonal zur Zeilenrichtung mit einem Neigungswinkel (α) geneigt sind.

4. Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor (100) gemäß Anspruch 3, wobei

der erste Versatz (Δx) in Zeilenrichtung der halben Breite der ersten und zweiten Detektorelemente (111, 122) in Zeilenrichtung entspricht; und/oder der zweite Versatz (Δz) orthogonal zur Zeilenrichtung basierend auf einem Verhältnis aus einer Auslesefrequenz f in 1/s für die Detektorelemente (111, 122) und auf einer Transportgeschwindigkeit b in cm/s eines Inspektionsobjekts (216) gegenüber

dem Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor (100) definiert ist als

$$\Delta z = \frac{(m \cdot b)}{(2 \cdot f)},$$

wobei m eine ungerade ganze Zahl ($m=1, 3, 5, 7, \dots$) ist.

5. Röntgeninspektionsanlage (200) mit einem Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor (100) gemäß einem der Ansprüche 1-4, wobei die Röntgeninspektionsanlage (200) für einen Transport eines Inspektionsobjekts (216) in einer Transportrichtung (TD) durch die Inspektionsanlage (200) eingerichtet ist;

die Zeilenrichtung des Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors (100) orthogonal zur Transportrichtung (TD) angeordnet ist; und

eingerichtet ist, erfasste erste Detektordaten ($Lo_1, Lo_2, Lo_3, \dots, Lo_N$) und zweite Detektordaten ($Hi_1, Hi_2, Hi_3, \dots, Hi_N$) des Inspektionsobjekts (216) bereit zu stellen.

6. Verfahren (1300; 1400; 1500; 1600) zur Aufbereitung der von der Röntgeninspektionsanlage (200) gemäß Anspruch 5 bereitgestellter ersten Detektordaten ($Lo_1, Lo_2, Lo_3, \dots, Lo_N$) und zweiten Detektordaten ($Hi_1, Hi_2, Hi_3, \dots, Hi_N$), wobei das Verfahren aufweist:

(S1) Berechnen eines jeweiligen virtuellen ersten Detektordatums (vLo) an der Position eines realen zweiten Detektorelements (122); und/oder

(S2) Berechnen eines jeweiligen virtuellen zweiten Detektordatums (vHi) an der Position eines realen ersten Detektorelements (111).

7. Verfahren (1300; 1400) gemäß Anspruch 6, wobei

das (S1) Berechnen eines virtuellen ersten Detektordatums (vLo) an der Position eines realen zweiten Detektorelements (122) aufweist: (S11) Berechnen des virtuellen ersten Detektordatums basierend auf einer bestimmten ersten Anzahl zu dem realen zweiten Detektorelement (122) benachbarten realen ersten Detektordaten und einer bestimmten zweiten Anzahl zu dem realen zweiten Detektorelement (122) benachbarten realen zweiten Detektordaten; und

das (S2) Berechnen eines virtuellen High-Detektordatums (vHi) an der Position eines realen Low-Detektorelements (111) aufweist: (S21) Berechnen des virtuellen zweiten Detektordatums basierend auf der bestimmten ersten Anzahl zu dem realen ersten Detektorelement (111) benachbarten realen zweiten Detektordaten und der bestimmten zweiten Anzahl zu dem realen ersten Detektorelement (111) benachbarten realen ersten Detektordaten.

8. Verfahren (1300; 1400) gemäß Anspruch 6 oder 7, wobei das Verfahren wenigstens einen der folgenden Schritte aufweist:

(S12) Berechnen der virtuellen ersten Detektordaten als Mittelwert aus benachbarten ersten und zweiten Detektordaten und/oder Berechnen (S22) der virtuellen zweiten Detektordaten als Mittelwert aus benachbarten zweiten und ersten Detektordaten;

(S14) Berechnen der virtuellen ersten Detektordaten unter Berücksichtigung des Verlaufs der Werte der zweiten Detektordaten und/oder (S24) Berechnen der virtuellen zweiten Detektordaten unter Berücksichtigung des Verlaufs der Werte der ersten Detektordaten; und

(S5) Berechnen der virtuellen zweiten oder ersten Detektordaten basierend auf den bereitgestellten ersten und zweiten Detektordaten unter Verwendung eines Deep-Learning-Algorithmus.

9. Verfahren (1500) gemäß einem der Ansprüche 6-8,

wobei die mit dem Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor (100) erfassten und bereit gestellten Detektordaten über eine Ortsvariable n , die in Zeilenrichtung des Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor (100) beginnend an einem Ende verläuft, derart indiziert werden, dass die ersten Detektorelemente reale erste Detektordaten $Lo_1, Lo_2, \dots, Lo_n, \dots, Lo_N$ des Inspektionsobjekts erfassen und die zweiten Detektorelemente entsprechende reale zweite Detektordaten $Hi_1, Hi_2, \dots, Hi_n, \dots, Hi_N$ des Inspektionsobjekts erfassen, wobei $1 \leq n \leq N$ gilt und N jeweils die Anzahl der zweiten und ersten Detektorelemente in Zeilenrichtung des Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektor (100) ist; und das Verfahren weiter aufweist:

(S31) Auslesen der realen zweiten und ersten Detektorelemente (111, 122) des Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors (100) paarweise in der Reihenfolge $Hi_1, Lo_1, Hi_2, Lo_2, \dots, Hi_n, Lo_n, \dots, Hi_N, Lo_N$ oder umgekehrt in der Reihenfolge $Lo_1, Hi_1, Lo_2, Hi_2, \dots, Lo_n, Hi_n, \dots, Lo_N, Hi_N$;

(S32) Bilden mittels mehrere mit dem Ausleseschritt ausgelesener Reihenfolgen einer zweidimensionalen Detektordaten-Matrix ($M5-M10; M6^*$); und

(S33) Berechnen der virtuellen zweiten und/oder ersten Detektordaten unter Verwendung eines angepassten Demosaicking-Algorithmus mit:

- (S331) Reduzieren eines dem Demosaicking-Algorithmus zugrunde liegenden drei Farben aufweisenden Bayer-Musters (BAYER) auf ein zweifarbiges Schachbrett-Muster (BAYER*);

- (S332) Drehen des Schachbrett-Musters (BAYER*) um 45° im Uhrzeigersinn;

- (S333) Zuordnen der einen Farbe des gedrehten Schachbrett-Musters (BAYER**) den zweiten Detektordaten und der anderen Farbe des Schachbretts den ersten Detektordaten; und

- (S334) Anwenden des auf das gedrehte Schachbrett-Muster (BAYER**) angepassten Demosaicking-

g-Algorithmus auf die erfassten realen zweiten und ersten Detektordaten der zweidimensionalen Detektordaten-Matrix ($M6-M10; M6^*$).

10. Ausleseverfahren (1600) für erste und zweite Detektorelemente eines Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors (1), insbesondere in einer Röntgeninspektionsanlage (200) des Anspruchs 5, wobei der Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektors (1) aufweist wenigstens eine Dual-Energie-Röntgenstrahlendetektorzeile (2) mit pro Bildpunkt jeweils einem hochenergetischen zweiten Detektorelement (5) und einem niedrigerenergetischen ersten Detektorelement (4), die in Richtung der zu erfassenden Röntgenstrahlen (RX) im Wesentlichen deckungsgleich übereinander angeordnet sind, wobei die auszulesenden zweiten und ersten Detektordaten der Detektorzeile (2) definiert sind als $Hi(n)$ oder $Lo(n)$ für ein jeweiliges zweites oder erstes Detektordatum mit der Ortsvariablen $n=1, 2, 3, \dots, N$ für die jeweilige Position des zugehörigen Detektorelements in der Detektorzeile (2), wobei $1 \leq n \leq N$ gilt und N die jeweilige Anzahl der zweiten und ersten Detektorelemente in der Zeilenrichtung ist, wobei das Ausleseverfahren aufweist:

(S7) Auslesen der zweiten und ersten Detektorelemente derart, dass zunächst alle Detektorelemente eines Typs entlang der Ortsvariablen n und anschließend alle anderen Detektorelemente des anderen Typs entlang der Ortsvariablen n ausgelesen werden.

11. Verarbeitungsvorrichtung (300) zur Aufbereitung der von der Röntgeninspektionsanlage (200) gemäß Anspruch 5 bereitgestellten ersten Detektordaten ($Lo_1, Lo_2, Lo_3, \dots, Lo_N$) und zweiten Detektordaten ($Hi_1, Hi_2, Hi_3, \dots, Hi_N$), wobei die Verarbeitungsvorrichtung (300) zur Durchführung eines Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 6-10 eingerichtet ist.

12. System mit einer Röntgeninspektionsanlage (200) gemäß Anspruch 5 und einer Verarbeitungsvorrichtung (300) gemäß Anspruch 11, wobei die Röntgeninspektionsanlage (200) zur Bereitstellung der zweiten und ersten Detektordaten basierend auf der Abtastung eines Inspektionsobjekts (216) an die Verarbeitungsvorrichtung (300) eingerichtet ist und dazu mit der Verarbeitungsvorrichtung (300) für eine Datenkommunikation verbunden ist.

13. Computerprogrammprodukt mit einem Computerprogramm, das Softwaremittel zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 6-10 aufweist, wenn das Computerprogramm auf einer Verarbeitungsvorrichtung (300) gemäß Anspruch 11 ausgeführt wird.

14. Datenträger mit einem Computerprogrammprodukt gemäß Anspruch 13.

15. Datenstrom mit elektronisch lesbaren Steuersignalen, die mit einem programmierbaren Computer derart interagieren können, dass wenn der Computer die elektronisch lesbaren Steuersignale ausführt, der Computer ein Verfahren nach einem der Ansprüche 6-10 durchführt.

Es folgen 13 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1a

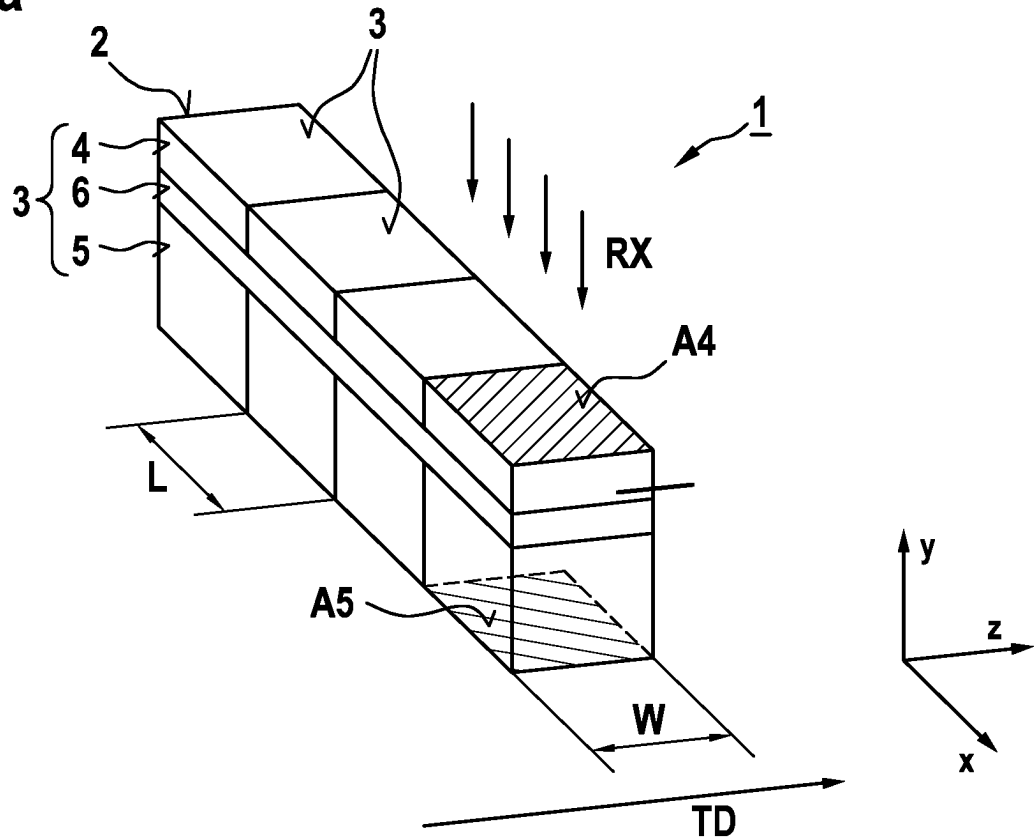


Fig. 1b

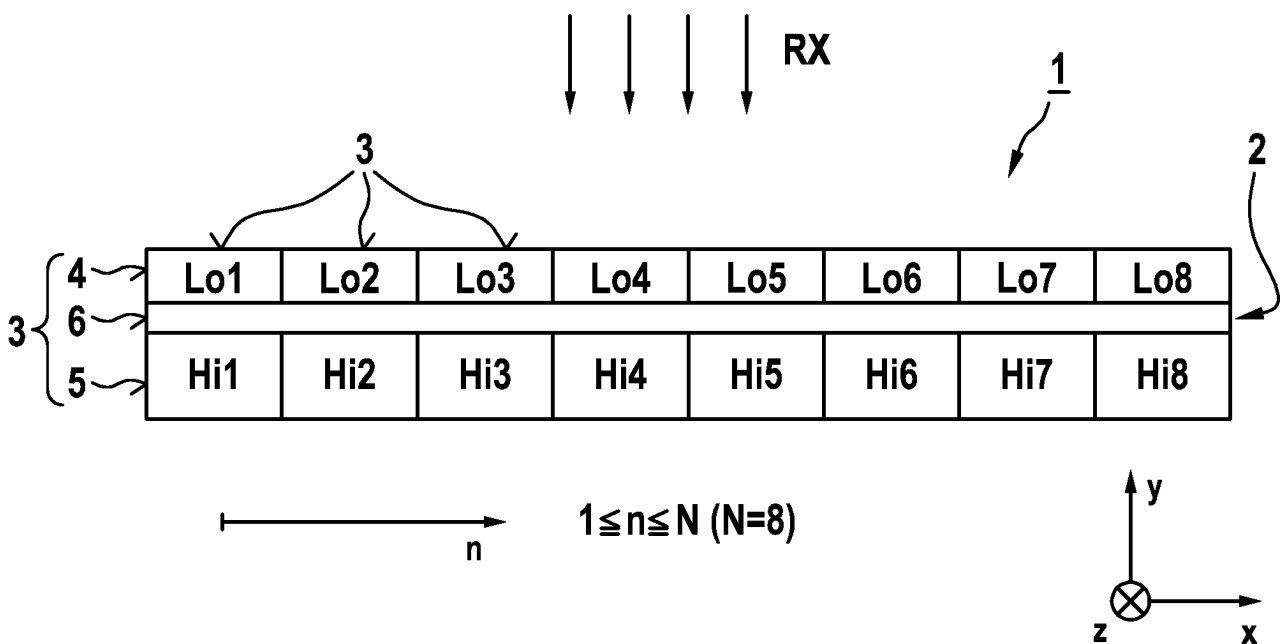


Fig. 2c

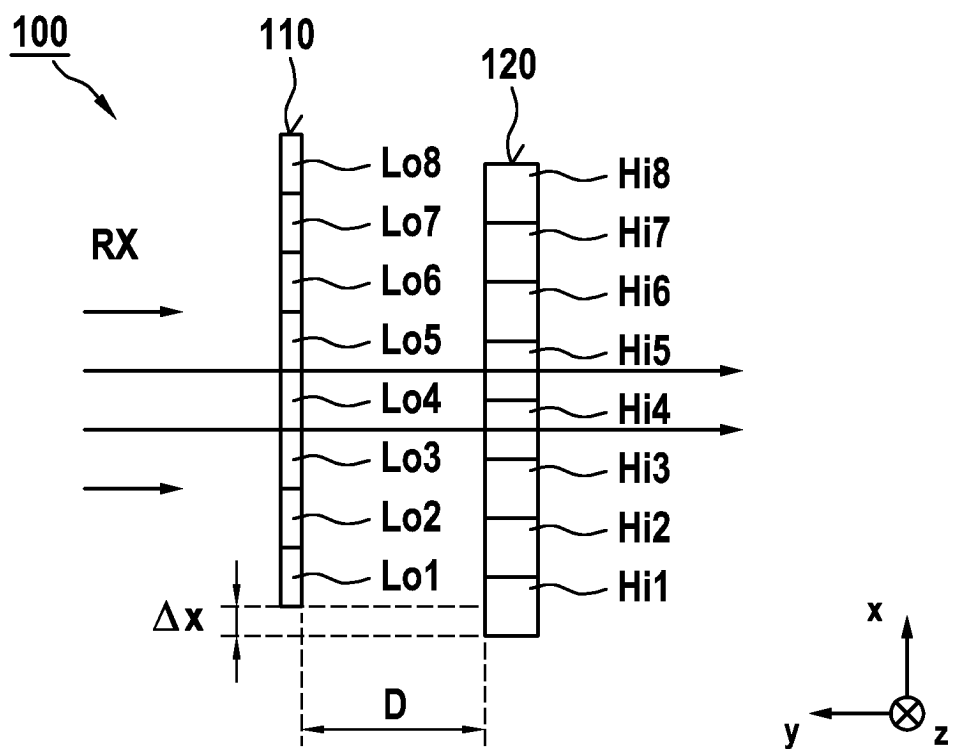


Fig. 3

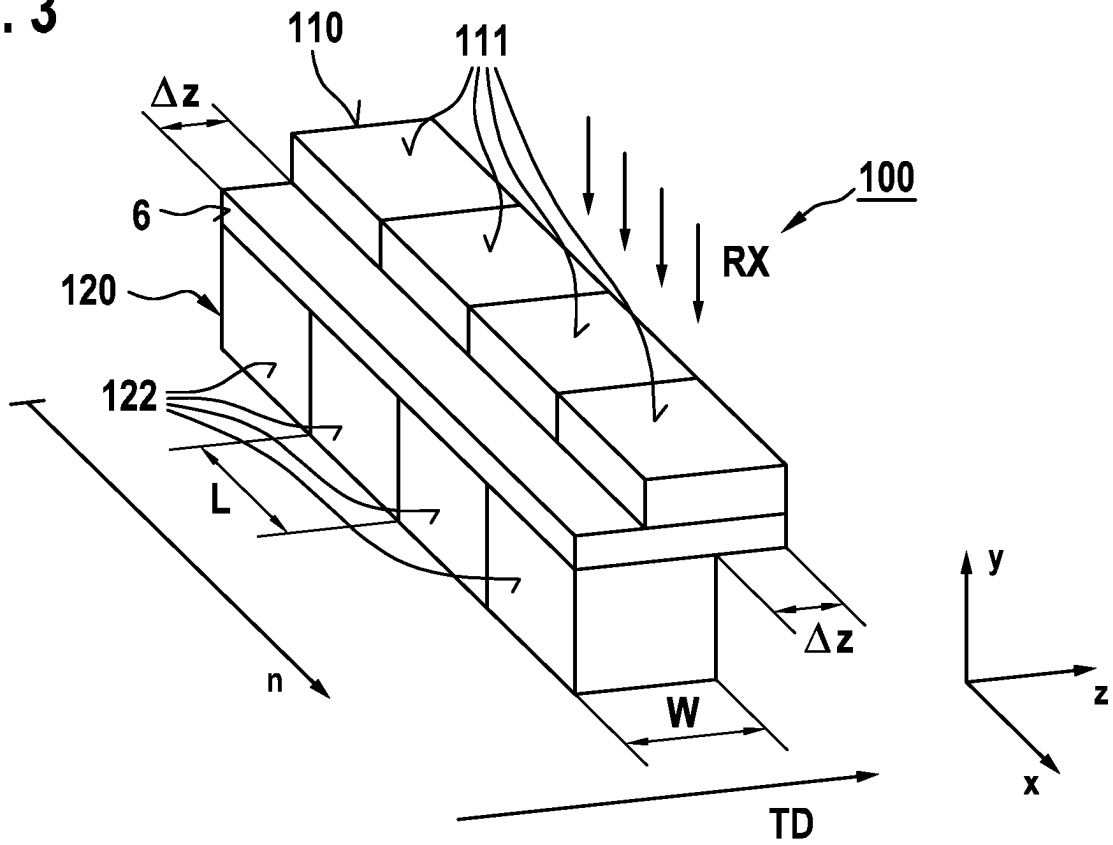


Fig. 4

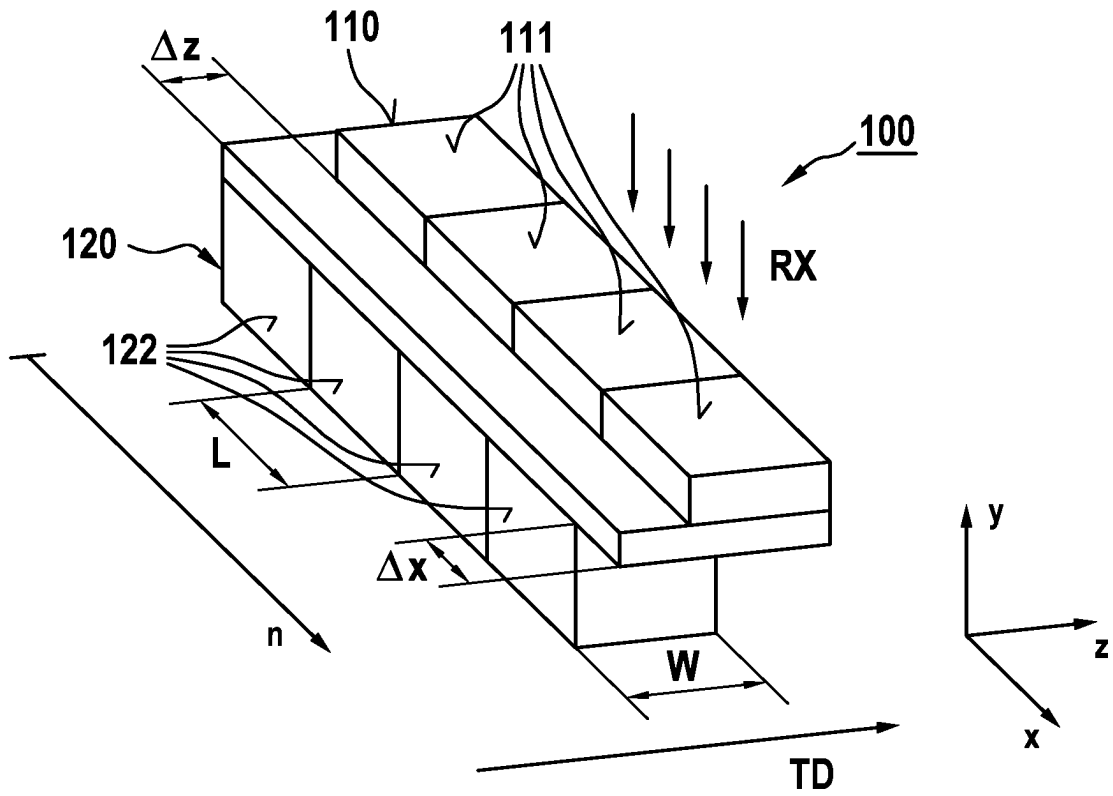


Fig. 5

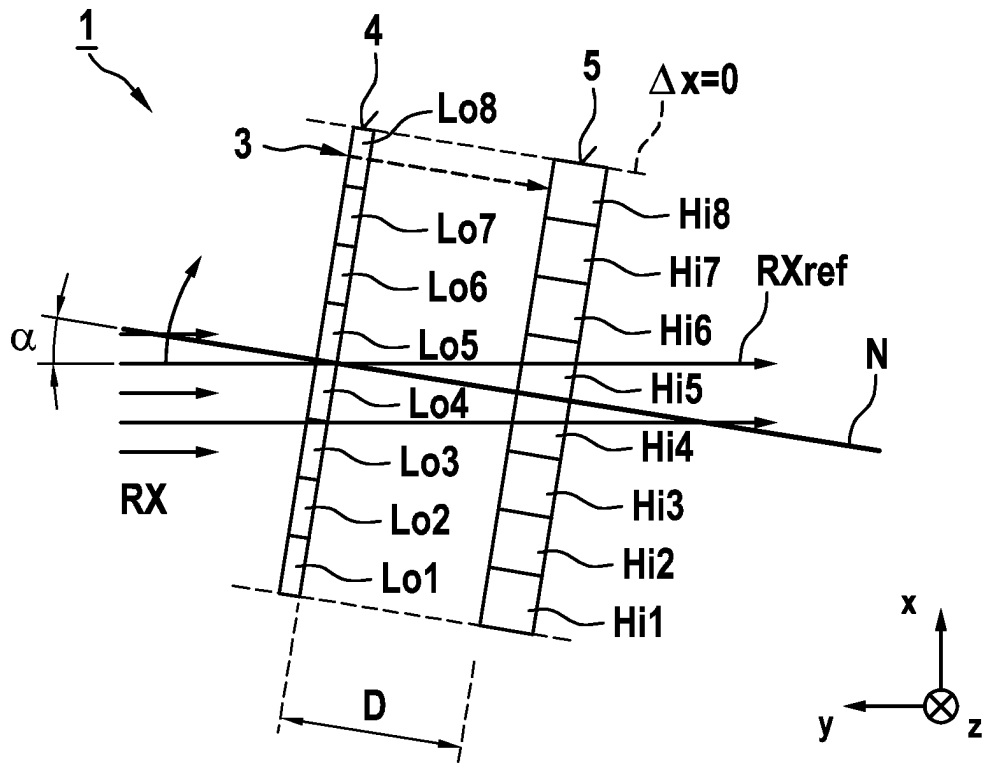


Fig. 6

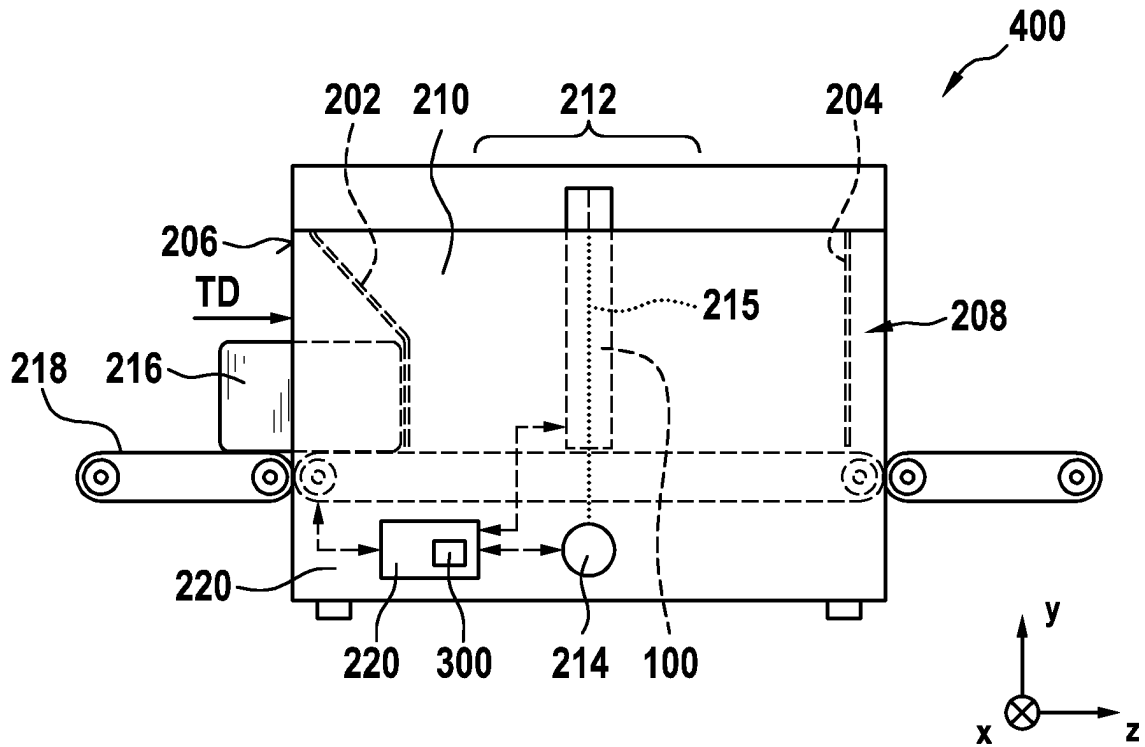


Fig. 7

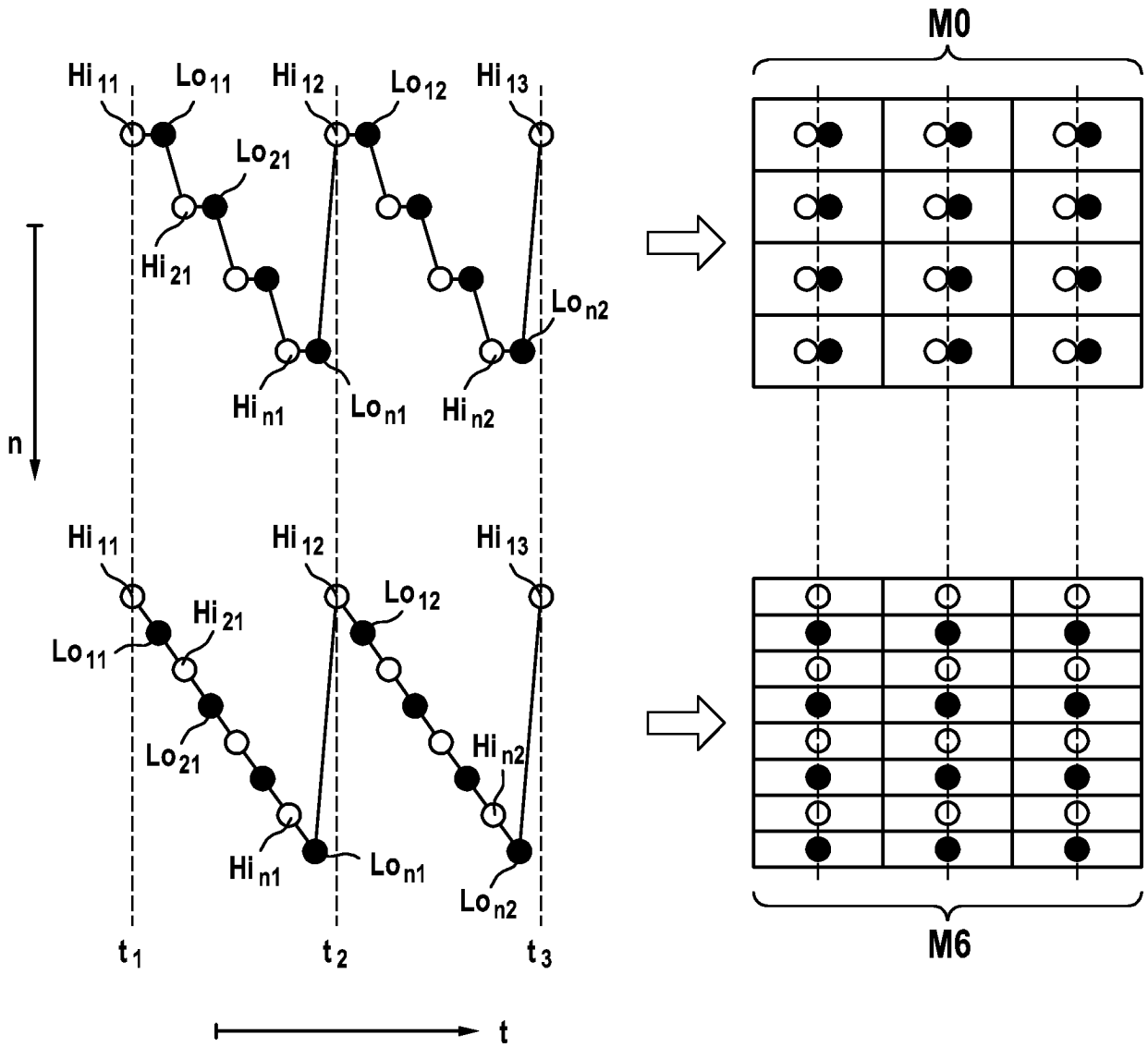


Fig. 8

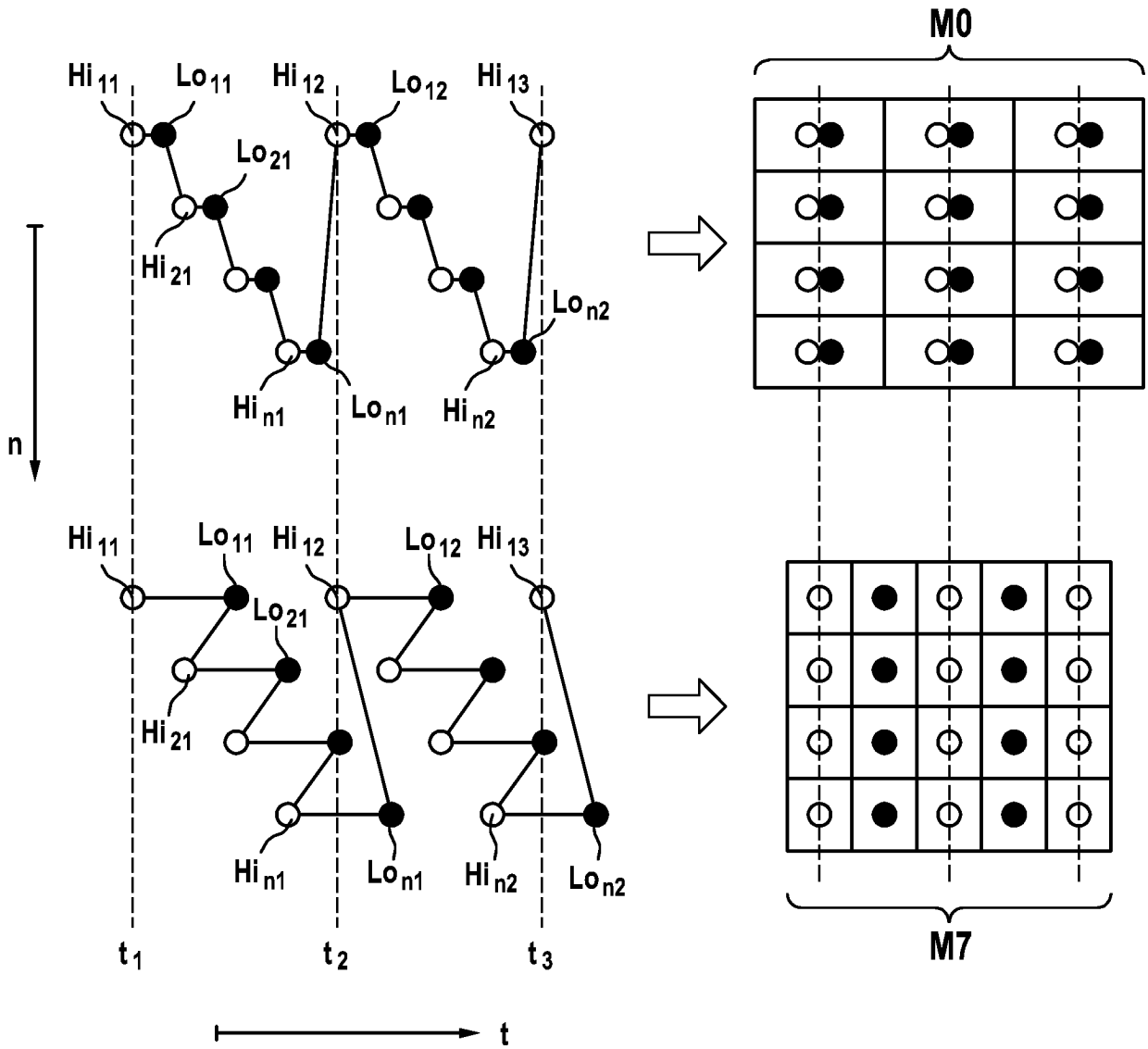


Fig. 9

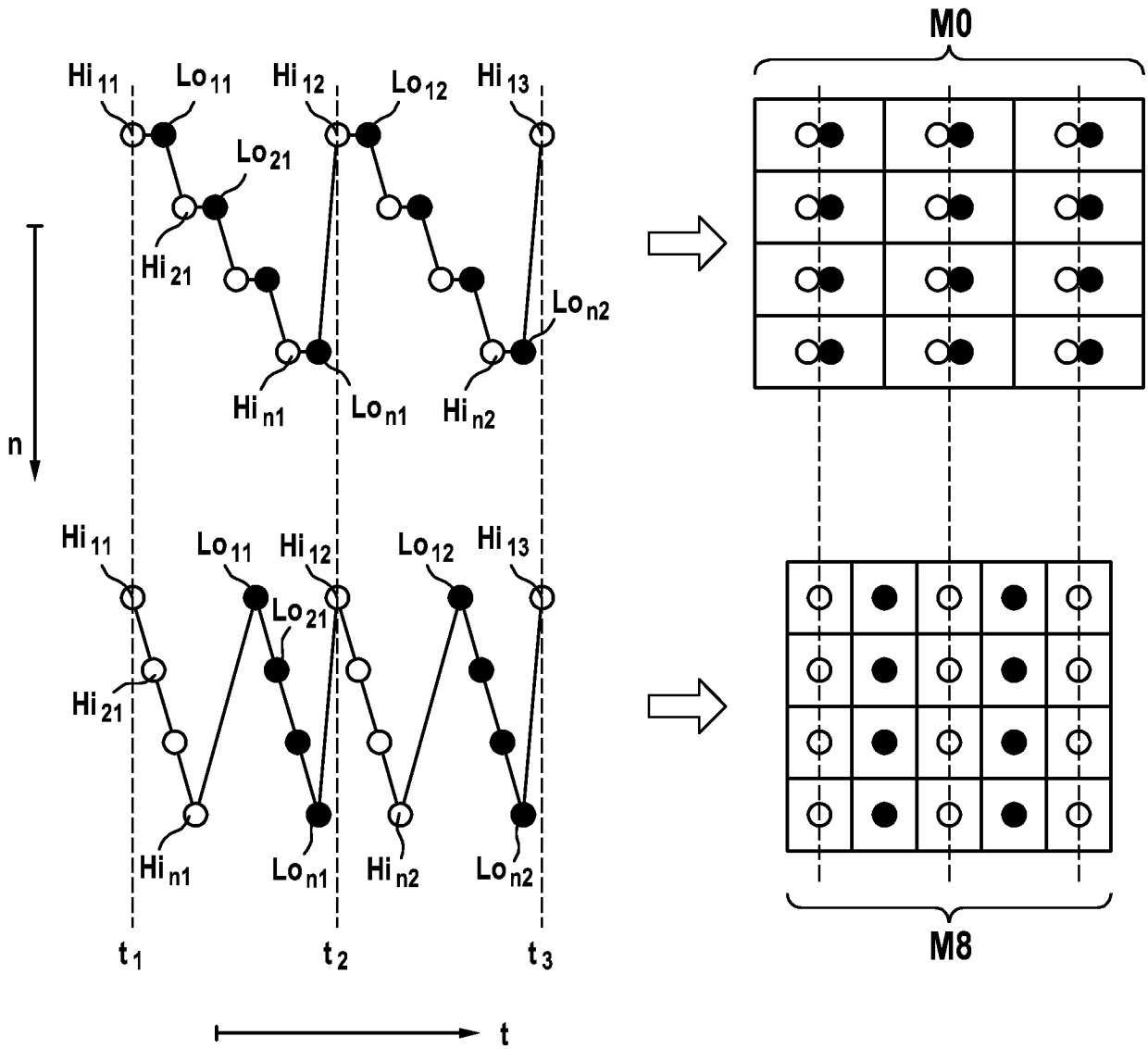


Fig. 10

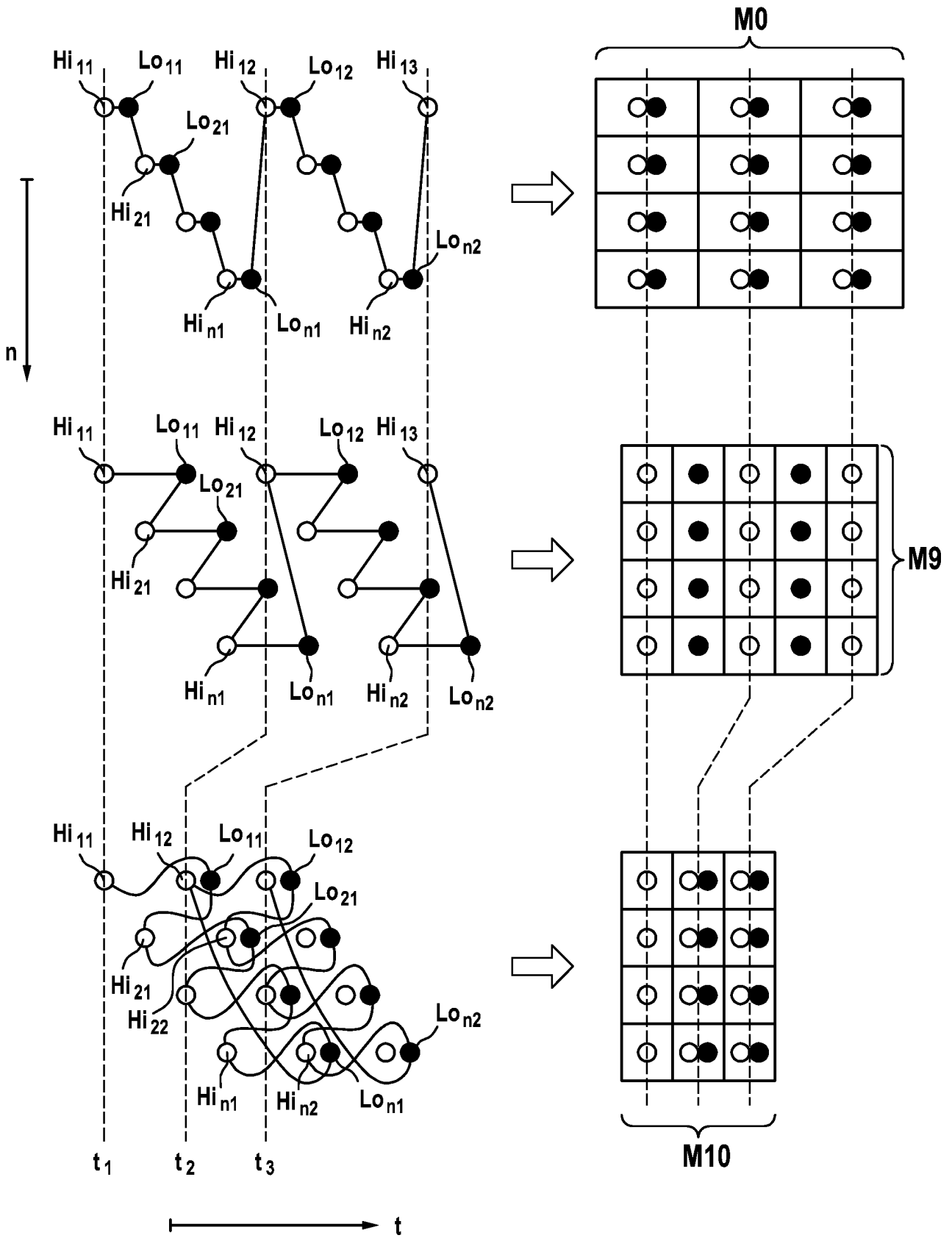


Fig. 11

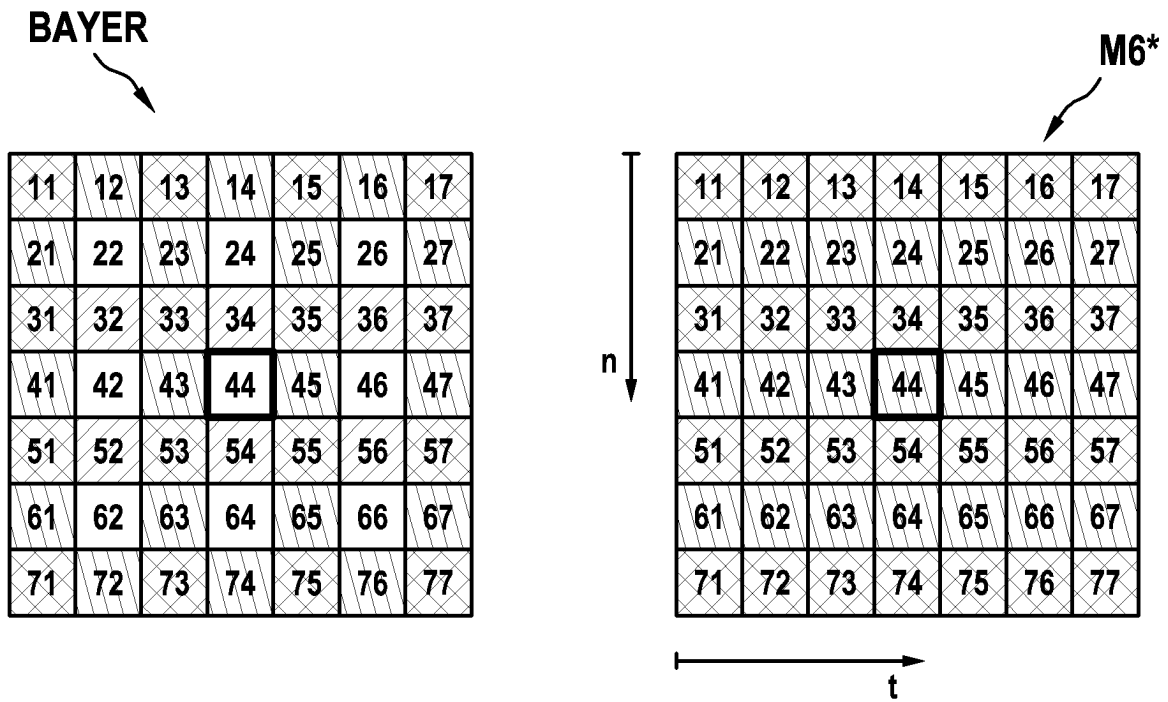


Fig. 12

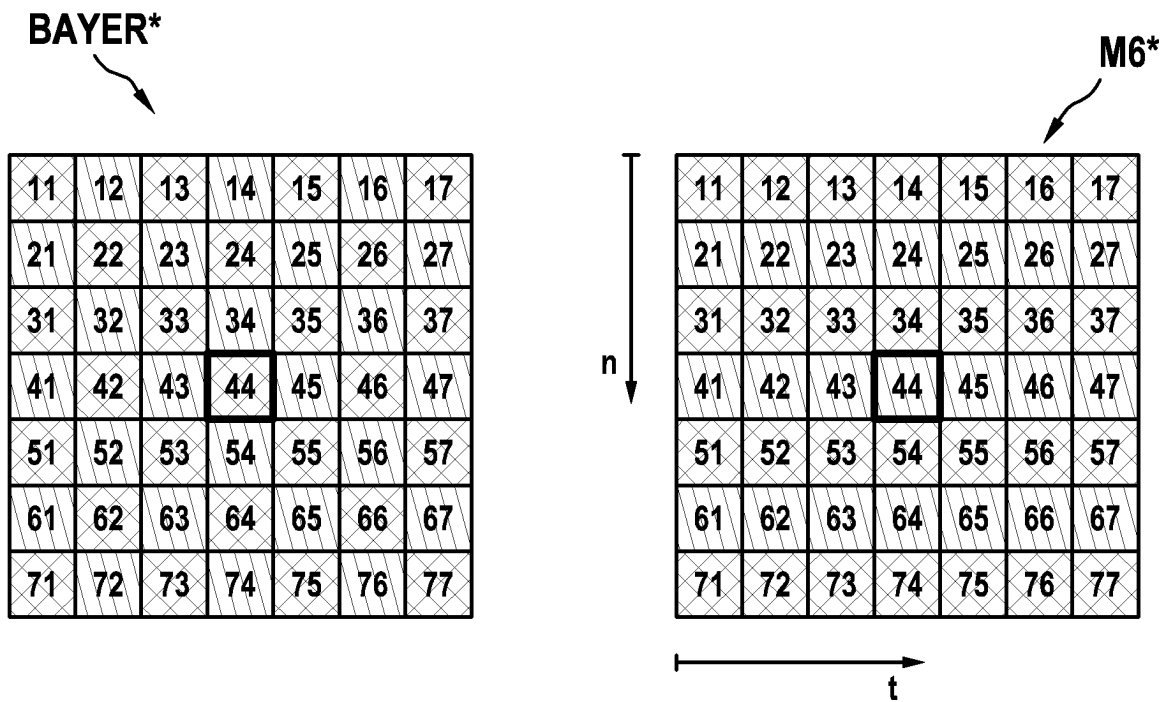


Fig. 13

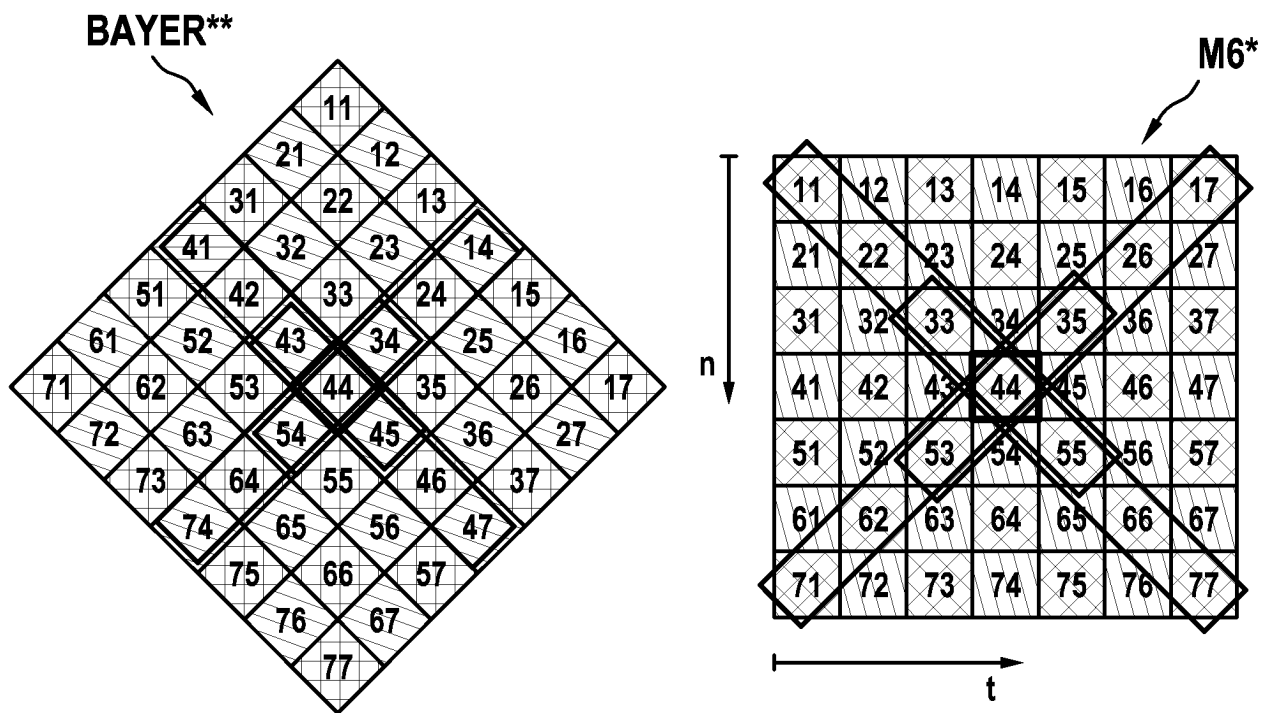


Fig. 14

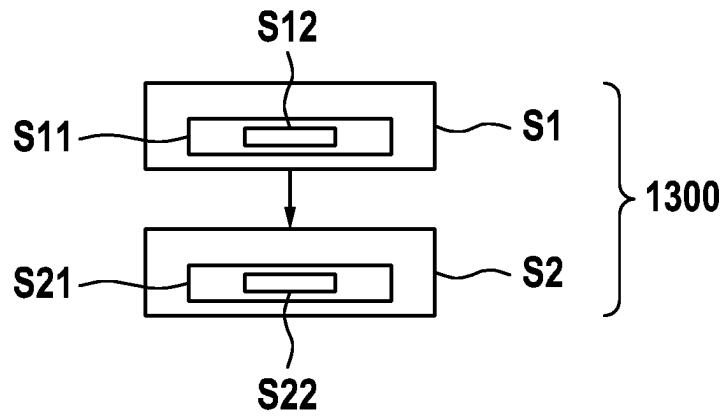


Fig. 15

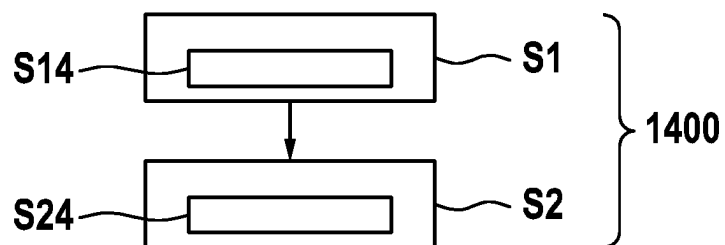


Fig. 16

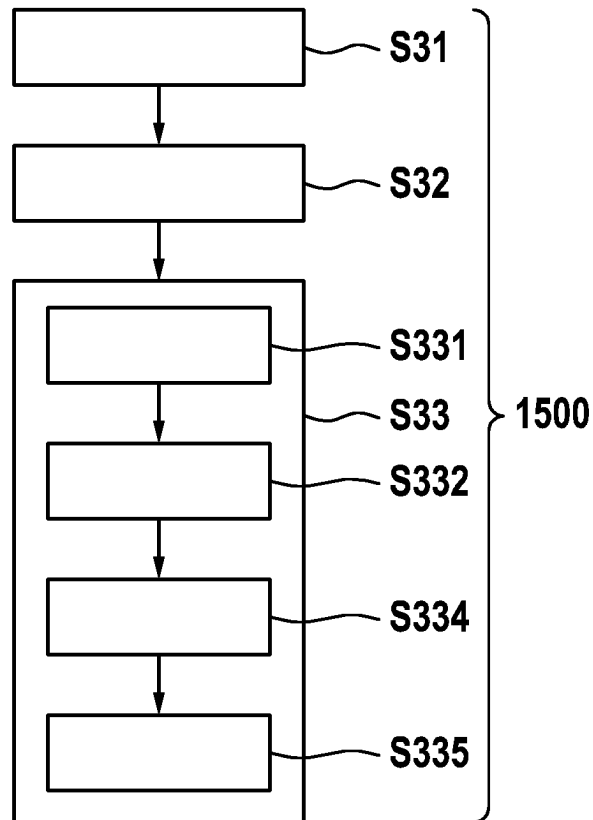


Fig. 17

