

(19)



(11)

EP 2 979 276 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
29.11.2017 Patentblatt 2017/48

(51) Int Cl.:
G21K 1/06 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **14724384.4**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2014/059331

(22) Anmeldetag: **07.05.2014**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2014/180901 (13.11.2014 Gazette 2014/46)

(54) **PHASENKONTRAST-RÖNTGENBILDGEBUNGSVORRICHTUNG UND BRECHUNGSGITTER FÜR EINE SOLCHE**

PHASE CONTRAST X-RAY IMAGING DEVICE AND REFRACTING GRID THEREFOR

DISPOSITIF D'IMAGERIE RADIOGRAPHIQUE À CONTRASTE DE PHASE ET RÉSEAU DE RÉFRACTION POUR UN TEL DISPOSITIF

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR

(73) Patentinhaber: **Siemens Healthcare GmbH**
91052 Erlangen (DE)

(30) Priorität: **10.05.2013 DE 102013008583**

(72) Erfinder: **PREUSCHE, Oliver**
91052 Erlangen (DE)

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
03.02.2016 Patentblatt 2016/05

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A2- 1 117 010 US-A1- 2011 051 889
US-A1- 2012 201 349

EP 2 979 276 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Phasenkontrast-Röntgenbildgebungsanordnung, also eine Röntgenanordnung für eine Phasenkontrastbildgebung. Die Erfindung bezieht sich des Weiteren auf ein Brechungsgitter für eine solche. Die Röntgenanordnung und das Brechungsgitter sind dabei insbesondere für eine Phasenkontrastbildgebung im Medizinbereich vorgesehen.

[0002] Die Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung im Allgemeinen, und Röntgenstrahlung im Speziellen, mit einem Medium wird üblicherweise durch Angabe eines komplexen Brechungsindex beschrieben. Realteil und Imaginärteil des Brechungsindex sind dabei jeweils abhängig von der materiellen Zusammensetzung des Mediums, dem der komplexe Brechungsindex zugeordnet ist. Während der Imaginärteil die Absorption der elektromagnetischen Strahlung in dem Medium wiedergibt, beschreibt der Realteil des Brechungsindex die materialabhängige Phasengeschwindigkeit, und damit die Brechung der elektromagnetischen Strahlung.

[0003] Derzeit eingesetzte Röntgenbildgebungsanordnungen detektieren meist ausschließlich die materialabhängige Strahlungsabsorption in einem zu untersuchenden Objekt, wobei die Intensität der durch das Objekt transmittierten Röntgenstrahlung orts aufgelöst aufgezeichnet wird.

[0004] Weniger verbreitet ist derzeit noch die Ausnutzung der von dem Objekt verursachten Brechung und der damit einhergehenden materialabhängigen Phasenverschiebung zum Zweck der Bildgebung. Entsprechende Verfahren und Vorrichtungen werden entwickelt.

[0005] Zur messtechnischen Erfassung der Phasenverschiebung wird typischerweise ein Talbot-Lau-Interferometer eingesetzt, wie es beispielsweise in "X-ray phase imaging with a grating interferometer, T. Weitkamp et al., 8. August 2005/ Vol. 13, No. 16/OPTICS EXPRESS" beschrieben ist.

[0006] Bei einem herkömmlichen Talbot-Lau-Interferometer sind entlang einer optischen Achse eine Röntgenstrahlungsquelle, ein Kohärenzgitter G_0 , ein Phasengitter (oder Beugungsgitter) G_1 , ein Analysegitter (oder Absorptionsgitter) G_2 und ein aus einer Vielzahl von Pixeln aufgebauter Röntgendetektor angeordnet. Das Kohärenzgitter G_0 dient dabei zur Sicherstellung einer ausreichenden räumlichen Kohärenz der Röntgenstrahlungsquelle. Dementsprechend kann das Kohärenzgitter G_0 im Falle einer annähernd punktförmigen Röntgenstrahlungsquelle entfallen. Mit Hilfe des Phasengitters G_1 , welches typischerweise eine gleichmäßige gestreifte Struktur aufweist, wird ein Interferenzmuster erzeugt, dessen Intensitätsverteilung mittels des Röntgendetektors detektiert wird.

[0007] Die Periode dieses Interferenzmusters ist dabei typischerweise deutlich kleiner als die Größe der Pixel des Röntgendetektors, so dass eine direkte Erfassung des Interferenzmusters mit dem Röntgendetektor nicht möglich ist. Um dennoch das Interferenzmuster vermessen zu können, ist dem Röntgendetektor daher üblicherweise das Analysegitter (oder Absorptionsgitter) G_2 vorgeschaltet, mit dessen Hilfe das Interferenzmuster durch eine räumlich-periodische Ausblendung von Röntgenstrahlung abgetastet werden kann. Hierzu wird das Analysegitter G_2 in einer Ebene senkrecht zur optischen Achse und der Struktur des Interferenzmusters verschoben. Alternativ zu dem Analysegitter G_2 können auch das Kohärenzgitter G_0 oder das Phasengitter G_1 verschoben werden.

[0008] Für die Phasenkontrastbildgebung wird das zu untersuchende Objekt zwischen der Röntgenstrahlungsquelle (und dem gegebenenfalls vorhandenen Kohärenzgitter) einerseits und dem Phasengitter G_1 andererseits positioniert. Alternativ hierzu kann das Objekt auch zwischen dem Phasengitter G_1 und dem Analysegitter G_2 positioniert werden. In beiden Fällen verursacht das Objekt eine ortsabhängig variierende Phasenverschiebung der Röntgenstrahlung, die das durch das Phasengitter G_1 erzeugte Interferenzmuster messbar verändert. Das veränderte Interferenzmuster wird auf die oben beschriebene Weise mittels des Röntgendetektors detektiert. Aus der gemessenen Intensitätsverteilung des Interferenzmusters wird dann auf die ortsabhängige Phasenverschiebung zurückgerechnet.

[0009] Die Bildinformation wird entweder unmittelbar aus der Phase gewonnen. Alternativ kann die Bildinformation auch aus der Dichte (d.h. der integrierten Phase) oder der Winkelstreuung (Dunkelfeld) ermittelt werden. Ferner wird mitunter das Phasenkontrastbild mit dem gleichzeitig gewonnenen Absorptionskontrastbild verrechnet, um das Bildrauschen zu reduzieren.

[0010] Der gewünschte Vorteil der Phasenkontrast-Röntgenbildgebung besteht darin, dass sich Strukturen im Weichteilgewebe (insbesondere Gewebe, Wasser und Körperfette) im Phasenkontrast in der Regel stärker voneinander abheben als im Absorptionskontrast.

[0011] Allerdings verursachen Talbot-Lau-Interferometer aufgrund der nötigen Gitter - je nach Absorptionsverhalten des eingesetzten Analysegitters - entweder einen starken Intensitätsverlust (und bedingen somit eine hohe Röntgendosis) oder eine schlechte Sichtbarkeit des Interferenzmusters (und somit einen schlechten Wirkungsgrad der Phasenkontrastmessung).

[0012] Aus US 2011/0051889 A1 und US 2012/0201349 A1 ist jeweils ein Brechungsgitter für eine Phasenkontrast-Röntgenbildgebungsanordnung nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 bekannt. Die bekannten Brechungsgitter weisen jeweils eine im Wesentlichen quer zu einer Strahlungseinfallsrichtung auszurichtende Transversalfläche auf, die durch eine x-Achse und eine hierzu senkrechte y-Achse aufgespannt ist. Die bekannten Brechungsgitter weisen weiterhin jeweils eine Vielzahl von Brechungsstegen aus einem optisch vergleichsweise dünnen Basismaterial auf, die alternierend

mit optisch dichteren Zwischenräumen angeordnet sind.

[0013] Aus EP 1 117 010 A2 ist ferner ein Beugungsgitter für Licht bekannt, das in einem Kalibrationssystem zur Messung einer lateralen Verschiebung eines Referenzpunktes bei einem lithographischen Projektionsapparat eingesetzt ist. Die verschiedenen Beugungsordnungen des durch das Beugungsgitter transmittierten Lichts besitzen beim Verlassen des Beugungsgitters verschiedene Winkelpositionen, die durch die Gitterformel bestimmt werden. Ein nachgeschaltetes Linsensystem richtet die verschiedenen Strahlen parallel aus und wandelt ihre jeweiligen Winkel in verschiedene Positionen in einer Ebene um, so dass die verschiedenen Ordnungen in dieser Ebene voneinander getrennt werden. Eine Ordnungsblende ist in dieser Ebene angeordnet. In zumindest einigen Öffnungsblenden der Ordnung umfasst die Ordnungsblende nicht nur einfach blockierende, ausgewählte Ordnungen, sondern Keile, um den jeweiligen Ordnungsstrahlen eine festgelegte Ablenkung zu verleihen. Die Ordnungsstrahlen werden dann auf feststehende Bezugsgitter fokussiert, hinter denen sich jeweils Photodetektoren befinden. Die Keile sind so angeordnet, dass die entsprechenden geraden und ungeraden Ordnungen an derselben Ordnung der feststehenden Bezugsgitter zusammenkommen.

[0014] Der Erfindung die Aufgabe zugrunde, die Phasenkontrast-Röntgenbildgebung zu verbessern.

[0015] Bezüglich eines Brechungsgitters für eine Phasenkontrast-Röntgenbildgebungsvorrichtung wird diese Aufgabe erfindungsgemäß gelöst durch die Merkmale des Anspruchs 1. Bezüglich einer Phasenkontrast-Röntgenbildgebungsvorrichtung wird diese Aufgabe erfindungsgemäß gelöst durch die Merkmale des Anspruchs 9. Vorteilhafte und teils für sich gesehen erfinderische Ausgestaltungsformen und Weiterentwicklungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen und der nachfolgenden Beschreibung dargelegt.

Die Erfindung geht aus von der Idee, den üblichen Aufbau eines Talbot-Lau-Interferometers zu modifizieren, indem anstelle des Analysegitters G_2 oder zusätzlich zu diesem ein (auch als Linsengitter bezeichnetes) Brechungsgitter G_L in dem Strahlengang der Röntgenstrahlung positioniert wird. Das Brechungsgitter ist dabei derart gestaltet, dass es jeweils mehrere benachbarte, einander entsprechende Strukturen (z.B. Intensitätsmaxima oder Intensitätsminima) des Interferenzmusters auf einen gemeinsamen Fokus bricht, während dazwischen liegende Strukturen (z.B. Intensitätsminima bzw. Intensitätsmaxima) des Interferenzmusters auf einen davon räumlich verschiedenen Fokus gebrochen werden. Das Grundkonzept dieser Idee ist bereits in der Vorgänger-Anmeldung WO 2013/160 153 A1 beschrieben.

Das erfindungsgemäße Brechungsgitter weist hierbei eine Transversalfläche auf, die durch eine x-Achse und eine hierzu senkrechte y-Achse aufgespannt wird, und die im Wesentlichen (d.h. exakt oder zumindest näherungsweise) quer zu einer Strahlungseinfallsrichtung auszurichten ist. Die vorgesehene Strahlungseinfallsrichtung definiert hierbei eine z-Achse des Brechungsgitters, die in der vorgesehenen Einbauposition des Brechungsgitters insbesondere parallel zu einer optischen Achse der Röntgenbildgebungsvorrichtung ausgerichtet ist. Die Transversalfläche kann hierbei innerhalb des von dem Brechungsgitters eingenommenen Raumvolumens grundsätzlich an beliebiger z-Position (d.h. Position entlang der z-Achse) definiert werden. Lediglich beispielhaft wird im Folgenden angenommen, dass die Transversalfläche durch die "vordere" Stirnfläche des Brechungsgitters gebildet ist, über die die Strahlung in das Brechungsgitter einfällt.

[0016] Die vorstehend eingeführten Achsen spannen ein kartesisches Koordinatensystem auf. Die durch die Orientierung der x-, y- und z-Achse definierten Raumrichtungen sind dabei nachfolgend als (positive) x-, y- bzw. z-Richtung bezeichnet. Die jeweils entgegengesetzten Raumrichtungen sind als (negative) als x-, y- bzw. z-Richtung bezeichnet. Positionen auf der x-, y- und z-Achse sind als x-, y, bzw. z-Positionen bezeichnet.

[0017] Entsprechend der gewünschten Eigenschaft, benachbarte verschiedenartige Strukturen des Interferenzmusters in unterschiedliche Fokusse (d.h. Fokalfpunkte oder Fokallinien) zu brechen, ist die Transversalfläche in jeweils in y-Richtung langgestreckte Brechungstreifen gegliedert, die in x-Richtung parallel nebeneinander aufgereiht sind. Benachbarte Brechungstreifen unterscheiden sich hierbei dadurch, dass sie hinsichtlich der Brechungseigenschaften des im Bereich dieses Brechungstreifens jeweils angeordneten Gittermaterials stets auf verschiedene Fokusse ausgerichtet sind. Mit anderen Worten ist das Material des Brechungsgitters, das entlang der z-Achse über und/oder unter einem Brechungstreifen angeordnet ist, derart ausgestaltet, dass es Strahlung zumindest einer bestimmten Designwellenlänge in einen bestimmten Fokus bricht, während das Material des Brechungsgitters, das entlang der z-Achse über und/oder unter einem benachbarten Brechungstreifen angeordnet ist, die Strahlung in einen anderen Fokus bricht. Bei der Transversalfläche und den darauf gebildeten Brechungstreifen handelt es dabei sich um mathematisch-abstrakte Strukturen.

[0018] Die strahlungsbrechende Wirkung des Brechungsgitters wird durch eine Mehrzahl von Brechungsstegen aus einem optisch vergleichsweise dünnen Basismaterial (also einem Feststoff mit für Röntgenstrahlen vergleichsweise niedrigem Realteil des Brechungsindex) erzeugt, wobei diese Brechungsstege alternierend mit optisch vergleichsweise dichten Zwischenräumen angeordnet sind. Bedingt durch die trennenden Zwischenräume verlaufen die Brechungsstege innerhalb der Transversalfläche zwangsweise zumindest näherungsweise parallel. Vorzugsweise sind die Brechungsstege hierbei aus Gold, Nickel oder Silizium gebildet. Die Zwischenräume sind wahlweise durch (luft- oder flüssigkeitsgefüllte) Lücken oder durch Zwischenstege aus einem optisch vergleichsweise dichten Material (also einem Feststoff mit für Röntgenstrahlen vergleichsweise großem Realteil des Brechungsindex), z.B. aus Photolack, gebildet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für Röntgenstrahlen der Realteil des Brechungsindex in allen Materialien kleiner als Eins ist, so dass für Röntgenstrahlen - anders als für sichtbares Licht - Feststoffe im Vergleich zu Vakuum oder Luft stets das

optisch dünnere Medium darstellen.

[0019] Die von den Brechungsstegen innerhalb der Transversalfläche jeweils eingenommenen Flächenbereiche sind dabei nicht deckungsgleich mit den Brechungstreifen, die nur durch die strahlungsbrechenden Eigenschaften des Brechungsgitters definiert. Vielmehr sind die Brechungsstege erfindungsgemäß derart ausgebildet sind, dass sie innerhalb der Transversalfläche zumindest abschnittsweise diagonal (also schrägwinklig, d.h. unter einem 0° übersteigenden und 90° unterschreitenden Winkel zu der y-Achse) verlaufen. Der zumindest abschnittsweise diagonale Verlauf der Brechungsstege in der Transversalfläche ist hierbei dadurch charakterisiert, dass für mindestens einen Brechungssteg die diesen Brechungssteg in x-Richtung begrenzenden Seitenflächen sich innerhalb der Transversalfläche über mindestens zwei Brechungstreifen erstrecken. Da die Brechungsstege, bedingt durch die Zwischenräume, zumindest näherungsweise parallel verlaufen müssen, erstreckt sich diese Eigenschaft zwangsweise auf alle Brechungsstege (mit Ausnahme von etwaigen Brechungsstegen an den Rändern der Transversalfläche, deren Seitenfläche sich aufgrund der Randlage nur über einen Brechungstreifen erstrecken kann). Vorzugsweise erstrecken sich - von etwaigen Randeffekten abgesehen - die Seitenflächen aller Brechungsstege regelmäßig über eine Vielzahl von Brechungstreifen, insbesondere über alle Brechungstreifen.

[0020] In anderer, aber inhaltlich völlig äquivalenter Formulierung ist der "diagonale Verlauf" der Brechungsstege in der Transversalfläche dadurch charakterisiert, dass sich mindestens ein Brechungssteg über mindestens vier Brechungstreifen erstreckt. Auch diese Eigenschaft gilt aufgrund des zumindest näherungsweisen Parallelverlaufs der Brechungstreifen - von etwaigen Randeffekten abgesehen - zwangsweise für alle Brechungsstege.

[0021] Durch die vorstehend beschriebenen Eigenschaften unterscheiden sich das erfindungsgemäße "diagonale Layout" der Brechungsstege des Brechungsgitters qualitativ von dem "streifenförmigen Layout" der Brechungsstege der in WO 2013/160 153 A1 angegebenen Brechungsgitter. Dort verlaufen die Brechungsstege in Längsrichtung der Brechungstreifen, d.h. in y-Richtung. Dabei bleiben die Seitenflächen eines jeden Brechungsstegs stets jeweils innerhalb des einem einzigen Brechungstreifen zugeordneten Raums, wodurch sich die streifenförmigen Brechungsstege nur über zwei oder maximal drei Brechungstreifen erstrecken können.

[0022] Wie bereits in WO 2013/160 153 A1 beschrieben ist, kann das Brechungsgitter erfindungsgemäß anstelle des Analysegitters des herkömmlichen Talbot-Lau-Interferometers eingesetzt werden. Das Brechungsgitter wird hierbei in seinem Fokusabstand zu dem Röntgendetektor angeordnet, so dass die Röntgenstrahlung durch das Brechungsgitter direkt auf die einzelnen Pixel oder Pixelspalten des Röntgendetektors fokussiert wird. Alternativ hierzu kann das Brechungsgitter, wie ebenfalls bereits in WO 2013/160 153 A1 beschrieben ist, dem Phasengitter und dem Analysegitter zwischengeordnet werden. In diesem Fall wird die Röntgenstrahlung durch das Brechungsgitter auf die Schlitze und Stege des Analysegitters fokussiert.

[0023] Durch die Eigenschaft des Brechungsgitters, jeweils mehrere benachbarte, einander entsprechende Strukturen (z.B. Intensitätsmaxima oder Intensitätsminima) des Interferenzmusters auf einen gemeinsamen Fokus zu brechen, wirkt das Brechungsgitter als periodische Anordnung von Sammellinsen, durch die das Interferenzmuster vergrößert wird. Dies ermöglicht den Einsatz eines entsprechend gröberen und in den Gitterstegen besser absorbierenden Analysegitters, wodurch die Sichtbarkeit (Visibilität) verbessert wird. Dies ermöglicht wiederum - insbesondere bei hochenergetischer (kurzwelliger) Röntgenstrahlung - eine Reduzierung des Bildrauschens und der Röntgendosis. Wird in alternativer Ausführung der Erfindung das Analysegitter weggelassen, so entfällt die hierdurch verursachte Absorption, wodurch - insbesondere bei niederenergetischer (langwelliger) Röntgenstrahlung - ebenfalls eine Reduzierung des Bildrauschens und der Röntgendosis erreicht wird.

[0024] Da ein Brechungsgitter regelmäßig mit kleinerer Bauhöhe gefertigt werden kann als ein Analysegitter, kann die Streifenbreite des Brechungsgitters im Vergleich zu der typischen Streifenbreite eines Analysegitters kleiner gewählt werden. Hierdurch kann zwischen dem Phasengitter und dem Brechungsgitter ein größerer (d.h. einem höheren Vielfachen des Talbot-Abstands entsprechender) Abstand eingestellt werden als zwischen dem Phasengitter und dem Analysegitter eines gewöhnlichen Talbot-Lau-Interferometers. Hierdurch ergibt sich eine höhere (Winkel-)Empfindlichkeit, wodurch der Nachteil einer etwas geringeren Sichtbarkeit überwogen wird. Dies ermöglicht eine weitere Verbesserung des Bildrauschens und/oder eine weitere Verringerung der Röntgendosis.

[0025] Wie bereits in WO 2013/160 153 A1 beschrieben ist, ist das Brechungsgitter vorzugsweise in einem photolithographischen Herstellungsverfahren, insbesondere dem sogenannten LIGA(Lithographie-Galvanik-Abformung)-Verfahren oder mittels reaktivem Ionen-Ätzen hergestellt.

[0026] Ein einschränkender Faktor für die Herstellung der Brechungsgitter ist dabei das durch Herstellungsverfahren begrenzte Aspektverhältnis, das bei gegebener Gitterhöhe in z-Richtung durch die herstellbaren Minimalabstände zwischen den Seitenwänden der Brechungsstege bestimmt ist, nämlich - je nach dem konkreten Herstellungsverfahren - durch die minimale Stärke der Brechungsstege und/oder die minimale Stärke der Zwischenräume.

[0027] Erkanntermaßen können durch das diagonale Layout der Brechungsstege bei gegebener Gitterhöhe und gegebenen Brechungseigenschaften der Brechungstreifen besonders große Minimalabstände zwischen den Seitenwänden der Brechungsstege - sowohl innerhalb der Brechungsstege als auch zwischen benachbarten Brechungsstegen - eingehalten werden. Dies ermöglicht wiederum die Fertigung von Brechungsgittern mit besonders großer Gitterhöhe in

z-Richtung oder besonders geringer Breite der Brechungsstreifen. Solche Brechungsgitter ermöglichen die Realisierung von Phasenkontrast-Röntgenbildgebungsanordnungen mit besonders geringer Einbaulänge und besonders hoher Empfindlichkeit.

[0028] In bevorzugter Ausführung sind die Brechungsstege jeweils nach Art von in y-Richtung geneigten schiefen Prismen geformt, deren Grundfläche und Deckfläche jeweils in den zur Transversalfläche parallelen Stirnflächen des Brechungsgitters liegen. In dieser Ausführung wird das Brechungsgitter insbesondere, wie an sich bereits in WO 2013/160 153 A1 beschrieben ist, durch ein photolithographisches Verfahren, insbesondere LIGA, unter Schrägbelichtung der Photolackschicht durch Röntgenstrahlung hergestellt. Die Grundfläche und die gegenüberliegende Deckfläche des Prismas haben hierbei in der Regel jeweils eine komplexe, polygonale Form. An den Seitenrändern des Brechungsgitters können die Brechungsstege - abweichend von einer reinen Prismenform - zur Bildung von in z-Richtung ausgerichteten Randflächen abgeschnitten sein. Durch die Ausführung der Brechungsstege als zur Transversalfläche schiefe Prismen wird eine vergleichsweise starke Brechung erzielt, ohne andere optische Eigenschaften, insbesondere die Absorption und die Sichtbarkeit (Visibility) wesentlich zu verschlechtern.

[0029] Die Brechungsstege sind insbesondere derart angeordnet, dass in jedem Brechungsstreifen eine sich in y-Richtung mit einer y-Periodenlänge wiederholende Materialstruktur ergibt. Die Brechungsstege sind also derart gestaltet, dass sie in jedem Brechungsstreifen stets parallelverschobene, kongruente und gleichmäßig beabstandete Flächenabschnitte einnehmen. Die Brechungsstege sind dabei derart in y-Richtung geneigt, dass die zu der Grundfläche entgegengesetzte Deckfläche eines jeden Brechungsstegs gegenüber der Grundfläche um eine ganze Anzahl von Periodenlängen, insbesondere um genau eine Periodenlänge versetzt ist. Die beiden in z-Richtung gegenüberliegenden Stirnflächen des Brechungsgitters weisen somit ein identisches Layout, also eine identische aus Brechungsstegen und Zwischenräumen gebildete Materialstruktur auf.

[0030] Vorzugsweise sind die Seitenflächen der Brechungsstege jeweils alternierend aus aktiven Teilflächen mit vergleichsweise starker Brechungswirkung in x-Richtung und passiven Teilflächen mit geringer oder verschwindender Brechungswirkung in x-Richtung zusammengesetzt. Die aktiven Teilflächen können hierbei als brechende Flächen von (Teil-)Prismen betrachtet werden, die mit ihren nicht-brechenden Rückenflächen zu einem den jeweiligen Brechungssteg bildenden Multi-Prisma zusammengesetzt sind.

[0031] Die aktiven und passiven Teilflächen sind hierbei vorzugsweise jeweils durch ebene (ungekrümmte) Flächenabschnitte gebildet. Die Brechungswirkung einer jeden Teilfläche wird dabei durch den zugehörigen Gradienten bestimmt. Als Gradient wird hierbei die Steigung $g = \Delta z / \Delta x$ bezeichnet, den diese Teilfläche in einem Schnitt entlang einer xz-Ebene (also einer durch die x-Achse und die z-Achse aufgespannten Ebene) aufweist. Je größer der Gradient g, je steiler also die jeweilige Teilfläche gegen die Transversalfläche angestellt ist, desto stärker wird das einfallende Röntgenlicht in x-Richtung gebrochen.

[0032] Jede aktive oder passive Teilfläche erstreckt sich innerhalb der Transversalfläche in x-Richtung dabei vorzugsweise über eine ganze Anzahl von Brechungsstreifen. Der Übergang zwischen aktiven und passiven Teilflächen einer Seitenfläche fällt somit vorzugsweise jeweils mit dem Übergang zwischen zwei Brechungsstreifen zusammen. Aktive und passive Teilflächen sind dabei vorzugsweise an den beiden Seitenflächen eines Brechungsstegs versetzt zueinander angeordnet. In einem Brechungsstreifen, in dem eine erste Seitenfläche eines jeden Brechungsstegs eine aktive Teilfläche aufweist, hat die andere Seitenfläche desselben Brechungsstegs somit eine passive Teilfläche und umgekehrt. Eine Ausnahme von dieser Regel bilden hierbei Brechungsstreifen ohne Brechungswirkung in x-Richtung (neutrale Brechungsstreifen), in denen beide Seitenflächen eines Brechungsstegs jeweils passive Teilflächen aufweisen.

[0033] Die passiven Teilflächen können exakt in der Transversalfläche parallel zur x-Achse ausgerichtet sein ($g = 0$). Vorzugsweise weisen auch die passiven Teilflächen aber einen kleinen Gradienten (Offset-Steigung) auf. Diese Offset-Steigung ist insbesondere derart bemessen, dass die dadurch verursachte Steigung Δy der passiven Teilflächen über einem Brechungsstreifen - in y-Richtung gemessen - etwa zwischen 20% und 50%, vorzugsweise etwa 25% der in x-Richtung gemessenen Streifenbreite s_L entspricht ($0,2 \leq \Delta y/s_L \leq 0,5$).

[0034] Durch die Offset-Steigung der passiven Teilflächen können bei gegebener Gitterhöhe und gegebenen Brechungseigenschaften der Brechungsstreifen die Minimal-Abstände zwischen den Seitenwänden der Brechungsstege - sowohl innerhalb der Brechungsstege als auch zwischen benachbarten Brechungsstegen - vorteilhafterweise weiter vergrößert werden.

[0035] Die Offset-Steigung der passiven Teilflächen bewirkt des Weiteren eine Abflachung der zwischen den aktiven und passiven Teilflächen gebildeten Winkel, was die technische Herstellbarkeit des Brechungsgitters begünstigt.

[0036] Da die Offset-Steigung jeweils die obere und die untere Materialkante einer Spalte gleichermaßen betrifft, ändert es die dadurch codierte Phasenverschiebung nicht. Aus einem Rechteck ("Gradient 0") wird durch die Offset-Steigerung ein Parallelogramm. Das Parallelogramm wirkt genauso auf die Phase des hindurchtretenden Lichts wie ein Rechteck. Die Offset-Steigung ist zweckmäßigerweise zwischen Oberkante und darunterliegender Unterkante des Materials gleich gewählt. Unterschiedliche Spalten dürfen auch unterschiedliche zusätzliche Gradienten erhalten für Kanten, die eine x-Komponente besitzen (rein vertikale Sprünge in y-Richtung werden nicht beeinflusst). Auch kann eine Spalte im linken und im rechten Teil (in x-Richtung) eine unterschiedliche Offset-Steigung besitzen, wenn dazwischen ein Knick

erfolgt.

[0037] In einer zweckmäßigen Ausführungsform des Brechungsgitters verläuft jeder Brechungssteg innerhalb der Transversalfläche in alternierenden Abschnitten diagonal in positiver y-Richtung und in negativer y-Richtung. Die Brechungsstege weisen also Knickstellen auf. Bevorzugt sind die Brechungsstege in regelmäßigen Abständen entlang der x-Achse alternierend gegensätzlich geknickt, so dass der jeweilige Brechungssteg innerhalb der Transversalfläche mäandrierend in Richtung der x-Achse verläuft. Durch das ein- oder mehrfach geknickte Layout für die Brechungsstege werden bei der Herstellung des Brechungsgitters im LIGA-Verfahren die zunächst durch Belichtung mit Röntgenstrahlung und anschließende Entwicklung herausgearbeiteten Zwischenstege aus Photolack mechanisch stabilisiert. Die Knickstellen sind vorzugsweise jeweils im Bereich von neutralen oder schwach brechenden Brechungsstreifen vorgesehen. Der Verlauf eines jeden Brechungsstegs innerhalb der Transversalfläche ändert somit jeweils an Brechungsstreifen mit geringer oder verschwindender Brechungswirkung die Richtung.

[0038] Zweckmäßigerweise sind stets jeweils eine einheitlich vorgegebene Anzahl von Brechungsstreifen auf einen gemeinsamen Fokus ausgerichtet. Die auf einen gemeinsamen Fokus ausgerichteten Brechungsstreifen werden hierbei zusammenfassend als Fokussierungsgruppe bezeichnet. Die Fokussierungsgruppen umfassen hierbei vorzugsweise jeweils eine ungeradzahlige Anzahl von Brechungsstreifen, z.B. 3, 5, 7 oder 9 Brechungsstreifen. Eine solche Fokussierungsgruppe umfasst einen neutralen Brechungsstreifen mit verschwindender Brechungswirkung, um den herum symmetrisch die weiteren Brechungsstreifen der Fokussierungsgruppe angeordnet sind, wobei deren Brechungswirkung in x-Richtung mit zunehmenden Abstand zu dem neutralen Brechungsstreifen ansteigt. Die Brechungsstreifen benachbarter Fokussierungsgruppen sind hierbei ineinander verschachtelt.

[0039] In bevorzugten Ausführungsformen des Brechungsgitters sind ferner ein oder mehrere der vorstehend beschriebenen Ausgestaltungsmerkmale vorgesehen, um die Minimal-Abstände innerhalb der Brechungsstege und zwischen benachbarten Brechungsstegen weiter zu vergrößern und/oder um die optischen Eigenschaften des Brechungsgitters zu optimieren:

- F1 - "Gradientenkompression": Dieses Ausgestaltungsmerkmal wird insbesondere auf die stärksten Teilprismen (also die aktiven Teilflächen der Brechungsstege mit den jeweils größten Gradienten) angewandt, wenn bei gegebener Gitterhöhe h und gegebener Streifenbreite s_L der Brechungstreifen durch eine aktive Teilfläche, die innerhalb der xz-Ebene linear über die gesamte Streifenbreite s_L und Gitterhöhe h verläuft ($g = h/s_L$), eine hinreichend starke Brechung nicht erzielt werden kann. Die Gradientenkompression wird realisiert, indem die aktive Teilfläche nicht über die volle Streifenbreite s_L geführt ist, sondern lediglich über einen Anteil $1/c$ (mit $c > 1$) dieser Streifenbreite s_L , während sich die aktive Teilfläche in z-Richtung vorzugsweise über die gesamte Gitterhöhe h erstreckt. Der Gradient g erhöht sich in diesem Fall auf $g = c \cdot h/s_L$. An der maximalen Visibilität ändert die Gradientenkompression zumindest dann wenig, wenn die Intensität in dem verbleibenden Rand des Brechungstreifens relativ gering ist. Wenn beispielsweise die Streifen hoher Intensität des durch das Phasengitter G_1 gebildeten Interferenzmusters in dem Brechungsgitter G_L genau auf einen Streifen fallen, so fließt die Hauptintensität in der Streifenmitte (=Spaltmitte) und der Rand bleibt vergleichsweise dunkel. Durch den durch Gradientenkompression erhöhten Gradienten wird ermöglicht, den Abstand zwischen dem Patienten und dem Röntgendetektor vergleichsweise klein zu halten, was auch die Empfindlichkeit verbessert. Der kleinere Abstand führt dazu, dass jeder Brechungstreifen auf einen schmäleren Bereich abgebildet wird, dies verbessert die Sichtbarkeit für geringe Kompression (z.B. bei $c^2 < 2$). Bei größerer Kompression (z.B. $c^2 > 2$) überwiegt dagegen die Reduktion der Sichtbarkeit durch die Randverluste in den am stärksten brechenden Teilprismen. In zweckmäßiger Dimensionierung ist c im Bereich $4/3 \leq c \leq 3/2$ wie z.B. $c = 2^{1/2}$ gewählt. Die Gradientenkompression wird vorzugsweise symmetrisch bezüglich des zugehörigen Brechungstreifens durchgeführt. Die in ihrer Breite (in x-Richtung) reduzierte aktive Teilfläche wird also bezüglich des zugehörigen Brechungstreifens zentriert.

[0040] Variante: Eine aus der Anmeldung US 2012/0041679 A1 beschriebene Methode zielt darauf ab, alle Gitter bei einem auf Phasenkontrastbildgebung beruhenden Computertomographen so auszurichten, dass in Abwesenheit des Patienten im Strahl die hellen Streifen des von dem Phasengitter G_1 erzeugten Interferenzmusters genau auf die Streifengrenzen des Analysegitters ausgerichtet sind. Bei einer vollen Umdrehung des Computertomographen (in Abwesenheit des Patienten) wird dann durch den Patient der Streifen einmal nach z.B. rechts und (nach 180° Gantry-Drehung) einmal in die Gegenrichtung (hier z.B. nach links) verschoben. Dies kann ohne jede Gitterverschiebung abgetastet und in Bilder umgerechnet werden.

[0041] In Übertragung dieser Idee auf die erfindungsgemäße Phasenkontrast-Röntgenbildgebungsanordnung wird die Gradientenkompression zweckmäßigerweise asymmetrisch durchgeführt. In diesem Fall wird zweckmäßigerweise vorher festgelegt, welche Spaltgrenzen des Brechungsgitters die hohe Intensität erhalten sollen. Der komprimierte Gradient wird von der Streifenmitte an diese Spaltgrenze verschoben. Die asymmetrische Kompression hat also den gradientenfreien Teil der Breite $s_L(1-1/c)$ zusammenhängend auf der zunächst unbeleuchteten Seite des Brechungstreifens und den Gradienten bis zum Rand der beleuchteten Spaltengrenze.

- F2 - Gradienten-Variation: Bei den in WO 2013/160153 A1 beschriebenen Brechungsgittern sind die Teilprismen bzw. Teilflächen stets derart ausgerichtet, dass alle Teilprismen bzw. Teilflächen eine Design-Wellenlänge λ_D bzw. Design-Photonenenergie möglichst exakt auf einen gemeinsamen Fokus fokussieren, in dem die Mitte des zugehörigen Elements des Analysegitters G_2 (Spalt bzw. Steg) bzw. Detektor-Pixels platziert wird. Dies beschränkt allerdings das Layout stärker als notwendig:

[0042] Die stärksten Teilprismen verteilen aufgrund von Dispersion die Licht-Intensität über einen weiten Bereich (oft über mehr als eine Pixelbreite bzw. S_2 -Spaltbreite). Ihre Gradienten sind daher nicht variierbar ohne weitere Sichtbarkeitsverluste in den zugehörigen Brechungsstreifen. Je schwächer jedoch die Teilprismen werden (je näher die Teilprismen entlang der x-Achse an dem zugehörigen Fokus liegen), desto näher zueinander werden die einzelnen Wellenlängen abgebildet, desto schmaler wird also insgesamt der beleuchtete Bereich. Dies bietet die Freiheit, den Gradienten dieser Prismen leicht zu erhöhen oder zu verringern, ohne die Sichtbarkeit signifikant zu verschlechtern. Die schwächsten Teilprismen befinden sich regelmäßig (entlang der x-Achse) zwischen den stärksten Teilprismen und den zweitstärksten Teilprismen der benachbarten Fokussierungsgruppe. Hier lassen sich durch leichte Verstärkung dieser schwächsten Teilprismen die Minimal-Abstände innerhalb der Brechungsstege und zwischen den Brechungsstege vergrößern, indem die zugehörigen Teilflächen in z-Richtung gestaucht werden. Oft können auch Gradienten nunmehr gleich starker Nachbar-Teilprismen reduziert werden, was die Absorption durch das Brechungsgitter reduziert.

- F3 - Variation der Grundhöhe: Die Grundhöhe (d.h., der über die volle Streifenbreite im Layout vorhandene rechteckige oder parallelogrammförmige Teil des Materials) kann verändert werden, um das Material-Aspektverhältnis zu verbessern. Das Aspektverhältnis wird hierbei verringert, indem die Grundhöhe durch Hinzufügen von Material im Layout über die volle Streifenbreite erhöht wird. Alternativ hierzu kann das Freiraum-Aspektverhältnis verbessert werden, indem die Grundhöhe reduziert wird - dies kann bei gegebenem und übererfülltem Aspektverhältnis auch zur Reduzierung des Material-Anteils und damit der Absorption genutzt werden. Diese Änderung betrifft vorwiegend schwache Teilprismen (mit kleinem Gradienten) und mittelstarke Teilprismen.

[0043] Bei schwachen Teilprismen empfiehlt sich, zur materialsparenden Optimierung des Aspektverhältnisses, anstelle einer Erhöhung der Grundhöhe eine Gradientenerhöhung (siehe F2) einzusetzen, solange Sichtbarkeit nicht signifikant reduziert ist.

- F4 - Zentrale Spalte: Bei den in WO 2013/160153 beschriebenen Brechungsgittern ist der zentrale (und optisch neutrale) Brechungsstreifen einer jeden Fokussierungsgruppe stets komplett mit Material gefüllt. Dies bedingt eine vergleichsweise starke Absorption in den zentralen Brechungsstreifen, wo eigentlich aus optischen Gründen gar nichts erforderlich wäre (da in den zentralen Brechungsstreifen keinerlei Gradient realisiert werden muss).

[0044] Hier ist die denkbar, den Aufbau an der zentralen Spalte komplett zu spiegeln (d.h., Aufbau achsensymmetrisch zur y-Achse in der Mitte der zentralen Spalte) und dafür rechteckige Materiallücken über die volle Breite der zentralen Brechungsstreifen (oder etwas mehr oder etwas weniger) einzubauen. Diese Lücken sind von der Brechung her neutral, reduzieren aber die Absorption. Sie sind so zu bemessen, dass minimale Materialbreiten nicht unterschritten werden. Vorzugsweise entsprechen sie einer Phasenverschiebung des hindurchtretenden Lichtes entlang der z-Achse um ein ganzzahliges Vielfaches an vollen Wellenlängen (analog F6 bzw. F7, für eine Wellenlänge des Spektrums nahe der Design-Wellenlänge).

- F5 "Gradienten-Verschmälerung": Diese Maßnahme ist sehr ähnlich zu der unter Punkt F1 beschriebenen Gradientenkompression, wird aber nicht auf die stärksten Teilprismen, sondern vorwiegend auf die schwächsten Teilprismen angewandt. Wird deren Gradient im streifenförmigen Layout am äußeren und/oder inneren Material-Rand in Richtung der Streifenmitte des Brechungsstreifens mit Streifenbreite s_L zurechtgeschnitten, so können damit die Mindestabstände erhöht werden.

[0045] Wird der äußere Rand zurechtgeschnitten (das sei der Rand, in dem sich in y-Richtung wenig oder kein Material befindet), so wird der mäanderförmige Materialstreifen aus zwei benachbarten Spalten insgesamt schmaler. Der Freiraum-Mindestabstand kann so zunehmen. Wird der innere Rand zurechtgeschnitten (das sei der Rand, in dem sich in y-Richtung viel Material befindet), so wird letztlich die Spaltengrenze zwischen den benachbarten Brechungsstreifen des mäanderförmigen Materialstreifens in Richtung des schwächeren Teilprismas verschoben. Der Material-Mindestabstand kann auf diese Weise vergrößert werden. Dabei sollte (um die maximale Sichtbarkeit wenig zu beeinflussen) maximal 10-15% der Streifenbreite beeinflusst werden.

- F6 - Dispersionskorrektur: Durch die unter Punkt F1 erläuterte Gradientenkompression wird eine Erhöhung des

geometrischen Gradienten der stärksten Teilprismen erreicht. Allerdings nimmt die Licht-Ablenkung der Brechungsstreifen nicht in demselben Maße zu. Dieser Effekt lässt sich zur Dispersionskorrektur bei den stärksten Teilprismen einsetzen. Da der Brechungsindex $\delta \propto \lambda^2 \propto 1/E^2$ und der Ablenkwinkel $\gamma \approx \delta \times g$ ist, folgt, dass $\gamma \propto \lambda^2 \propto 1/E^2$ ist. Gegeben sei ein starker Gradient, der die Materialhöhe (und damit die Phase aufgrund der höheren Phasengeschwindigkeit durch das Material) in Richtung positiver x-Achse steigert (und das Licht damit in negativer x-Richtung ablenkt). Der x-Abstand Δx sei nun passend zum Gradient g so gewählt, dass $\Delta\Phi = 2\pi (\delta/\lambda)g \Delta x = 2\pi$ gilt, dass sich also entlang von Δx die Phase durch den Gradient genau um $\Delta\Phi = 2\pi$ ändert bzw. die Wellenfront um $\Delta z = +\lambda_D$ in Ausbreitungsrichtung verschoben wird (für eine vorzugsweise nahe der Mitte des Auslegungs-Spektrums liegende einer Design-Wellenlänge $+\lambda_D$). Wenn hier in der positiven x-Richtung der steigender Materialhöhe nun die Materialhöhe sprunghaft um $\Delta h = g \cdot \Delta x$ reduziert wird, so dass ein Phasensprung von $\Delta\Phi = -2\pi$ bzw. $\Delta z = -\lambda_D$ entsteht, so ist dies für die Design-Wellenlänge λ_D ohne jede Auswirkung (da nur die Phase modulo 2π relevant ist). Für eine um einen Faktor f geänderte Wellenlänge $\lambda = f \cdot \lambda_D$ gilt jedoch $\delta(\lambda)/\lambda \propto f \cdot \lambda_D$, so dass wegen $\Delta\Phi = 2\pi (\delta/\lambda)\Delta h$ lokal an der Sprungstelle eine Phasen-Abweichung von $2\pi \cdot (1-f)$ verbleibt. Falls man Abweichungen von $\pm\pi/4$ toleriert, so muss also $3/4 \leq f \leq 5/4$ gelten. Das Spektrum hat also eine Bandbreite vom Faktor $5/3=167\%$ (was gut zur bisherigen Bandbreite des Brechungsgitters vom Faktor $3^{1/2}=173\%$ passt). Wird alle Δx ein dem Gradient entgegengesetzter Phasensprung erzeugt (wodurch die Materialhöhe eine Sägezahnkurve ohne jede mittlere Steigung beschreibt), so kompensieren sich jedoch die Phasen-Abweichung von 2π durch den Gradient mit der durch den Phasensprung, so dass sich die Phase (bis auf die lokale Abweichung von $2\pi \cdot (1-f)$) im Mittel durch die Gerade $\Delta\Phi = 2\pi \cdot x/\Delta x$ annähern lässt, und zwar unabhängig von f bzw. λ . Für die Röntgenstrahlung sieht es also wie eine fehlerbehaftete kontinuierliche Steigung bei $\delta \propto \lambda^1$ oder $1/E^1$ aus. Es resultieren Ablenkungswinkel linear zu f : $\gamma \propto \lambda^1$ oder $1/E^1$ oder f . Der Farbfehler kann so also um eine Größenordnung reduziert werden. Wird in kürzeren Abständen als Δx ein Phasensprung eingefügt, so wird ggf. überkompensiert, was in geringem Umfang sinnvoll sein kann. Es empfiehlt sich der Einsatz von Phasensprüngen erst zur Korrektur von Farbfehlern, wenn $(\delta/\lambda)g \cdot s_L$ größer oder zumindest nicht wesentlich kleiner als 1 ist.

[0046] Zahlenbeispiele: Für $E=62$ keV-Photonen entspricht ein voller Phasensprung einer Gold-Höhe von $h=25 \mu\text{m}$ (Transmission 85%) oder einer Nickel-Höhe von $43 \mu\text{m}$ (Transmission 95%). Bei $E=29$ keV dagegen ist es eine Nickel-Höhe von $20 \mu\text{m}$ (Transmission 82%) oder eine Silizium-Höhe von $75 \mu\text{m}$ (Transmission 98%). Bei $E=19$ keV Photonen entspricht der Sprung um eine Phase einer Silizium-Höhe von $50 \mu\text{m}$ (Transmission 95%).

[0047] Ein Problem dieser Strategie ist es, dass an der Sprungstelle genug Material verbleiben muss, um die Mindestbreiten des Layouts zu erfüllen. Deshalb spart der negative Phasensprung einerseits Material, es muss andererseits aber auch Material hinzugefügt werden, um an den Sprungstellen noch genug Material zu haben. Letzten Endes kann das bedeuten, dass man Material hinzufügen muss.

- F7 - Zusätzliche Phasensprünge: Im Gegensatz zu der unter Punkt F6 diskutierten Dispersionskorrektur wird hier die Dispersion erhöht (und ist bei kleinen Gradienten dann näherungsweise unabhängig von einer Variation des Gradienten). Zweckmäßigerweise wird die die Dispersion der schwächsten Teilprismen durch einen oder mehrere zusätzliche 2π -Sprünge (Sprünge um jeweils eine Wellenlänge) erhöht. Dadurch nimmt der Materialanteil im Layout zunächst zu, und der Material-Mindestabstand kann dadurch - erwünschtermaßen - auch zunehmen. Diese Maßnahme erlaubt allerdings, die unter Punkt F3 diskutierte Grundhöhe zu reduzieren und so den Freiraum-Mindestabstand zu reduzieren. Letztlich nähert sich die Material/Freiraum-Grenze im Streifen der schwächsten Teilprismen damit der Material/Freiraum-Grenze der gegenüberliegenden stärksten Teilprismen in grober Näherung an. Durch die Wahl der x-Positionen der λ -Phasensprünge innerhalb des Streifens kann man beeinflussen, ob der Freiraum-Abstand (in Richtung der gegenüberliegenden stärksten Teilprismen) stärker oder weniger stark als der Materialabstand (innerhalb des mäanderförmigen Materialstreifens mit der benachbarten Prismenspalte) beeinflusst werden soll. Bei größeren Gitterhöhen kann es auch sinnvoll sein, mehrere komplette Phasensprünge relativ gleichmäßig über die Spaltenbreite zu verteilen (z.B. drei Phasensprünge an den Positionen 12,5%, 50%, 87,5% der Teilprismenbreite oder an den x-Positionen 25%, 50%, 75% von s_L). Dies gilt entsprechend auch für die unter Punkt F6 diskutierte Dispersionskorrektur.

Die unter den Punkten F1 bis F6 diskutierten Ausgestaltungsmerkmale der Brechungsstege und der darin enthaltenen aktiven Teilflächen (Teilprismen) können vorteilhaft sowohl bei diagonalen Layouts der Brechungsstege gemäß der vorliegenden Erfindung als auch bei streifenförmigen Layouts gemäß WO 2013/160153 A1 eingesetzt werden, um die Minimal-Abstände innerhalb der Brechungsstege und zwischen benachbarten Brechungsstegen weiter zu vergrößern und/oder um die optischen Eigenschaften des Brechungsgitters zu optimieren.

[0048] Wie vorstehend erwähnt, umfasst die erfindungsgemäße (Phasenkontrast-Röntgenbildgebungs-)Vorrichtung eine Röntgenstrahlungsquelle, ein Phasengitter und einen Röntgendetektor, der eine eindimensionale oder zweidimensionale Anordnung von Pixel aufweist. Die erfindungsgemäße Vorrichtung umfasst des Weiteren ein zwischen dem

Phasengitter und dem Röntgendetektor angeordnetes Brechungsgitter der vorstehend beschriebenen Art.

Sofern die Röntgenquelle nicht bereits von Haus aus hinreichend kohärente Röntgenstrahlung emittiert, umfasst die Vorrichtung zusätzlich ein Kohärenzgitter, das der Röntgenquelle und dem Phasengitter zwischengeschaltet ist.

In einer zweckmäßigen Ausgestaltungsvariante umfasst die Vorrichtung zusätzlich ein Analysegitter, das dem Brechungsgitter und dem Röntgendetektor zwischengeschaltet ist. Wie vorstehend erwähnt, kann das Brechungsgitter dem Röntgendetektor in einer alternativen Ausführung der Vorrichtung aber auch unmittelbar vorgeschaltet sein.

In bevorzugten Verfahrensvarianten sind bei der Vorrichtung ferner ein oder mehrere der nachstehend beschriebenen Ausgestaltungsmerkmale verwirklicht

- F8 - Filterung der Spektren: Je schmaler das verwendete Röntgenspektrum ist, desto besser lässt sich die Geometrie auf dieses Spektrum optimieren (z.B. durch Wahl einer Design-Wellenlänge nahe der Mitte des Spektrums). Der spektrale Breite, die das Prismengitter verträgt, muss aufgrund der Abhängigkeit des Ablenk winkels von der Wellenlänge ($\alpha = \delta \cdot g$) die Bedingung $\lambda_{\max}/\lambda_{\min} = E_{\max}/E_{\min} \leq 3^{1/2}$ erfüllen (aus der fremden Pixelmitte muss mindestens eine halbe Pixelbreite $s_2/2$ und höchstens $3s_2/2$ abgelenkt werden. Es muss daher $\alpha_{\max}/\alpha_{\min} \leq 3$ gelten. Je schmaler das Spektrum ist, desto besser fokussiert das Brechungsgitter und desto bessere Sichtbarkeit ergibt sich bei größerem Schlitzanteil von z.B. 25%. Um ein möglichst schmales Spektrum zu erreichen, kann z.B. nahe der Röntgenröhre gefiltert werden (z.B. mittels einer flächigen Filterfolie oder Filterplatte) mit Materialien, welche das Spektrum anhand ihrer K_α -Kante begrenzen (also höhere Photonenenergien abschneiden). Im nieder-energetischen Bereich (z.B. bei einer Design-Wellenlänge von $\lambda_D \approx 25$ keV) bietet sich z.B. eine Filterung mit Antimon an, welches Wellenlängen $> 30,5$ keV stark absorbiert (beispielsweise Filterung mit $100\mu\text{m}$ Sb), bei Iod wird dagegen $> 33,2$ keV gedämpft. Im höherenergetischen Bereich bieten sich z.B. Tantal (67,4 keV), Wolfram (69,5 keV) oder Rhenium (71,7 keV) an, wenn die Design-Wellenlänge z.B. 60-65 keV beträgt. Natürlich gibt es bei anderen Design-Wellenlängen andere sinnvolle Materialien.

- F9 - "Zweidimensionale Formulierung des Phasenkontrastes": Optional werden die Phasenänderungen entlang der x-Achse und entlang der y-Achse gleichzeitig gemessen, z.B. unter Verwendung eines Kohärenzgitters G_0 , das zeilenweise und spaltenweise filtert. Bei einem Öffnungsanteil von $0 < q < 1$ in jeder der beiden Dimensionen passiert also lediglich q^2 der Intensität die Löcher in G_0 (z.B. mit $q = 30\%$ oder $q = 50\%$). In diesem Fall wird ein zweidimensionales Phasengitter G_1 eingesetzt, so dass ein schachbrettartiges Interferenzmuster (z.B. schwarze Schachbrettfelder dunkel, weiße hell) am Ort des Brechungsgitters G_L entsteht. Ein entsprechendes Brechungsgitter ist beispielsweise aus zwei Brechungsgittern der vorstehend beschriebenen Art mit diagonalem Layout gebildet, wobei diese Brechungsgitter um 90° gedreht übereinandergelegt sind, so dass sich überlappende stückweise Linsen in x-Richtung durch eines der beiden Brechungsgitter und überlappende stückweise Linsen in y-Richtung durch das andere Gitter ergeben.

[0049] Der Vorteil dieser Konstruktion liegt darin, dass es nun für jedes Pixel im Inneren des gemessenen Bildes mehrere Pfade gibt, entlang derer die Phase aufintegriert werden kann (je weiter in der Bildmitte, desto mehr Pfade lohnen sich oder haben größere Gewichte). Entsprechend lässt sich das Bildrauschen gegenüber dem eindimensionalen Fall durch Mittellung dieser Ergebnisse entlang verschiedener Pfade (in der Regel Linien) reduzieren.

[0050] Auch die in den Punkten F8 und F9 offenbarten Ausgestaltungsmerkmale können sowohl bei Brechungsgittern mit diagonalem Layout und Brechungsgittern mit streifenförmigem Layout eingesetzt werden und werden daher als eigenständige Erfindungen angesehen.

[0051] Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand einer Zeichnung näher erläutert. Darin zeigen:

FIG 1 in einer grob schematischen Schnittdarstellung eine Phasenkontrast-Röntgenbildgebungsvorrichtung mit einem Brechungsgitter,

FIG 2 in schematischer Ansicht auf eine Transversalfläche ausschnittshaft eine Ausführungsform des Brechungsgitters, wobei die Transversalfläche von diagonal verlaufenden Brechungsstegen und dazwischen angeordneten Zwischenräumen durchzogen ist, und wobei die Transversalfläche in eine Anzahl paralleler Brechungstreifen gegliedert sind, wobei je fünf Brechungstreifen auf einen gemeinsamen Fokus ausgerichtet sind ($N = 5$),

FIG 3 in Darstellung gemäß FIG 2 eine alternative Ausführung des Brechungsgitters für $N = 9$,

FIG 4 in Darstellung gemäß FIG 2 eine Variante des Brechungsgitters gemäß FIG 3, bei der der Verlauf der Brechungsstege innerhalb der Transversalfläche in gleichmäßig beabstandeten Knickstellen die Richtung ändert,

- FIG 5 in Darstellung gemäß FIG 2 eine weitere Variante des Brechungsgitters gemäß FIG 3, bei der der Verlauf der Brechungsstege innerhalb der Transversalfläche in gleichmäßig beabstandeten Knickstellen die Richtung ändert,
- 5 FIG 6 in neun Einzeldarstellungen gemäß FIG 2 verschiedene Ausführungsformen des Brechungsgitters, in denen eine Offset-Steigung des Brechungsgitters variiert ist,
- FIG 7 in sechs Einzeldarstellungen gemäß FIG 2 verschiedene Ausführungsformen des Brechungsgitters, an denen der Einfluss der Gradientenkompression (Punkt F1) demonstriert ist,
- 10 FIG 8 in acht Einzeldarstellungen gemäß FIG 2 verschiedene Ausführungsformen des Brechungsgitters, an denen die Optimierung des Aspektverhältnisses und der optischen Eigenschaften des Brechungsgitters mittels Gradientenvariation (Punkt F2), Änderung der Grundhöhe (Punkt F3), Einführung zentraler Spalte (Punkt F4) und Gradientenverschmälerung (Punkt F5) demonstriert ist,
- 15 FIG 9 in einem schematischen Diagramm die Auslegung von Gradienten bei Einsatz von Gradientenkompression (Punkt F1) und Gradientenvariation (Punkt F2),
- FIG 10 in vier Einzeldarstellungen gemäß FIG 2 verschiedene Ausführungsformen des Brechungsgitters, an denen die Optimierung des Aspektverhältnisses und der optischen Eigenschaften des Brechungsgitters mittels Dispersionskorrektur (Punkt F6) und Einführung zusätzlicher Phasensprünge (Punkt F7) demonstriert ist,
- 20 FIG 11 in schematischer Darstellung Möglichkeiten zur Vermeidung von Materialengstellen bei Brechungsstegen mit negativen Phasensprüngen,
- 25 FIG 12 in schematischer Darstellung Möglichkeiten zur Vermeidung von Materialengstellen bei Brechungsstegen mit positiven Phasensprüngen,
- FIG 13 in schematischer Darstellung für eine zweidimensionale Formulierung einer Phasenkontrast-Röntgenbildgebung die Zusammenwirkung zweier um 90° gegeneinander verdrehter Brechungsgitter,
- 30 FIG 14 in einem Diagramm die Sichtbarkeit (Visibilität) für verschiedene Ausführungsformen der Vorrichtung,
- FIG 15 in zwei Einzeldarstellungen gemäß FIG 2 verschiedene Ausführungsformen des Brechungsgitters, an denen die Realisierung besonders großer Minimal-Abstände innerhalb der Brechungsstege mittels Gradientenvariation (Punkt F2) demonstriert ist,
- 35 FIG 16 in drei Einzeldarstellungen gemäß FIG 2 verschiedene Ausführungsformen des Brechungsgitters, an denen die Realisierung von das Aspektverhältnis übersteigenden Gradienten demonstriert ist,
- 40 FIG 17 in zwei Einzeldarstellungen gemäß FIG 2 eine für die Anwendung in der Mammographie ausgebildete Ausführungsform des Brechungsgitters mit $N = 17$, wobei zur Einhaltung von Mindest-Abständen innerhalb der Brechungsstege zusätzliche Phasensprünge vorgesehen sind,
- 45 FIG 18 in zwei Einzeldarstellungen gemäß FIG 2 verschiedene Varianten einer weiteren Ausführungsformen des Brechungsgitters für $N = 17$, an denen die Realisierung besonders großer Minimal-Abstände innerhalb der Brechungsstege mittels Gradientenvariation (Punkt F2) demonstriert ist,
- FIG 19 in zwei Einzeldarstellungen gemäß FIG 2 weitere Varianten des Brechungsgitters gemäß FIG 18, bei denen zusätzlich eine Dispersionskorrektur (Punkt F6) vorgesehen ist,
- 50 FIG 20 in zwei Einzeldarstellungen zwei Varianten eines Brechungsstegs in einem zentralen Bereich eines diagonalen Layouts, wobei der Brechungssteg jeweils aufgelöst in einzelne Teilprismen dargestellt ist.
- 55 **[0052]** Einander entsprechende Teile und Größen sind in allen Figuren stets mit gleichen Bezugszeichen versehen.
[0053] Die in FIG 1 schematisch dargestellte (Phasenkontrast-Röntgenbildgebungs-)Vorrichtung 2 umfasst eine Röntgenquelle 4, ein Kohärenzgitter G_0 , ein Phasengitter G_1 , ein Brechungsgitter G_L , ein Analysegitter G_2 sowie einen aus einer Vielzahl von Pixeln P aufgebauten Röntgendetektor 6.

[0054] Dem Aufbau lässt sich dabei eine Systemachse (nachfolgend als optische Achse 8 bezeichnet) zuordnen, welche im Falle des Ausführungsbeispiels in einer z-Richtung ausgerichtet ist. Die einzelnen optischen Elemente der Röntgenvorrichtung 2 sind im Ausführungsbeispiel eben ausgestaltet, entlang dieser optischen Achse 8 angeordnet und jeweils senkrecht zu dieser ausgerichtet.

[0055] Die Röntgenvorrichtung 2 ist zur Gewinnung medizinischer differentieller Phasenkontrastbilder vorgesehen. Zur Bildaufnahme wird ein Patient zwischen dem Kohärenzgitter G_0 und dem Phasengitter G_1 , bevorzugt unmittelbar vor dem Phasengitter G_1 , positioniert. Die messtechnische Erfassung oder vielmehr die Ermittlung der durch den Patienten verursachten räumlichen Verteilung der Phasenverschiebung erfolgt bei der hier vorgestellten Röntgenvorrichtung 2 nach an sich bekanntem und beispielsweise in "X-ray phase imaging with a grating interferometer, T. Weitkamp et al., 8. August 2005/ Vol. 13, No. 16/OPTICS EXPRESS" beschriebenen Prinzip.

[0056] Das Kohärenzgitter G_0 weist eine Gitterkonstante (Gitterperiode) p_0 und eine (in z-Richtung gemessene) Gitterhöhe h_0 auf und dient zur Sicherstellung einer ausreichenden räumlichen Kohärenz der für die interferometrische Messmethode genutzten Röntgenstrahlung. Das Kohärenzgitter G_0 ist dabei typischerweise in einem Abstand von etwa 10cm zur Röntgenquelle 4 positioniert und weist in typischer Dimensionierung etwa die Abmessungen einer Briefmarke auf. In alternativer Ausgestaltung der Vorrichtung 2 ist anstelle einer räumlich ausgedehnten Röntgenstrahlungsquelle 4 eine in guter Näherung punktförmige Röntgenstrahlungsquelle eingesetzt, die bereits hinreichend kohärente Röntgenstrahlung emittiert. In diesem Fall entfällt das Kohärenzgitter G_0 .

[0057] Im Betrieb der Vorrichtung 2 emittiert die Röntgenstrahlungsquelle 4 Röntgenstrahlung mit einer Photonenenergie bis etwa 100keV. Für das vorzugsweise aus Gold (Au, $Z=79$) bestehende Kohärenzgitter G_0 ist in zweckmäßiger Dimensionierung eine Höhe h_0 von $1000\mu\text{m}$ und eine Gitterkonstante p_0 von $26,83\mu\text{m}$ gewählt.

[0058] In einem Abstand d_{01} von z.B. 1000mm in z-Richtung versetzt zum Kohärenzgitter G_0 ist das Phasengitter G_1 angeordnet. Dieses dient wie bei einem herkömmlichen Talbot-Lau-Interferometer zur Erzeugung eines streifenförmigen Interferenzmusters und weist hierzu eine streifenförmige Struktur mit Stegen und dazwischen gebildeten Schlitzen auf, wobei sich die Stege und Schlitze parallel zueinander in einer (senkrecht zu der z-Achse ausgerichteten) y-Richtung erstrecken. In der Darstellung gemäß FIG 1 ist die y-Achse senkrecht zur Zeichnungsebene ausgerichtet.

[0059] Das Phasengitter G_1 ist dabei derart ausgestaltet, dass die einfallende Röntgenstrahlung durch die Stege bei einer Photonenenergie von z.B. 65 keV eine Phasenverschiebung um ein Viertel der Wellenlänge, also um $\pi/2$, erfährt, während die im Bereich der Schlitze einfallende Röntgenstrahlung das Phasengitter G_1 ohne signifikante Phasenänderung durchläuft. Für die Höhe h_1 des Phasengitters G_1 wurde ein Wert von $42\mu\text{m}$ gewählt. Der Wert der Gitterkonstante (Gitterperiode) p_1 des aus Silizium (Si, $Z=14$) gefertigten Phasengitters G_1 beträgt in diesem Ausführungsbeispiel $1,42\mu\text{m}$. Alternativ kann das Phasengitter G_1 auch so gestaltet sein, dass es im Bereich seiner Stege eine Phasenverschiebung der Röntgenstrahlung um eine halbe Wellenlänge erzeugt. In diesem Fall ist die Gitterkonstante p_1 zu $2,84\mu\text{m}$.

[0060] In einem Abstand d_{1L} von z.B. 55,91 mm versetzt zum Phasengitter G_1 ist das Brechungsgitter G_L positioniert. Die Geometrie des Brechungsgitters G_L ist charakterisiert durch drei Achsen, die - entsprechend der bestimmungsgemäßen Orientierung des Brechungsgitters G_L in der Vorrichtung 2 - als x-Achse, y-Achse und z-Achse bezeichnet sind. Bestimmungsgemäß wird das Brechungsgitter G_L im Rahmen der Vorrichtung 2 derart angeordnet, dass seine z-Achse parallel zur optischen Achse 8, und somit zur z-Richtung und der gemittelten Strahlungsausbreitungsrichtung innerhalb der Vorrichtung 2 angeordnet ist. Die x-Achse und die y-Achse des Brechungsgitters G_L , die sowohl zur z-Achse als auch zueinander senkrecht ausgerichtet sind, spannen somit eine sich senkrecht zur Strahlungseinfallsrichtung erstreckende Transversalfläche 10 auf. In z-Richtung weist das Brechungsgitter G_L eine Gitterhöhe h_L von etwa $60\mu\text{m}$ auf.

[0061] Das Brechungsgitter G_L dient zur Manipulation des vom Phasengitter G_1 ausgehenden Röntgenstrahlungsfeldes und weist hierzu eine Gitterkonstante p_L von z.B. $1,5\mu\text{m}$ auf, die der Periodizität des durch das Phasengitter G_1 am Ort des Brechungsgitters G_L erzeugten Interferenzmusters entspricht. Die Periodizität der Struktur des Brechungsgitters G_L ist durch $N \times p_L$ gegeben, wobei N eine natürliche, vorzugsweise ungerade Zahl ($N = 3, 5, \dots$) ist. Im Ausführungsbeispiel gemäß FIG 2 weist N beispielsweise den Wert 5 auf ($N = 5$).

Entsprechend der Gitterkonstante p_L ist die in FIG 2 ausschnitthaft in größerem Detail dargestellte Transversalfläche 10 des Brechungsgitters G_L in einzelne langgestreckte Brechungsstreifen 12 (FIG 2) gegliedert, die sich in y-Richtung jeweils über die gesamte Transversalfläche 10 erstrecken und in x-Richtung parallel nebeneinander aufgereiht sind. Die Brechungsstreifen 12 weisen eine einheitliche (in x-Richtung gemessene) Streifenbreite s_L auf, die der Hälfte der Gitterkonstante p_L entspricht ($s_L = 0,5 \cdot p_L$). Je zwei benachbarte Brechungsstreifen 12 haben somit zusammen eine der Gitterkonstante p_L entsprechende Breite. Wie vorstehend erwähnt, wird exemplarisch diejenige Stirnfläche des Brechungsgitters G_L mit der Transversalfläche 10 identifiziert, die der Röntgenquelle 4 zugewandt ist und an der somit die Röntgenstrahlung in das Brechungsgitter G_L einfällt.

Wie in FIG 1 angedeutet, ist jeder Brechungsstreifen 12 auf einen zugeordneten Fokus F ausgerichtet. Mit anderen Worten ist die in z-Richtung über dem jeweiligen Brechungsstreifen 12 angeordnete Materialstruktur des Brechungsgitters G_L derart gewählt, dass die in diesem Brechungsstreifen 12 einfallende Röntgenstrahlung in den zugehörigen Fokus F gebrochen wird. Benachbarte Brechungsstreifen 12 sind dabei stets auf verschiedene Fokuse F ausgerichtet. Die Zahl N beschreibt dabei die Anzahl der Brechungsstreifen 12, die auf einen gemeinsamen Fokus F ausgerichtet

sind. Diese auf einen gemeinsamen Fokus F ausgerichteten Brechungsstege 12 sind - wie bereits vorstehend - als Fokussierungsgruppe bezeichnet. Die Zahl N ist für alle Fokussierungsgruppen einheitlich gewählt und stellt somit eine globale Eigenschaft des Brechungsgitters G_L dar. Mit anderen Worten umfasst jede Fokussierungsgruppe des Brechungsgitters G_L die gleiche Anzahl (im Beispiel gemäß FIG N=5) an zugehörigen Brechungsstreifen 12.

[0062] Sofern die Anzahl N ungerade ist, weist jede Fokussierungsgruppe einen neutralen Brechungstreifen 12a auf, in dem einfallende Röntgenstrahlung nicht oder nur in vernachlässigbarem Ausmaß gebrochen wird. Um den neutralen Brechungstreifen 12a sind symmetrisch die weiteren Brechungsstreifen 12 der Fokussierungsgruppe (bei N=5 beidseitig je zwei weitere Brechungsstreife 12b und 12c) angeordnet, deren Brechungswirkung mit zunehmenden Abstand zu dem neutralen Brechungstreifen 12a zunimmt. Da das einfallende Interferenzmuster streifenförmig ist und daher keine oder nur geringe Änderung in y-Richtung aufweist, wird hier und im Folgenden nur die Strahlungsbrechung in x-Richtung betrachtet. Etwaige Anteile der Strahlungsbrechung in y-Richtung werden vernachlässigt.

[0063] Da die Gitterkonstante p_L des Brechungsgitters G_L der Periode des von dem Phasengitters P_1 am Ort des Brechungsgitters G_L erzeugten Interferenzmusters entspricht, werden Interferenzmaxima und Interferenzminima des Interferenzmusters in jeweils verschiedene Fokusse F gebrochen. Die benachbarten Fokussierungsgruppen sind hierbei, wie in FIG 1 schematisch angedeutet ist, gleichmäßig ineinander verschachtelt.

[0064] Die dem Brechungsgitter G_L zugeordneten Fokusse F sind in einer (in z-Richtung von dem Brechungsgitter G_L um einen Abstand d_{L2} von z.B. $43,92\mu\text{m}$ beabstandeten) Fokusebene angeordnet, in der das Analysegitter G_2 positioniert wird. Die Abstände der Fokusse F entsprechen dabei der halben Gitterkonstante p_2 des Analysegitters G_2 , das eine streifenförmige Struktur aus Stegen und Schlitz (Spalten) aufweist, so dass die Fokusse F alternierend in den Stegen und Schlitz des Analysegitters G_2 liegen. Somit werden durch das Brechungsgitter G_L - je nach der relativen x-Position des Kohärenzgitters G_1 , des Brechungsgitters G_L und des Analysegitters G_2 - je N Interferenzmaxima (oder Interferenzminima) auf einen Schlitz des Analysegitters G_2 fokussiert, während die dazwischen liegenden Interferenzminima (bzw. Interferenzmaxima) auf die benachbarten Stege des Analysegitters G_2 fokussiert werden. Die Gitterhöhe h_2 des Analysegitters G_2 beträgt beispielsweise $400\mu\text{m}$, die Gitterkonstante p_2 beispielsweise $7,81\mu\text{m}$.

[0065] Die Ausdehnungen der Gitter G_1 , G_L , G_2 in x-Richtung und in y-Richtung sind im Ausführungsbeispiel gemäß FIG 1 im Wesentlichen gleich. Abweichend von der schematischen Darstellung gemäß FIG 1 entspricht die Ausdehnung des Brechungsgitters G_L und des Analysegitters G_2 in x-Richtung und in y-Richtung vorzugsweise etwa der Ausdehnung des Röntgendetektors 6, genauer der von den Pixeln P des Röntgendetektors 6 aufgespannten Detektorfläche. Ebenso wie bei dem Kohärenzgitter G_0 bestehen auch bei dem Phasengitter G_1 und dem Analysegitter G_2 die jeweiligen Stege vorzugsweise aus Gold.

[0066] Aufgrund der Wirkung des Brechungsgitters G_L , Interferenzmaxima und Interferenzminima des Interferenzmusters zu separieren und jeweils gruppenweise zu fokussieren, lässt sich das Analysegitter G_2 gröber strukturieren als bei einem herkömmlichen Talbot-Lau-Interferometer, ohne dass sich hierdurch die Sichtbarkeit (Visibilität) des Interferenzmusters signifikant verändert. Während also bei einem herkömmlichen Talbot-Lau-Interferometer nach dem Stand der Technik bei einem vergleichbaren Aufbau, allerdings ohne Brechungsgitter G_L , ein Wert für die Gitterkonstante p_2 von etwa 1,5 bis $2\mu\text{m}$ gewählt werden würde, liegt der Wert der Gitterkonstante p_2 bei der Vorrichtung 2 gemäß FIG 1 und N = 5 bei dem Fünffachen dieses Wertes.

[0067] Betrachtet man die Wirkung des Brechungsgitters G_L auf fünf unmittelbar benachbarte Strahlen gleicher Phase, dann entspricht diese der Wirkung einer Sammellinse, in deren Fokus F das Analysegitter G_2 positioniert ist. Das Brechungsgitter G_L ist deshalb auch als Linsengitter bezeichnet.

[0068] Zur Erzielung der strahlungsbrechenden Wirkung ist das Brechungsgitter G_L aus einer Anzahl von näherungsweise parallelen Brechungsstegen 14 aus Gold gebildet, zwischen denen Zwischenräume 16 gebildet sind. Bei den Zwischenräumen 16 kann es sich um luftgefüllte Lücken handeln. Alternativ können die Zwischenräume 16 allerdings auch durch Zwischenstege aus Photolack ausgefüllt sein. Die Brechungsstege 14 und die gegebenenfalls vorhandenen Zwischenstege sind auf einer Grundplatte 17 (FIG 1) des Brechungsgitters G_L aufgebaut, die parallel zu der Transversalfläche 10 ausgerichtet ist und im Beispiel gemäß FIG 1 exemplarisch die hintere (von der Röntgenquelle 4 abgewandte) Stirnfläche des Brechungsgitters G_L bildet.

Das Brechungsgitter G_L wird vorzugsweise mittels des LIGA-Verfahrens hergestellt. Hierzu wird eine strahlungsabsorbierende Maske (z.B. aus Gold) über einer auf die Grundplatte 17 aufgebrachten, beispielsweise etwa $100\mu\text{m}$ dicken, Photolackschicht positioniert und mit Röntgenstrahlung (Belichtungsstrahlung) belichtet. Durch anschließende Entwicklung lösen sich aus der Photolackschicht Füllbereiche in Form von Löchern oder Gräben heraus, die eine Negativform für die herzustellenden Brechungsstege 14 bilden. Diese Füllbereiche werden in einem nachfolgenden Galvanik-Prozessschritt mit Metall, insbesondere Gold aufgefüllt. Der in den Zwischenräumen 16 verbleibende Photolack kann nach der Herstellung der Brechungsstege 14 zur Bildung der Zwischenstege belassen oder zur Bildung der Lücken herausgelöst werden.

Die Struktur der im LIGA-Verfahren verwendeten Maske entspricht der Materialstruktur, die an der Transversalfläche 10 des fertigen Brechungsgitters G_L sichtbar ist. Ein Beispiel für diese (nachfolgend auch als Layout bezeichnete) Materialstruktur ist ausschnitthaft in FIG 2 dargestellt. Die (den Goldstrukturen der Maske entsprechenden) Brechungs-

stege 14 sind hierbei als dunkle Flächen dargestellt. Die (den Lücken der Maske) entsprechenden Zwischenräume 16 sind als weiße Flächen dargestellt.

[0069] Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass sich die Brechungsstege 14 (und entsprechend auch die Zwischenräume 16) diagonal - also unter einem 0° überschreitenden und 90° unterschreitenden Winkel gegen die - Achse - über die Transversalfläche 10 ziehen. Alle Brechungsstege 14 haben bis auf etwaige Randeffekte (d.h. abgeschnittene Teilvolumina an den Rändern des Brechungsgitters G_L) die gleiche Form. Die Brechungsstege 14 sind dabei in y-Richtung parallelverschoben zueinander angeordnet, so dass die Materialstruktur in der Transversalfläche 10 eine Periodizität mit einer Periodenlänge p_y aufweist.

[0070] Die beiden Seitenflächen 18, über die jeder Brechungssteg 14 von dem benachbarten Zwischenraum 16 abgegrenzt ist, sind gegliedert durch eine Abfolge von "steilen" Teilflächen 20, sich mit vergleichsweise starker Steigung durch die Transversalfläche 10 ziehen, und "flachen" Teilflächen 22, die in der Transversalfläche 10 eine nur geringe (Offset-)Steigung aufweisen (oder z.B. im Ausführungsbeispiel gemäß FIG 4) teilweise sogar horizontal (d.h. in der Transversalebene 10 in x-Richtung) verlaufen.

[0071] In jeder der Seitenflächen 18 folgen die steilen Teilflächen 20 und flachen Teilflächen 22 in der Regel alternierend aufeinander, wobei sich jede Teilfläche 20 oder 22 jeweils über die volle Streifenbreite s_L eines Brechungsstreifens 14 erstreckt. Die steilen Teilflächen 20 und flachen Teilflächen 22 der beiden Seitenflächen 18 eines Brechungsstegs 14 sind dabei streifenweise versetzt zueinander angeordnet. In Brechungsstreifen 12, in denen eine der beiden Seitenflächen 18 eines Brechungsstegs 14 eine steile Teilfläche 22 aufweist, hat die andere Seitenfläche 18 eine flache Teilfläche 20, und umgekehrt.

[0072] Eine Ausnahme von dieser Regel bilden die neutralen Brechungsstreifen 12a, im Bereich derer jeweils beide Seitenflächen 18 flache Teilflächen 22 aufweisen. In der Umgebung der neutralen Brechungsstreifen 12a erstrecken sich die flachen Teilflächen 22 daher über jeweils über die volle Breite zweier Brechungsstreifen 12.

[0073] Den steilen Teilflächen 20 und flachen Teilflächen 22 sind mitunter senkrechte Sprungflächen 24 zwischengeschaltet, die in der Transversalfläche 10 in y-Richtung verlaufen.

[0074] Das Brechungsgitter G_L ist im LIGA-Verfahren unter Schrägbelichtung hergestellt. Die Maske wird hierbei mit Belichtungsstrahlung belichtet, deren Strahlverlauf schräg in der z-Ebene ausgerichtet ist. Die Neigung des Strahlverlaufs gegen die z-Richtung beträgt dabei in zweckmäßiger Ausführung zwischen 2° und 30° und insbesondere zwischen 5° und 15° .

[0075] Die Brechungsstege 14 haben daher im dreidimensionalen Raum jeweils die Form eines schrägen Prismas. Bis auf etwaige Randeffekte haben die Brechungsstege 14 daher in der Transversalebene 10 und der dieser in z-Richtung gegenüberliegenden Stirnfläche des Brechungsgitters G_L - der Grundfläche bzw. Deckfläche eines Prismas entsprechend - parallele, kongruente und polygonale Flächenabschnitte, die zueinander in y-Richtung verschoben sind. Die Kanten der Seitenflächen 18 sind in z-Ebene um einen dem Einstrahlwinkel der Belichtungsstrahlung entsprechenden Winkel geneigt. Diese Neigung ist derart auf die Gitterhöhe h_L abgestimmt, dass sich die Kanten der Seitenflächen 18 in y-Richtung über genau eine Periodenlänge p_y erstrecken. Hierdurch ergibt sich in der Transversalfläche 10 und der gegenüberliegenden Stirnfläche des Brechungsgitters G_L eine identische, in Blickrichtung entlang der z-Achse exakt überlappende (fluchtende) Materialstruktur.

[0076] Zur Visualisierung der optischen Eigenschaften des Brechungsgitters G_L lassen sich die Brechungsstege 14 gedanklich untergliedern in

- aktive Teilprismen mit jeweils dreieckiger Grundfläche, wobei jeweils eine Kante dieser Grundfläche eine der steilen Teilflächen 20 begrenzt, sowie in
- passive Teilprismen mit parallelogrammförmiger (oder rechteckiger) Grundfläche, wobei jeweils eine Kante dieser Grundfläche eine der flachen Teilflächen 22 begrenzt.

[0077] Im Rahmen der Vorrichtung 2 erzeugt die steile Teilfläche 20 jedes aktiven Teilprismas eine vergleichsweise starke Brechung der entlang der optischen Achse 8 einfallenden Röntgenstrahlung in x-Richtung. Die steilen Teilflächen 20 sind daher auch als "aktive" Teilflächen 20 bezeichnet.

[0078] Die flache Teilfläche 22 eines jeden passiven Teilprismas erzeugt andererseits keine oder nur eine vernachlässigbare Brechung der entlang der optischen Achse 8 einfallenden Röntgenstrahlung in x-Richtung. Die flachen Teilflächen 22 sind daher auch als "passive" Teilflächen 22 bezeichnet. Die passiven Teilprismen dienen zur mechanischen Verbindung der aktiven Teilprismen und sind aus herstellungstechnischen Gründen vorgesehen, um die minimal fertigen Materialbreiten einzuhalten.

[0079] Die Gliederung der Brechungsstege 14 in aktive und passive Teilprismen ist in der Darstellung gemäß FIG 2 im Bereich des zweiten Brechungsstreifens 12 von links - dort an dem mittleren Brechungssteg 14 veranschaulicht. Aus der Darstellung ist erkennbar, dass das dortige aktive Teilprisma in y-Richtung eine Materialhöhe y_g hat, während das passive Teilprisma eine Materialhöhe y_m hat. Die benachbarten Zwischenräume 16 haben hier jeweils eine in y-Richtung gemessene Breite y_f .

[0080] Im Beispiel gemäß FIG 2 geben y_m die minimal fertigmögliche Materialhöhe, und y_g die minimal fertigmögliche Zwischenraumbreite in y-Richtung an.

[0081] Die vertikale Periodenlänge p_y im Layout besteht dabei also

- 5 - erstens aus einem festen y-Anteil an Material, nämlich hier der Materialhöhe y_m ,
- zweitens einem variablen Anteil je Brechungsstreifen 12, hier der Materialhöhe y_g , der den eigentlichen Gradienten sowie etwaige Phasensprünge (z.B. im Rahmen einer Dispersionskorrektur gemäß Punkt F6 oder im Rahmen zusätzlicher Phasensprünge gemäß Punkt F7) und die Grundhöhe codiert und zwischen Materialanteilen 0% bis 100% variieren kann, sowie
- 10 - drittens einem festen y-Anteil an Freiraum mit der Breite y_f .

Es gilt also:

$$15 \quad p_y = y_m + y_g + y_f.$$

Die Höhe $(h/p_y)(y_m + y_f)$ repräsentiert dabei eine zusätzliche Höhe, die nichts zum maximalen Gradienten beiträgt und somit quasi "verschnitten" bildet. Der Verschnitt-Anteil sinkt mit steigender y-Periode p_y , also mit steigender Materialhöhe h bzw. zunehmender Abweichung von der senkrechten Belichtungsrichtung, da er im wesentlichen vom Fertigungsprozess abhängt, also weitgehend unabhängig von Materialhöhe h und Belichtungswinkel ist. Bei z.B. $g = 70$ (stärkster Gradient $\Delta z/\Delta x$) und einem Belichtungswinkel, der 15° von der Senkrechten abweicht, sowie $y_m = y_f = s_L$ ergibt sich beispielsweise

$$25 \quad p_y = 20,76 s_L = h \tan(15^\circ) = 70 \tan(15^\circ) + 2 s_L,$$

also

$$h = 77,46 s_L = (70 + 2/\tan(15^\circ)) s_L$$

und damit einen Anteil des Gradienten an der Gesamthöhe von

30

$$y_g/p_y = g s_L/h = 90,4\%.$$

Bei einem diagonalen Materialstreifen (z.B. von links unten nach rechts oben in der Transversalebene 10, wie in FIG 2 abgebildet) codiert in jedem x-Streifen der Breite s_L von G_L eine Kante (hier z.B. die obere) von links nach rechts kontinuierlich oder sprunghaft zunehmende Materialdicke, die andere Kante (hier z.B. die untere) von links nach rechts kontinuierlich oder sprunghaft abnehmende Materialdicke.

[0082] Jede der Kanten verläuft dabei zunächst (in der 'reinen' Formulierung) entweder von links nach rechts oder von unten nach oben oder in einer Mischung der beiden Richtungen, jedoch vorzugsweise niemals nach rechts-unten oder nach links-oben. Dies wird erreicht, indem benachbarte Spalten passend aneinandergefügt werden (alle Strukturen und damit alle Kanten wiederholen sich natürlich in y-Richtung periodisch wie für die Schrägbelichtung gefordert). Wenn an einer Streifengrenze in y-Richtung dabei die Materiallänge in y in der linken Spalte größer ist als in der rechten, so werden die Spalten am oberen (positiven Ende in y-Richtung) aufeinander ausgerichtet (unten entsteht dann ggf. ein Sprung in y), ansonsten am unteren Ende (dem in negativer y-Richtung) aneinandergefügt (es kann ein Sprung am oberen Ende entstehen). Dadurch werden alle Winkel im Layout rechtwinklig oder flacher, was die Auswirkungen von Ecken-Verrundungen aufgrund des prozessbedingten Radius reduziert.

[0083] Das Brechungsgitter G_L hat in jedem Brechungsstreifen 12 überall den gleichen optisch wirksamen Gradienten $g = \Delta z/\Delta x$, also die gleiche Steigung der jeweiligen aktiven Teilflächen 20 der Brechungsstege 14 in der xz-Ebene (für die neutralen Brechungsstreifen 12a gilt hierbei $g \approx 0$). In den einer Fokussierungsgruppe zugeordneten Brechungsstreifen 12 ist der Gradient regelmäßig unterschiedlich stark ausgeprägt. Um dies zu veranschaulichen, sind die aktiven Teilflächen 20 der fünf einer Fokussierungsgruppe zugeordneten Brechungsstreifen 12a, 12b und 12c in FIG 2 jeweils durch rechteckige Rahmen hervorgehoben.

[0084] FIG 3 zeigt eine Variante des Brechungsgitters G_L mit ähnlichem Layout wie in FIG 2, allerdings für $N = 9$.

[0085] FIG 4 und 5 zeigen Varianten des Brechungsgitters G_L gemäß FIG 3 (ebenfalls für $N = 9$ und einer Offset-Steigung von 50%), bei denen Knickstellen DK in dem diagonalen Layout vorgesehen sind, so dass die Brechungsstege 14 in der Transversalebene 10 um die x-Achse mäandrieren und somit alternierend abschnittsweise diagonal in positive y-Richtung und in negative y-Richtung verlaufen. In der Ausführungsform gemäß FIG 4 sind die Knickstellen DK in den

neutralen Brechungsstreifen 12a vorgesehen. In der Ausführungsform gemäß FIG 5 sind die Knickstellen DK jeweils in den Brechungsstreifen 12 mit dem schwächsten aktiven Teilprismen, also dem kleinsten von Null verschiedenen Gradienten g vorgesehen. Den schwächsten aktiven Teilprismen ist gemäß FIG 5 zusätzlich Grundhöhe (Punkt F3) hinzugefügt für ein besseres Material-Aspektverhältnis in Richtung der Brechungsstreifen 12 mit den zweitstärksten Teilprismen.

[0086] In den Spalten der FIG 6 sind verschiedene diagonale Layouts für $N=5$ mit unterschiedlicher Offset-Steigung der passiven Teilflächen 22 dargestellt (Offset-Steigung von der linken Spalte zur rechten Spalte: 0%, 50%, 100%). In der oberen Zeile sind hierbei jeweils diagonale Layouts ohne Knickstellen DK dargestellt, in der mittleren Zeile - analog zu FIG 4 - diagonale Layouts mit Knickstellen DK in den neutralen Brechungsstreifen 12a und in der unteren Zeile - analog zu FIG 5 - diagonale Layouts mit Knickstellen DK in den Brechungsstreifen 12 mit dem schwächsten aktiven Teilprismen.

[0087] In FIG 7 ist die Wirkung der vorstehend unter Punkt F1 erläuterten Gradientenkompression dargestellt. In der linken Spalte ist dieser Effekt für streifenförmige Layouts gezeigt, wie sie grundsätzlich in WO 2013/160 153 A1 offenbart sind. In der rechten Spalte ist die Wirkung der Gradientenkompression für diagonale Layouts veranschaulicht. In der oberen Zeile sind die jeweiligen Layouts ohne Gradientenkompression dargestellt. Darunter ist in der mittleren Spalte jeweils das entsprechende Layout mit Gradientenkompression ($c=150\%$) dargestellt. Die hier eingefügten Pfeile weisen auf die im Vergleich zu den Layouts der oberen Zeile verschobenen Ecken hin. In der unteren Zeile sind Ausschnitte der jeweils darüber liegenden Layouts vergrößert dargestellt.

[0088] Es ist erkennbar, dass die - in der Transversalebene 10 gebildeten - Gradienten $\Delta y/\Delta x$ aller aktiven Teilflächen 20 infolge der Gradientenkompression auf 150% gesteigert werden. Bei den stärksten Teilprismen ("++P") sowie - weniger ausgeprägt - auch bei den zweitstärksten Teilprismen ("+P") wird der Gradient dadurch auf weniger als die Streifenbreite eingeschränkt. Dargestellt ist der Fall, dass der Gradient in der Mitte des jeweiligen Brechungsstreifens 12 realisiert wird, dass also der Gradient in x-Richtung von beiden Seiten gleichmäßig komprimiert wird. Eine Verschiebung des Gradienten zu einem der Ränder des jeweiligen Brechungsstreifens 12 ist alternativ auch möglich.

[0089] In FIG 8 sind Optionen zur Verbesserungen der Aspektverhältnisse für streifenförmige Layouts gemäß WO 2013/160 153 A1 (linke Spalte) bzw. diagonale Layouts (rechte Spalte) mittels folgender Maßnahmen veranschaulicht:

- F2: Gradientenvariation,
- F3: Variation der Grundhöhe,
- F4: Einführung zentraler Spalte und
- F5: Gradientenversmälnerung

[0090] In der oberen Zeile der FIG 8 sind hierbei reguläre Layouts für $N=9$ ohne aspektverhältnisoptimierende Maßnahmen dargestellt. Die hier hinzugefügten Pfeile deuten Stellen an, an denen in den darunter abgebildeten Layouts mittels der Maßnahmen F2 und F3 Minimal-Abstände im Material der Brechungsstege 14 bzw. in den Zwischenräumen 16 verbessert sind. Kritische Minimalabstände sind durch Radien veranschaulicht.

[0091] In der zweiten Zeile von oben sind entsprechende Layouts abgebildet, in denen die kritischen Minimalabstände mittels Gradienten-Variation (Punkt F2) verbessert sind (die hier eingetragenen Pfeile deuten Veränderungen gegenüber der oberen Zeile an). Bei dem diagonalen Layout (rechte Spalte) werden Gradienten auch verringert, um Material zu reduzieren oder Gradienten einander anzunähern.

[0092] In der dritten Zeile von oben sind entsprechende Layouts abgebildet, in denen die kritischen Minimalabstände durch Variation der Grundhöhe (Punkt F3) verbessert sind (die hier eingetragenen Pfeile deuten Veränderungen gegenüber der oberen Zeile an). Hierdurch werden der Freiraum-Abstand zum stärksten Teilprisma vergrößert und Material reduziert.

[0093] In der unteren Zeile sind entsprechende Layouts abgebildet, in denen in denen die kritischen Minimalabstände durch Gradienten-Versmälnerung (Punkt F5) verbessert wurden. Die hier eingefügten Pfeile deuten wiederum Veränderungen gegenüber der oberen Zeile an). Ferner wurden bei dem streifenförmigen Layout in der linken Spalte in den zentralen Spalten, also den neutralen Brechungsstreifen 12a gemäß der vorstehend unter dem Punkt F4 beschriebenen Maßnahme Zwischenräume eingefügt.

[0094] FIG 9 verdeutlicht in einem Diagramm die Auslegung von Gradienten für Gradientenkompression (Punkt F1) und Gradienten-variation (Punkt F2). Gezeigt ist, wie sich im Standardfall ("Zielposition=0%", dicke schwarze Linie) die Gradienten der Streifen von c (h/s_L) linear bis zur zentralen Spalte auf 0 reduzieren. Für den Fall der Gradientenvariation (Punkt F2) sieht man, dass sich die Gradienten auch linear bis auf andere Positionen als den zentralen Streifen auf 0 absenken lassen. Dies führt zu einer Situation, in der alle Streifen die dort vom extremen Streifen (d.h. den stärksten Teilprismen) abgebildete Wellenlänge ebenfalls dorthin abbilden. Bei schwächeren Teilprismen sinkt aber der Bereich, in dem die unterschiedlichen Wellenlängen abgebildet werden stark, so dass man in der Praxis beispielsweise Zielpositionen zwischen -35% und +35% (bezogen auf Radius eines "Pixels" in G_2 , also $N s_L/2$) wählen kann, um die Fertigung des Layouts zu erleichtern bzw. zu verbessern. Optimistisch gesehen erlauben alle Ziel-Positionen zwischen -100%

und +100%, dass die Intensitäts-Maxima aller Wellenlängen für alle Teilprismen im Zielbereich der Breite s_2 bleiben. Allerdings führen die Breite des Beugungsbereiches und die Anzahl an Öffnungen in G_0 häufig zu einer engeren Wahl der Zielpositionen. Als besonders geeignet werden Zielpositionen zwischen -35% und +35% empfohlen.

[0095] In FIG 10 ist die Optimierung von streifenförmigen Layouts gemäß WO 2013/160 153 A1 (linke Spalte, S_L) bzw. diagonalen Layouts (rechte Spalte D_L) durch folgenden Maßnahmen veranschaulicht:

- F6: Dispersionskorrektur und
- F7: Einführung zusätzlicher Phasensprünge.

[0096] In der oberen Zeile der FIG 10 sind hierbei wiederum reguläre Layouts für $N=7$ ohne aspektverhältnisoptimierende Maßnahmen dargestellt. In der unteren Zeile sind die entsprechenden, durch die Maßnahmen F6 und F7 optimierten Layouts dargestellt.

[0097] Wie erkennbar, wird durch die Maßnahme F6 Material weggenommen, was die Dispersion reduziert, aber an sich zu schwer fertigmachen Engstellen führen würde. Durch die Maßnahme F7 wird an anderer Stelle Material hinzugefügt, wodurch diese Engstellen zur Erleichterung der Fertigung verbreitert werden. Die dadurch wiederum erhöhte Dispersion ist im Bereich der kleinen Gradienten - wo diese Maßnahme eingesetzt wird - tolerabel.

[0098] In der Abbildung wurde jeweils ein einziger Sprung gewählt der sich in der Spaltmitte befindet. Dies kann natürlich variiert werden.

[0099] Die FIG 11 und 12 zeigen schematisch Möglichkeiten zur Veränderung der Form der Brechungsstege 14 zur Realisierung von negativen und positiven Phasensprüngen unter Vermeidung von schwer zu fertigenden Engstellen.

[0100] FIG 13 zeigt schematisch zwei aufeinandergelegte und um 90° gegeneinander verdrehte Brechungsgitter G_L für eine zweidimensionale Formulierung des Phasenkontrastes (wie vorstehend unter Punkt F9 erläutert). Gezeigt sind Wirkungsbereiche 26a-26c der einzelnen Fokussierungsgruppen, d.h. derjenigen Bereiche, auf die diese fokussieren. Mit einem Kreuz aus durchgezogenen Linien gekennzeichnet sind diejenigen Wirkungsbereiche 26a, in die aus beiden Brechungsgittern G_L jeweils die in der FIG 13 dunkel unterlegten Brechungsstreifen 12d fokussieren. Mit einem Kreuz aus gestrichelten Linien gekennzeichnet sind diejenigen Wirkungsbereiche 26b, in die aus beiden Brechungsgittern G_L jeweils die in der FIG 12 weiß unterlegten Brechungsstreifen 12e fokussieren. Gemischte Wirkungsbereiche 26c, in die aus einem der Brechungsgitter G_L die dunkel unterlegten Brechungsstreifen 12d, und aus dem anderen Brechungsgitter G_L die weiß unterlegten Brechungsstreifen 12e fokussieren, sind mit einem Kreuz aus einer durchgezogenen und einer gestrichelten Linie gekennzeichnet.

[0101] Die in FIG 13 gezeigten Brechungsgitter G_L sind mit jeweils einem streifenförmigen Layout ausgestaltet, wie es in WO 2013/160 153 A1 beschrieben ist. Alternativ hierzu können die gekreuzten Brechungsgitter G_L auch mit diagonalem, z.B. gemäß einem der FIG 2 bis 6 gestaltetem Layout ausgeführt sein.

[0102] Die FIG 14 bis 19 zeigen konkrete Simulationen.

[0103] FIG 14 zeigt zunächst Simulationsergebnisse, die den Einfluss des Brechungsgitters G_L und der hieran gegebenenfalls vorgenommenen Gradientenkompression (Punkt F1) auf die Sichtbarkeit verdeutlichen. Simuliert wurde eine Vorrichtung 2 mit $d_{01}=500\text{mm}$, einer Design-Energie der Röntgenstrahlung von 19,5 keV, einer Wolfram-Röhre mit 30 kVp und einer Filterfolie aus $70\mu\text{m}$ Palladium, wobei in der Vorrichtung 2 teilweise ein Brechungsgitter G_L mit $N=5$ eingesetzt wurde.

[0104] Dargestellt ist die Sichtbarkeit in Abhängigkeit von Randbedingungen. Im Einzelnen wurden die nachfolgend von links nach rechts aufgezählten Messpunkte für folgende Randbedingungen simuliert:

- "0% p_0 + G_L ": Punktquelle mit Brechungsgitter G_L ,
- "0% p_0 Point Source": Punktquelle ohne Brechungsgitter G_L , sondern nur mit den Gittern G_0 , G_1 und G_2 ,
- "1x30% p_0 slit": G_0 mit 30% offenen Schlitzen ohne Brechungsgitter G_L ,
- "1x30% + G_L (IrM, grad=60)": G_0 mit einem offenem 30%-Schlitz mit Brechungsgitter G_L (Photolack, Gradient=60, also sehr schwache Brechung),
- "1x30% + G_L 117%": wie "1x30% + G_L (IrM, grad=60)" mit Kompression $c=117\%$,
- "1x30% + G_L 133%": wie "1x30% + G_L (IrM, grad=60)" mit Kompression $c=133\%$,
- "1x30% + G_L 150%": wie "1x30% + G_L (IrM, grad=60)" mit Kompression $c=150\%$,
- "1x30% + G_L 167%": wie "1x30% + G_L (IrM, grad=60)" mit Kompression $c=167\%$,
- "1x30% + G_L 183%": wie "1x30% + G_L (IrM, grad=60)" mit Kompression $c=183\%$,
- "1x30% + G_L 200%": wie "1x30% + G_L (IrM, grad=60)" mit Kompression $c=120\%$.

[0105] Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass bei Einsatz des Brechungsgitters G_L eine optimale Sichtbarkeit für eine Gradientenkompression von $c=117\%$ erreicht wird. Eine stärkere Gradientenkompression von $c=133\%$ verschlechtert die Sichtbarkeit allerdings nur wenig (ca. 2%).

[0106] FIG 15 zeigt das Ergebnis einer Simulation für $s_L=1,0\mu\text{m}$, in der durch Gradientenvariation (Punkt F2) mit einem

diagonalen Layout Minimalabstände von $1,7\mu\text{m}$ sowohl in den Zwischenräumen als auch im Material der Brechungsstege 14 realisiert wurden (in der Darstellung wurden die Längen in y-Richtung auf 80% ihrer tatsächlichen Länge gestaucht für größtmögliche Darstellung).

[0107] Das obere Bild zeigt hierbei ein Layout mit einer Gradientenkompression von $c=133\%$ und geringer Grundhöhe, aber ohne Gradientenvariation. Eingefügte $1,7\mu\text{m}$ -Radien veranschaulichen die erforderlichen Mindestabstände. Die ebenfalls eingefügten Pfeile zeigen Verletzungen dieser Mindestabstände an. Das untere Bild zeigt ein durch zusätzliche Gradientenvariation (Punkt F2) optimiertes Layout. Der Mindestabstand von $1,7\mu\text{m}$ ist hier überall eingehalten.

[0108] FIG 16 zeigt streifenförmige Layouts für $N=7$, einer Streifenbreite von $1,0\mu\text{m}$, Minimalbreiten von $0,88\mu\text{m}$ und einer Bauhöhe von $87\mu\text{m}$, bei denen der maximale Gradient größer als das Aspektverhältnis ist. In den Bildern sind wiederum Mindestradien eingetragen. Eingefügte Pfeile weisen wiederum auf deren Verletzung hin.

[0109] Das linke obere Bild zeigt ein theoretisches Layout, bei dem die Brechungsstege 14 nur Gradienten ausbilden und keinerlei Grundhöhe vorhanden ist. Es ist erkennbar, dass hier an zahlreichen Stellen der Transversalfläche 10 die Mindestabstände nicht eingehalten sind. Das rechte obere Bild zeigt ein durch Gradientenvariation (Punkt F2), Variation der Grundhöhe (Punkt F3) und Gradientenverschmälerung (Punkt F5) verbessertes Layout, das aber noch keine Phasensprünge aufweist. Das untere Bild zeigt ein optimiertes Layout, in dem durch zusätzliche Phasensprünge (Punkt F7) die Einhaltung der Mindestabstände sichergestellt wurde. Mit diesem Layout ist ein maximaler Gradient von 130 bei einem symmetrischen Aspektverhältnis von 100 realisierbar.

[0110] FIG 17 zeigt ein streifenförmiges Layout eines für die Anwendung in der Mammographie optimierten Brechungsgitters G_L mit $N=17$, $s_L=1,00\mu\text{m}$, symmetrischen Minimalabständen von $0,76\mu\text{m}$, einem symmetrischen Aspektverhältnis von 48 und einer Höhe von $36\mu\text{m}$. Die Simulation wurde für ein Brechungsgitter G_L mit Brechungsstegen 14 aus Nickel und photolackgefüllten Zwischenräumen 16 durchgeführt.

[0111] Das obere Bild zeigt hierbei eine bereits durch Gradientenkompression (Punkt F1), Gradientenvariation (Punkt F2) und Einstellung der Grundhöhe (Punkt F3) optimierte Variante des Layouts. Den schwächsten und zweitschwächsten Teilprismen ist hierbei eine Zielposition von 35% zugeordnet. Trotz der vorstehend genannten Maßnahmen werden - wie wieder durch eingetragene Radien verdeutlicht ist - die Mindestabstände nicht überall eingehalten.

[0112] Das mittlere Bild zeigt eine verbesserte Variante des Layouts, bei dem zur Einhaltung der Mindestabstände in den schwächsten Prismen ein zusätzlicher Phasensprung (Punkt F7) eingeführt wurde.

[0113] Das untere Bild zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des mittleren Bilds.

[0114] Die FIG 18 und 19 zeigen Varianten eines diagonalen Layout eines für die Anwendung in der Mammographie optimierten Brechungsgitters G_L mit $N=17$. Die in dem oberen Bild der FIG 18 dargestellte Layoutvariante wurde dabei ohne Gradientenvariation (Punkt F2) realisiert. Die in dem unteren Bild der FIG 18 dargestellte Layoutvariante wurde (zur Erreichung größerer Minimal-Abstände) mit Gradientenvariation (Punkt F2) realisiert. Das obere Bild aus FIG 19 zeigt eine Layoutvariante, in der die Brechungsstege 14 zusätzlich mit einem negativem Phasensprung (Punkt F6) zur Reduzierung von Farbfehlern versehen wurde. Das untere Bild aus FIG 19 zeigt schließlich die Reduktion von Farbfehlern in 6 von 17 Streifen je Pixel. In je drei innerhalb der Fokussierungsgruppe aufeinanderfolgenden Brechungsstegen 14 ist dabei zur Dispersionskorrektur ein Phasensprung eingefügt.

[0115] FIG 20 zeigt schließlich schematisch in zwei Varianten einen Teil eines Brechungsstegs 14 in einem zentralen Bereich eines diagonalen Layouts. Verschiedene Teilprismen des Brechungsstegs 14 sind hierbei zur Verdeutlichung durch unterschiedliche Füllung bzw. Schraffierung hervorgehoben. Wie in den voranstehenden Beispielen sind diese Teilprismen auch hier aus dem gleichen Material und sind miteinander einstückig zur Bildung des Brechungsstegs 14 verbunden.

[0116] Die in der rechten Bildhälfte dargestellte Variante des Brechungsstegs 14 unterscheidet sich von der in der linken Bildhälfte dargestellten Variante durch hinzugefügtes Material zur Realisierung einer Dispersionskorrektur (Punkt F6) und zusätzlicher Phasensprünge (Punkt F7).

[0117] Dargestellt ist, dass sich die Dispersionskorrektur durch Hinzufügen von Material auf der Hälfte des Brechungstreifens 12 mit dem geringeren Materialanteil (insbesondere dem Brechungstreifen 14 mit dem stärksten Teilprisma) erreichen lässt und dass der Einsatz von Streifen sinnvoll sein kann, in denen sich die Wirkungen der Maßnahmen F6 und F7 gegenseitig aufheben. Das ist in der rechts dargestellten Layoutvariante beim schwächsten Teilprisma gezeigt, wo in der linken Hälfte zusätzliches Material für die Dispersionskorrektur (Punkt F6), und in der rechten Hälfte genauso viel zusätzliches Material zur Realisierung eines zusätzlichen Phasensprungs (Punkt F7) hinzugefügt wurde.

[0118] Konkretes Beispiel A (hohe Energie, große Minimalabstände):

[0119] FIG 15 zeigt für $s_L=1,0\mu\text{m}$, dass sich mit einem diagonalen Layout trotz Gradientenkompression ($c=133\%$) Minimalabstände von $1,7\mu\text{m}$ ($> s_L$) symmetrisch (=sowohl für Freiraum als auch für Material) realisieren lassen. Das obere Teilbild zeigt die Situation ohne Gradientenvariation. Hier ergeben sich Minimal-Abstände von lediglich $1,3\mu\text{m}$ für das Material (Pfeile zeigen Verletzungen des Minimalabstands von $1,7\mu\text{m}$ an).

[0120] Brechungsgitter Rahmendaten: $N=7$, diagonales Layout mit Offset-Steigung von 50%, Belichtungswinkel $\alpha = 12^\circ$, $S_L=1,0\mu\text{m}$, $p_y = 18,47\mu\text{m} = y_m (=5,2\mu\text{m}) + (=7,97\mu\text{m}) + y_f (=5,3\mu\text{m})$, Aspektverhältnis symmetrisch (d.h., sowohl für Freiraum als auch für Material) $r = 53$, Minimal-Abstände symmetrisch $1,7\mu\text{m}$, Gitterhöhe $h = 86,9\mu\text{m}$ (maximale

Materialhöhe 62 μm , durchschnittliche Materialhöhe 42,8 μm), Maximaler Material-Gradient 50:1 = $c \times 37,5 : 1$. In der Grafik entspricht 100% Gradient dem Gradienten 37,5 : 1. Das obere Bild (Teilbild a)) verwendet Zielpositionen von 0%. Das untere Bild (Teilbild b)) verwendet Zielpositionen von 0% (stärkste Teilprismen), -37% (mittelstarke Teilprismen werden abgeschwächt) und +35% (schwächste Teilprismen werden verstärkt).

[0121] Gesamtaufbau Rahmendaten der optischen Simulation: Röntgenröhre mit Wolfram-Anode, 100 kVp, Filterung flächig 20 μm Gold + 200 μm Rhenium ($K(\alpha)=71,7 \text{ keV}$).

[0122] G_0 : $P_0=20,881 \mu\text{m}$, Stege als komplett absorbierend simuliert ("schwarz"), jeweils zwei benachbarte von $q=7$ Schlitz in G_0 geöffnet zu 30% Öffnungsanteil (d.h., G_0 wiederholt sich in x-Richtung alle $q P_0=146,168 \mu\text{m}$. Je mehr Schlitz geöffnet sind, desto heller wird das Bild, aber desto mehr verbreitern sich die Streifen in G_2 und verschlechtern die Sichtbarkeit). $d_{01}=1000 \text{ mm}$.

[0123] G_1 : $p_1=1,8252 \mu\text{m}$, $h_1=41,93 \mu\text{m}$ Silizium (alternativ 11,4 μm Nickel) für einen Phasensprung von $\pi/2 \leftrightarrow \lambda/4$ bei $\lambda_D=65 \text{ keV}$; $d_{1L}=95,78 \text{ mm}$.

[0124] G_L : Material Gold, Luft als Freiraum, Lichtbrechung 1:14100 für 47keV bis 1:32600 für 71keV; $d_{L2}=116,071 \text{ mm}$.

[0125] G_2 : $p_2=15,4829 \mu\text{m}$ bzw. Detektor-Pixelbreite ca. 7,74 μm , Höhe $h_2=774 \mu\text{m}$ Gold, Aspektverhältnis 100.

[0126] Optische Leistung (simuliert mit 21 diskreten Wellenlängen 38keV, 41 keV, ..., 98keV mit 3keV Energie-Abstand jeweils), hier anhand von Sichtbarkeiten verschiedener Randbedingungen und Abschnitten (Spalten). Bei den Sichtbarkeiten für einen Streifen (den zentralen) bzw. zwei Streifen (je zwei Streifen gleicher Prismen-Geometrie) wurden die anderen Spalten als komplett absorbierend ("schwarz") simuliert.

Randbedingung (diagonales Layout F1 $c=133\%$)	1. Gesamtsichtbarkeit	Sichtbarkeit in den Spalten mit dem ... Teilprismen			Zentrale
		2. stärksten	3. mittleren	4. schwächsten	5. Spalte
a) Ohne F2	55,8%	39,4%	58,8%	64,5%	64,5%
b) Mit F2	53,7%		52,4%	64%	

[0127] Wird bei 2. (stärkste Prismen) auf F1 verzichtet ($c=100\%$) und $d_{L2}=169,7 \text{ mm}$ entsprechend erhöht, so ergibt sich erneut 2. 39,4%. Die stärksten Prismen haben immer mit Dispersion bzw. Farbfehlern zu kämpfen. Die Gradientenkompression ist nicht der Grund für die schlechte Leistung.

[0128] Wird stattdessen ein Phasensprung zur Dispersionkorrektur (Punkt F6) um -24 μm Höhe Gold eingeführt, so steigt die Sichtbarkeit der Spalten stärkster Prismen von 39,4% auf 42,2%. Wird zusätzlich die Distanz von 116,071 mm auf $d_{L2}=137,85 \text{ mm}$ erhöht (was nun wegen den geringeren Farbfehler möglich ist), so steigt die Sichtbarkeit stark an auf 48,6%. Die Dispersionskorrektur ist somit hier der dominierende Effekt.

[0129] Konkretes Beispiel B (hohe Energie, hoher Gradient):

[0130] FIG 16 zeigt, dass bei streifenförmigen Layouts, wie sie grundsätzlich in WO 2013/160 153 A1 offenbart sind, Gradienten möglich sind, die das Aspektverhältnis übersteigen.

[0131] $N=7$: Mittels der Maßnahmen F1, F2, F3, F5 und F7 (Phasensprung) ist ein maximaler Gradient von 130 bei einem symmetrischen Aspektverhältnis von 100 realisierbar.

[0132] Brechungsgitter Rahmendaten: $N=7$, streifenförmiges Layout, Belichtungswinkel $\alpha = 9^\circ$, $s_L=1,0 \mu\text{m}$, $p_y = 13,73 \mu\text{m}$, Aspektverhältnis symmetrisch $r = 100$, Minimal-Abstände symmetrisch 0,88 μm , Gitterhöhe $h = 86,7 \mu\text{m}$ (maximale Materialhöhe 86,7 μm), Maximaler Material-Gradient 130:1 = $c \times 86,7 : 1$ mit Kompression (Punkt F1) $c=150\%$. In der Grafik entspricht 100% Gradient dem Gradienten 86,67 : 1. Das obere linke Bild (Teilbild a)) verwendet Zielpositionen von 0%. Das obere rechte Bild (Teilbild b)) und das untere Bild (Teilbild c)) verwenden Zielpositionen von 0% (stärkste Teilprismen), -20% (mittelstarke Teilprismen werden abgeschwächt) und +35% (schwächste Teilprismen werden verstärkt). Das untere Teilbild enthält zusätzlich einen zusätzlichen Phasensprung (Punkt F7) von $\Delta h=25 \mu\text{m}$ Gold.

[0133] Gesamtaufbau Rahmendaten der optischen Simulation (nur Unterschiede zu der der FIG 15 zugrundeliegenden Simulation angegeben):

G_0 : Jeweils vier benachbarte von $q=17$ Schlitz in G_0 geöffnet zu 30% Öffnungsanteil (d.h., G_0 wiederholt sich in x alle $q p_0=17 \times 20,881 \mu\text{m} = 354,98 \mu\text{m}$), Stege wiederum perfekt absorbierend ("schwarz") simuliert.

G_L : Lichtbrechung 1:5400 für 47keV bis 1:12500 für 71keV; $d_{L2}=44,9907 \text{ mm}$.

G_2 : $p_2=14,575 \mu\text{m}$ bzw. Detektor-Pixelbreite ca. 7,3 μm , wie G_0 als perfekt absorbierend angenommen zur Vergleichbarkeit mit der Situation ohne Brechungsgitter (vgl. Zeile 4 in folgender Tabelle).

[0134] Optische Leistung (Spektrum wie im Beispiel A, FIG 15), hier anhand von Sichtbarkeiten verschiedener Rand-

bedingungen und Abschnitten (Spalten):

Randbedingung [G_0 , G_2 perfekt absorbierend]	Gesamtsichtbarkeit	Sichtbarkeit in den Spalten mit dem ... Teilprismen			Zentrale Spalte
		Stärksten	mittleren	schwächsten	
a) Nur Gradienten	58,4%	39,3%	64,5%	65,6%	65,3%
b) Mit F2, F3, F5, ohne F7	57,2%	39,3%	64,0%	64,4%	67,0%
c) Mit allem / 4x30% G_0	56,4%	39,3%	64,0%	62,7%	67,0%
Ohne Brechungs-gitter	65,0%	---	---	---	65,0%

[0135] Um den Sichtbarkeitsverlust durch das Brechungsgitter G_L zu zeigen, ist als letzte Zeile in der vorstehenden Tabelle die Situation ohne Brechungsgitter G_L (d.h., G_2 an Stelle von G_L) dargestellt. Dabei wurde darauf verzichtet, die Absorption insbesondere von G_2 zu modellieren.

[0136] Der Sichtbarkeitsverlust entsteht im Wesentlichen durch die hohe Kompression $c=150\%$ und die Anzahl geöffneter Spalten in G_0 (ein äquivalentes Layout mit $c=117\%$, in dem nur einer von dann 14 Spalten in G_0 geöffnet ist, hat eine Gesamtsichtbarkeit von 62,7%).

[0137] Zu erkennen ist, dass der zentrale Streifen der Layouts gemäß den den Teilbildern b) und c) höhere Sichtbarkeiten aufweist als die Situation ohne Brechungsgitter G_L . Der Grund ist, dass eine Aufhärtung durch 87 μm Gold erfolgt, welche die niederenergetischen Anteile und die über 80,7 keV (Gold $K\alpha$) entfernt, die durch Beugung zwischen G_L und G_2 weniger gut durch G_L abgebildet werden. Es verbleibt daher relativ mehr Intensität nahe der Design-Wellenlänge.

[0138] Konkretes Beispiel C (niedrigere Energie, große Minimalabstände, begrenzter Bauhöhe):

[0139] FIG 17 zeigt eine Mammographie-Konfiguration mit $N=17$ und streifenförmigem Layout, Gradientenkompression (Punkt F1), Gradientenvariation (Punkt F2) und Grundhöhe (Punkt F3) sowie zusätzlichem Phasensprung (Punkt f7), $s_L=1,0\mu\text{m}$, Minimalabstände symmetrisch 0,76 μm , Aspektverhältnisse symmetrisch 48, Höhe 36 μm . Die Brechungsstege 14 bestehen aus Nickel. Die Zwischenräume 16 sind mit Photolack gefüllt.

[0140] Je größer N ist, desto stärker sind die Gradienten-Unterschiede zwischen dem Streifen mit dem kleinsten Gradienten (schwächsten Teilprisma) und den Nachbarstreifen (der eine Nachbarstreifen ist durch Freiraum getrennt, der andere mit Material verbunden).

[0141] Brechungsgitter Rahmendaten: $N=17$, streifenförmiges Layout wie grundsätzlich in WO 2013/160 153 A1 offenbart, Belichtungswinkel $\alpha = 10^\circ$, $s_L=1,00\mu\text{m}$, $p_y = 6,348\mu\text{m}$, Aspektverhältnis symmetrisch $r = 48$, Minimal-Abstände symmetrisch 0,76 μm , Gitterhöhe $h = 36,00\mu\text{m}$ (durchschnittliche Materialhöhe 18,7 μm , bei kleineren Minimalabständen kann dies und damit die Absorption reduziert werden), Maximaler Material-Gradient 48:1 = $c \times 36:1$ mit $c=133\%$, in der Grafik entspricht 100% Gradient dem Gradienten 36:1.

[0142] Die Zielpositionen zur Auslegung der Prismen sind (von der Spalte bzw. dem Streifen der stärksten Prismen ("1.") zum Streifen der schwächsten Prismen ("8.") hin absteigend, zentraler Streifen 9. immer 0%):

- Oberes Bild (Teilbild a)), Minimal-Abstände 0,63 μm (0,76 μm eingezeichnet):

Zielpositionen 1. 0%, 2. 0%, 3. 0%, 4. 0%, 5. 25%, 6. 35%, 7. 35%, 8. 35%

- Mittleres Bild (Teilbild b)), Minimal-Abstände wie eingezeichnet 0,76 μm :

Zielpositionen 1. 0%, 2. 0%, 3. -30%, 4. +25%, 5. +25%, 6. +25%, 7. +35%, 8. +25%, dabei bei 7. (zweitschwächste Prismen-Spalten): Gradienten-Verschmälerung (Punkt F5) auf 88% der Spaltbreite (6% der Streifenbreite rechts und links abgeschnitten), sowie bei 8. (schwächste Prismen-Streifen) ein Phasensprung (Punkt F7) von $\Delta h=20\mu\text{m}$ Höhe ($\Delta y=3,53\mu\text{m}$), aufgeteilt in zwei Teile je p_y , um die Spalte der Geometrie den benachbarten Spalten anzunähern.

[0143] Gesamtaufbau Rahmendaten der optischen Simulation: Röntgenröhre mit Wolfram-Anode, 40 kVp, Filterung 100 μm "Sb" Antimon ($K(\alpha)=30,5\text{ keV}$).

[0144] G_0 : $p_0=26,6573\mu\text{m}$, Stege sind komplett absorbierend ("schwarz") (oder bestehen in guter Näherung aus Gold mit Höhe $h_0 \geq 130\mu\text{m}$). Jeweils fünf benachbarte von $q=17$ Schlitzen in G_0 geöffnet zu 30% Öffnungsanteil (d.h., G_0 wiederholt sich in x-Richtung alle $q p_0=453,174\mu\text{m}$); $d_{01}=1500\text{mm}$.

[0145] G_1 : $p_1=3,7208\mu\text{m}$, $h_1=8,4\mu\text{m}$ Nickel für einen Phasensprung von $n \leftrightarrow \lambda/2$ bei $\lambda_D = 25\text{keV}$; $d_{1L}=112,54\text{ mm}$.

[0146] G_L : Wie beschrieben, Material Nickel, Photolack als Freiraum (reduziert Brechkraft von Nickel um ca. 2/13 = 15,5% auf ca. 11/13), Lichtbrechung 1:5000 für 19 keV bis 1:12500 für 30 keV; $d_{L2}=130,796\text{mm}$.

[0147] G_2 : $p_2=36,758\mu\text{m}$ bzw. Detektor-Pixelbreite ca. $18,38\mu\text{m}$, als perfekt absorbierend simuliert für Vergleichbarkeit mit Situation ohne Linsengitter.

[0148] Optische Leistung (21 diskrete Photonen-Energien zu 18 keV, 19 keV,..., 38 keV mit Abständen von jeweils 1 keV), hier anhand von Sichtbarkeiten verschiedener Randbedingungen und Abschnitten (Streifen). Die Transmission liegt bei etwa 74% mit Linsengitter und bei etwa 94,5% ohne Linsengitter. #

Randbedingung [G_0 , G_2 perfekt absorbierend]	Gesamtsichtbarkeit	Sichtbarkeit in den Spalten mit dem ... Teilprismen			Zentrale Spalte
		1. stärksten	5. mittleren	8. schwächsten	
a) Ohne F7 / Zielposition 35%	46,1%			50,1%	
b) Mit F7, Minimalabstand $0,76\mu\text{m}$	45,1%	33,0%	50,2%	47,2%	51,2%
Ohne Brechungs-gitter	51,7%	---	---	---	51,7%

Konkretes Beispiel D (niedrigere Energie, Dispersionskorrektur) :

[0149] Die FIG 18 und 19 zeigen für $N=17$ diagonale Layouts mit dem Ziel, im niederenergetischeren Bereich direkt auf die Pixelgröße eines feinen Detektors zu vergrößern. Das obere Bild (Teilbild a)) in FIG 18 ist ohne Gradientenvariation (Punkt F2) realisiert. Das untere Bild (Teilbild b)) in FIG 18 ist zur Erreichung größerer Minimal-Abstände mit Gradientenvariation realisiert. Das obere Bild (Teilbild c)) in FIG 19 ist zusätzlich mit einem negativem Phasensprung zur Reduzierung von Farbfehlern (Punkt F6) versehen. Das untere Bild (Teilbild d)) aus FIG 19 zeigt schließlich die Reduktion von Farbfehlern in 6 von 17 Streifen je Pixel.

[0150] Brechungsgitter Rahmendaten: $N=17$, diagonales Layout, Belichtungswinkel $\alpha=12^\circ$, $s_L=1,00\mu\text{m}$, $p_y=7,653\mu\text{m}$ (Teilbilder a) und b)) bzw. $10,083\mu\text{m}$ (Teilbild c)) bzw. $10,098\mu\text{m}$ (Teilbild d)), Aspektverhältnis r und Minimal-Abstände Δxy symmetrisch, aber je nach Teilabbildung unterschiedlich (ebenso wie die Gitterhöhe), Maximaler Material-Gradient $30:1 = c \times 22,5:1$ mit $c=133\%$. In den FIG 18 und 19 entspricht 100% Gradient jeweils dem Gradienten $22,5:1$. Aspektverhältnisse r , Minimal-Abstände Δxy , Gitterhöhen h , Zielpositionen je Teilabbildung:

- Teilbild a) ohne Gradientenvariation (Punkt F2) und ohne Dispersionskorrektur (Punkt F6):

$r=50$, $\Delta xy=0,74\mu\text{m}$, $h=36\mu\text{m}$, durchschnittl. Materialhöhe $14,94\mu\text{m}$, alle Zielpositionen 0%.

- Teilbild b) mit Gradientenvariation (Punkt F2), aber ohne Dispersionskorrektur (Punkt F6):

$r=46$, $\Delta xy=0,80\mu\text{m}$, $h=36\mu\text{m}$, durchschnittl. Materialhöhe $14,38\mu\text{m}$, Zielpositionen 1. 0%, 2. 0%, 3. -20%, 4. -20%. 5. -25%, 6. +7%, 7. +35%, 8. +35%.

- Teilbild c) mit Gradientenvariation (Punkt F2) und mit 1x Dispersionskorrektur (Punkt F6):

$r=97$, $\Delta xy=0,50\mu\text{m}$, $h=47,4\mu\text{m}$, durchschnittl. Materialhöhe $13,53\mu\text{m}$, Zielpositionen wie bei Teilbild b).

- Teilbild d) mit Gradientenvariation (Punkt F2) und Dispersionskorrektur (Punkt F6) in 3 Spalten:

$r=97$, $\Delta xy=0,50\mu\text{m}$, $h=47,5\mu\text{m}$, durchschnittl. Materialhöhe $14,46\mu\text{m}$, Zielpositionen 1. 0%, 2. 0%, 3. 0%, 4. +10%. 5. -5%, 6. -15%, 7. +25%, 8. +30%.

[0151] Gesamtaufbau Rahmendaten der optischen Simulation (nur Unterschiede zu der der FIG 17 zugrundeliegenden Simulation angegeben, insbesondere sind p_0 , p_1 , d_{01} , d_{1L} unverändert) :

G_0 : Jeweils drei benachbarte von $q=11$ Schlitzen in G_0 geöffnet zu 30% Öffnungsanteil (d.h., G_0 wiederholt sich in x-Richtung alle $q p_0=11 \times 26,6574\mu\text{m} = 293,23\mu\text{m}$).

G_1 : wie im Beispiel C

G_L : Nickel/Photolack wie im Beispiel C, Lichtbrechung 1:8000 für 19 keV bis 1:20 000 für 30 keV; $d_{L2}=211,496\text{ mm}$.

G2: $p_2=38,4593\mu\text{m}$ bzw. Detektor-Pixelbreite ca. $19,23\mu\text{m}$ (perfekt absorbierend simuliert).

[0152] Optische Leistung (Spektrum wie im Beispiel C), wiederum anhand von Sichtbarkeiten verschiedener Randbedingungen und Abschnitten (Spalten). Die Transmission liegt bei etwa 75,8% mit Brechungsgitter (77% bei Teilbild c)) und bei etwa 94,2% ohne Brechungsgitter.

Randbedingung [G_0 , G_2 perfekt absorbierend]	Gesamtsichtbarkeit	Sichtbarkeit in den Spalten mit dem ... Teilprismen			Zentrale Spalte
		1. stärksten	5. mittleren	8. schwächsten	
b) Ohne F6, $\Delta xy=0,8\mu\text{m}$	42,5%	29,4%			
b) Mit F6, $\Delta xy=0,5\mu\text{m}$	43,6%	36,6	43,6%	48,1%	49,8%
Ohne Brechungs-gitter	50,9%	---	---	---	50,9%

[0153] Die Sichtbarkeit bei den stärksten Teilprismen nimmt ca. 7% zu. Das gesamte Gitter profitiert nur mit 1% Zuwachs, da nur zwei von 17 Spalten zu den Stärksten zählen. Es soll nun gezeigt werden, wie sich der Sichtbarkeitsabstand zu der Situation ohne Brechungsgitter verringern lässt. Dabei wird gemäß der folgenden Tabelle vertikal das Layout und horizontal die Anzahl offener Schlitz je $q p_0$ in G_0 variiert. Für die vorhergehenden Tabelle war dieser Wert 3 (eine Reduktion der Gradientenkompression von $c=4/3$ auf $c=7/6$ würde eine weitere Verbesserung bringen).

Randbedingung [G_0 , G_2 perfekt absorbierend]	Gesamtsichtbarkeit bei ... Spalten in G_0 je $q p=203,23\mu\text{m}$			
	1	2	3	4
a) Ohne F2/F6, $0,74\mu\text{m}$	48,4%	46,5%	43,4%	39,3%
b) Ohne F6, $\Delta xy=0,8\mu\text{m}$	47,5%	45,6%	42,5%	38,4%
c) 1x F6, $\Delta xy=0,5\mu\text{m}$	48,9%	46,8%	43,6%	39,3%
d) 3x F6, $\Delta xy=0,5\mu\text{m}$	50,4%	48,5%	45,4%	41,1%
e) wie d), aber $d_{L2}=191,78\text{mm} \leftrightarrow q=12 q p_0=319,89\mu\text{m}$	50,5%	48,8%	46,2%	42,6%

[0154] Die Verkürzung des Abstands verbessert die Sichtbarkeit nur leicht und lediglich zwischen d) und e), weil die höchsten Photonenenergien etwas stärker gebrochen werden.

[0155] Die Erfindung ist nicht auf die vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiele beschränkt. Vielmehr können auch andere Varianten der Erfindung von dem Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Gegenstand der Erfindung zu verlassen. Insbesondere sind ferner alle im Zusammenhang mit den Ausführungsbeispielen beschriebenen Einzelmerkmale auch auf andere Weise miteinander kombinierbar, ohne den Gegenstand der Erfindung zu verlassen. Der Gegenstand der Erfindung wird von den Ansprüchen definiert.

Anhang: Physikalische Grundlagen

[0156] Der Phasenkontrast einer Röntgenaufnahme visualisiert unterschiedliche Phasengeschwindigkeiten $c_p = c_0/(1 - \delta) = c_0/(1 + \delta)$ aufgrund des materialabhängigen Brechungsindex $n = 1 - \delta + i\beta$.

[0157] Die Transmission T hinter dem Patienten ist durch das Intensitätsverhältnis $T = I / I_0$ bestimmt, wobei I_0 die durchschnittliche Intensität ohne G_1 und G_2 ist. Das Rauschen (repräsentiert durch die Standardabweichung σ_ϕ) ist proportional zu $(\Delta t I_0)^{-2}$. Um das Rauschen zu halbieren, wird also die vierfache Dosis $\Delta t I_0$ benötigt. Bei differentielltem Phasenkontrast (sowie auch bei Dunkelfeldaufnahmen) ergibt sich eine proportionale Abhängigkeit des Rauschens σ_ϕ von der Streifen-Phase ϕ (dabei ist V die (Streifen-)Sichtbarkeit oder Visibilität mit

$$V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$$

[0158] Die Größen $I_{\max}$ und $I_{\min}$ bezeichnen dabei die maximalen/minimalen Intensitäten abhängig von der x-Position eines verschiebbaren G_0 :

$$\sigma_\phi^2 \propto 1 / (\Delta t I_0 V^2 T),$$

wobei Sichtbarkeit V und die Transmission T jeweils in den Grenzen 0-100% variieren können.

[0159] Um das Rauschen auf einem bestimmten Wert zu halten, muss also $\Delta t I_0 V^2 T$ unverändert bleiben. Es kann eine Effizienz η der Optik hinter dem Patienten definiert werden als:

$$\eta_{\Phi} = V^2 T$$

[0160] Ein Ziel der vorliegenden Anmeldung ist, η_{Φ} zu optimieren, d.h., eine Dosisminimierung bei gegebenem σ_{Φ} (im Unterschied zu $\sigma_{\Phi'}$ oder σ_{Φ}) zu erreichen, wobei Φ die Phase der tatsächlichen Wellenfront und Φ' deren räumliche Änderung $\Phi' = \partial\Phi/\partial x$ bezeichnen. Φ' ist gegeben durch

$$\Phi' = \partial\Phi/\partial x = \phi_{p_{2L}} / (\lambda d_{1L})$$

[0161] Mit der Definition der Empfindlichkeit S als $S = d_{1L} / P_L$ gilt bei gegebener Design-Wellenlänge $\lambda = \lambda_D$

$$\sigma_{\Phi'} \propto \sigma_{\Phi} / S$$

[0162] Je höher die Empfindlichkeit, desto geringer ist somit das Rauschen. Aus

$$\sigma_{\Phi'}^2 \propto \sigma_{\Phi}^2 / S^2 \propto 1 / (\Delta t I_0 S^2 V^2 T)$$

folgt wie oben bei vorgegebenem Rauschen $\sigma_{\Phi'}$, dass die Dosis $\Delta t I_0$ proportional ist mit η_{Φ} mit

$$\eta = \eta_{\Phi} = S^2 V^2$$

Patentansprüche

1. Brechungsgitter (G_L) für eine Phasenkontrast-Röntgenbildgebungsanordnung (2) mit einer im Wesentlichen quer zu einer Strahlungseinfallsrichtung auszurichtenden Transversalfläche (10), die durch eine x-Achse und eine hierzu senkrechte y-Achse aufgespannt ist, und mit einer Vielzahl von Brechungsstegen (14) aus einem optisch vergleichsweise dünnen Basismaterial, die alternierend mit optisch dichteren Zwischenräumen (16) angeordnet sind, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Brechungsstege (14) derart ausgebildet sind,

- dass sie die Transversalfläche (10) in jeweils in y-Richtung langgestreckte Brechungsstreifen (12) gliedern, die in x-Richtung parallel nebeneinander aufgereiht sind, wobei benachbarte Brechungsstreifen (12) stets auf verschiedene Fokusse (F) ausgerichtet sind, und

- dass sie innerhalb der Transversalfläche (10) zumindest abschnittsweise diagonal verlaufen, wobei sich die Seitenflächen (18) mindestens eines Brechungsstegs (14), die diesen Brechungssteg (14) in x-Richtung begrenzen, jeweils über mehrere Brechungsstreifen (12) erstrecken.

2. Brechungsgitter (G_L) nach Anspruch 1, wobei die Brechungsstege (14) jeweils nach Art von in y-Richtung geneigten schiefen Prismen geformt sind, deren Grundfläche und Deckfläche in den zur Transversalfläche (10) parallelen Stirnflächen des Brechungsgitters (G_L) liegen.

3. Brechungsgitter (G_L) nach Anspruch 2, wobei die Brechungsstege (14) derart angeordnet sind, dass in jedem Brechungsstreifen (12) eine sich in y-Richtung mit einer y-Periodenlänge (p_y) wiederholende Materialstruktur ergibt, und wobei die Brechungsstege (14) derart in y-Richtung geneigt sind, dass eine zu der Grundfläche entgegengesetzte Deckfläche eines jeden Brechungsstegs (14) gegenüber der Grundfläche um eine ganze Anzahl von Periodenlängen (p_y), insbesondere genau eine Periodenlänge (p_y) versetzt ist.

4. Brechungsgitter (G_L) nach einem der Ansprüche 1 bis 3,
wobei jeder Brechungssteg (14) durch jeweils zwei Seitenflächen (18) an die zwischen den Brechungsstegen (14)
angeordneten Zwischenräume (16) angrenzt, und wobei die Seitenflächen (18) alternierend aus aktiven Teilflächen
(20) mit vergleichsweise starker Brechungswirkung in x-Richtung und passiven Teilflächen (22) mit geringer oder
verschwindender Brechungswirkung in x-Richtung zusammengesetzt sind.
5. Brechungsgitter (G_L) nach Anspruch 4,
wobei jede aktive oder passive Teilfläche (20,22) sich in x-Richtung über eine ganze Anzahl von Brechungsstreifen
(12) erstreckt.
6. Brechungsgitter (G_L) nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
wobei jeder Brechungssteg (12) innerhalb der Transversalfläche (10) in alternierenden Abschnitten diagonal in
positiver y-Richtung und in negativer y-Richtung verläuft.
7. Brechungsgitter (G_L) nach Anspruch 6,
wobei der Verlauf eines jeden Brechungsstegs (12) innerhalb der Transversalfläche (10) jeweils an Brechungsstrei-
fen (12) mit geringer oder verschwindender Brechungswirkung die Richtung ändert.
8. Brechungsgitter (G_L) nach einem der Ansprüche 1 bis 7,
wobei jeweils eine einheitlich vorgegebene Anzahl von Brechungsstreifen (12) auf einen gemeinsamen Fokus (F)
ausgerichtet ist.
9. Phasenkontrast-Röntgenbildgebungsvorrichtung (2) mit einer Röntgenstrahlungsquelle (4), mit einem Phasengitter
(G_1), mit einem Röntgendetektor (6), der eine eindimensionale oder zweidimensionale Anordnung von Pixeln (P)
aufweist sowie mit einem zwischen dem Phasengitter (G_1) und dem Röntgendetektor (6) angeordneten Brechungs-
gitter (G_L) nach einem der Ansprüche 1 bis 8.
10. Phasenkontrast-Röntgenbildgebungsvorrichtung (2) nach Anspruch 9, mit einem zusätzlichen Kohärenzgitter (G_0),
das der Röntgenstrahlungsquelle (4) und dem Phasengitter (G_1) zwischengeschaltet ist.
11. Phasenkontrast-Röntgenbildgebungsvorrichtung (2) nach Anspruch 9 oder 10, mit einem zusätzlichen Analysegitter
(G_2), das dem Brechungsgitter (G_L) und dem Röntgendetektor (6) zwischengeschaltet ist.

Claims

1. Refracting grid (G_L) for a phase contrast X-ray imaging device (2) having a transverse surface (10) to be aligned
essentially crosswise to a direction of incident radiation, said transverse surface (10) being spanned by an x axis
and a y axis perpendicular thereto, and having a plurality of refracting bars (14) made of a visually comparatively
thin base material, said refracting bars (14) being arranged in alternation with visually thicker intermediate spaces
(16), **characterised in that** the refracting bars (14) are designed such that
 - they divide the transverse surface (10) into refracting strips (12) elongated in the y direction in each case,
which are arrayed in the x direction parallel to one another, wherein adjacent refracting strips (12) are always
aligned to different focus points (F), and
 - within the transverse surface (10) they run diagonally at least in sections, wherein the lateral surfaces (18) of
at least one refracting bar (14), that delimit said refracting bar (14) in the x direction, in each case extend over
a plurality of refracting strips (12).
2. Refracting grid (G_L) according to claim 1,
wherein the refracting bars (14) are each formed in the manner of oblique prisms inclined in the y direction, whose
base and top surface lie in the end surfaces of the refracting grid (G_L) parallel to the transverse surface (10).
3. Refracting grid (G_L) according to claim 2,
wherein the refracting bars (14) are arranged such that in each refracting strip (12) a material structure repeated in
the y direction with a y period length (p_y) results, and wherein the refracting bars (14) are inclined in the y direction
such that a top surface of each refracting bar (14) opposing the base is offset in respect of the base by a whole
number of period lengths (p_y), in particular exactly one period length (p_y).

4. Refracting grid (G_L) according to one of claims 1 to 3,
wherein each refracting bar (14) adjoins the intermediate spaces (16) arranged between the refracting bars (14) by
two lateral surfaces (18) in each case, and wherein the lateral surfaces (18) are alternately composed of active part
surfaces (20) with a comparatively strong refractive effect in the x direction and passive partial surfaces (22) with a
low or negligible refractive effect in the x direction.
5. Refracting grid (G_L) according to claim 4,
wherein each active or passive part surface (20,22) extends in the x direction across a whole number of refracting
strips (12).
6. Refracting grid (G_L) according to one of claims 1 to 5,
wherein each refracting bar (12) within the transverse surface (10) runs in alternating sections diagonally in the
positive y direction and in the negative y direction.
7. Refracting grid (G_L) according to claim 6,
wherein the course of each refracting bar (12) within the transverse surface (10) in each case changes direction at
refracting strips (12) with a low or negligible refractive effect.
8. Refracting grid (G_L) according to one of claims 1 to 7,
wherein in each case a uniformly predetermined number of refracting strips (12) is aligned on a common focus point
(F).
9. Phase contrast X-ray imaging device (2) having an X-ray source (4), having a phase grid (G_1), having an X-ray
detector (6) which has a one-dimensional or two-dimensional array of pixels (P) and having a refracting grid (G_L)
according to one of claims 1 to 8 arranged between the phase grid (G_1) and the X-ray detector (6).
10. Phase contrast X-ray imaging device (2) according to claim 9, having an additional coherence grid (G_0) which is
connected between the X-ray source (4) and the phase grid (G_1).
11. Phase contrast X-ray imaging device (2) according to claim 9 or 10, having an additional analysis grid (G_2) which
is connected between the refracting grid (G_L) and the X-ray detector (6).

Revendications

1. Réseau (G_L) de réfraction pour un dispositif (2) d'imagerie radiographique à contraste de phase, ayant une surface
(10) transversale dirigée sensiblement transversalement à une direction d'incidence du rayonnement et passant
par un axe x et par un axe y qui lui est perpendiculaire et ayant une pluralité de barrettes (14) de réfraction en un
matériau de base relativement mince optiquement, qui sont disposées en alternance avec des espaces (16) inter-
médiaires plus épais optiquement, **caractérisé en ce que** les barrettes (14) de réfraction sont constituées de manière
- à subdiviser la surface (10) transversale en des bandes (12) de réfraction s'étendant en longueur dans la
direction y et rangées les unes à côté des autres parallèlement dans la direction x, des bandes (12) de réfraction
voisines étant dirigées sur des foyers (F) différents et
- à ce qu'elles s'étendent dans la surface (10) transversale au moins par tronçons en diagonale, les surfaces
(18) latérales d'au moins une barrette (14) de réfraction, qui délimitent cette barrette (14) de réfraction dans la
direction x, s'étendant respectivement sur plusieurs bandes (12) de réfraction.
2. Réseau (G_L) de réfraction suivant la revendication 1,
dans lequel les barrettes (14) de réfraction sont formées chacune à la manière de prismes obliques inclinés dans
la direction y, dont la surface de base et la surface supérieure sont, dans les surfaces frontales, parallèles à la
surface (10) transversale, du réseau (G_L) de réfraction.
3. Réseau (G_L) de réfraction suivant la revendication 2,
dans lequel les barrettes (14) de réfraction sont disposées de manière à donner, dans chaque bande (12) de
réfraction, une structure de matériau se répétant dans la direction y avec une longueur (p_y) de période y et dans
lequel les barrettes (14) de réfraction sont inclinées dans la direction y, de manière à ce qu'une surface supérieure,
opposée à la surface de base, de chaque barrette de réfraction soit décalée par rapport à la surface de base d'un

nombre entier de longueur (p_y) de période, notamment exactement d'une longueur (p_y) de période.

4. Réseau (G_L) de réfraction suivant l'une des revendications 1 à 3,
dans lequel chaque barrette (14) de réfraction est délimitée, sur les espaces (16) intermédiaires disposés entre les
barrettes (14) de réfraction, par respectivement deux surfaces (18) latérales et dans lequel les surfaces (18) latérales
sont composées en alternances de sous-surfaces (20) actives à effet de réfraction relativement fort dans la direction
x et de sous-surfaces (22) passives à effet de réfraction petit ou s'évanouissant dans la direction x.
5. Réseau (G_L) de réfraction suivant la revendication 4,
dans lequel chaque sous-surface (20, 22) active ou passive s'étend dans la direction x sur un nombre entier de
bandes (12) de réfraction.
6. Réseau (G_L) de réfraction suivant l'une des revendications 1 à 5,
dans lequel chaque barrette (12) de réfraction s'étend dans la surface (10) transversale en des tronçons alternés,
en diagonal dans la direction y positive et dans la direction y négative.
7. Réseau (G_L) de réfraction suivant la revendication 6,
dans lequel le tracé de chaque barrette (12) de réfraction, dans la surface (10) transversale, change de direction
sur des bandes (12) de réfraction à effet de réfraction petit ou s'évanouissant.
8. Réseau (G_L) de réfraction suivant l'une des revendications 1 à 7,
dans lequel un nombre unitaire donné à l'avance de bandes (12) de réfraction est dirigé sur un foyer (F) commun.
9. Dispositif (2) d'imagerie radiographique à contraste de phase, comprenant une source (4) de rayons X, un réseau
(G_1) de phase, un détecteur (6) de rayons X, qui a un agencement monodimensionnel ou bidimensionnel de pixels
(P) ainsi qu'un réseau (G_L) de réfraction, suivant l'une des revendications 1 à 8, disposé entre le réseau (G_1) de
phase et le détecteur (6) de rayons X.
10. Dispositif (2) d'imagerie radiographique à contraste de phase suivant la revendication 9, comprenant un réseau
(G_0) de cohérence supplémentaire, qui est interposé entre la source (4) de rayons X et le réseau (G_1) de phase.
11. Dispositif (2) d'imagerie radiographique à contraste de phase suivant la revendication 9 ou 10, comprenant un
réseau (G_2) d'analyse supplémentaire, qui est interposé entre le réseau (G_L) de réfraction et le détecteur (6) de
rayons X.

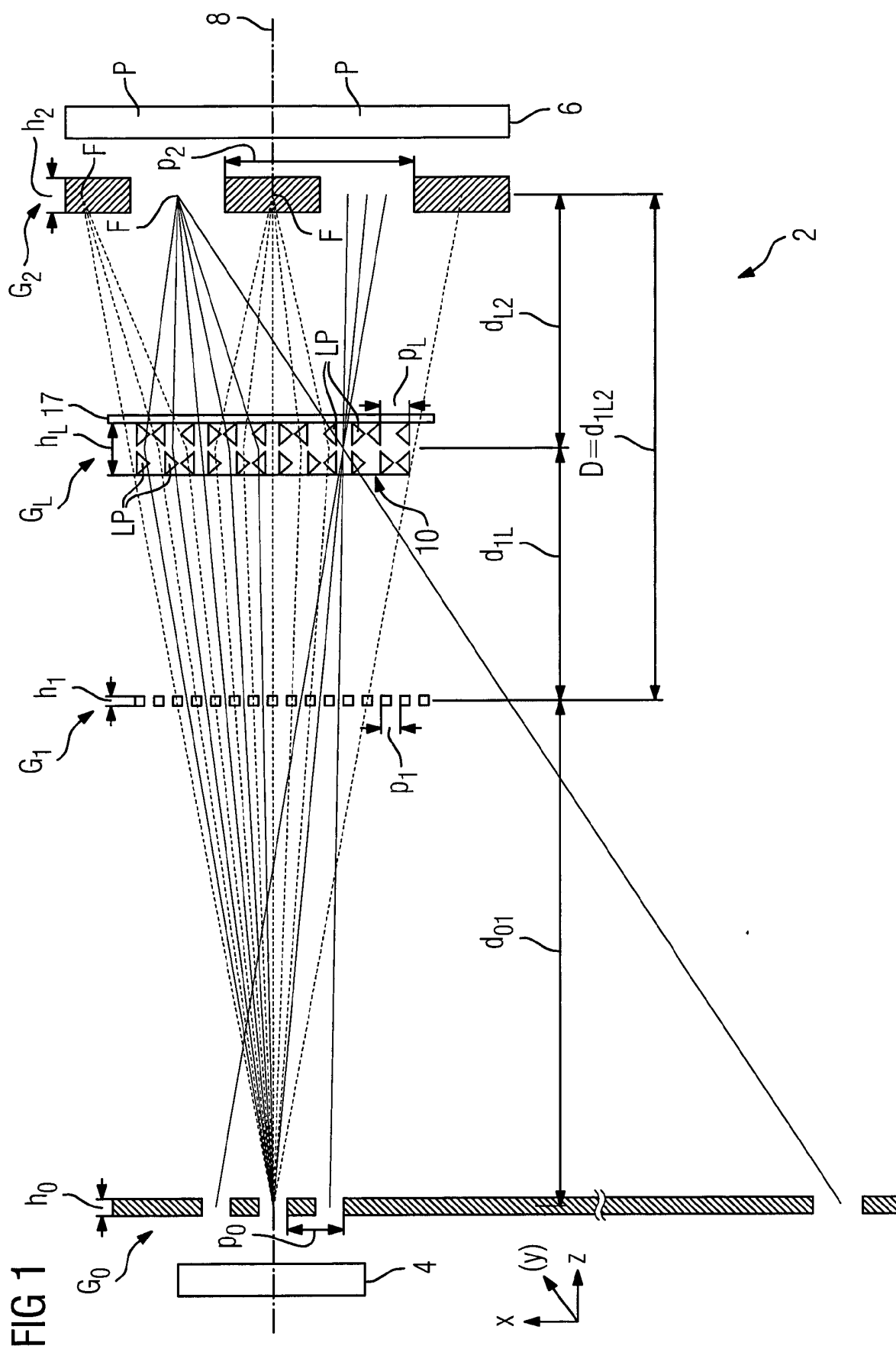


FIG 2

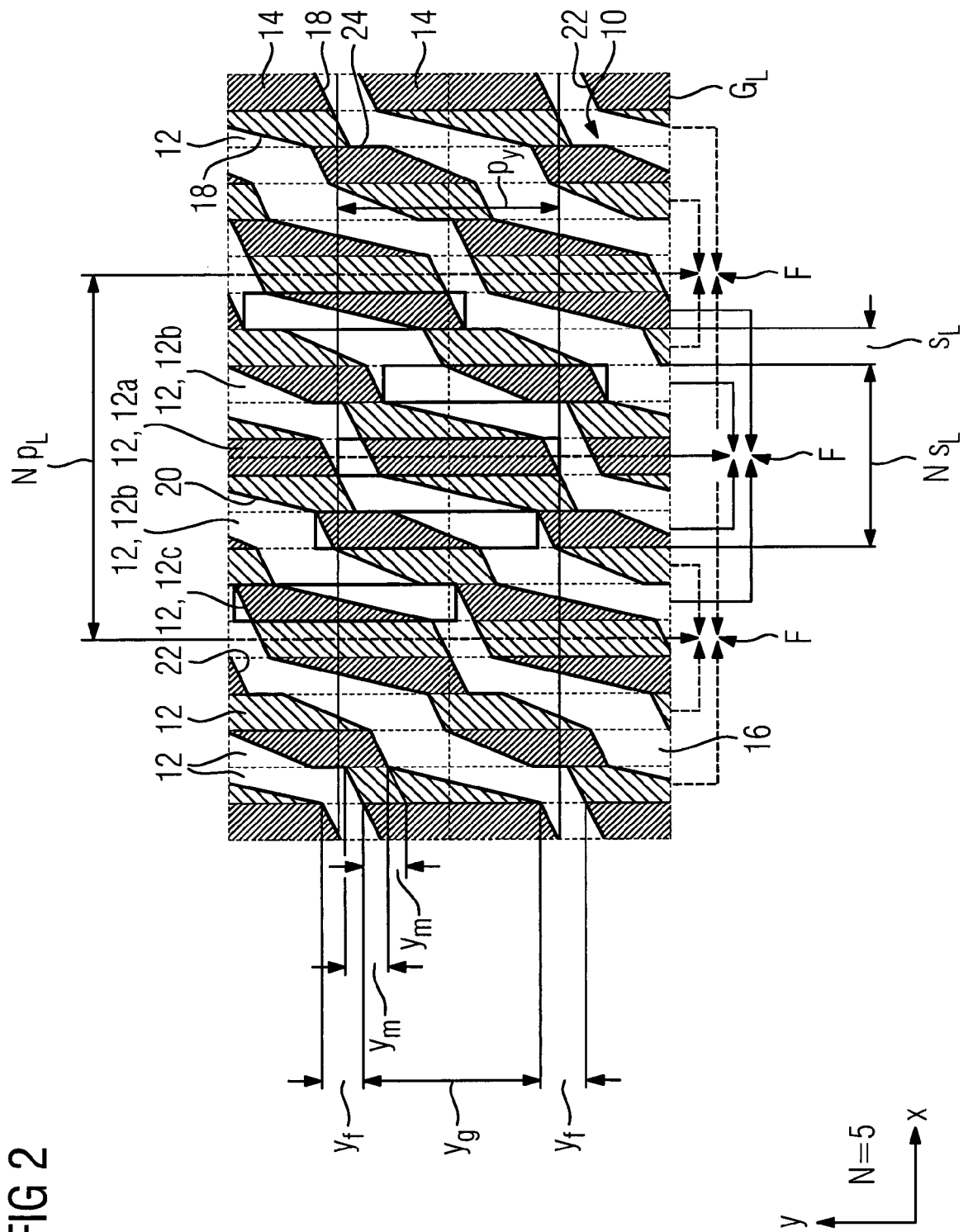


FIG 3

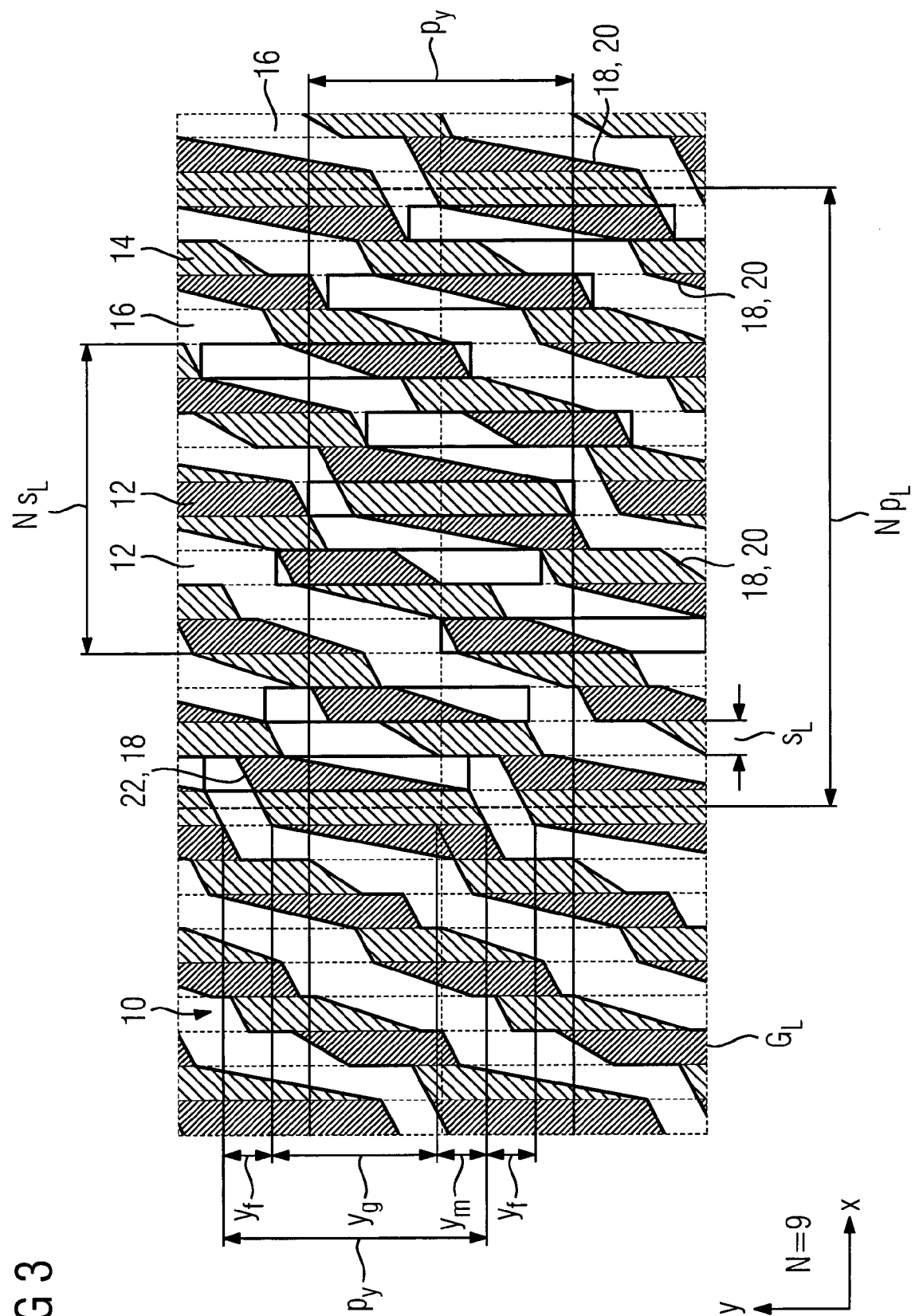


FIG 4

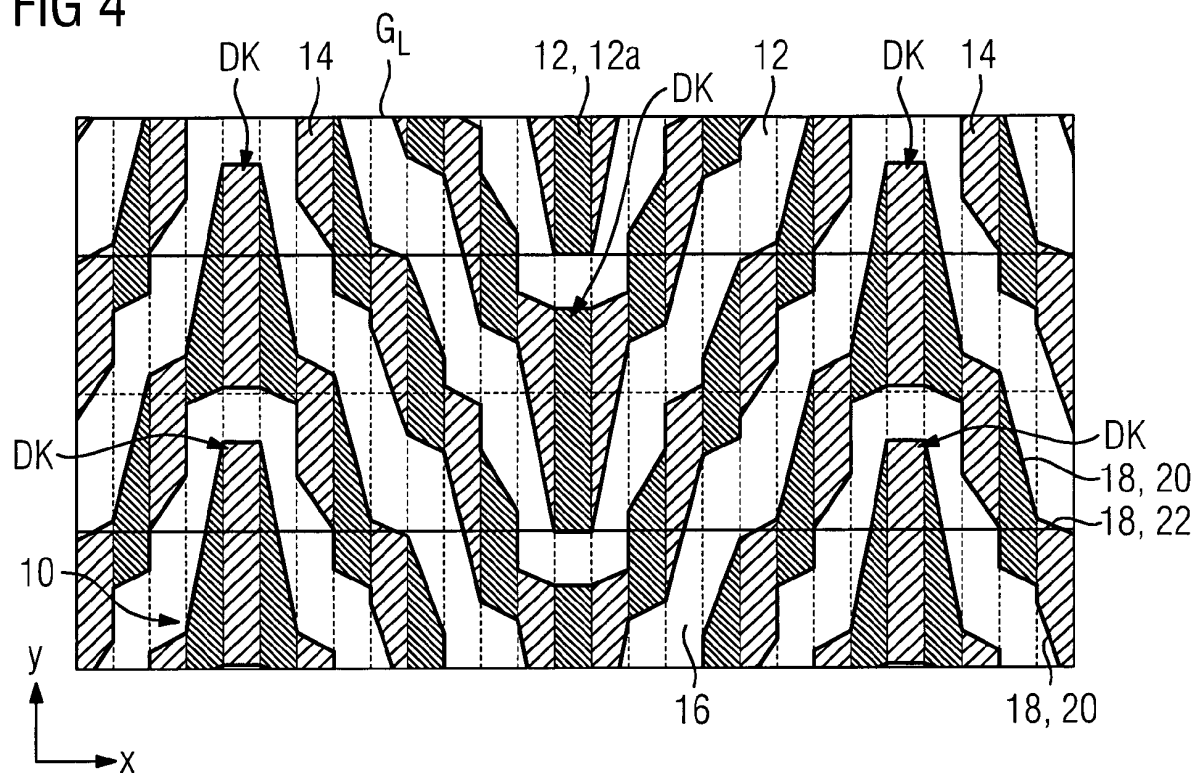


FIG 5

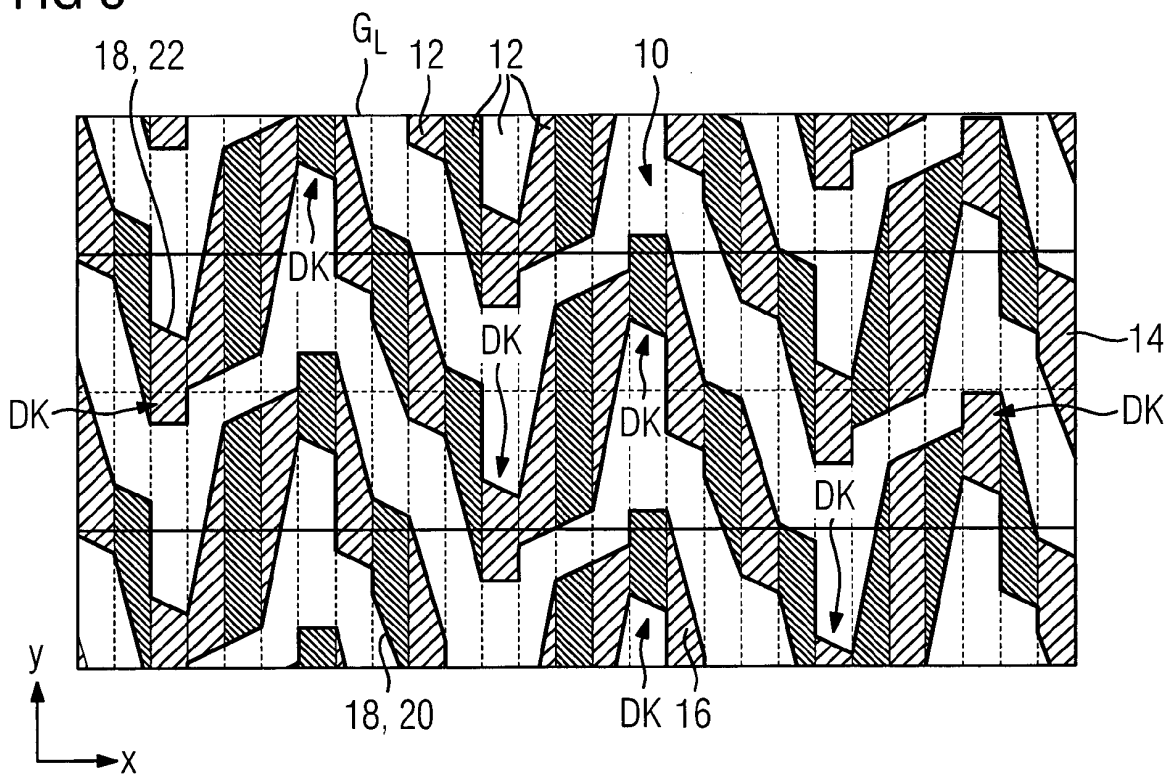


FIG 6

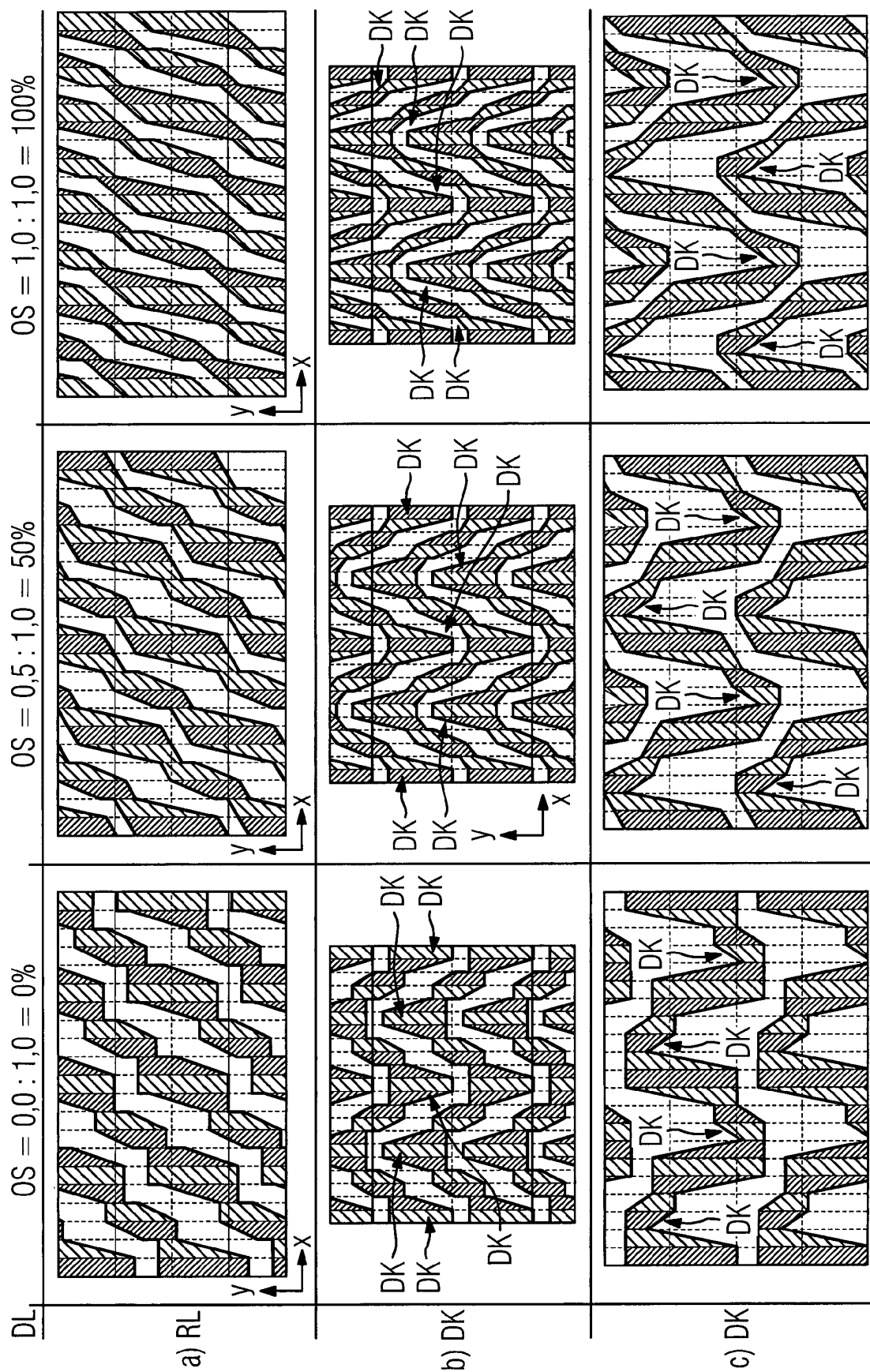


FIG 7

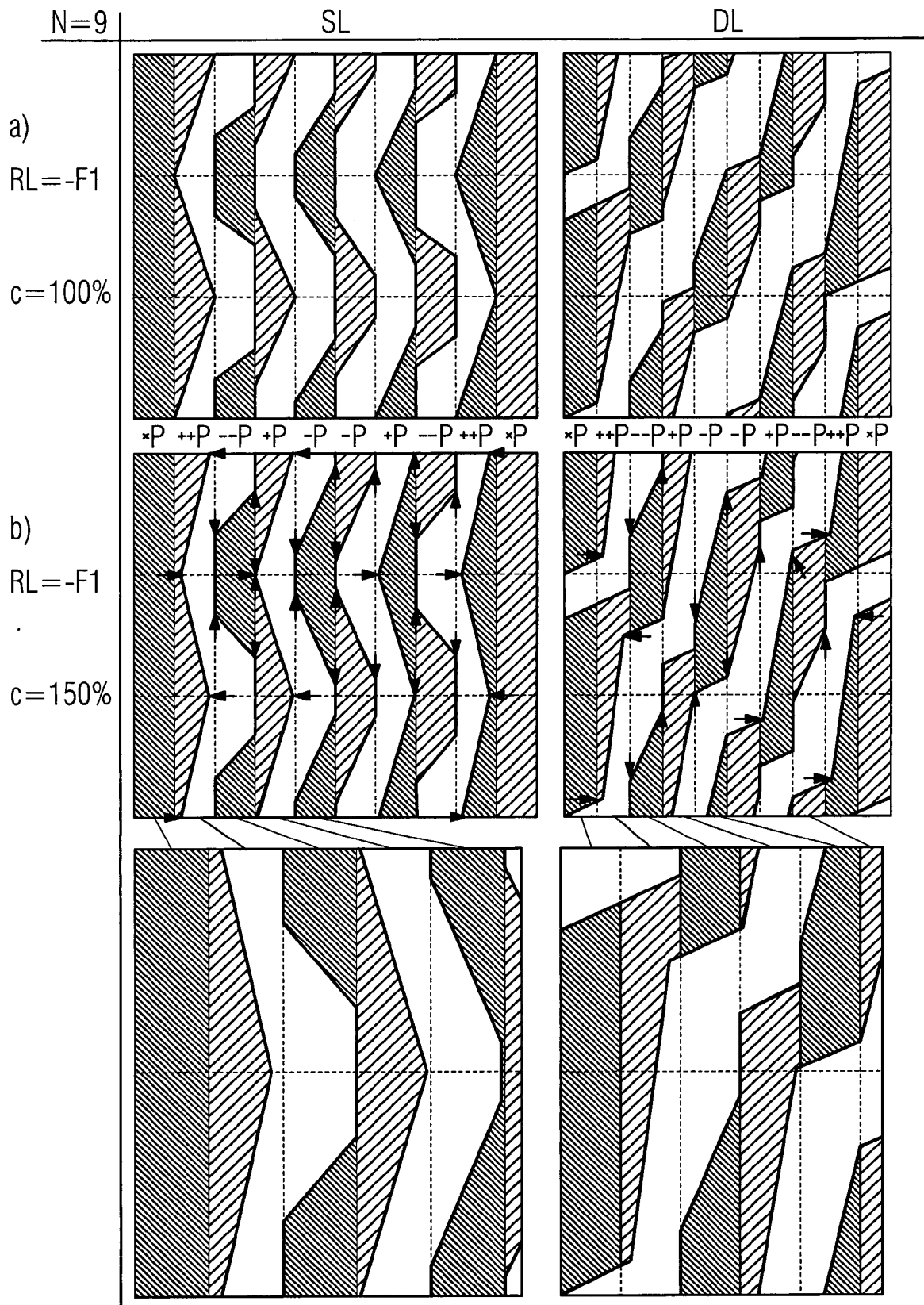
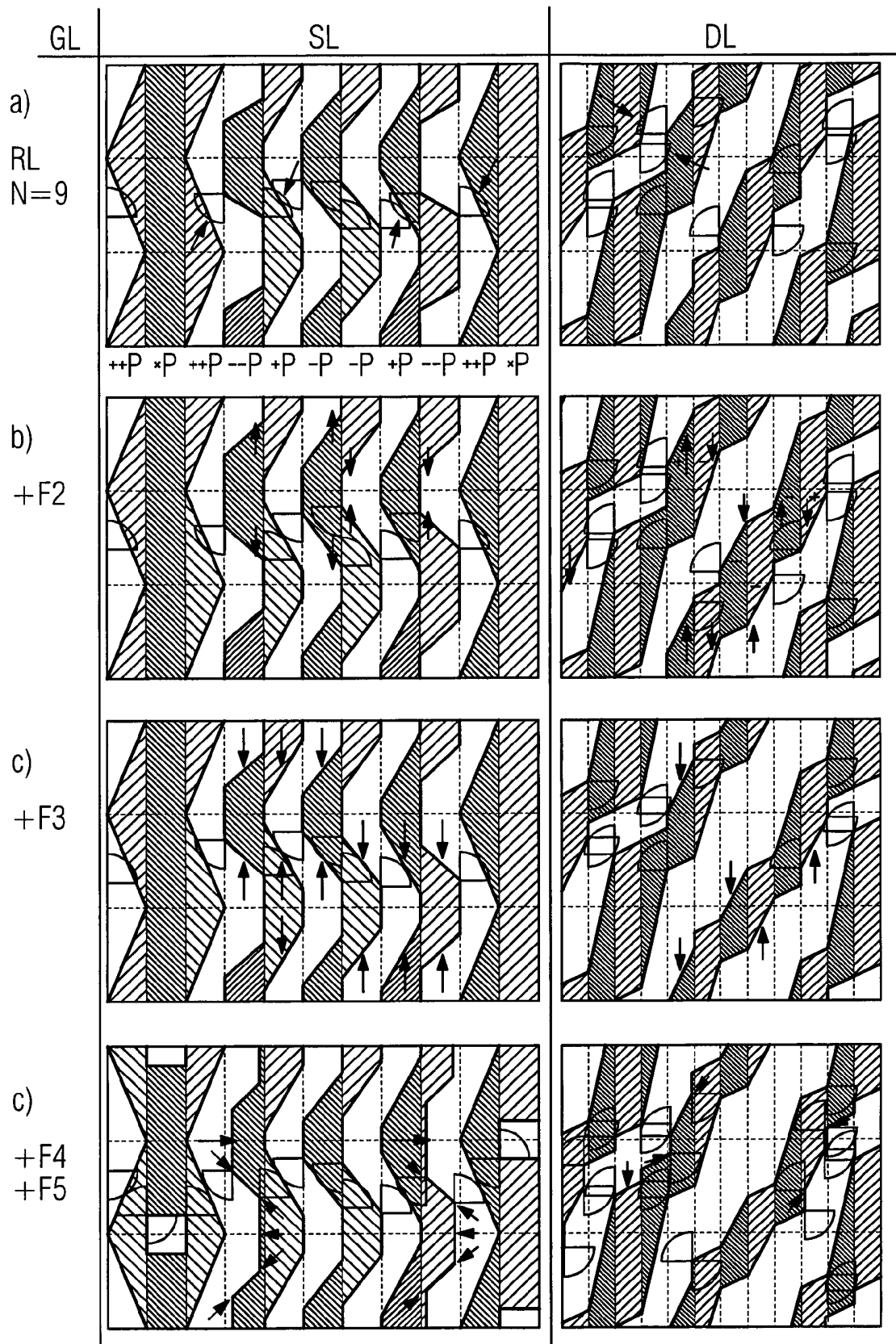


FIG 8



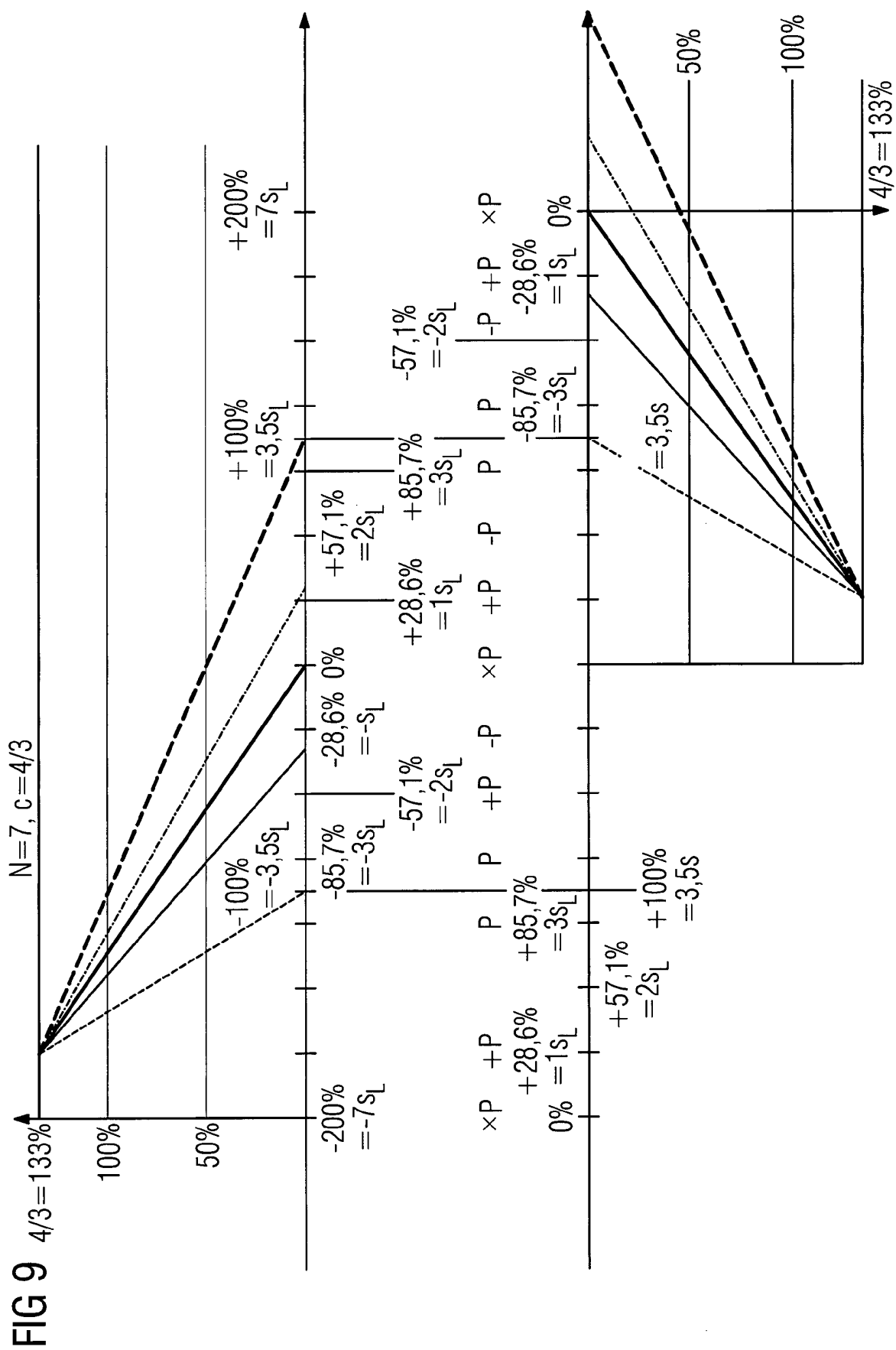


FIG 10

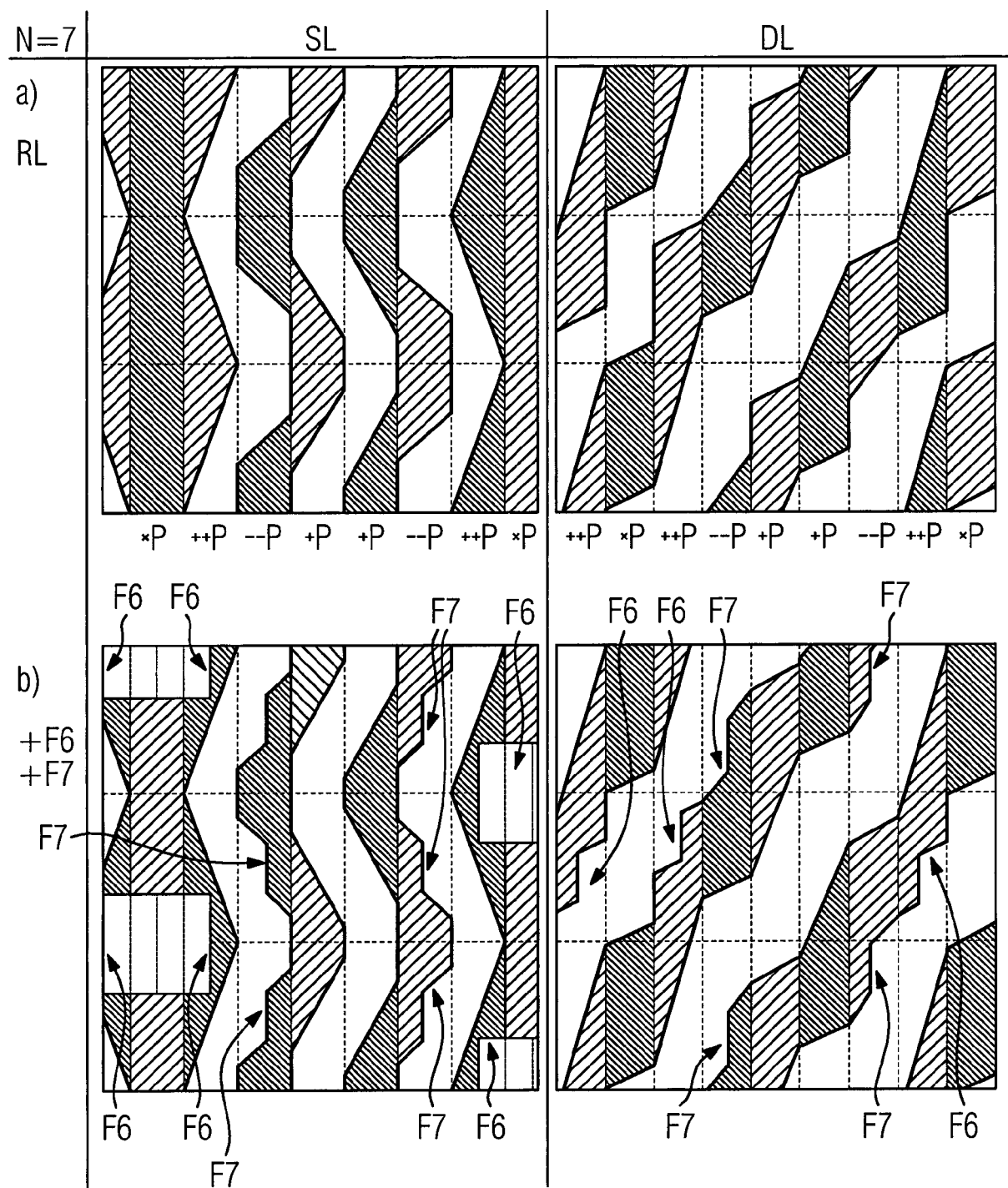


FIG 11

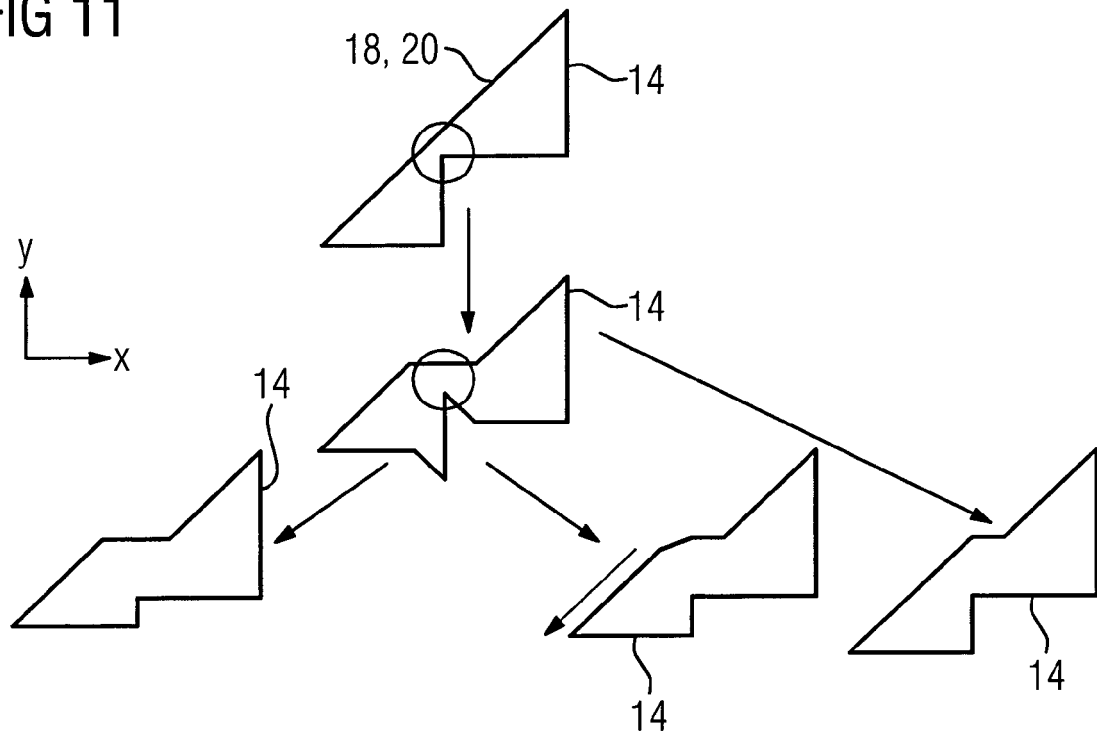


FIG 12

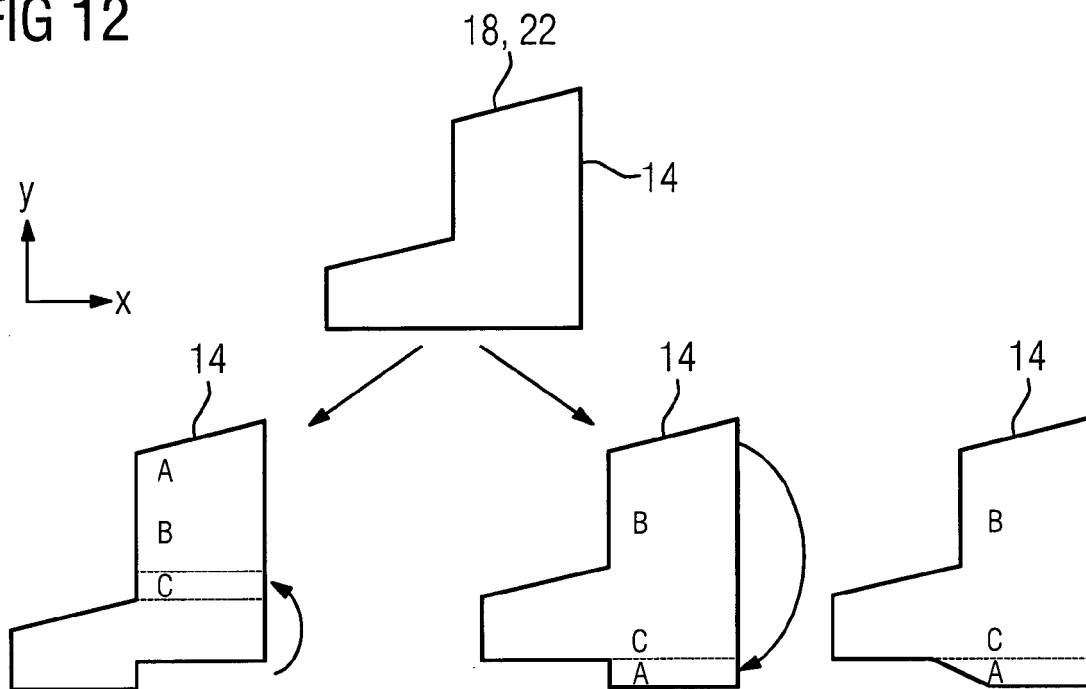


FIG 13

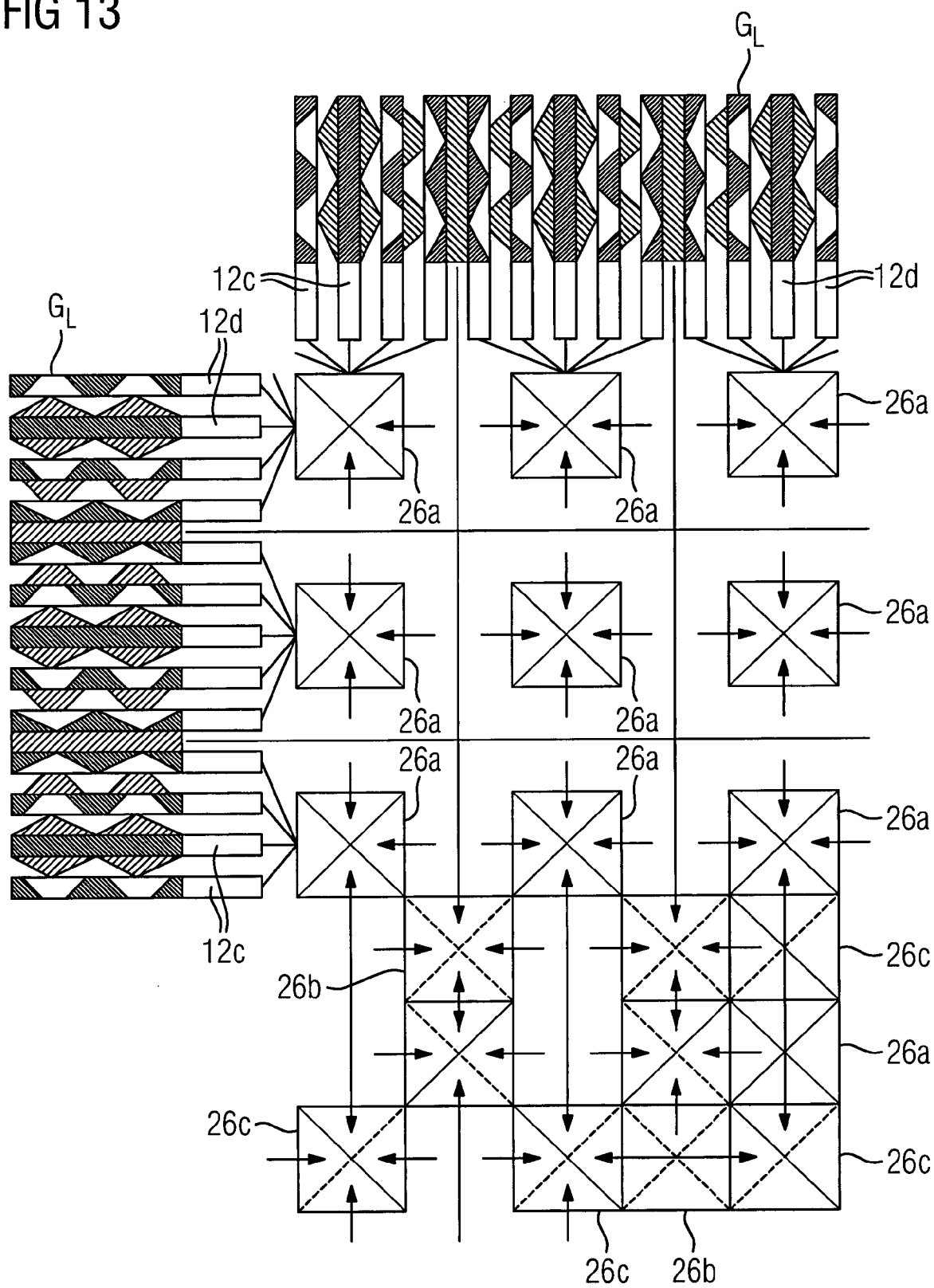


FIG 14

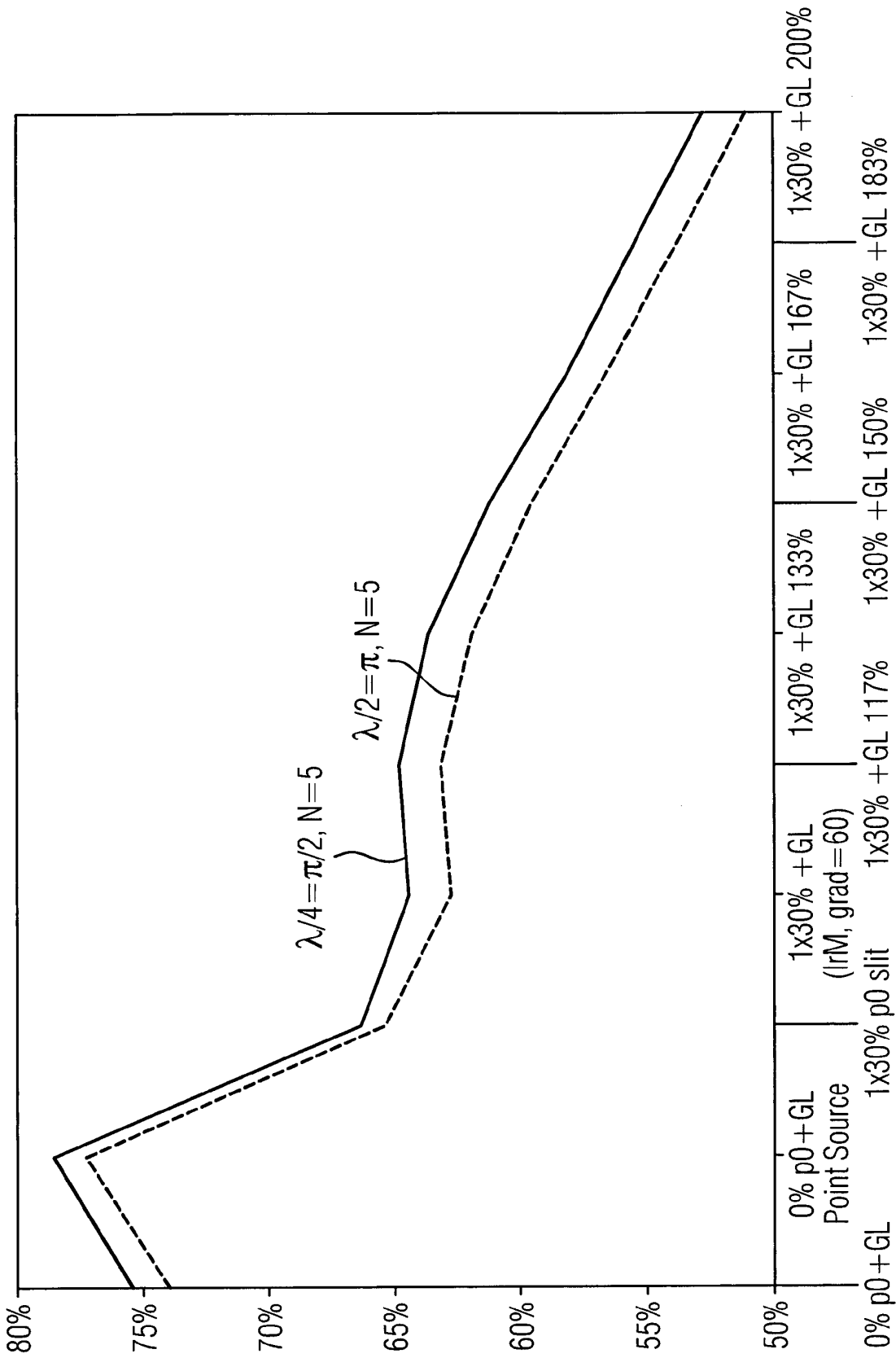


FIG 15

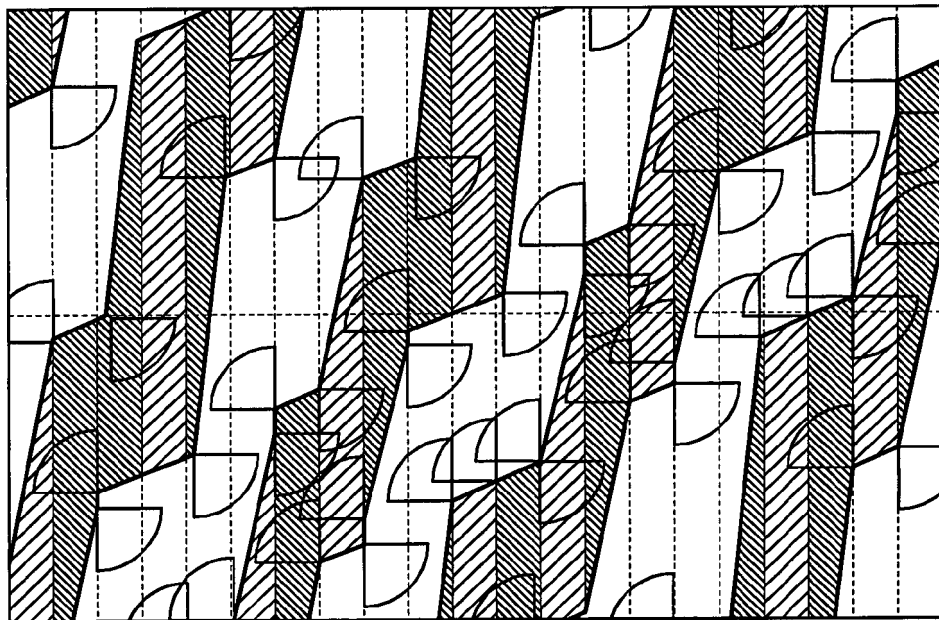
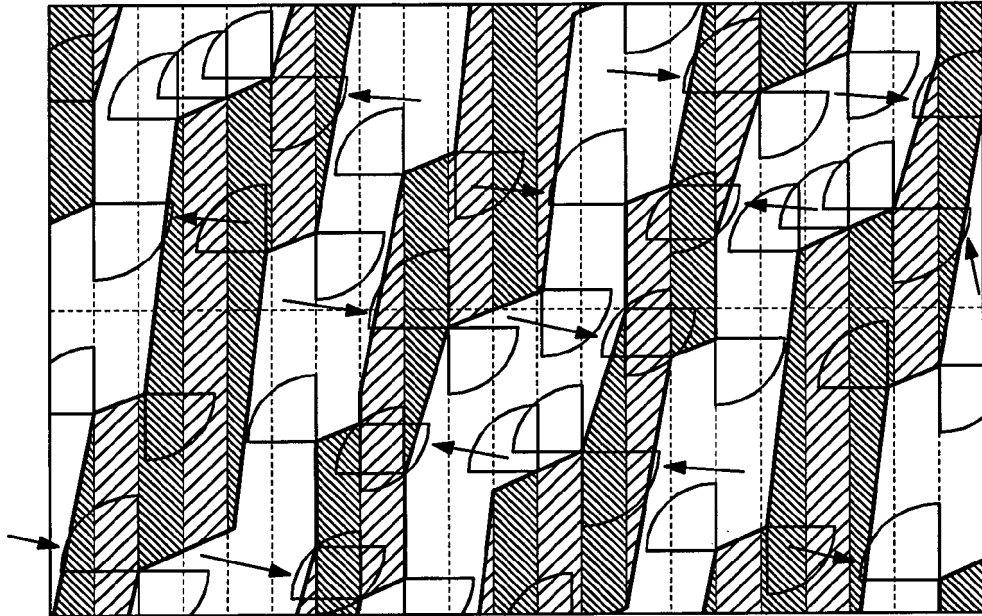


FIG 16

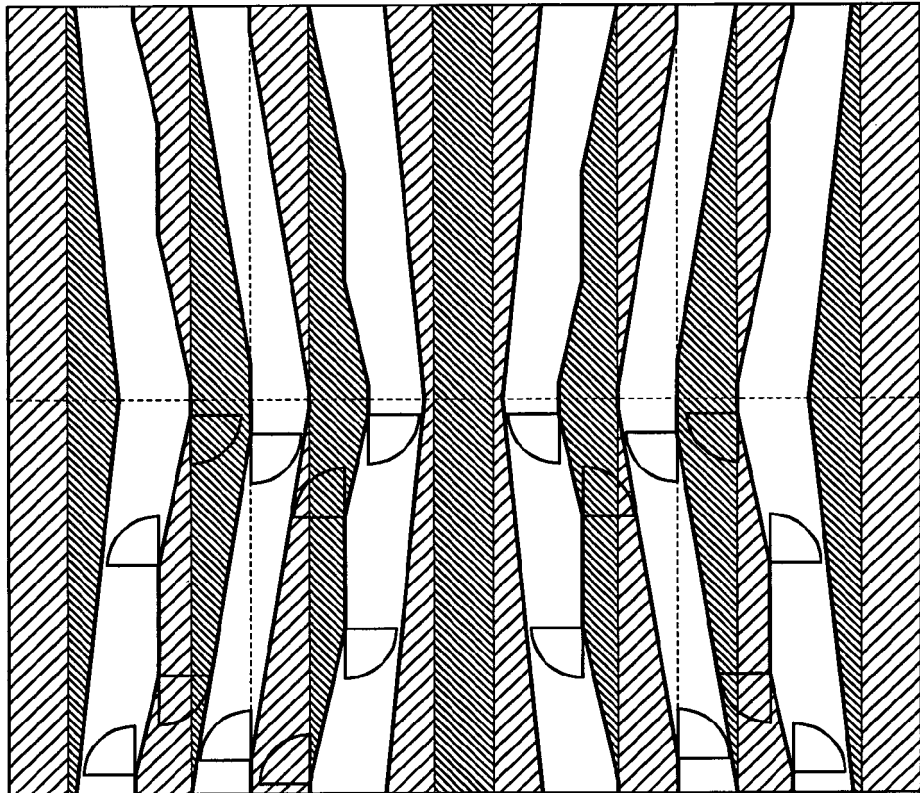
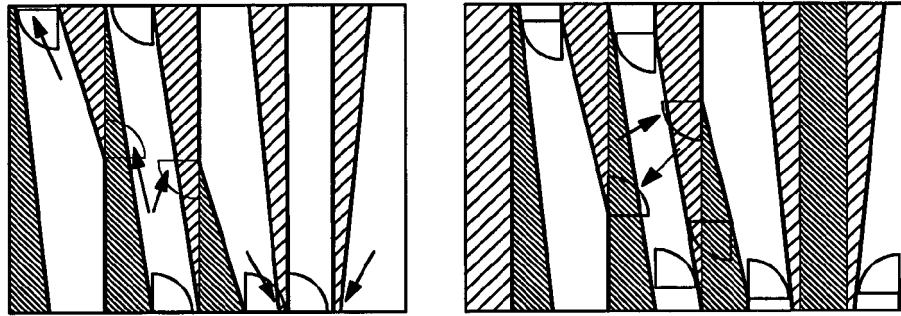


FIG 17

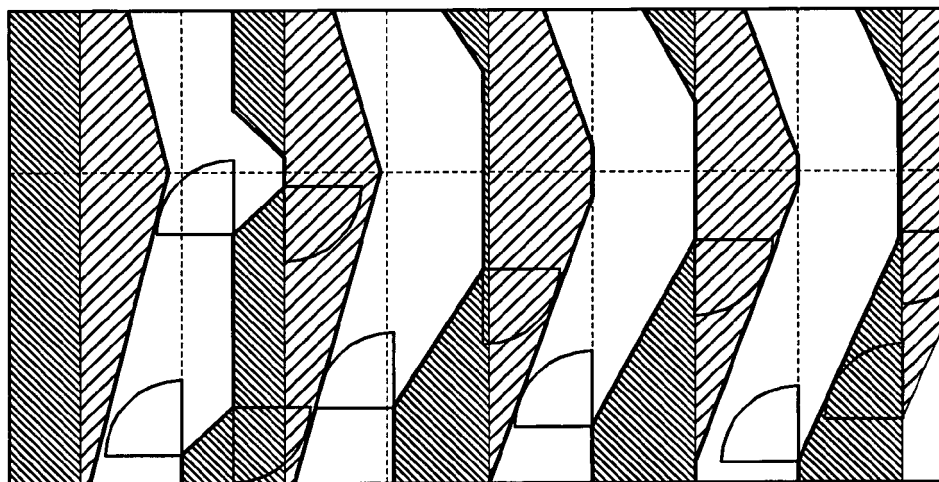
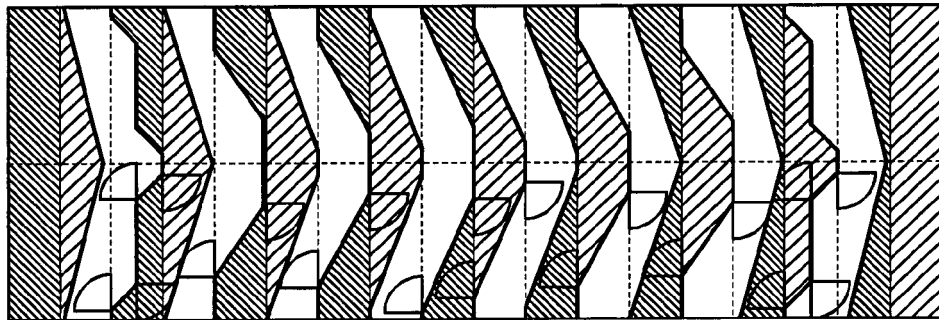
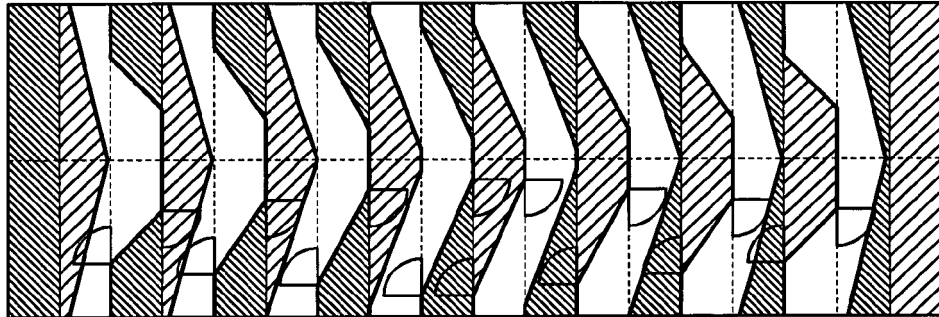


FIG 18

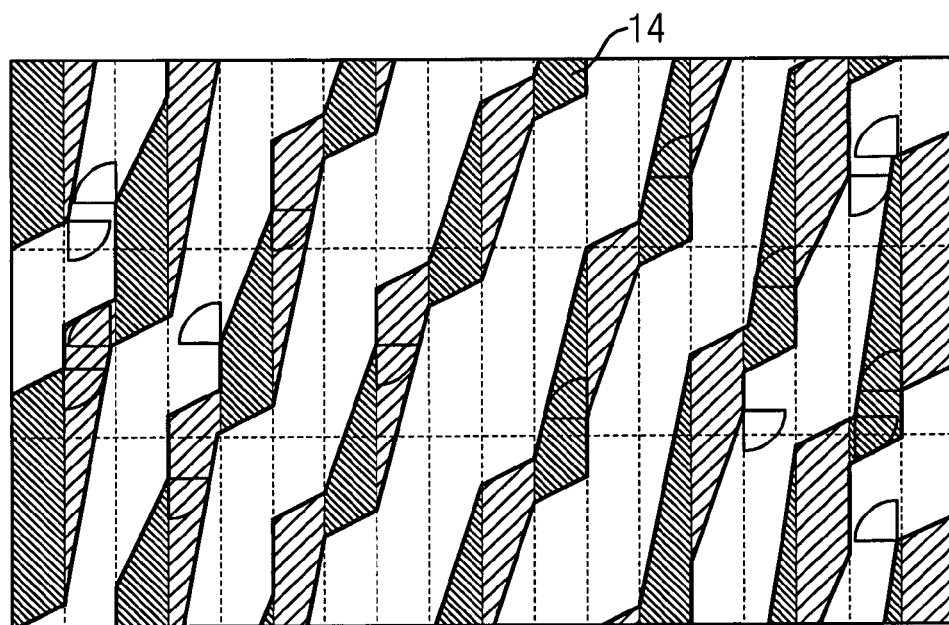
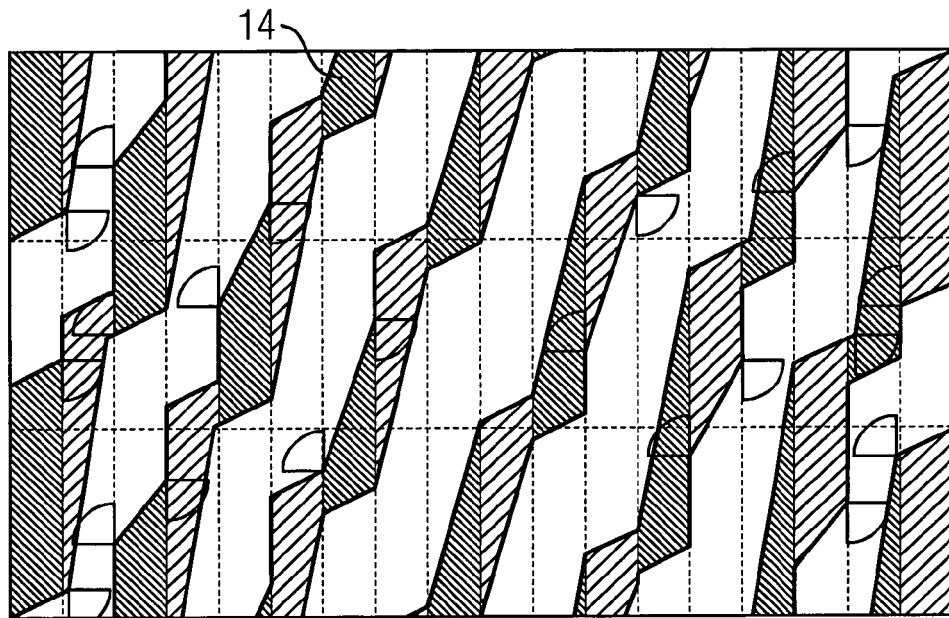


FIG 19

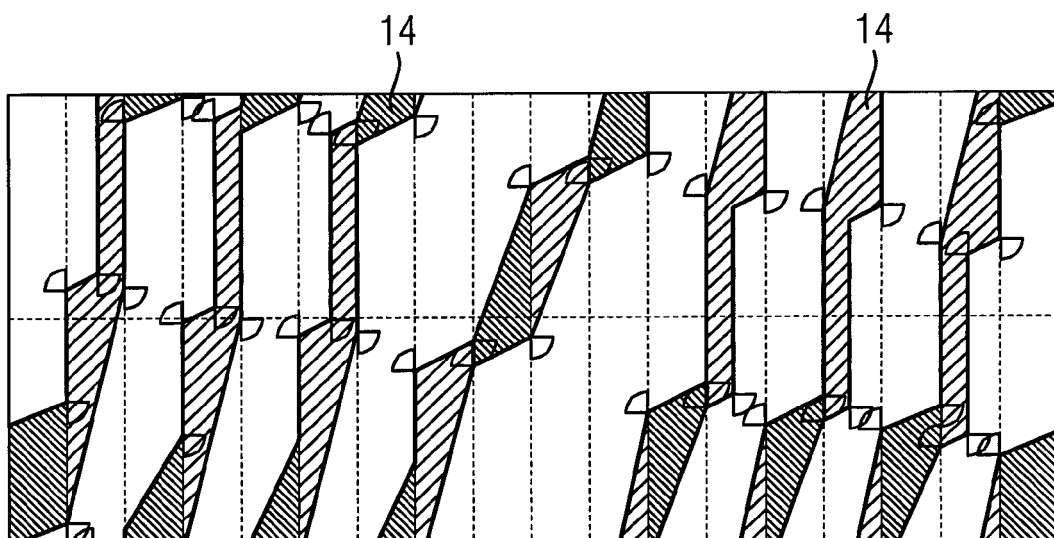
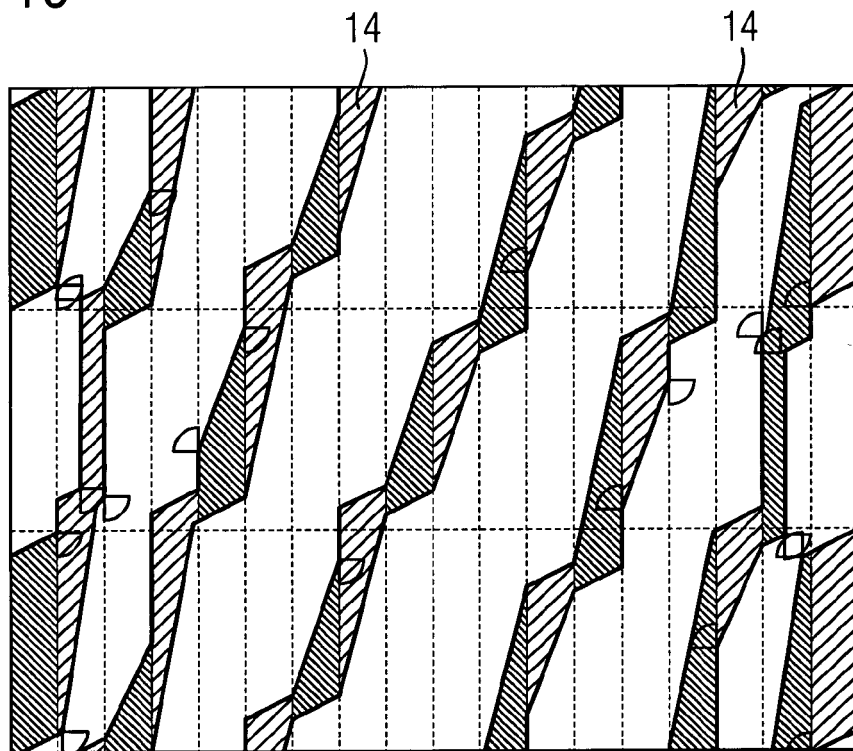
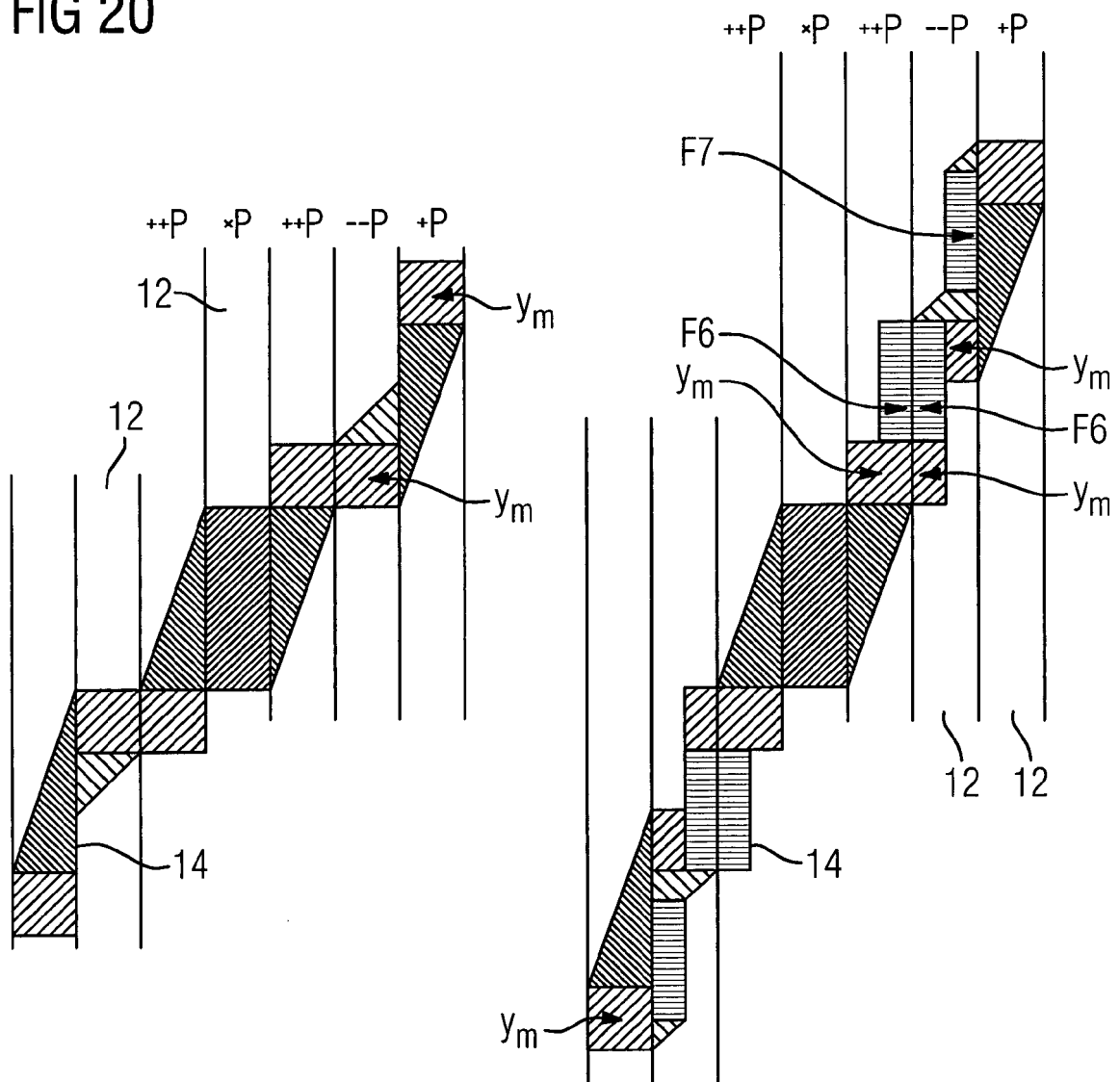


FIG 20



IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentedokumente

- US 20110051889 A1 [0012]
- US 20120201349 A1 [0012]
- EP 1117010 A2 [0013]
- WO 2013160153 A1 [0015] [0021] [0022] [0025] [0028] [0041] [0047] [0087] [0089] [0095] [0101] [0130] [0141]
- US 20120041679 A1 [0040]
- WO 2013160153 A [0043]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **T. WEITKAMP.** X-ray phase imaging with a grating interferometer. *OPTICS EXPRESS*, 08. August 2005, vol. 13 (16 [0005] [0055])