



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
09.07.2008 Patentblatt 2008/28

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

(21) Anmeldenummer: **07020485.4**

(22) Anmeldetag: **19.10.2007**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL PL PT RO SE SI SK TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL BA HR MK RS

(30) Priorität: **31.10.2006 DE 102006051912**

(71) Anmelder: **Astrium GmbH**
81663 München (DE)

(72) Erfinder:
• **Frey, Albrecht, Dr.**
72131 Ofterdingen (DE)
• **Pailer, Norbert, Dr.**
88719 Stetten (DE)
• **Köhler, Jess, Dr.**
85521 Ottobrunn (DE)

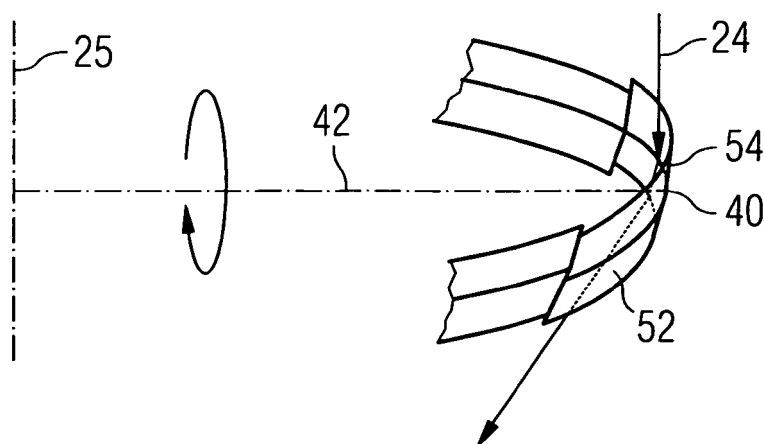
(74) Vertreter: **Hummel, Adam**
EADS Deutschland GmbH
Patentabteilung
81663 München (DE)

(54) **Vorrichtung zur Verbesserung des Auflösungsvermögens eines röntgenoptischen Apparates**

(57) Die vorliegende Erfindung beschreibt eine Vorrichtung zur Verbesserung des Auflösungsvermögens eines röntgenoptischen Apparates für einen aus einer Einfallsrichtung einfallenden Röntgenstrahl (24), die ein Spiegelement (52, 54) mit einer Spiegelflanke (52) aufweist, wobei die Spiegelflanke (52) durch einen Zylinderschalenabschnitt um eine Flankenachse (58) gebildet ist, wobei das Spiegelement (52, 54) bezüglich einer zur

Einfallsrichtung parallelen Fokusachse (25) durch einen Fokuspunkt des röntgenoptischen Apparates in einer Radialrichtung (42) beabstandet angeordnet ist und das Spiegelement (52, 54) ferner um eine sich in Radialrichtung (42) erstreckende Achse gegenüber der Einfallsrichtung gedreht angeordnet ist, derart, dass die Flankenachse (58) gegenüber der Einfallsrichtung geneigt ist.

FIG 4



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Verbesserung der räumlichen Auflösung einer Mikroporenoptik für Röntgenstrahlen gemäß Anspruch 1.

[0002] Beim Bau eines Teleskops für Röntgenstrahlen ergibt sich das Problem, dass für Röntgenstrahlung wegen der geringen Brechung und der starken Absorption in Materie keine geeigneten Linsen existieren. Auch Spiegel im üblichen Sinn sind nicht einsetzbar, da die Reflektivität für Röntgenstrahlen anders als für sichtbares Licht bei weitem zu gering ist. Einzig für sehr große Einfallswinkel nahe an 90 Grad ergeben sich ausreichende Reflektivitätswerte. Dieser Effekt kann genutzt werden, um ein Spiegelteleskop für Röntgenstrahlen zu bauen, vorausgesetzt, dass geeignet gestaltete Oberflächen gefunden werden. Dabei müssen die Röntgenstrahlen sehr flach auf die reflektierende Oberfläche treffen (streifender Einfall, grazing incidence). Röntgenstrahlen werden von polierten Oberflächen nämlich nur dann reflektiert, wenn der Einfall der Strahlen fast streifend ist. Eine Möglichkeit für die Realisierung eines Röntgenteleskops besteht daher in der Verwendung eines Parabolspiegels. Dieser hat jedoch unter den Bedingungen eines streifenden Einfalls sehr große Bildfehler.

[0003] Aus dem Stand der Technik ist ein Teleskop von Typ Wolter I bekannt (siehe beispielsweise auch die Veröffentlichung "Spiegelsysteme streifenden Einfalls als abbildende Optiken für Röntgenstrahlen", H. Wolter, Analen der Physik, 10, 1952, S. 94 - 114). Ein solches Teleskop nützt die Reflexion von Röntgenstrahlung bei streifendem Einfall auf Metalloberflächen aus. Die Grundidee besteht darin, dass hinter das Paraboloid als Korrekturspiegel ein Hyperboloid gesetzt wird, an dem die Röntgenstrahlen ein zweites Mal reflektiert werden.

[0004] Die Spiegelanordnung vom Typ Wolter-I setzt sich aus vielfach ineinander geschachtelten metallischen (oft nur aus beschichteten Folien bestehenden) Rotationsparaboloiden zusammen, denen jeweils ein Rotationshyperboloid folgt. Diese Spiegel haben zusammen ähnliche Abbildungseigenschaften, wie gewöhnliche Teleskope im sichtbaren Bereich des Lichts. Bei ihm werden die Strahlen zunächst an einem kleinen Ausschnitt eines Parabolspiegels und anschließend an einem Ausschnitt eines Hyperbolspiegels reflektiert. Um größere Intensitäten zu erzielen, wurden mehrere solcher Spiegelsysteme ineinander verschachtelt. Denn jedes Spiegelpaar hat wegen des streifenden Einfalls nur einen ganz schmalen Bereich, in dem es Röntgenlicht aufnehmen und in den Brennpunkt bündeln kann. Zum Beispiel sind beim Spiegelsystem des Röntgensatelliten ROSAT vier Wolter-Doppelspiegel gleicher Brennweite ineinander geschachtelt, um eine große Sammelfläche zu erreichen.

[0005] Aus dem Stand der Technik ist ferner eine Approximation der Wolter-I-Optik bekannt, welche mehrere Stapel von einfach geneigten zylindrischen Flächen verwendet, welche die Paraboloiden und Hyperboloiden er-

setzt. Eine solche Approximation ist tolerierbar, wenn große Brennweiten gewählt werden.

[0006] Ferner wird bislang eine Röntgenlinse durch eine Porenoptik erzeugt, deren reflektierende Oberflächen eine ideale Wolter-I-Optik durch zwei zylindrische Flächen annähert. Eine solche Porenoptik ist in den Figuren 1 A und 1 B dargestellt. Eine Approximation geschieht aus herstellungsrelevanten Gründen: Auf eine zylinderförmige Unterlage 10, wie sie in Figur 1A dargestellt ist, werden Schicht für Schicht die zylindrischen Spiegelschalen 12 aufgebracht (siehe Figur 1 B). Eine Spiegelschale ist auf der Vorderseite poliert und auf der Rückseite mit vielen Stegen 14 versehen. Die Stege 14 der letzten aufgebrachten Spiegelschale 12 werden mit der Spiegeloberfläche der darunter liegenden Spiegelschale 12 verbunden, so dass die letzte Spiegeloberfläche wieder genauso wie die darunter liegende gekrümmt ist. Diese Herstellungsmethode erfordert, dass die zwischen den Stegen 14 und den Spiegelschalen 12 verbleibenden Zwischenräume, die Poren, einen rechteckigen Querschnitt haben.

[0007] Der Vorteil einer Porenoptik ist es, viele Spiegelschalen präzise herzustellen und hintereinander halten zu können. Die Spiegelschalen sind durch Stege miteinander verbunden, was zur Geometrie vieler kleiner Poren führt. Ein Nachteil des Standes der Technik ist allerdings, dass die räumliche Auflösung der Röntgenoptiken bekannter Lösungen nicht mehr den heutigen Anforderungen entspricht.

[0008] Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Vorrichtung für eine Röntgenoptik zu schaffen, welche im Vergleich zum Stand der Technik eine verbesserte räumliche Auflösung erreicht.

[0009] Diese Aufgabe wird durch eine Vorrichtung gemäß Anspruch 1 gelöst.

Bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

[0010] Die vorliegende Erfindung schafft eine Vorrichtung zur Verbesserung des Auflösungsvermögens eines röntgenoptischen Apparates für einen aus einer Einfallsrichtung einfallenden Röntgenstrahl, umfassend ein Spiegelement mit einer Spiegelflanke, wobei die erste Spiegelflanke durch einen ersten Zylinderschalenabschnitt um eine Flankenachse gebildet und das Spiegelement bezüglich einer zur Einfallsrichtung parallelen Fokusachse durch einen Fokuspunkt des röntgenoptischen Apparates in einer Radialrichtung beabstandet angeordnet ist, und wobei das Spiegelement ferner um eine sich in Radialrichtung erstreckende Achse gegenüber der Einfallsrichtung gedreht derart angeordnet ist, dass die Flankenachse gegenüber der Einfallsrichtung geneigt ist.

[0011] Der vorliegenden Erfindung liegt die Erkenntnis zu Grunde, dass sich durch eine Drehung des Spiegelementes um die Radialachse eine Approximation der parabolischen und hyperbolischen Form erreichen lässt, welche sich näher an der optimalen Form orientiert, als dies eine einfache Approximation aus Zylinderschalen

ermöglicht.

[0012] Die erfindungsgemäße Vorrichtung hat den Vorteil, dass sie zu einer Verbesserung der räumlichen Auflösung einer Röntgenabbildung führen kann, was bei einer breiten Anwendung von röntgenoptischen Geräten einen weiten Einsatzbereich finden kann. Mit anderen Worten besteht ein Vorteil der erfindungsgemäßen Vorrichtung darin, dass diese zu einer geringeren Unschärfe des Bildes führt, was wiederum zu einer besseren Bildqualität führt. Die gewünschte Reduktion der Bildunschärfe kann von der Stapellänge und der Brennweite abhängig sein. Die Verbesserung der Auflösung kann beispielsweise im Bereich von einem Faktor 3 liegen.

[0013] Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung kann eine an die Spiegelflanke angrenzende zweiten Spiegelflanke vorgesehen sein, die durch einen zweiten Zylinderschalenabschnitt um eine zweite Flankenachse gebildet ist, wobei das Spiegelement derart angeordnet sein kann, dass eine die Flankenachse und zweite Flankenachse umfassende Ebene gegenüber der Einfallsrichtung geneigt ist. Dies hat den Vorteil, dass nunmehr nicht nur der Übergang zwischen der ersten und zweiten Spiegelflanke besser approximiert werden kann, sondern auch neben der Spiegelflanke die zweite Spiegelflanke durch die Zylinderapproximation kostengünstig hergestellt werden kann.

[0014] Um ein Spiegelement herzustellen, dass der Wolter-I-Optik besonders gut entspricht, kann gemäß einer Ausführungsform der Erfindung die Spiegelflanke einer Approximation einer parabolischen Form und die zweite Spiegelflanke einer Approximation einer hyperbolischen Form entsprechen.

[0015] Damit das Spiegelement eine besonders gute Approximation der Wolter-I-Optik darstellt, kann gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung das Spiegelement eine Breite aufweisen, die geringer als etwa ein Zehntel des radialen Abstandes des Spiegelementes bezüglich der Fokusachse ist. Hierdurch kann sichergestellt werden, dass der Approximationsbereich nicht zu groß wird, so dass die Approximation nicht unzulässig wird.

[0016] Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung kann das Spiegelement eine Breite aufweisen, die einer Bogenlänge von weniger als etwa zwei Grad in die Radialrichtung entspricht. Dieser Bereich der Breite des Spiegelementes bietet eine noch bessere Approximation der Form der Wolter-I-Optik, da der zu approximierende Bereich sehr klein gegenüber der gesamten parabolischen und hyperbolischen Form der Wolter-I-Optik ist, so dass die Approximation keinen großen Fehler verursacht.

[0017] Auch kann gemäß einer Ausführungsform der Erfindung eine Neigung zwischen der Flankenachse und der Einfallsrichtung in einem Bereich zwischen etwa einem halben Grad und etwa fünf Grad liegen, was sich als besonders guter Neigungsbereich für die Verbesserung der Auflösungsvermögens des röntgenoptischen Apparates auszeichnet.

[0018] Um eine weitere Verbesserung des Auflösungsverhaltens des röntgenoptischen Apparates zu erreichen, kann gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ein weiteres Spiegelement mit einer dritten Spiegelflanke und einer an die dritte Spiegelflanke angrenzenden vierten Spiegelflanke vorgesehen sein, wobei die dritte Spiegelflanke durch einen dritten Zylinderschalenabschnitt um eine dritte Flankenachse gebildet und das weitere Spiegelement bezüglich der Fokusachse in einer weiteren Radialrichtung beabstandet angeordnet ist, und wobei das weitere Spiegelement ferner um eine sich in die weitere Radialrichtung erstreckende weitere Achse gegenüber der Einfallsrichtung derart gedreht angeordnet ist, dass die dritte Flankenachse gegenüber der Einfallsrichtung geneigt ist. Durch das Vorsehen eines derartigen weiteren Spiegelementes kann somit eine Verbesserung der Ausbeute der einfallenden Röntgenstrahlen erreicht werden.

[0019] Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung kann das weitere Spiegelement an das Spiegelement angrenzen und in einem Abstand von der Fokusachse angeordnet sein, der dem Abstand des Spiegelementes von der Fokusachse entspricht, und ein lateraler Übergang zwischen dem Spiegelement und dem weiteren Spiegelement kann einen Stufenversatz aufweisen. Durch diese verkippte Anordnung der Spiegelemente kann der Bereich der vertikalen Ausdehnung der Grenzlinie zwischen der ersten und zweiten Spiegelflanke bzw. der dritten und vierten Spiegelflanke in einem sehr engen Bereich gehalten werden, so dass einfallende Röntgenstrahlen an beiden Spiegelementen auf einen sehr kleinen Fokusbereich bzw. Fokuspunkt abgelenkt werden können. Wäre die Anordnung der Spiegelemente derart gewählt, dass sich die Grenzlinien zwischen der ersten und zweiten Spiegelflanke und der dritten und vierten Spiegelflanke berühren würden, würde eine solche Anordnung keine optimale Fokussierung auf einen gemeinsamen Fokuspunkt bewirken.

[0020] Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung kann es vorteilhaft sein, wenn die erfindungsgemäße Vorrichtung eine Mehrzahl von zusätzlichen Spiegelementen umfasst, die einen Ring aus Spiegelementen um die Fokusachse bilden. Dies bewirkt, dass Röntgenstrahlen von einer Vielzahl von Spiegelementen auf einen einzigen Fokusbereich bzw. Fokuspunkt abgelenkt werden, was wiederum die Intensität des Lichtflecks in dem Fokuspunkt erhöht. Hierdurch ist dann eine bessere Detektion bzw. Auswertungsfähigkeit der eintreffenden Röntgenstrahlen möglich.

[0021] Auch kann die Vorrichtung gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ein zusätzliches Spiegelement aufweisen, welches in der Radialrichtung von der Fokusachse beabstandet angeordnet ist, wobei ein Abstand des zusätzlichen Spiegelementes von der Fokusachse größer ist, als der Abstand des Spiegelementes zu der Fokusachse. Insbesondere ist eine solche Vorrichtung dann vorteilhaft, wenn das zusätzliche Spiegelement zwei Spiegelflanken aufweist, die eine Neigung

zueinander haben, so dass ein in der Einfallrichtung einfallender Röntgenstrahl auf einen im wesentlichen identischen Fokuspunkt reflektiert wird, wie ein Röntgenstrahl, der am Spiegelement abgelenkt wird. Somit kann durch eine geschachtelte Anordnung ebenfalls eine Verbesserung des Auflösungsverhaltens erreicht werden.

[0022] Weitere Vorteile und Anwendungsmöglichkeiten der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung in Verbindung mit den in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispielen.

[0023] In der Beschreibung, in den Ansprüchen, in der Zusammenfassung und in den Zeichnungen werden die in der hinten angeführten Liste der Bezugszeichen verwendeten Begriffe und zugeordneten Bezugszeichen verwendet.

[0024] Die Zeichnungen zeigen in:

- Fig. 1A und 1 B Darstellungen des Aufbaus einer Porenoptik;
- Fig. 2 eine schematische Darstellung von zwei aufeinanderfolgenden Spiegelschalen gemäß der Wolter-I-Anordnung;
- Fig. 3 eine Darstellung von Zylindersegmenten einer Spiegelschale;
- Fig. 4 eine Darstellung eines Ausführungsbeispiels der Drehung von Zylindersegmenten um die radiale Achse der Teleskopanordnung;
- Fig. 5A und 5B Darstellungen eines Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung in zwei unterschiedlichen Schnittansichten;
- Fig. 6 eine Darstellung der Ablenkung von Lichtstrahlen an dem Teleskop;
- Fig. 7 ein Spotdiagramm in der Fokalebene, wobei konische Spiegelschalen zur Erzeugung des Spotdiagramms verwendet werden;
- Fig. 8 ein Diagramm der Abweichung bei Verwendung eines Spiegelementes aus zwei Zylinderflächen;
- Fig. 9A und 9B Diagramme der Abweichung der Zylindernäherung einer konischen Fläche für einen Paraboloiden (Fig. 9A) bzw. eine Hyperboloiden (Fig. 9B);

Fig. 10

eine Darstellung der Beleuchtung des Spiegelementes aus zwei Zylinderschalen;

5 Fig. 11

ein Spotdiagramm in der Fokalebene, das durch ein Spiegelement mit Zylinderflächen erzeugt wird;

Fig. 12A und 12B

Diagramme der Abweichung eines Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung von einer unmodifizierten Zylinderapproximation für die erste Spiegelflanke (Fig. 12A) und die zweite Spiegelflanke (Fig. 12B); und

Fig. 13

ein Spotdiagramm in der Fokalebene, das durch ein Spiegelement gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung erhalten wird.

[0025] Zur genaueren Erklärung der vorliegenden Erfindung sollen zunächst die Grundüberlegungen näher erläutert werden, die zur erfindungsgemäßen Vorrichtung führen. Absolute Größenangaben in der folgenden Beschreibung und den Zeichnungen sind nur beispielhafte Angaben, welche die Erfindung nicht einschränken.

1. Konische Approximation zur Wolter-I-Optik für Röntgenastronomie

[0026] Ein Röntgenteleskop kann aus Spiegelschalen 20, 22 bestehen, die eine so genannte Wolter-I-Optik darstellen. Dann ist die dem Objekt zugewandte Spiegelschale 20 ein Ausschnitt eines Paraboloiden und die der Bildebene zugewandten Spiegelschale 22 ein Ausschnitt eines Hyperboloiden. Demnach wäre die erste Spiegelschale 20 der Paraboloidausschnitt und die zweite Spiegelschale 22 der Hyperboloidausschnitt, wie es in Fig. 2 dargestellt ist.

[0027] Um stets im Bereich des streifenden Einfalls von Röntgenstrahlen 24 zu arbeiten, sind die Ausschnitte des Paraboloiden und des Hyperboloiden schmale Spiegelschalen. Sie werden üblicherweise gestaffelt angeordnet, um eine größere Lichtmenge auf die Fokalebene 23 im Abstand 24a von den Spiegelschalen 20, 22 abzubilden. Es ist gängig, die schmalen schalenförmigen Ausschnitte des Paraboloiden und des Hyperboloiden durch konische Elemente anzunähern. In diesem Fall stellen die Spiegel 20 und 22 ringförmige Ausschnitte von Kegelmäntel mit einem Radius 26 dar. Die beiden zugrunde liegenden Kegel habe eine Kegelachse, die mit der Teleskopsymmetrieachse (oder Fokusachse 25) identisch ist. Die Kegelwinkel sind so gewählt, dass sich die Kegelflächen am Ort der Spiegelschalen 20 und 22 tangential aneinander anschmiegen. Im Anwendungsbeispiel ist einleitend eine konische Approximation einer

Wolter-I-Optik beschrieben.

[0028] Ein Kriterium zur Beurteilung der Qualität der optischen Abbildung ist der Durchmesser des Lichtflecks 27 in der Fokalebene 23. Ein kleiner Fleck 27 bedeutet, dass das Auflösungsvermögen des Teleskops groß ist, während bei einem großen Lichtfleck 27 zwei nahe beieinander liegende Objekte nicht unterschieden werden können. Daher ist es das Ziel jeden optischen Teleskops, einen möglichst kleinen Lichtfleck 27 in der Fokalebene 23 zu erzeugen.

2. Zylinderapproximation

[0029] Eine Fertigung ganzer Spiegelschalen 20, 22 ist aufwendig. Es ist zweckmäßig, eine azimutale Segmentierung 30 vorzunehmen, wie es in Fig. 3 dargestellt ist. Ein solches Spiegelsegment 32 bzw eine Spiegelflanke kann näherungsweise durch eine Ausschnittsfläche eines Zylindermantels beschrieben werden. Das erleichtert die Fertigung der Spiegelschalensegmente sehr. Diese Näherung führt allerdings auch dazu, dass der Durchmesser des Lichtflecks in der Focalebene größer wird.

[0030] Die Zylinderapproximation besteht darin, eine Zylinderfläche an die konische Fläche, welche den Parabolidausschnitt repräsentiert, anzupassen. Das gelingt gut, sofern die azimutale Segmentgröße 30 im Vergleich zu dem Radius der Schalen 34 klein ist, d.h. $b_{\text{Segment}} \ll R_{\text{Schale}}$ gilt. Die Folge dieser Approximation ist, dass der Lichtfleck in der Fokalebene größer wird.

3. Zylinderapproximation mit gedrehten Zylinderflächen

[0031] Gegenstand eines Ausführungsbeispiels der Erfindung ist eine Modifikation der Zylinderapproximation, die es ermöglicht, den Lichtfleckdurchmesser gegenüber der Zylinderapproximation deutlich zu verkleinern. Damit ist es möglich, mit Zylinderschalenausschnitten einen Lichtfleck der Größe der konischen Approximation zur Wolter-1-Optik zu erzielen. Auf diese Weise hat man die Vorteile der einfacheren Fertigung von Zylinderschalensegmenten ohne signifikanten Verlust des Auflösungsvermögens des Teleskops erwirkt.

[0032] Die Modifikation besteht gemäß einem Ausführungsbeispiel darin, dass die Zylindersegmente 40 um die radiale Achse 42 der Spiegelschalenanordnung des Teleskops, welche durch das Zentrum des Spiegelschalensegments verläuft, gedreht werden. Eine derartige Anordnung der Drehung der Zylindersegmente um die radiale Achse der Teleskopanordnung ist in Fig. 4 dargestellt. Das Anwendungsbeispiel zeigt, dass damit der Durchmesser des Lichtflecks in der Fokusebene um einen Faktor drei reduziert werden kann. Die Verbesserung ist abhängig vom Abstand des Spiegelsegments zur Symmetrieachse: Sie nimmt mit kleinerem Abstand zu. Da das Anwendungsbeispiel sich auf ein Spiegeltandem der Peripherie des Teleskops bezieht, werden für die inneren Spiegeltandems deutlich kleinere Lichtfleck-

durchmesser erreicht.

[0033] Die Figuren 5A und 5B zeigen ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Spiegelementes in verschiedenen Schnittdarstellungen. Hierbei zeigt die Figur 5A eine Querschnittsdarstellung des Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Spiegelementes. das Spiegelement umfasst dabei eine erste Spiegelflanke 52 und eine zweiten Spiegelflanke 54, welche beide aneinander angrenzen. Hierbei ist die erste Spiegelflanke 52 in einem radialen Abstand 56 um eine erste Flankenachse 58 herum angeordnet. Die erste Spiegelflanke 52 bildete sich aus einem Zylindersegment bzw. einem Zylinderoberflächenabschnitt. Hierbei ist die erste Flankenachse 58 gegenüber der Fokusachse 25 geneigt. Weiterhin besteht auch die zweite Spiegelflanke 54 aus einem Zylinderoberflächenabschnitt, der in einem zweiten in radialen Abstand 60 um eine zweite Flankenachse 62 herum angeordnet ist. Die zweite Flankenachse 62 ist dabei gegenüber der ersten Flankenachse 58 geneigt, so dass das aus der ersten in Spiegelflanke 52 und der zweiten Spiegelflanke 54 bestehende Spiegelement eine geknickte Form aufweist. Hierdurch kann sichergestellt werden, dass Röntgenstrahlen, die in einer zur Fokusachse 25 parallelen Einfallrichtung auf das Spiegelement auftreffen, auf einen im Figur 5A nicht dargestellten Fokuspunkt fokussiert werden.

[0034] Fig. 5B zeigen eine Grundrissdarstellung des in Fig. 5A dargestellten Spiegelementes wobei zugleich benachbart angeordnete Spiegelemente ebenfalls dargestellt sind. In Fig. 5B ist ebenfalls wieder die Fokusachse 25 sowie die erste Flankenachse 58 sowie die zweite Flankenachse 62 dargestellt ist. Die erste und zweite Spiegelflanke 52 beziehungsweise 54 der einzelnen Spiegelemente sind dabei wieder Zylinderoberflächenabschnitte, wie dies bereits im Zusammenhang mit Fig. 5A beschrieben wurde. Ferner ist in Fig. 5B dargestellt, dass erfindungsgemäß eine Rotation um eine zur Fokusachse 25 rechtwinklig angeordnete Radialachse (hier nicht dargestellt) gedreht ist, so dass zwischen der Fokusachse 25 unter der ersten bzw. zweiten Flankenachse 58 beziehungsweise 62 ein Versatzwinkel 64 entsteht. Durch diesen Versatzwinkel 64 kann nun die Verbesserung in der optischen Auflösung erreicht werden, welche erfindungsgemäß angestrebt werden soll.

[0035] Weiterhin können auch benachbarte Spiegelemente, wie sie in Fig. 5B durch die Bezugszeichen 66 und 68 dargestellt sind, in einem Stufenversatz 70 angeordnet sein, so dass sich die in Fig. 5B dargestellte Struktur ergibt. Hierdurch kann sichergestellt werden, dass eine Begrenzung zwischen der ersten Spiegelflanke 52 und der zweiten Spiegelflanke 54 möglichst in einem schmalen lateralen Bereich liegt, so dass eine Fokussierung von Lichtstrahlen bzw. Röntgenstrahlen von verschiedenen Spiegelementen möglichst alle auf einen kleinen Fokuspunkt fokussiert werden. Auch kann durch die in Fig. 5B dargestellte Struktur eine Ringform um in die Fokusachse 25 erstellt werden, wie es beispielsweise in Fig. 2 dargestellt ist. Ansatzweise ist eine

solche Form auch bereits in Fig. 4 angedeutet.

[0036] Erfindungsgemäß wird die Verbesserung bei der Fokussierung eines Röntgenstrahles dadurch erreicht, dass durch den Versatzwinkel 64 eine bessere Approximation der Wolter-I-Optik erreicht werden kann, als er wenn die Begrenzungslinie zwischen einer der ersten Spiegelflanke 52 und der zweite Spiegelflanke 54 waagerecht, das heißt rechtwinklig zur Fokusachse 25 ist.

[0037] Im Folgenden wird ein konkretes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung im Vergleich mit einer konischen sowie einer einfachen Zylinderapproximation näher beschrieben.

[0038] Ein Modell der konischen Approximation der Wolter-I-Optik und der unmodifizierten und modifizierten Zylinderapproximation (d.h. eines Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung) der konischen Approximation der Wolter-I-Optik wurde mit Hilfe des Optik-Programms "ASAP" erstellt. Mithilfe geometrischoptischen Strahldurchrechnungen wurde der Lichtfleck in der Fokalebene der Anordnung (Spotdiagramm) berechnet.

- Geometrieparameter

[0039] Abstand zwischen Spiegelschalen und Fokalebene: $f = 50000\text{mm}$

Radius der Spiegelschalen Begrenzung: $R = 3500\text{mm}$

- Konische Approximation der Wolter-I-Optik

Lichtquelle:

[0040] Lichtstrahlen 24 (speziell Röntgenstrahlen) fallen parallel zur Symmetrieachse 25 des Teleskops auf die ringförmige Anordnung eines Spiegeltandems 40, das aus der Spiegelschale, welche die konische Approximation des Paraboloiden darstellt, und der zweiten Spiegelschale, welche die konische Approximation des Hyperboloiden darstellt, besteht. Das Raster der Lichtstrahlen ist in Fig. 6 angedeutet, wobei das linke Teilbild eine Grundrissdarstellung und das rechte Teilbild eine Aufrissdarstellung eines solchen Teleskopes wiedergibt.

Lichtfleck in der Fokalebene:

[0041] Es ergibt sich dann ein rotationssymmetrischer Lichtfleck im Zentrum der Fokalebene, dessen Durchmesser etwa 0.6mm beträgt. Das geht aus den Dimensionen des in Fig. 7 dargestellten Diagrams hervor, das die Auftreffpunkte der Strahlen in der Fokalebene darstellt. Wie erwartet werden kann, ist die Symmetrie erhalten und die Bildpunkte der einzelnen Strahlen liegen auf Kreisen. Eine Verschiebung der Fokalebene entlang der Teleskopachse hat zur Folge, dass der Lichtfleck größer wird, unabhängig von der Verschieberichtung. Das zeigt, dass tatsächlich die Fokalebene vorliegt. Die Fig. 7 zeigt dabei ein Spotdiagramm in der Fokalebene. Die beiden konischen Spiegelschalen werden mit axialen

Lichtstrahlen beleuchtet. Der Spotdurchmesser beträgt 0.42mm .

- Zylinderapproximation

[0042] Ein azimuthales Segment entspricht beispielsweise einem 360° -stel eines Kreisbogens, also einem Grad. Bei einem Kreisradius von 3500mm bedeutet das eine Bogenlänge von $b = (2\pi/360) \cdot 1^\circ \cdot 3500\text{mm} = 61\text{mm}$. Es ist jeweils eine Zylinderfläche an die konischen Flächen 1 und 2 angepasst worden, die den Spiegelflächen 52 und 54 entsprechen. Das ist sehr gut möglich, weil die Bogenlänge sehr viel kleiner als der Kreisradius ist. Fig. 8 zeigt eine Abbildung eines solchen Tandems aus zwei Zylinderflächen.

[0043] Die Abweichung der Zylinderflächen von den konischen Flächen ist stets kleiner als ein Mikrometer. Die Figuren 9A und 9B zeigen, dass die Differenz im Fall der Spiegelfläche 1 (entsprechend der Spiegelflanke 52, daher mit dem Bezugszeichen 52' gekennzeichnet) weniger als 10nm beträgt (Fig. 9A), im Fall der Spiegelfläche 2 (entsprechend der Spiegelflanke 54, daher mit dem Bezugszeichen 54' gekennzeichnet) sind es weniger als 200nm (Fig. 9B). Somit ist in Fig. 9A die Abweichung von der konischen Approximation als Differenz zwischen der Zylindernäherung der konischen Fläche dargestellt, die den Paraboloiden der Wolter-I-Optik beschreibt, während in Fig. 9B die Abweichung von der konischen Approximation als Differenz zwischen der Zylindernäherung der konischen Fläche dargestellt ist, die den Hyperboloiden der Wolter-I-Optik beschreibt. Die y-Achse gibt die Abweichung in Mikrometern an.

Lichtquelle:

[0044] Das Tandem aus Zylinderspiegeln 52', 54' wird mit Lichtstrahlen 24 beleuchtet. Die Lichtstrahlen 24 verlaufen parallel zur Teleskopachse 25, ihre räumliche Anordnung ist in Figur 10 gezeigt, in der die Beleuchtung des Tandems aus zwei Zylinderschalen 52' und 54' dargestellt ist. Der Kreisbogenschnitt ist übertrieben dargestellt; tatsächlich ist der Azimutwinkel etwa 1° .

Lichtfleck in der Fokalebene:

[0045] Ein Zylinderspiegeltandem erzeugt einen Lichtfleck im Zentrum der Fokalebene, welcher unsymmetrisch ist. Seine maximale Ausdehnung liegt in der Richtung senkrecht zu dem Spiegeltandem und beträgt etwa 0.82mm , wie in dem Spotdiagramm aus Fig. 11 zu entnehmen ist. Eine Anordnung aus mehreren Zylinderspiegeltandems derart, dass ein kompletter Ring aus Spiegelschalen entsteht, hat dann einen runden Lichtfleck in der Mitte der Fokalebene zur Folge, dessen Durchmesser etwa 0.82mm beträgt. Fig. 11 zeigt dabei ein Spotdiagramm in der Fokalebene, das ein Tandem aus zwei beschriebenen Zylinderflächen aus den axial einfallenden Lichtstrahlen erzeugt. Der Spotdurchmesser beträgt

0.82mm.

- Zylinderapproximation mit gedrehten Zylinderflächen (Anordnung gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung)

[0046] Die Oberflächen der modifizierten (d.h. der erfindungsgemäß gedrehten) und unmodifizierten Zylinderapproximation der Spiegelfläche 52 bzw. 52' unterscheiden sich um weniger als 40 Mikrometer; die Oberflächen der modifizierten und unmodifizierten Zylinderapproximation der Spiegelfläche 54 und 54' unterscheiden sich um weniger als 60 Mikrometer. Obwohl das kleine Zahlen im Vergleich zu den lateralen Dimensionen der Spiegelflächen sind, stellen sie doch signifikante Abweichungen dar, wenn man bedenkt, dass der Unterschied zwischen Zylinder- und konischer Approximation um drei Größenordnungen kleiner ist. In Fig. 12A ist die Abweichung der modifizierten (gedrehten) und unmodifizierten Zylinderapproximation für die Spiegelfläche 52 bzw. 52' dargestellt, wogegen in Fig. 12B die Abweichung der modifizierten (gedrehten) und unmodifizierten Zylinderapproximation für die Spiegelfläche 2 des Spiegeltandems dargestellt ist.

Lichtquelle:

[0047] Um einen direkten Vergleich zu haben, ist die gleiche Lichtquelle wie im vorangegangenen Abschnitt verwendet worden.

Lichtfleck in der Fokalebene:

[0048] Durch Drehung des Tandems aus den beiden Zylinderspiegeln 52 und 54 um die radiale Achse der Teleskopanordnung um 1,00713 Grad kann der Durchmesser des Lichtflecks deutlich verkleinert werden. Wie in Fig. 13 gezeigt ist, beträgt die maximale Ausdehnung des Lichtflecks etwa 0.25 mm. Eine Anordnung aus mehreren Zylinderspiegeltandems derart, dass ein kompletter Ringe aus Spiegelschalen entsteht, hat dann einen runden Lichtfleck in der Mitte der Fokalebene zur Folge, dessen Durchmesser etwa 0.25 mm beträgt. Das ist etwa um einen Faktor 3.3 kleiner als im Fall der unmodifizierten Zylinderapproximation und etwa um einen Faktor 2.4 kleiner als im Fall der konischen Approximation der Wolter-I-Optik.

Fig. 13 zeigt dabei ein Spotdiagramm in der Fokalebene, das ein Tandem aus zwei gedrehten Zylinderflächen aus den axial einfallenden Lichtstrahlen erzeugt. Der Spotdurchmesser beträgt 0.25mm.

Bezugszeichen

[0049]

- 10 Unterlage
- 12 zylindrische Spiegelschalen

- 14 Stege
- 20,22 Spiegelschalen
- 23 Fokusebene
- 24 Lichtstrahlen, Röntgenstrahlen
- 5 24a Abstand zwischen der Fokalebene und den Spiegelschalen
- 25 Fokusachse, Teleskopachse
- 26 Radius der Spiegelschalen
- 27 Lichtfleck
- 10 30 azimutale Segmentierung
- 32 Spiegelsegment
- 34 Radius der Schalen der Zylinderapproximation
- 40 Zylindersegment
- 42 radiale Achse, Radialachse
- 15 52 erste Spiegelflanke
- 54 zweite Spiegelflanke
- 56 radialer Abstand von der ersten Spiegelflanke zur ersten Flankenachse 58
- 58 erste Flankenachse
- 20 60 radialer Abstand von der zweiten Spiegelflanke zur zweiten Flankenachse 62
- 62 zweite Flankenachse
- 64 Versatzwinkel
- 66,68 weitere Spiegelemente
- 25 70 Stufenversatz

Patentansprüche

- 30 1. Vorrichtung zur Verbesserung des Auflösungsvermögens eines röntgenoptischen Apparates für einen aus einer Einfallsrichtung einfallenden Röntgenstrahl (24), umfassend
 - 35 ein Spiegelement (52, 54) mit einer Spiegelflanke (52), wobei die Spiegelflanke (52) durch einen Zylinderschalenabschnitt um eine Flankenachse (58) gebildet und das Spiegelement (52, 54) bezüglich einer zur Einfallsrichtung parallelen Fokusachse (25) durch einen Fokuspunkt des röntgenoptischen Apparates in einer Radialrichtung (42) beabstandet angeordnet ist, und wobei das Spiegelement (52, 54) ferner um eine sich in Radialrichtung (42) erstreckende Achse gegenüber der Einfallsrichtung derart gedreht angeordnet ist, dass die Flankenachse (58) gegenüber der Einfallsrichtung geneigt ist.
- 40 2. Vorrichtung gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass**
 - 45 eine an die Spiegelflanke (52) angrenzende zweite Spiegelflanke (54) vorgesehen ist, die durch einen zweiten Zylinderschalenabschnitt um eine zweite Flankenachse (62) gebildet ist, wobei das Spiegelement (52, 54) derart angeordnet ist, dass eine die Flankenachse (58) und zweite Flankenachse (62) umfassende Ebene gegenüber der Einfallsrichtung geneigt ist.
- 50 3. Vorrichtung gemäß Anspruch 2,

dadurch gekennzeichnet, dass

die Spiegelflanke (52) einer Approximation einer hyperbolischen Form und die zweite Spiegelflanke (54) einer Approximation einer parabolischen Form entspricht.

4. Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3,
dadurch gekennzeichnet, dass
das Spiegelement (52, 54) eine Breite aufweist, die geringer als etwa ein Zehntel des radialen Abstandes des Spiegelementes bezüglich der Fokusachse (25) ist. 5
5. Vorrichtung gemäß Anspruch 4,
dadurch gekennzeichnet, dass
das Spiegelement (52, 54) eine Breite aufweist, die einer Bogenlänge von weniger als etwa zwei Grad in die Radialrichtung (42) entspricht. 10
6. Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet, dass
eine Neigung zwischen der Flankenachse (58) und der Einfallrichtung in einem Bereich zwischen etwa einem halben Grad und etwa 5 Grad liegt. 15
7. Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Vorrichtung ein weiteres Spiegelement (66, 68) mit einer dritten Spiegelflanke (52) und einer an die dritte Spiegelflanke (52) angrenzenden vierten Spiegelflanke (54) aufweist, wobei die dritte Spiegelflanke (52) durch einen dritten Zylinderschalenabschnitt um eine dritte Flankenachse gebildet und das weitere Spiegelement (66, 68) bezüglich der Fokusachse in einer weiteren Radialrichtung beabstandet angeordnet ist, und wobei das weitere Spiegelement (66, 68) ferner um eine sich in die weitere Radialrichtung erstreckende weitere Achse gegenüber der Einfallrichtung derart gedreht angeordnet ist, dass die dritte Flankenachse gegenüber der Einfallrichtung geneigt ist. 20
8. Vorrichtung gemäß Anspruch 7,
dadurch gekennzeichnet, dass
das weitere Spiegelement (66, 68) an das Spiegelement (52, 54) angrenzt und in einem Abstand von der Fokusachse (25) angeordnet ist, der dem Abstand des Spiegelementes (52, 54) von der Fokusachse (25) entspricht und wobei ein Übergang zwischen dem Spiegelement (52, 54) und dem weiteren Spiegelement (66, 68) einen Stufenversatz (70) aufweist. 25
9. Vorrichtung gemäß Anspruch 7 oder 8,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Vorrichtung eine Mehrzahl von zusätzlichen Spiegelementen (66, 68) umfasst, die einen Ring aus Spiegelementen um die Fokusachse bilden. 30

10. Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Vorrichtung ein zusätzliches Spiegelement aufweist, welches in der Radialrichtung von der Fokusachse beabstandet angeordnet ist, wobei ein Abstand des zusätzlichen Spiegelementes von der Fokusachse (25) größer ist als der Abstand des Spiegelementes (52, 54) zu der Fokusachse (25). 35

FIG 1A

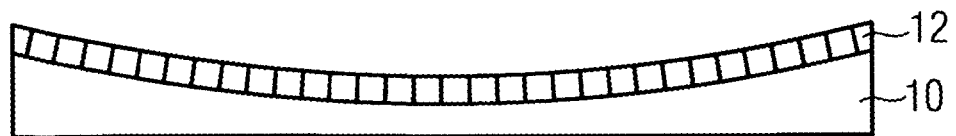


FIG 1B

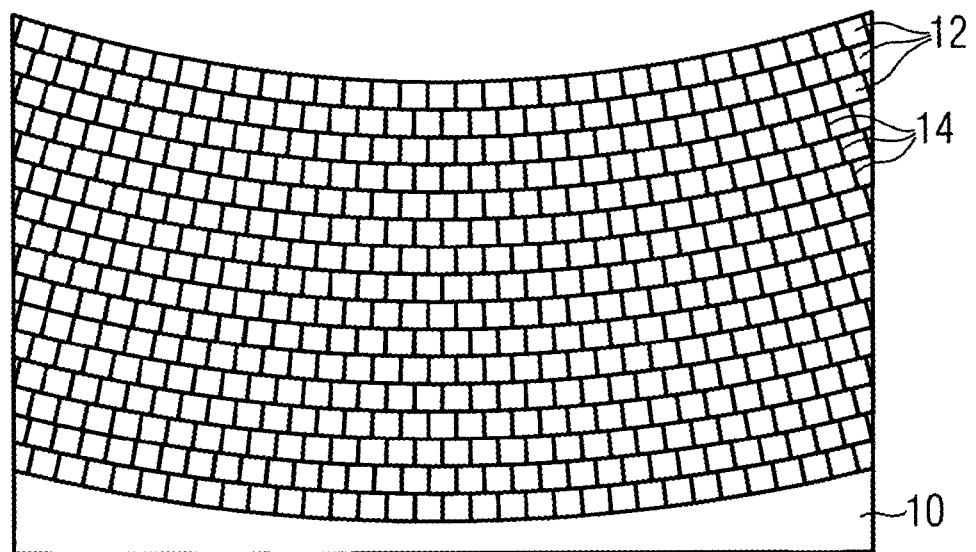


FIG 2

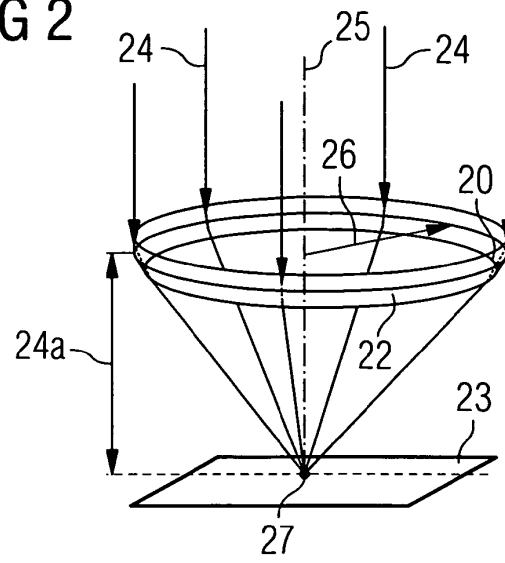


FIG 3

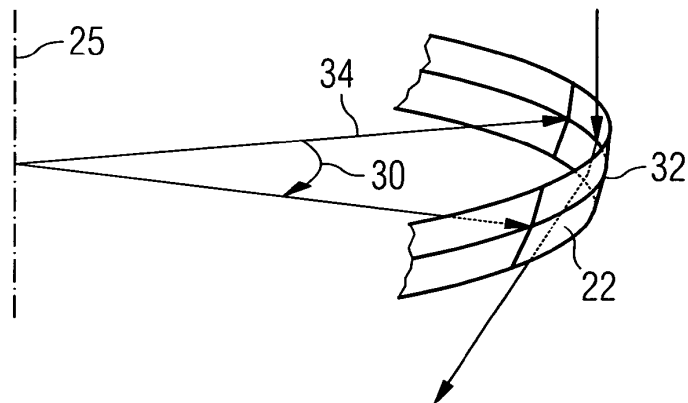


FIG 4

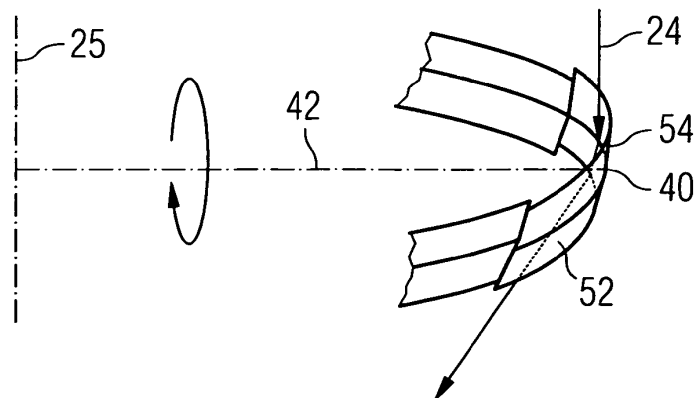


FIG 5A

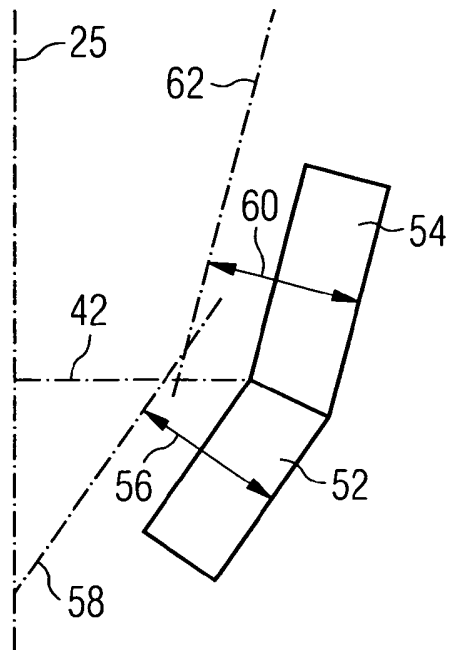


FIG 5B

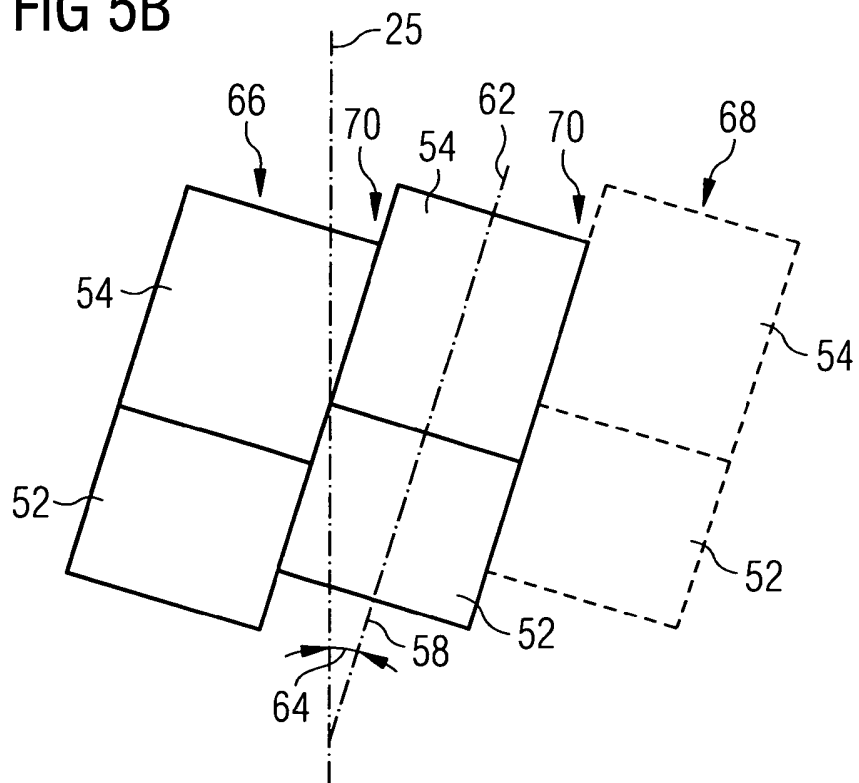


FIG 6

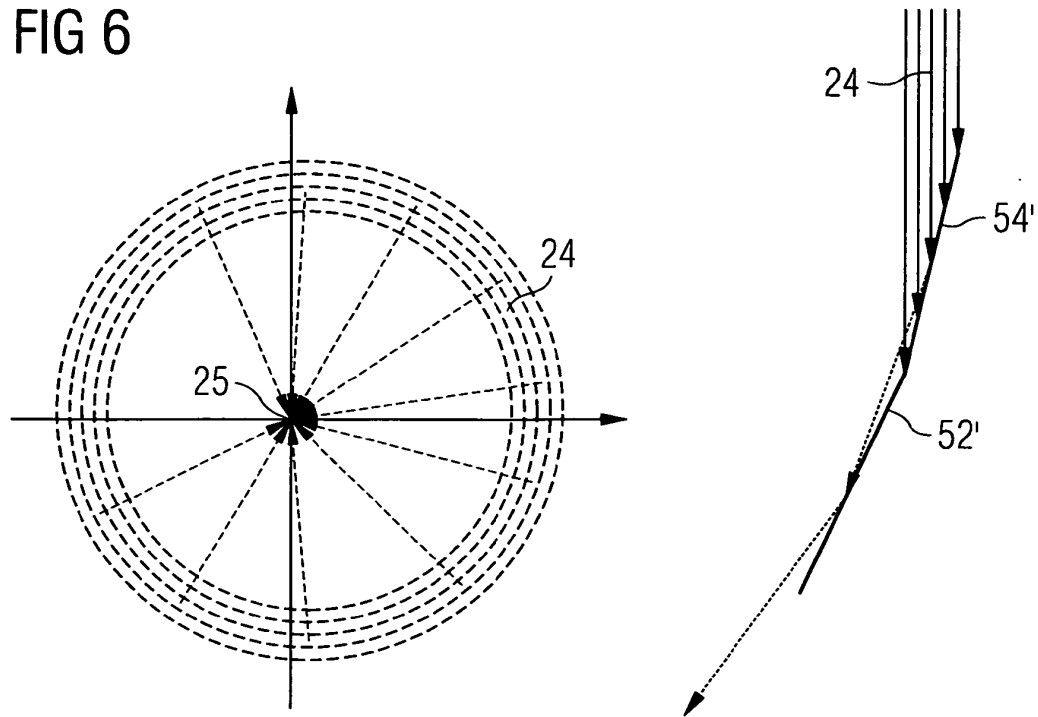


FIG 7

AXIAL POINT SOURCE, 2 CLOSED CONES

.218, .29691

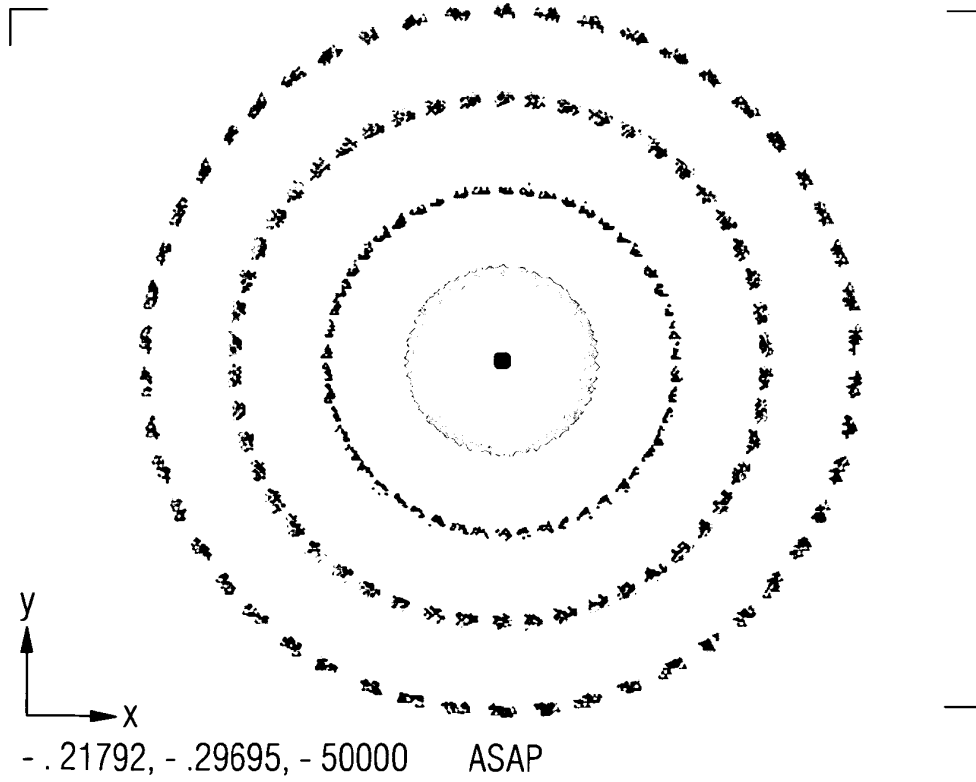


FIG 8

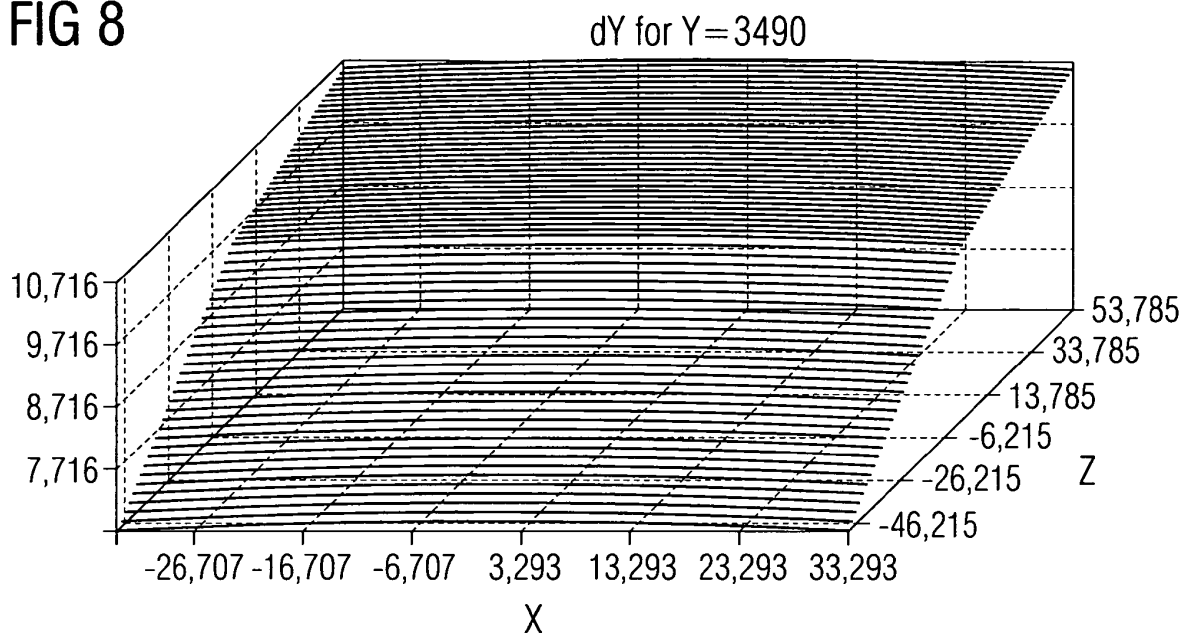


FIG 9A

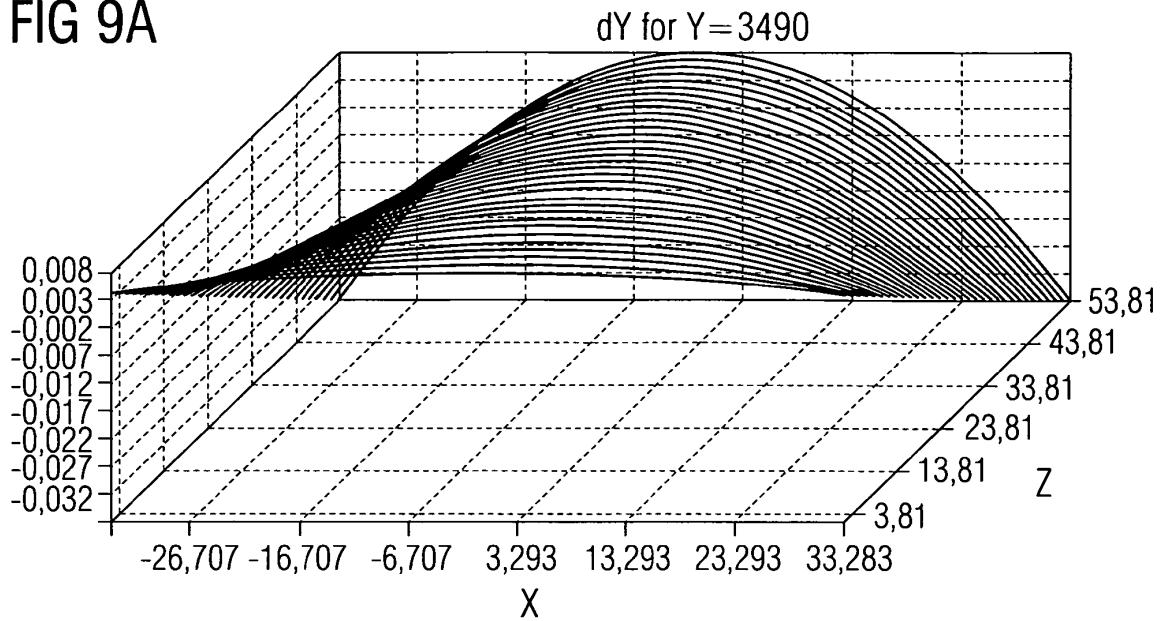


FIG 9B

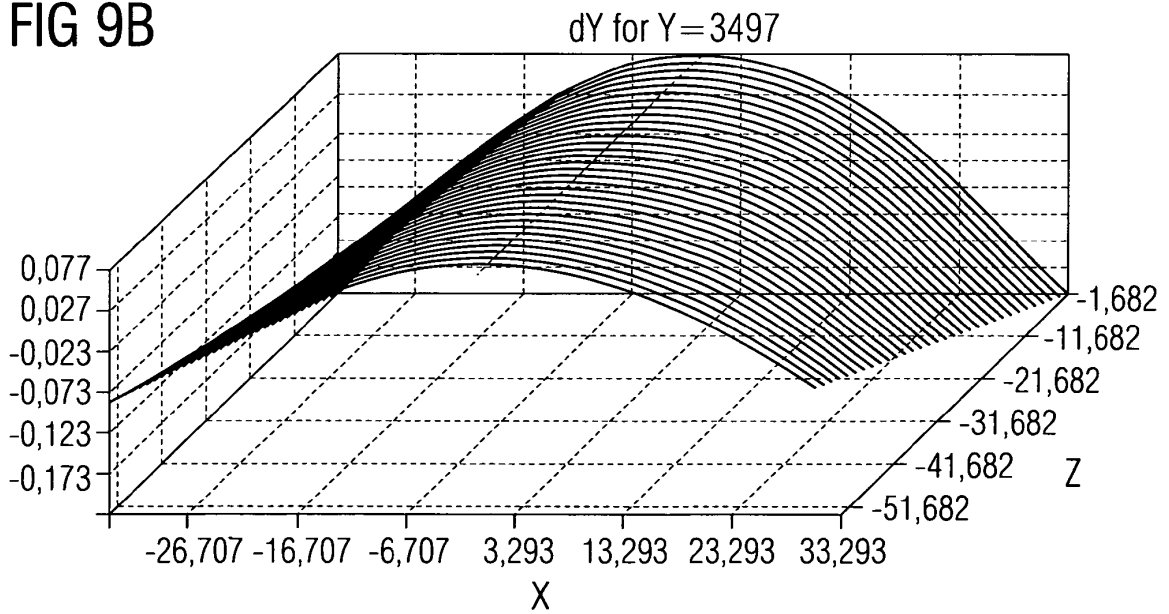


FIG 10

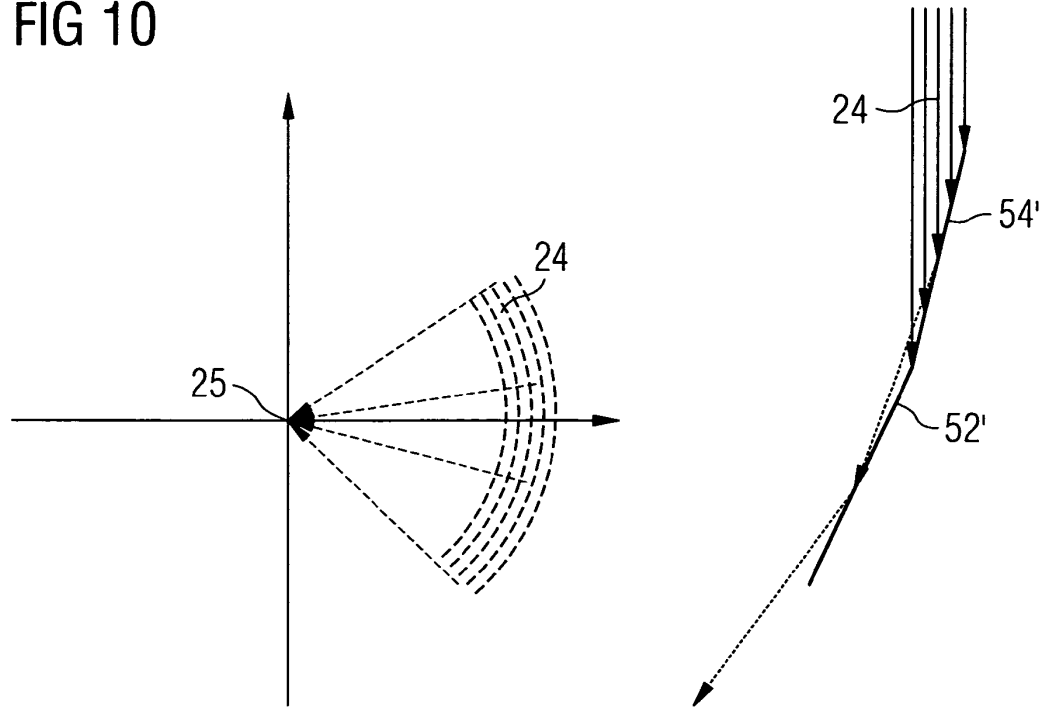
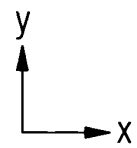


FIG 11

AXIAL POINT SOURCE, 2 CYLINDR. WAFERS ON RADIUS 3500 .32604, .41206

NO ROTATION ABOUT RADIAL AXIS
CURV.RATIO 1 1



- .27896, - .41215



ASAP

FIG 12A

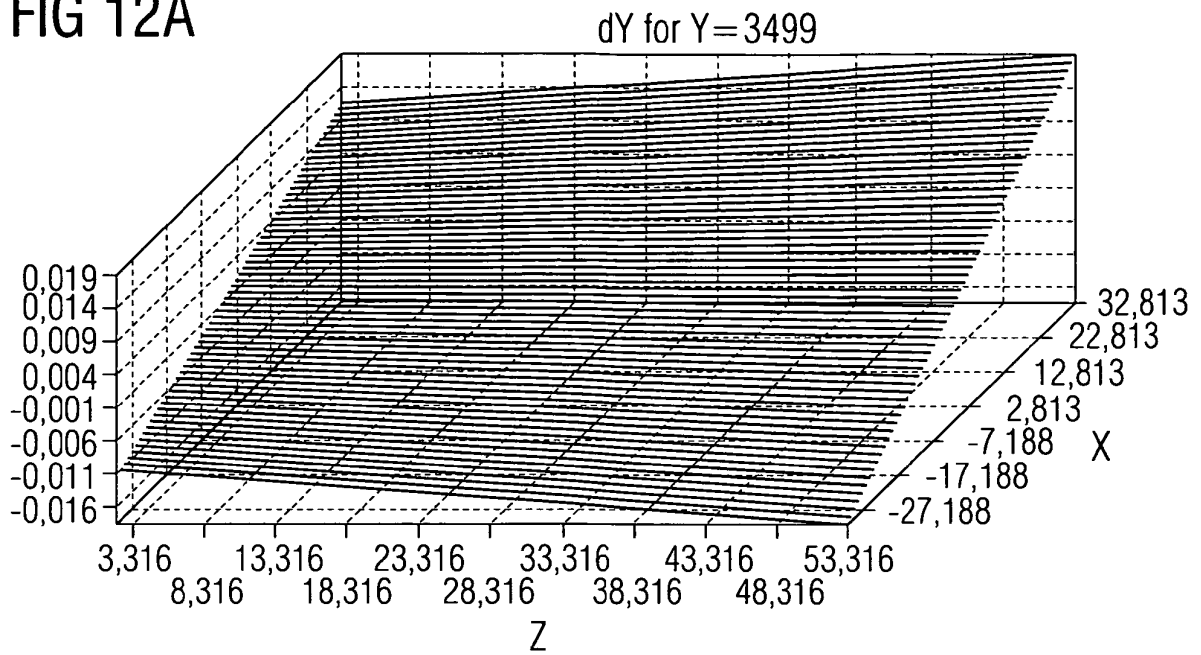


FIG 12B

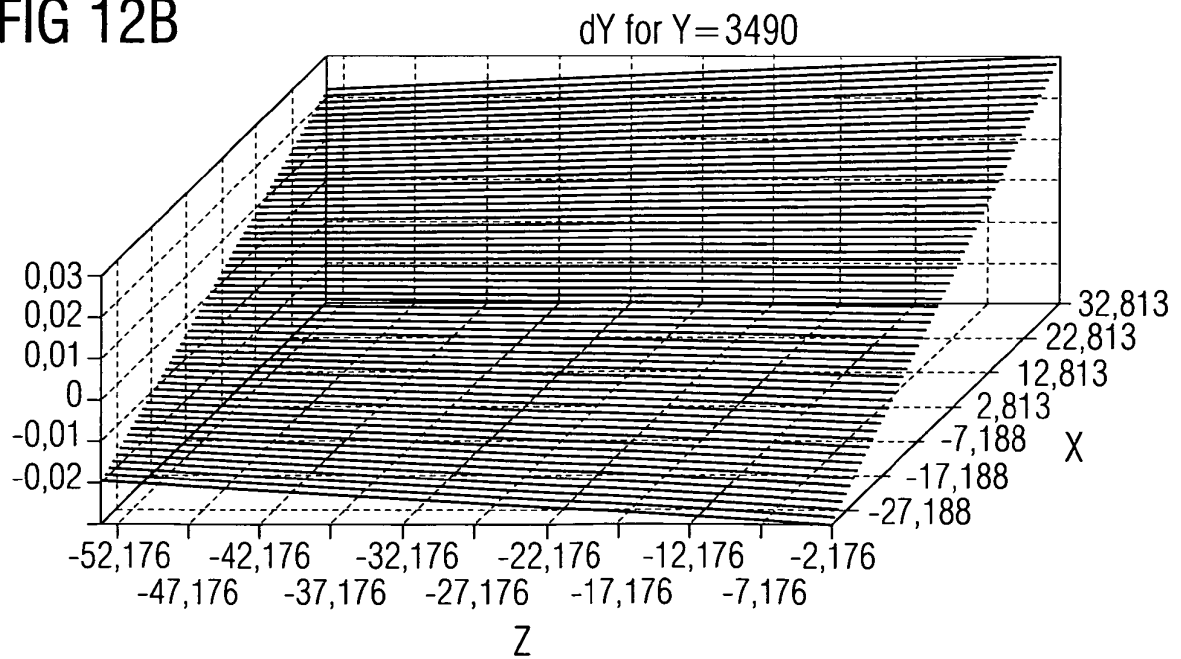


FIG 13

AXIAL POINT SOURCE, 2 CYLINDR. WAFERS ON RADIUS 3500 .12579, .1272

ROTATION 1.00713 DEG ABOUT RADIAL AXIS

CURV.RATIO 1 1

y
x
- .060872, - .12709

ASAP

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 Nicht-Patentliteratur

- **H. WOLTER.** Spiegelsysteme streifenden Einfalls als abbildende Optiken für Röntgenstrahlen. *Anal. der Physik*, 1952, vol. 10, 94-114 **[0003]**