



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11)

EP 1 318 524 A2

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
11.06.2003 Patentblatt 2003/24

(51) Int Cl.7: **G21K 1/06**

(21) Anmeldenummer: **02026625.0**

(22) Anmeldetag: **29.11.2002**

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

(72) Erfinder:
• **Lange, Joachim**
76767 Hagenbach (DE)
• **Bahr, Detlef**
76149 Karlsruhe (DE)

(30) Priorität: **08.12.2001 DE 10160472**

(74) Vertreter: **KOHLER SCHMID + PARTNER**
Patentanwälte GbR,
Ruppmannstrasse 27
70565 Stuttgart (DE)

(71) Anmelder: **Bruker AXS GmbH**
76187 Karlsruhe (DE)

(54) **Röntgen-optisches System und Verfahren zur Abbildung einer Quelle**

(57) Ein Röntgen-optisches System mit zwei Röntgen-Spiegeln (A, B) zum Abbilden einer Röntgen-Quelle (S) auf einen Zielbereich, ist dadurch gekennzeichnet, dass die Röntgen-Spiegel (A, B) abweichend von 90° derart gegeneinander verkippt angeordnet sind, dass der kombinierte Akzeptanzbereich der Röntgen-

Spiegel (A, B) an die Form der Röntgen-Quelle (S) und/oder des Zielbereichs angepasst ist. Dadurch wird mit geringen und technischen einfachen Modifikationen problemlos eine Erhöhung der Intensität der fokussierten Röntgen-Strahlung auf der Probe bei gleichbleibender Emissionsleistung der Röntgen-Quelle (S) ermöglicht.

Fig. 2a

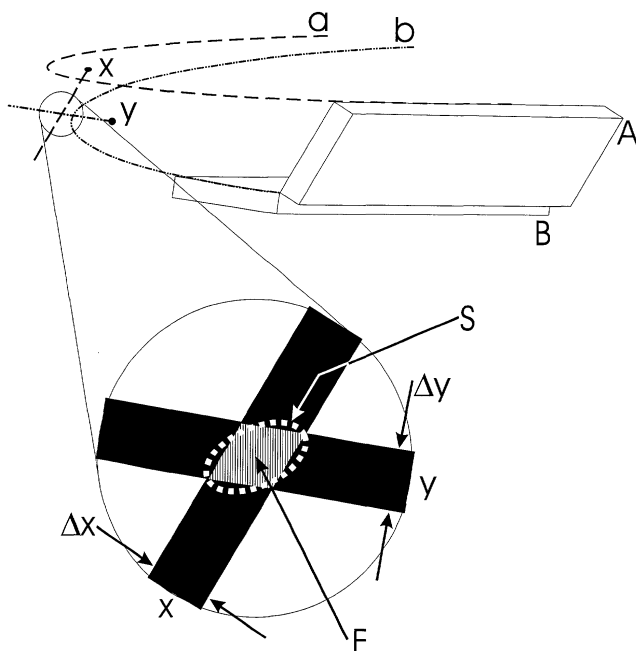


Fig. 2b

EP 1 318 524 A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Röntgen-optisches System mit zwei Röntgen-Spiegeln zum Abbilden einer Röntgen-Quelle auf einen Zielbereich.

[0002] Ein solches System bzw. Verfahren ist bekannt aus Paul Kirkpatrick and A.V.Baez, J. Opt. Soc. Am. **38**, 9 (1948).

[0003] Die prinzipielle Funktionsweise einer gattungsgemäßen Anordnung ist darin ausführlich beschrieben. Sie umfasst zwei hintereinander angeordnete konkave Röntgenspiegel, die so aufgestellt sind, dass die Reflexionsebene des ersten Spiegels senkrecht zur Reflexionsebene des zweiten Spiegels steht. Die in sehr flachem Winkel auf den ersten Spiegel einfallende Röntgenstrahlung wird in einer Koordinatenrichtung fokussiert und fällt dann ebenfalls unter einen flachen Winkel auf den zweiten Spiegel, wo sie in der zweiten, dazu senkrechten Koordinatenrichtung fokussiert wird. Auf diese Weise erhält man einen in zwei Koordinatenrichtungen fokussierten Röntgen-Strahl, so dass Strahldivergenzen zumindest teilweise rückgängig gemacht werden können.

[0004] Die beiden konkaven Röntgenspiegel können zylindrische, elliptische oder parabolische Krümmungsflächen aufweisen. Bei Verwendung von Parabolspiegeln ist insbesondere auch eine Parallelisierung der einfallenden Röntgenstrahlung möglich.

[0005] Nachteilig bei dieser altbekannten Kirkpatrick-Baez-Anordnung ist der erheblich begrenzte Akzeptanzbereich der beiden Spiegel. Aufgrund der Notwendigkeit der Erfüllung der Bragg-Bedingung für beide Spiegel wird nur eine wesentlich kleinere Fläche (ca. 1/100) im Verhältnis zur sichtbaren, strahlenden Gesamtfläche der Röntgen-Quelle abgebildet.

[0006] Als Verbesserung zur Kirkpatrick-Baez-Anordnung ist in der US-A 6,041,099 ein einstückiger Spiegel mit zwei unter 90° gegeneinander angeordneten reflektierenden Oberflächen vorgeschlagen, der als "Side-by-Side"-Anordnung bezeichnet wird. Hierdurch soll die reflektierte Intensität der einfallenden Röntgen-Strahlung ungefähr verdoppelt werden, wobei die Anordnung kompakter ist als die klassische Kirkpatrick-Baez-Anordnung mit zwei hintereinander geschalteten Spiegeln.

[0007] Die Verwendung von Multilayer-Spiegeln im Zusammenhang mit einer Kirkpatrick-Baez-Anordnung ist in einem Aufsatz von J. Underwood in der Zeitschrift Applied Optics, Vol. 25, No. 11 (1986) beschrieben.

[0008] Um einen Eindruck der Größenordnungen bei den problembehafteten Größen zu vermitteln, sei erwähnt, dass der Akzeptanzwinkel von typischen Multilayer-Spiegeln im Bereich von 1 mrad und die üblichen Brennweiten im Bereich einiger Zentimeter liegen. Der Elektronenfokus der Röntgen-Quelle variiert in einem linearen Bereich von 10 µm bis einige Millimeter. Der Akzeptanzbereich eines Spiegels hat eine kleinste Linear-
dimension in einem Bereich um einige 10 µm und ist typischerweise streifenförmig. Die üblichen Röntgen-

Proben andererseits haben lineare Ausdehnungen im Bereich von 100 µm bis einige Millimeter, typischerweise mehrere zehntel Millimeter.

[0009] Ein Hauptproblem bei den gattungsgemäßen Röntgen-optischen Systemen liegt daher in der relativ niedrigen von der Spiegel-Anordnung aufgrund der Bragg-Bedingungen reflektierten Intensität der fokussierten Röntgen-Strahlung im Verhältnis einerseits zur theoretisch möglichen Ausbeute aufgrund der Größe der strahlenden Fläche der Röntgen-Quelle und andererseits des "Bedarfs" an Röntgenstrahlung aufgrund der flächenmäßigen Größe der zu untersuchenden Probe.

[0010] Aufgabe der Erfindung ist es demgegenüber, ein Röntgen-optisches System mit den eingangs genannten Merkmalen vorzustellen, das mit möglichst geringen und technischen einfachen Modifikationen problemlos eine Erhöhung der Intensität der fokussierten Röntgen-Strahlung auf der Probe bei gleichbleibender Emissionsleistung der Röntgen-Quelle ermöglicht.

[0011] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe auf ebenso überraschend einfache wie wirkungsvolle Art und Weise dadurch gelöst, dass die Röntgen-Spiegel abweichend von 90° derart gegeneinander verkippt angeordnet sind, dass der kombinierte Akzeptanzbereich der Röntgen-Spiegel an die Form der Röntgen-Quelle und/oder des Zielbereichs angepasst ist.

[0012] Dadurch wird der kombinierte Akzeptanzbereich der beiden Spiegel optimal an die geometrische Form des Elektronen-Fokus und/oder der Probe angepasst, so dass die Ausbeute an nutzbarer Röntgen-Strahlung auf der Probe deutlich erhöht wird. Dies ist dann besonders vorteilhaft, wenn die beiden Bereiche in der gleichen Größenordnung liegen.

[0013] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung wird die obige Aufgabe auch dadurch gelöst, dass die Röntgen-Spiegel abweichend von 90° mit einer Abweichung des Verkippfungswinkels von 90° betragsmäßig um mindestens 20°, vorzugsweise zwischen 30° und 85° gegeneinander verkippt angeordnet sind. Hierdurch kann der kombinierte Akzeptanzbereich der beiden Spiegel ebenfalls an die geometrische Form des Elektronen-Fokus und/oder der Probe angepasst werden.

[0014] Auch für den Fall, daß der kombinierte Akzeptanzbereich der Röntgen-Spiegel erheblich kleiner ist als der Elektronenfokus und/oder die Probe, ergibt die erfindungsgemäße Verkippfung der Röntgen-Spiegel einen erheblichen Intensitätsgewinn, weil sich der kombinierte Akzeptanzbereich gegenüber dem aus dem Stand der Technik bekannten Fall der 90°-Anordnung erheblich Vergrößern läßt (wie aus der unten gezeigten Zeichnung deutlich wird). Es muss allerdings dabei beachtet werden, dass der Akzeptanzbereich nicht aus dem Elektronenfokus der Quelle oder dem Zielfokus der Probe herauswandert.

[0015] An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Erfindung ihre Vorteile nicht nur auf dem Gebiet der Röntgen-Optik entfaltet, sondern auch im Bereich der Neutronen-

optik und mit Synchrotronstrahlung als Quelle anwendbar ist.

[0016] Die verwendeten Spiegel können eben, zylindrisch, kugelschalenförmig, elliptisch, parabolisch oder hyperbolisch ausgestaltet sein. Es können Gradientenspiegel (graded mirrors) verwendet werden, bei denen der Schichtabstand lateral und/oder in der Tiefe variiert. Ebenso können aber auch Einkristalle oder andere Röntgen- oder Neutronen-optische Elemente als Spiegel eingesetzt werden.

[0017] Besonders bevorzugt ist eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Röntgen-optischen Systems, bei der mindestens ein Röntgen-Spiegel eine Multilayer-Struktur aufweist. Damit lässt sich eine besonders hohe Intensität der reflektierten Strahlung erreichen.

[0018] Bei einfachen Ausführungsformen der Erfindung ist der Verkippungswinkel der beiden Röntgen-Spiegel fest gewählt. Damit lässt sich eine vorab eingestellte optische Anpassung an eine ganz bestimmte Geometrie fest "einfrieren".

[0019] Bei alternativen Ausführungsformen kann aber auch der Verkippungswinkel variierbar sein. Damit lassen sich dann mehrere verschiedene Geometrien der Gesamtanordnung einstellen.

[0020] Bei einer Weiterbildung dieser Ausführungsform sind die Röntgen-Spiegel beim Verkippen gegeneinander in verschiedenen Stellungen einrastbar. Auf diese Weise lässt sich eine Auswahl von fest vorgegebenen Problemanpassungen vorab treffen, wobei bei der jeweiligen individuellen Einstellung aufgrund der Rasterung kein großer Justageaufwand getrieben werden muss.

[0021] Alternativ können die Röntgen-Spiegel aber auch kontinuierlich gegeneinander verkipptbar ausgestaltet sein. Damit lässt sich eine völlig freie On-line-Optimierung zugeschnitten auf die speziellen Bedürfnisse ganz unterschiedlicher Untersuchungsanordnungen verwirklichen.

[0022] Generell gilt bei der erfindungsgemäßen Anordnung, dass die abgebildete Quellenfläche umso größer ist, je größer die Verkippung der beiden Röntgen-Spiegel gegeneinander ist. Bei vorteilhaften Ausführungsformen der Erfindung beträgt die Abweichung des Verkippungswinkels von 90° betragsmäßig mindestens 3°, vorzugsweise mindestens 10°, besonders bevorzugt zwischen 30° und 85°.

[0023] Bei einer besonders einfachen Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung sind genau zwei Röntgen-Spiegel (bzw. Neutronen-Spiegel) vorgesehen.

[0024] Bei einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung bilden die Röntgen-Spiegel eine gegeneinander verkippte Kirkpatrick-Baez Anordnung, wie sie unverkippt seit vielen Jahrzehnten üblich ist.

[0025] In einer Weiterbildung dieser Ausführungsform können die Röntgen-Spiegel eine gegeneinander verkippte side-by-side Anordnung bilden, wie sie unver-

kippt in der oben zitierten US-A 6,041,099 beschrieben ist.

[0026] Bei alternativen Ausführungsformen der Erfindung können die Röntgen-Spiegel eine gegeneinander verkippte Multiple-corner Anordnung bilden. Eine unverkippte Multiple-corner Anordnung ist beispielsweise aus der US-A 6,014,423 an sich bekannt. Die Bedingung für die Abweichung des Verkippungswinkels von 90° gemäß dem oben diskutierten weiteren Aspekt der Erfindung gilt dann jeweils für Paare benachbarter Röntgen-Spiegel.

[0027] In den Rahmen der vorliegenden Erfindung fällt auch ein Röntgen-Spektrometer oder ein Röntgen-Diffraktometer oder ein Röntgen-Mikroskop, jeweils mit einem Röntgen-optischen System der oben beschriebenen erfindungsgemäßen Art.

[0028] Weiterhin fällt in den Rahmen der vorliegenden Erfindung ein Verfahren zum Abbilden einer Strahlungsquelle für Röntgen- oder Neutronen-Strahlung auf einen Zielbereich, wobei die von der Quelle emittierte Strahlung an einem ersten Röntgen- bzw. Neutronen-Spiegel und anschließend an einem zweiten Spiegel reflektiert wird, welches sich dadurch kennzeichnet, dass der Winkel zwischen der Ebene der ersten Reflexion und der Ebene der zweiten Reflexion derart abweichend von 90° verkippt eingestellt wird, dass der kombinierte Akzeptanzbereich der ersten und zweiten Reflexion an die Form der Strahlungs-Quelle und/oder des Zielbereichs angepasst ist.

[0029] Damit wird ebenfalls die oben genannte Erfindungsaufgabe gelöst.

[0030] Besonders bevorzugt ist eine Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens, bei der der Verkippungswinkel zwischen der Ebene der ersten Reflexion und der Ebene der zweiten Reflexion während einer Datenaufnahmefolge (=Scan) erneut mindestens ein weiteres Mal angepasst wird. Dadurch wird beispielsweise bei einem Scan mit Beleuchtung der Probe unter verschiedenen Winkeln eine optimale Anpassung an die Gegebenheiten bei jeder einzelnen Aufnahme des Scans durch entsprechendes Nachfahren der Winkeleinstellung ermöglicht.

[0031] Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter aufgeführten Merkmale erfindungsgemäß jeweils einzeln für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen sind nicht als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter für die Schilderung der Erfindung.

[0032] Die Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert.

[0033] Im Einzelnen zeigen die Abbildungen Folgendes:

Fig. 1 ein Prinzipschema für den Akzeptanzbereich

von Nutzstrahlung aus einer Röntgenquelle im Fokus eines Röntgen-Spiegels;

Fig. 2a den schematischen Aufbau einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Röntgen-optischen Systems;

Fig. 2b einen vergrößerten Ausschnitt der Strahlungsverhältnisse im Fokus von Fig. 2a;

Fig. 3 die wirksame Fläche als Schnittmenge der Akzeptanzbereiche der beiden Spiegel gemäß Fig. 2b; und

Fig. 4 die wirksame Fläche F als Funktion des von 90° abweichenden Verkipfungswinkels β .

[0034] In Fig. 1 ist schematisch ein Querschnitt durch einen Röntgen-Spiegel A dargestellt, auf den Strahlung aus einem Akzeptanzbereich Δx im Fokus des Spiegels A trifft, die von einer Röntgen-Quelle stammt, welche üblicherweise ebenfalls in diesem Fokus angeordnet ist. Der Akzeptanzwinkel für die Nutzstrahlung, die unter Beachtung der Bragg-Bedingung vom Röntgen-Spiegel A reflektiert wird, ist in der Zeichnung mit α bezeichnet.

[0035] In Fig. 2a ist sehr schematisch eine Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Anordnung dargestellt, bei der zwei Röntgen-Spiegel A, B um einen von 90° abweichenden Winkel gegeneinander verkippt angeordnet sind. Die beiden dargestellten Röntgen-Spiegel A, B sollen im gezeigten Ausführungsbeispiel jeweils eine parabolische oder elliptische Oberfläche aufweisen, deren Krümmungsradius jeweils der lang bzw. kurz gestrichelten Linie a (für Spiegel A) bzw. b (für Spiegel B) folgt. Der Fokus des ersten Röntgen-Spiegels A ist mit x, der Fokus des zweiten Röntgen-Spiegels B ist mit y bezeichnet.

[0036] Fig. 2b zeigt einen vergrößerten Ausschnitt aus Fig. 2a, wobei Δx den Akzeptanzbereich der Röntgen-Quelle vom Röntgen-Spiegel A aus gesehen und Δy den Akzeptanzbereich der Röntgen-Quelle vom Röntgen-Spiegel B aus gesehen bezeichnen. Die Fläche F ist die Schnittmenge beider Akzeptanzbereiche Δx und Δy . Die gestrichelte, weiße Ellipse S soll im gezeigten Beispiel eine üblicherweise auftretende Form einer Röntgen-Quelle darstellen.

[0037] Fig. 3 zeigt schematisch die Aufteilung der wirksamen Fläche F als Schnittmenge der beiden Akzeptanzbereiche Δx und Δy der beiden Röntgen-Spiegel A, B am Ort der Röntgen-Quelle. Das sich ergebende Parallelogramm weist eine Seitenlänge b, eine lange Diagonale d_1 sowie eine kurze Diagonale d_2 auf. Außerdem ist in der Zeichnung der Abweichungswinkel β gegenüber einer Verkippfung der beiden Röntgen-Spiegel A, B um 90° zu erkennen.

[0038] Zwischen den in Fig. 3 gezeigten Größen gelten folgende geometrische Beziehungen:

$\Delta x = \Delta y = a$ (bei identisch gewählten Röntgen-Spiegeln A, B)

$b = \Delta x / \cos \beta = a / \cos \beta$

$F = \Delta x b = a^2 / \cos \beta$

$d_1 = a ((1 + \sin \beta)^2 / \cos^2 \beta + 1)^{1/2}$

$c = a \tan \beta$

[0039] Fig. 4 schließlich stellt die in Fig. 3 gezeigte Fläche F als Funktion der zunehmenden Winkelabweichung β vom Winkel 90° dar. Dabei wird vorausgesetzt, dass die beiden Akzeptanzbereiche Δx und Δy untereinander gleich und auf 1 normiert sind.

Patentansprüche

1. Röntgen-optisches System mit zwei Röntgen-Spiegeln (A, B) zum Abbilden einer Röntgen-Quelle (S) auf einen Zielbereich,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Röntgen-Spiegel (A, B) abweichend von 90° derart gegeneinander verkippt angeordnet sind, dass der kombinierte Akzeptanzbereich der Röntgen-Spiegel (A, B) an die Form der Röntgen-Quelle (S) und/oder des Zielbereichs angepasst ist.
2. Röntgen-optisches System mit zwei Röntgen-Spiegeln (A, B) zum Abbilden einer Röntgen-Quelle (S) auf einen Zielbereich,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Röntgen-Spiegel (A, B) abweichend von 90° mit einer Abweichung β des Verkipfungswinkels von 90° betragsmäßig um mindestens 20°, vorzugsweise zwischen 30° und 85° gegeneinander verkippt angeordnet sind.
3. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** mindestens ein Röntgen-Spiegel (A, B) eine Multilayer-Struktur aufweist.
4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Abweichung β des Verkipfungswinkels von 90° betragsmäßig mindestens 3°, vorzugsweise mindestens 10°, besonders bevorzugt zwischen 30° und 85° beträgt.
5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Röntgen-Spiegel (A, B) eine gegeneinander verkippte Kirkpatrick-Baez Anordnung bilden.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Röntgen-Spiegel (A, B) eine gegeneinander verkippte side-by-side Anordnung bilden.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Röntgen-Spiegel (A, B) eine gegeneinander verkippte Multiple-corner Anordnung bilden. 5
8. Röntgen-Diffraktometer mit einem Röntgen-optischen System nach einem der vorhergehenden Ansprüche.
9. Verfahren zum Abbilden einer Strahlungsquelle (S) für Röntgen- oder Neutronen-Strahlung auf einen Zielbereich, wobei die von der Quelle (S) emittierte Strahlung an einem ersten Röntgen- bzw. Neutronen-Spiegel (A) und anschließend an einem zweiten Spiegel (B) reflektiert wird, 10
15
dadurch gekennzeichnet, dass der Winkel zwischen der Ebene der ersten Reflexion und der Ebene der zweiten Reflexion derart abweichend von 90° verkippt eingestellt wird, 20
25
dass der kombinierte Akzeptanzbereich F der ersten (Δx) und zweiten (Δy) Reflexion an die Form der Strahlungs-Quelle (S) und/oder des Zielbereichs angepasst ist.
10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Verkippfungswinkel zwischen der Ebene der ersten Reflexion und der Ebene der zweiten Reflexion während einer Datenaufnahmefolge (=Scan) erneut mindestens ein weiteres Mal angepasst wird. 30
35
40
45
50
55

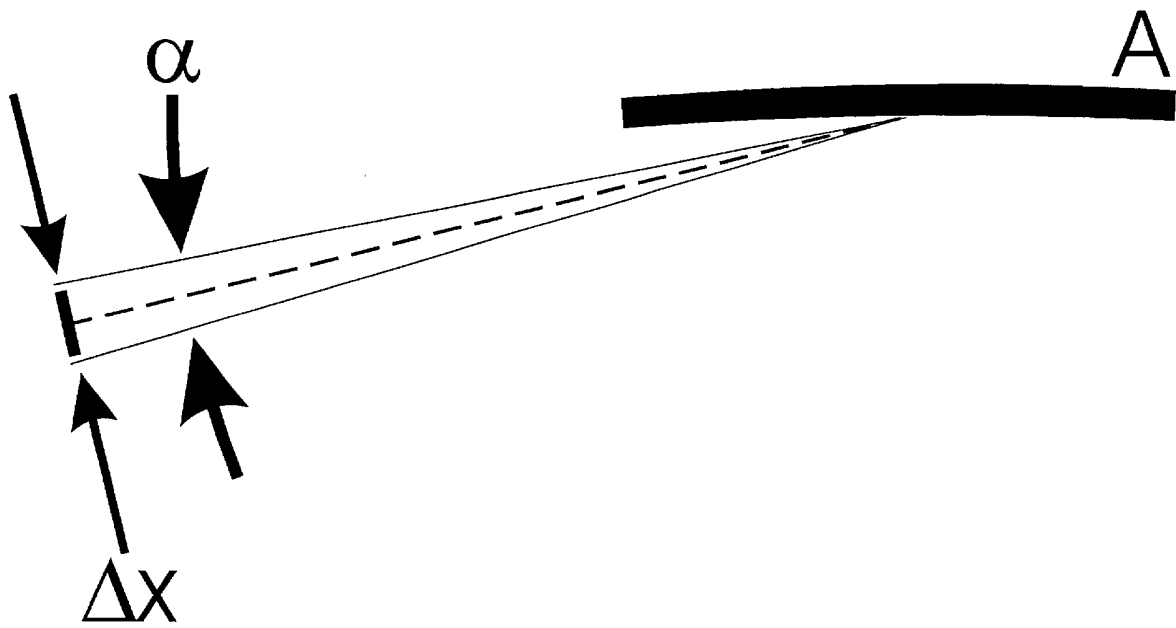


Fig. 1

Fig. 2a

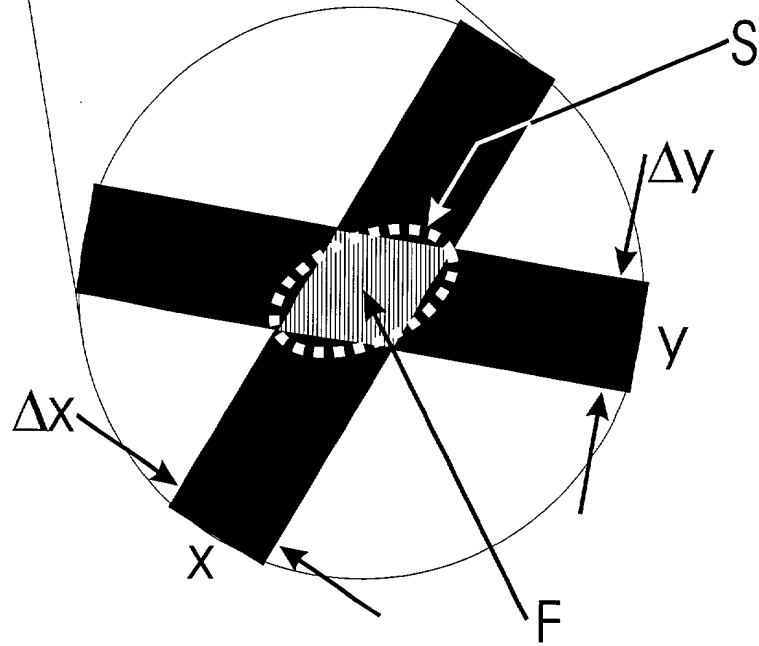
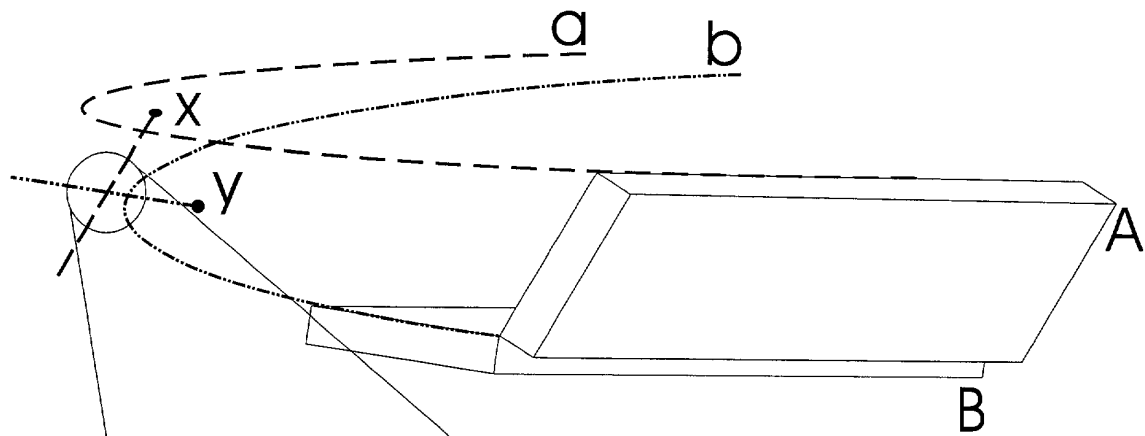


Fig. 2b

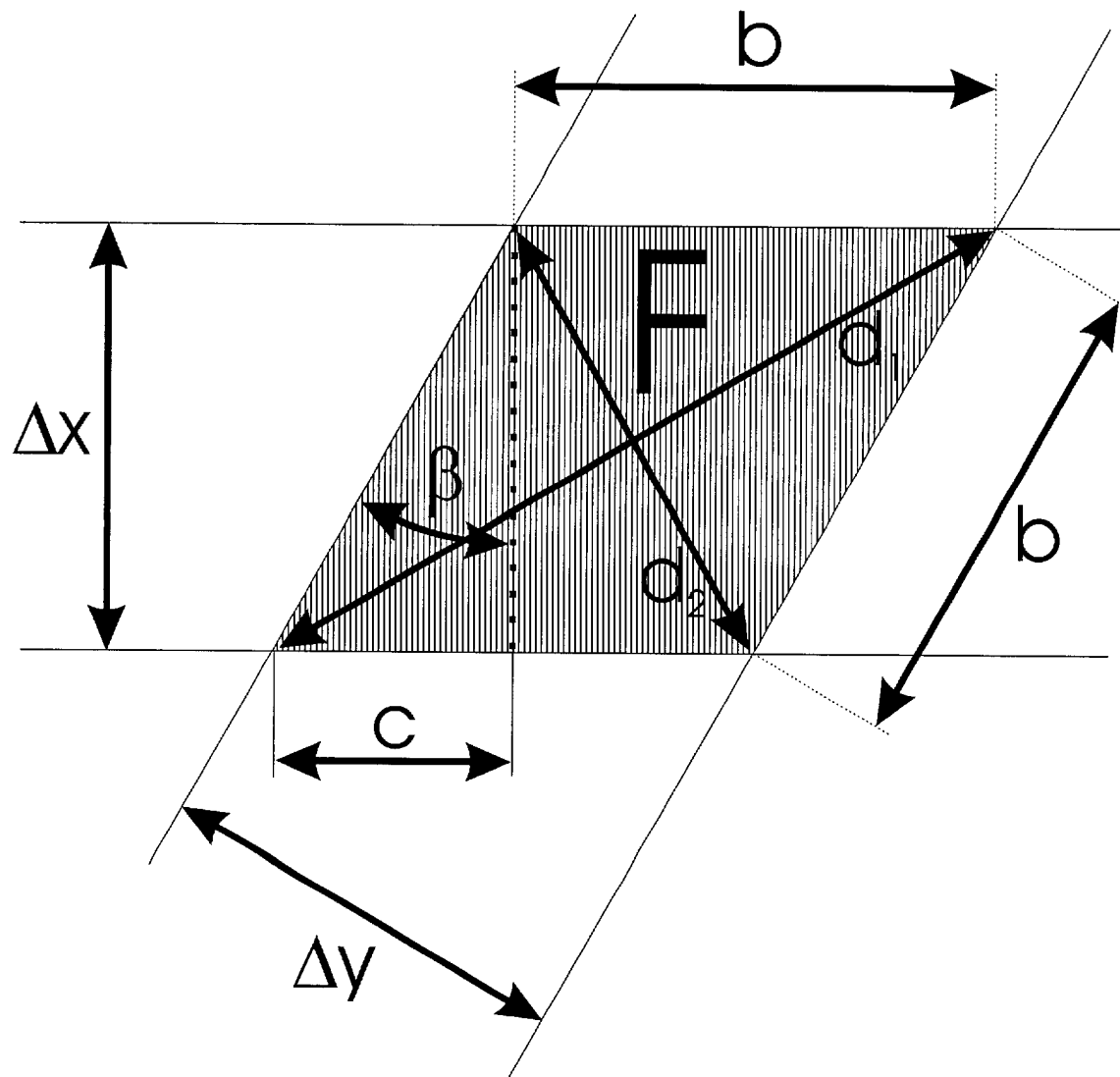


Fig. 3

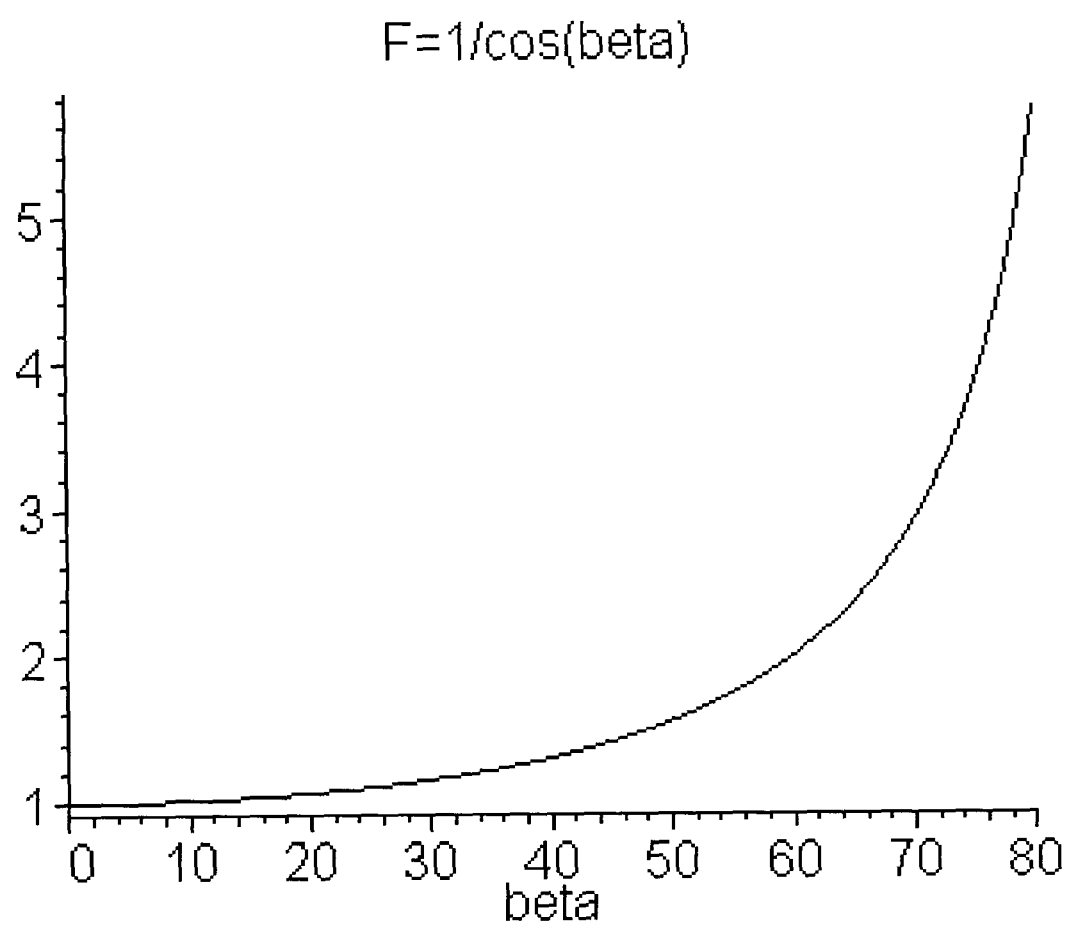


Fig. 4