

(19)



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11)

EP 1 701 360 A2

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
13.09.2006 Patentblatt 2006/37

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

(21) Anmeldenummer: **05025936.5**

(22) Anmeldetag: **29.11.2005**

(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 NL PL PT RO SE SI
SK TR**
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL BA HR MK YU

(30) Priorität: **09.12.2004 DE 102004059285**

(71) Anmelder: **Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
76133 Karlsruhe (DE)**

(72) Erfinder:
• **Nazmov, Vladimir, Dr.
76351 Linkenheim (DE)**
• **Reznikova, Elena, Dr.
76351 Linkenheim (DE)**
• **Mohr, Jürgen, Dr.
75056 Sulzfeld (DE)**

(74) Vertreter: **Rückert, Friedrich
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH,
Stabsabteilung Marketing, Patente und Lizenzen,
Postfach 3640
76021 Karlsruhe (DE)**

(54) **Röntgenlinse**

(57) Die Erfindung betrifft Röntgenlinsen, die die einfallende Röntgenstrahlung über einen großen Energiebereich fokussieren.

Erfindungsgemäße Röntgenlinsen umfassend eine Vielzahl von Linsenelementen, die je ein quasiparabolisches Profil $Y(x)$ aufweisen, das der Gleichung $Y(x)=x^2/2[(r+f(x))]$ genügt, wobei x die Parabelachse, $1/2r$ den Halbparameter der Parabel und $f(x)$ eine von Null verschiedene Funktion bezeichnen.

EP 1 701 360 A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Röntgenlinse zur Fokussierung von Röntgenstrahlen.

[0002] Röntgenlinsen zur Fokussierung von Röntgenstrahlen bestehen im Allgemeinen aus einer großen Anzahl N einzelner fokussierender Elemente, die als Linsenelemente bezeichnet werden.

[0003] Aus A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, A. Souvorov und B. Lengeler, *Focussing high-energy x rays by compound refractive lenses*, Applied Optics, Band 37, 1998, S. 653-662, sind Linsenelemente bekannt, die ein parabolisches Profil aufweisen, das sich mittels der Gleichung

$$Y(x) = x^2 / 2r \quad (1)$$

beschreiben lässt. Hierbei bezeichnen x die Parabelachse und $1/2r$ den Halbparameter der Parabel (siehe z. B. Bronstein, Semendjajew, *Taschenbuch der Mathematik*, 20. Aufl. 1981, S. 278)

[0004] Unter Berücksichtigung des Realteils δ der Brechzahl $n = 1 + i\beta - \delta$ ergibt sich für diese Art von Röntgenlinsen bei einer Wellenlänge λ die Fokalfleckgröße σ zu

$$\sigma = 0.68 \sqrt{\lambda \delta(E) F} , \quad (2)$$

wobei F die Brennweite des Linsenelements und E die Photonenenergie bezeichnen und für $\delta(E) \sim E^{-2}$ gilt. Bei Wellenlängen im Bereich der Röntgenstrahlung, d.h. etwa zwischen 0,01 und 1 nm lassen sich damit im Idealfall Fokalflecke mit einer Größe σ unterhalb von 0,1 μm realisieren.

[0005] Die Fokaltiefe FWHM ist ein Maß für den Energiebereich, in dem die Linse als fokussierend angesehen werden kann, und ist für Linsen mit einem parabolischen Profil Y(x) nach Gleichung 1 definiert durch

$$FWHM = \sqrt{\left(\frac{\pi \beta}{4 \delta} F \right)^2} . \quad (3)$$

[0006] Bei bekannten Röntgenlinsen beträgt diese nur wenige Millimeter, was einem Energiebereich von 0,1 % der Nennenergie, d.h. einigen Elektronenvolt (eV), entspricht.

[0007] Röntgenspektroskopische Untersuchungen erfordern jedoch über einen breiten Energiebereich der Photonen, vorzugsweise über einige keV an einem festen Ort, an dem sich insbesondere die zu analysierende Probe befindet, eine konstante Größe des Fokalflecks, die geringer als 1 μm sein soll. Beispielsweise beträgt bei EXAFS-Untersuchungen der abzudeckende Energiebereich ΔE ca. 1 keV, bei XANES-Untersuchungen ca. 100 eV.

[0008] Die Brennweite einer Linse mit einer großen Fokaltiefe lässt sich mittels der Gleichung

$$\overline{F(E)} = \left[\overline{r + f(x)} \right] / 2N\delta(E) \quad (4)$$

definieren, wobei $\overline{F(E)}$ die von der Linsenmitte bis zur Fokalfleckmitte gemessene Brennweite, $\left[\overline{r + f(x)} \right]$ den über die Linsenapertur gemittelten Krümmungsradius und N die Anzahl der fokussierenden Elemente der Linse bezeichnen. Nach Gleichung 4 befindet sich die Probe über eine Fokaltiefe ΔF innerhalb des Fokalflecks, wenn die Energie um den Betrag

$$\Delta E = \frac{\Delta F}{F} \frac{E}{2} \quad (5)$$

variiert. Wird für E ein mittlerer Wert von 12,7 keV und eine typische Brennweite von 18 cm gewählt, dann ergibt sich eine Fokaltiefe von $\Delta F = 2,8$ cm für den bei EXAFS-Untersuchungen abzudeckenden Energiebereich ΔE von ca. 1 keV.

[0009] Ausgehend davon ist es die Aufgabe der Erfindung, Röntgenlinsen bereitzustellen, die die einfallende Röntgenstrahlung über einen großen Energiebereich an einem festen Ort fokussieren. Insbesondere soll eine Röntgenlinse angegeben werden, die bei einer festen Energie über eine mehrere Zentimeter große Fokaltiefe einen Fokalfleck mit einer Halbwertsbreite von weniger als $1 \mu\text{m}$ aufweist, wobei die Grenzen der Fokaltiefe durch diejenigen Stellen festgelegt sind, an denen die Halbwertsbreite des Fokalflecks größer als $1 \mu\text{m}$ wird.

[0010] Diese Aufgabe wird gelöst durch die Merkmale des Patentanspruchs 1. Die Unteransprüche beschreiben vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung.

[0011] Eine erfindungsgemäße Röntgenlinse umfasst eine Vielzahl, vorzugsweise zwischen 100 und 1000 von Linsenelementen, die je ein Profil aufweisen, das sich durch die Gleichung

$$Y(x) = x^2 / 2 [r + f(x)] \quad (6)$$

beschreiben lässt. Gleichung 6 bedeutet, dass das parabolische Profil gemäß Gleichung 1 durch eine Funktion $f(x)$ moduliert wird und somit ein quasiparabolisches Profil vorliegt.

[0012] Vorzugsweise handelt es sich bei der Funktion $f(x)$ um eine periodische Funktion, die gewährleistet, dass neben dem gewollten Fokalfleck keine weiteren lokalen Strahlungsmaxima in benachbarten Gebieten auftreten.

[0013] In einer bevorzugten Ausgestaltung zeichnet sich das quasiparabolische Profil dadurch aus, dass die Funktion $f(x)$ auf einem Parabelstück (Parabelabschnitt) monoton abnimmt und auf dem hierzu benachbarten Parabelstück monoton anwächst, um auf dem hierzu benachbarten Parabelstück wieder monoton abzunehmen usw. Unter einem Parabelstück wird ein Abschnitt von $Y(x)$ für einen abgegrenzten Wertebereich von x z.B. zwischen x_0 und $x_0 + l/2$ und verstanden, wobei $l/2$ die Länge des Parabelstücks bezeichnet.

[0014] In einer bevorzugten Ausgestaltung sind die Längen $l/2$ dieser Parabelabschnitte annähernd gleich. Durch die Wahl des Wertes der Länge der Parabelabschnitte $l/2$ wird die Homogenität der Intensitätsverteilung in der Fokaltiefe festgelegt. Um eine möglichst gute Homogenität zu erzielen, sollte dieser Wert zwischen $0,1 \mu\text{m}$ und $5 \mu\text{m}$ liegen.

[0015] In einer bevorzugten Ausgestaltung wird für $f(x)$ eine Sägezahnfunktion ausgewählt. Diese ist allgemein charakterisiert durch die Beziehungen

$$f(x) = \alpha x / l \quad \text{für } x_n < x < l/2 + x_n \text{ und} \quad (7a)$$

$$f(x) = -\alpha x / l \quad \text{für } l/2 + x_n < x < l + x_n, \quad (7b)$$

wobei der Parameter α , der die Amplitude der Sägezahnfunktion bezeichnet, zur Einstellung der Fokaltiefe dient. n gibt die laufende Nummer des betrachteten Parabelabschnitts an. Alternativ lässt sich eine Sägezahnfunktion $f(x)$ in einer Reihenentwicklung wie folgt darstellen:

$$f(x) = a \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \sin \left[(2k+1) \pi \frac{x}{l} \right] \cdot \frac{1}{\left[(2k+1) \frac{\pi}{l} \right]^2} \quad (8)$$

[0016] In einer weiteren Ausgestaltung wird das Profil der Sägezahnfunktion durch eine Funktion $g(x)$ derart modifiziert, dass sich die Funktion

$$f(x) = a \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \sin \left[(2k+1) \pi \frac{x}{l} \right] \cdot g(x) \cdot \frac{1}{\left[(2k+1) \frac{\pi}{l} \right]^2} \quad (9)$$

ergibt, wobei a die Amplitude der Funktion bezeichnet und $g(x) \approx 1$ ist. Durch diese Korrektur lässt sich die Intensität im Fokalfleck homogenisieren.

[0017] Um erfindungsgemäße Röntgenlinsen zu erhalten, die über eine mehrere Zentimeter große Fokaltiefe einen Fokalfleck mit einer Halbwertsbreite von weniger als $1 \mu\text{m}$ aufweisen, sollte der Parameter α , durch den die Fokaltiefe eingestellt wird, größer als $1 \mu\text{m}$ und kleiner als $40 \mu\text{m}$ sein.

[0018] In einer alternativen Ausgestaltung wird als sägezahnartige Funktion die Funktion

$$f(x) = a \sum_{k=0}^{\infty} \left[\sin \left(k \frac{x}{l} \right) + \alpha \sin \left(k \frac{x}{l} + \varphi \right) \right] / \left(\frac{k}{l} \right)^{2+b} \quad (10)$$

gewählt. Hiermit lässt sich eine sehr homogene Intensitätsverteilung über die gesamte Fokaltiefe erzielen. Die Parameter in Gleichung 10 nehmen bevorzugt die folgenden Werte an: Amplitude a zwischen $1 \mu\text{m}$ und $25 \mu\text{m}$, b zwischen 0 und 3, α zwischen 0 und 0,1 und φ zwischen 0 und $\pi/2$.

[0019] Erfindungsgemäße Röntgenlinsen zeigen im Gegensatz zu herkömmlichen Röntgenlinsen mit parabolischem Profil eine deutlich vergrößerte Fokaltiefe. Die Konstanz der Fokalfleckbreite über eine gewisser Fokaltiefen erlaubt röntgenspektroskopische Untersuchungen innerhalb eines weiten Energiebereichs, d.h. über einige keV, durchzuführen, ohne dass der beleuchtete Bereich seine Form und Größe ändert, d.h. die spektroskopische Information kommt für alle Energien innerhalb des Energiebereichs aus dem gleichen Probevolumen.

[0020] Die Erfindung wird im Folgenden anhand von Ausführungsbeispielen mit Hilfe der Abbildungen näher erläutert.

[0021] Die experimentellen Untersuchungen wurden bei einer Energie von $E = 15 \text{ keV}$ an der *European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)* durchgeführt. Für die Berechnungen wurde das Programm MATHCAD© eingesetzt.

[0022] Für **Fig. 1a-d** wurde zur Modellierung des parabolischen Linsenprofils die lineare, d.h. nichtperiodische Funktion $f(x) = a \cdot x$ verwendet. Für die Parameter der Röntgenlinse in den **Fig. 1a-c** wurden die folgenden Werte gewählt: $r = 55 \mu\text{m}$; $\alpha = 0,0417 r$; Energie der Röntgenstrahlung $E = 12,7 \text{ keV}$; Linsenapertur $A = 150 \mu\text{m}$ und Anzahl der Linsenelemente $N = 153$.

[0023] **Fig. 1a** zeigt die Intensitätsverteilungen im Bereich des Fokalflecks, **Fig. 1b** die Halbwertsbreite über den Fokalbereich und **Fig. 1c** die Intensitätsverteilung über die Breite des Fokalflecks an verschiedenen Stellen im Fokalbereich.

[0024] **Fig. 1d** zeigt die experimentell bestimmte Fokaltiefe $[\blacksquare]$ und Intensität $[*]$ einer erfindungsgemäßen Röntgenlinse mit einer nichtperiodischen linearen Funktion $f(x) = \alpha x$. Hierfür wurde eine Linse mit den Parametern $r = 65 \mu\text{m}$, $\alpha = 0,0267 r$ Linsenapertur $A = 150 \mu\text{m}$ und Anzahl der Linsenelemente $N = 153$ verwendet. Der Bereich konstanter Fokalfleckgröße bei akzeptabler Intensitätsschwankung erstreckt sich bei einer Halbwertsbreite von ca. $3 \mu\text{m}$ zwischen $18,2 \text{ cm}$ und $21,7 \text{ cm}$, d.h. über eine Fokaltiefe von ca. $3,5 \text{ cm}$.

[0025] In den **Fig. 2a-b** wurde zur Modellierung des parabolischen Linsenprofils eine modifizierte Sägezahnfunktion nach Gleichung 9 mit folgenden Parametern eingesetzt: $r = 91,75 \mu\text{m}$; $\alpha = 0,08278 r$; $E = 12,7 \text{ keV}$; $A = 150 \mu\text{m}$; $N = 153$, $l = 5 \mu\text{m}$.

[0026] **Fig. 2a** hierbei die Intensitätsverteilungen im Bereich des Fokalflecks. **Fig. 2b** zeigt die Halbwertsbreite über

den Fokalbereich und sich anschließender Bereiche für eine Funktion gemäß Gleichung 8. Aus **Fig. 2b** kann entnommen werden, dass die Röntgenlinse über eine Fokaltiefe von 3,7 cm einen Fokalfleck mit einer Halbwertsbreite von kleiner 1 μm aufweist. Innerhalb einer Fokaltiefe von 1 cm schwankt die Halbwertsbreite lediglich um 0,2 μm .

[0027] In **Fig. 3a-b** wurde zur Modellierung des parabolischen Linsenprofils eine Funktion gemäß Gleichung 9 mit folgenden Parametern ausgewählt: $r = 100 \mu\text{m}$; $\alpha = 0,08575r$; $l = 1,3 \mu\text{m}$; $E = 12,2 \text{ keV}$; $N = 153$.

[0028] **Fig. 3a** zeigt die Intensitätsverteilungen im Bereich des Fokalflecks. **Fig. 3b** zeigt die Halbwertsbreite über den Fokalbereich und sich anschließender Bereiche für eine Funktion gemäß Gleichung 9. Aus **Fig. 3b** kann entnommen werden, dass diese Röntgenlinse über eine Fokaltiefe von 3,7 cm einen Fokalfleck mit einer Halbwertsbreite von kleiner 1 μm aufweist. Innerhalb einer Fokaltiefe von 1 cm schwankt die Halbwertsbreite weniger als 0,05 μm .

Patentansprüche

1. Röntgenlinse zur Fokussierung von Röntgenstrahlen, umfassend eine Vielzahl von Linsenelementen, die je ein modulierte parabolisches Profil $Y(x)$ aufweisen, das der Gleichung

$$Y(x) = x^2 / 2[r + f(x)]$$

genügt, wobei x die Parabelachse, $1/2r$ den Halbparameter der Parabel und $f(x)$ eine von Null verschiedene Funktion bezeichnen.

2. Röntgenlinse nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** es sich bei der Funktion $f(x)$ um eine periodische Funktion handelt, die auf einem Parabelstück monoton sinkt und auf dem hierzu benachbarten Parabelstück monoton steigt.
3. Röntgenlinse nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Längen der Parabelstücke annähernd gleich sind.
4. Röntgenlinse nach Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** $f(x)$ eine Sägezahnfunktion darstellt.
5. Röntgenlinse nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** $f(x)$ eine modifizierte Sägezahnfunktion darstellt, für die

$$f(x) = a \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \sin \left[(2k+1) \pi \frac{x}{l} \right] \cdot g(x) / \left[(2k+1) \frac{\pi}{l} \right]^2$$

gilt, wobei a die Amplitude der Sägezahnfunktion, $l/2$ die Länge der Parabelstücke und $g(x) \approx 1$ eine Profilkorrektur darstellt.

6. Röntgenlinse nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Amplitude a einen Wert zwischen 1 μm und 40 μm und die Länge l einen Wert zwischen 0,1 μm und 5 μm annimmt.
7. Röntgenlinse nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** $f(x)$ eine modifizierte Sägezahnfunktion darstellt, für die

$$f(x) = a \sum_{k=0}^{\infty} \left(\sin \left[k \frac{x}{l} \right] + \alpha \cdot \sin \left[k \frac{x}{l} + \varphi \right] \right) / \left(\frac{k}{l} \right)^{2+b}$$

EP 1 701 360 A2

gilt, wobei b , α und φ Parameter dieser Funktion bezeichnen.

8. Röntgenlinse nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Amplitude α einen Wert zwischen $1\ \mu\text{m}$ und $25\ \mu\text{m}$, die Länge l einen Wert zwischen $0,1\ \mu\text{m}$ und $5\ \mu\text{m}$ und die Parameter b einen Wert zwischen 0 und 3, α einen Wert zwischen 0 und 0,1 sowie φ einen Wert zwischen 0 und $\pi/2$ annehmen.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

Fig. 1a

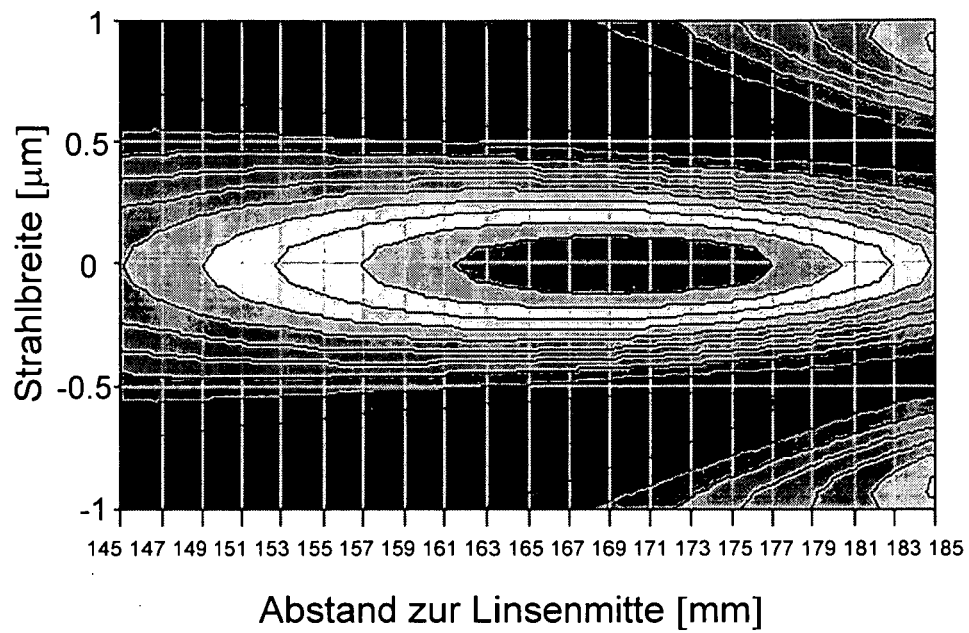


Fig. 1b

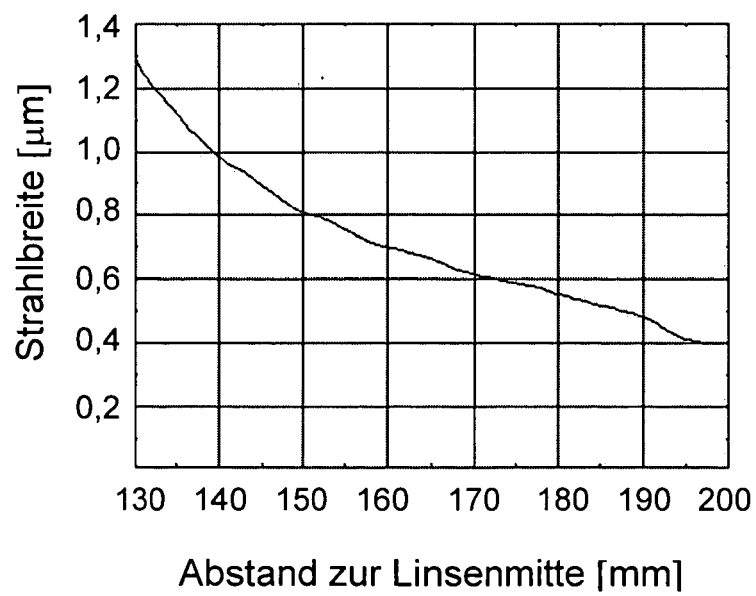


Fig. 1c

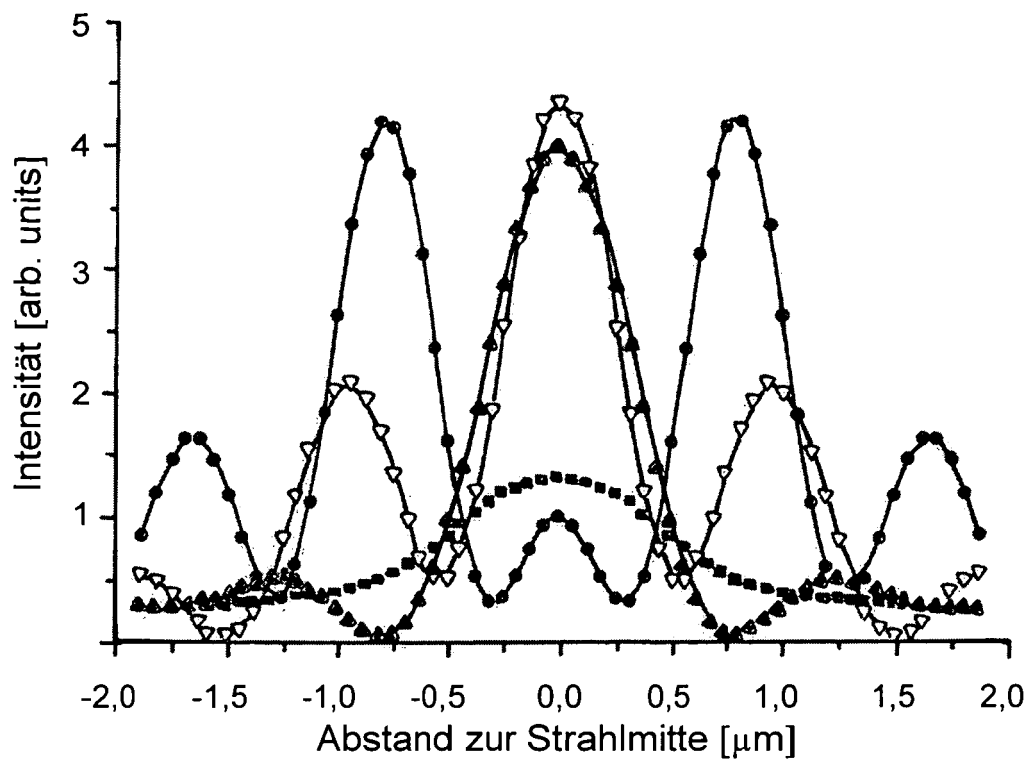


Fig. 1d

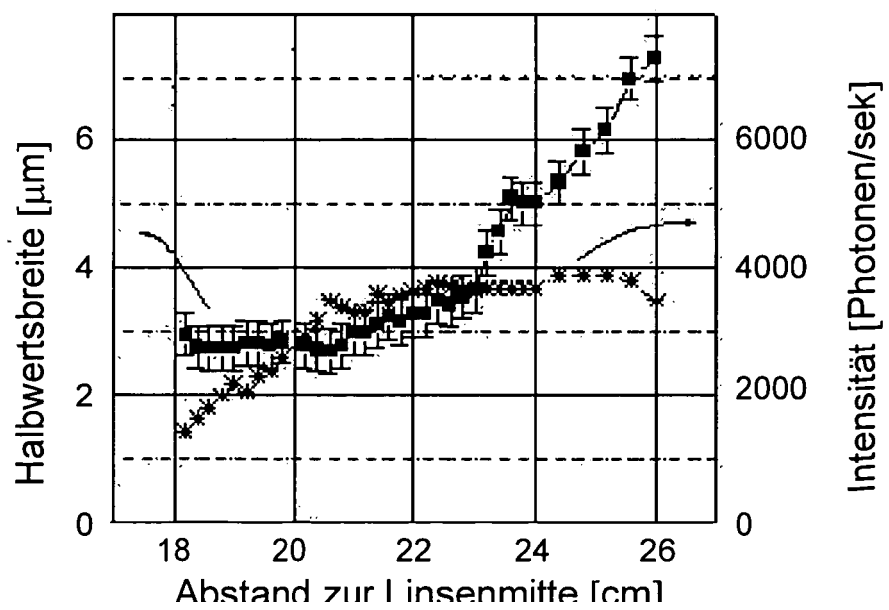


Fig. 2a

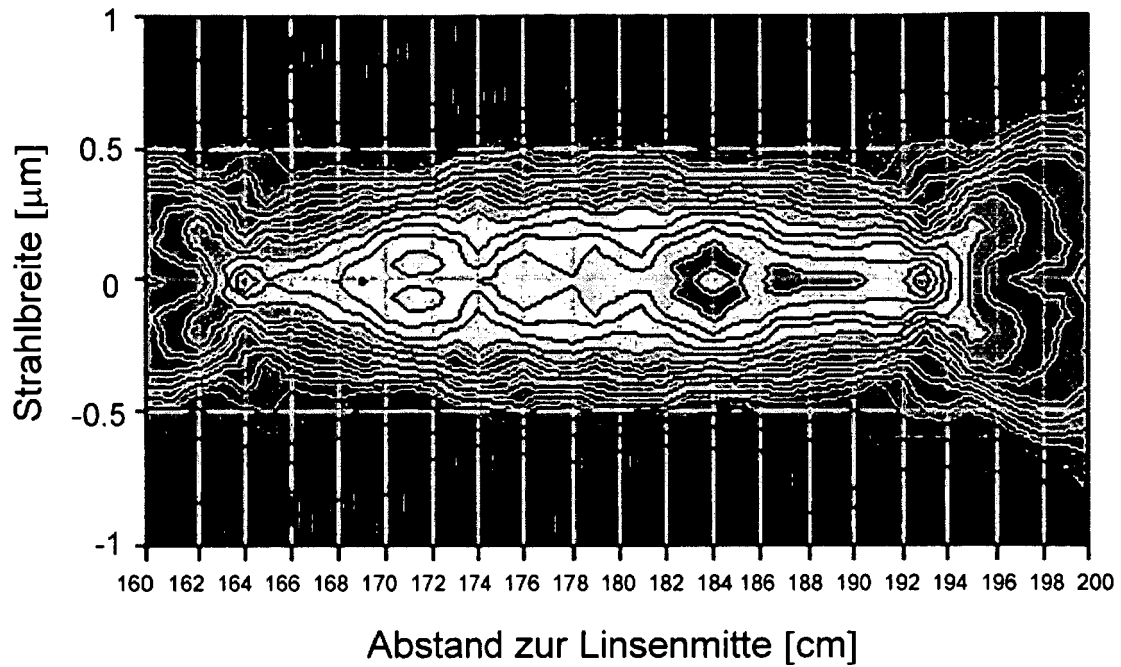


Fig. 2b

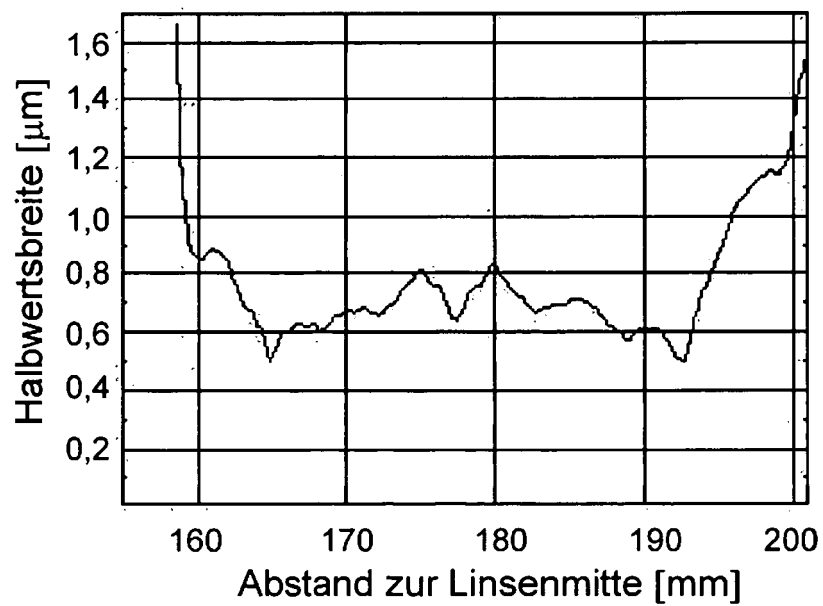


Fig. 3a

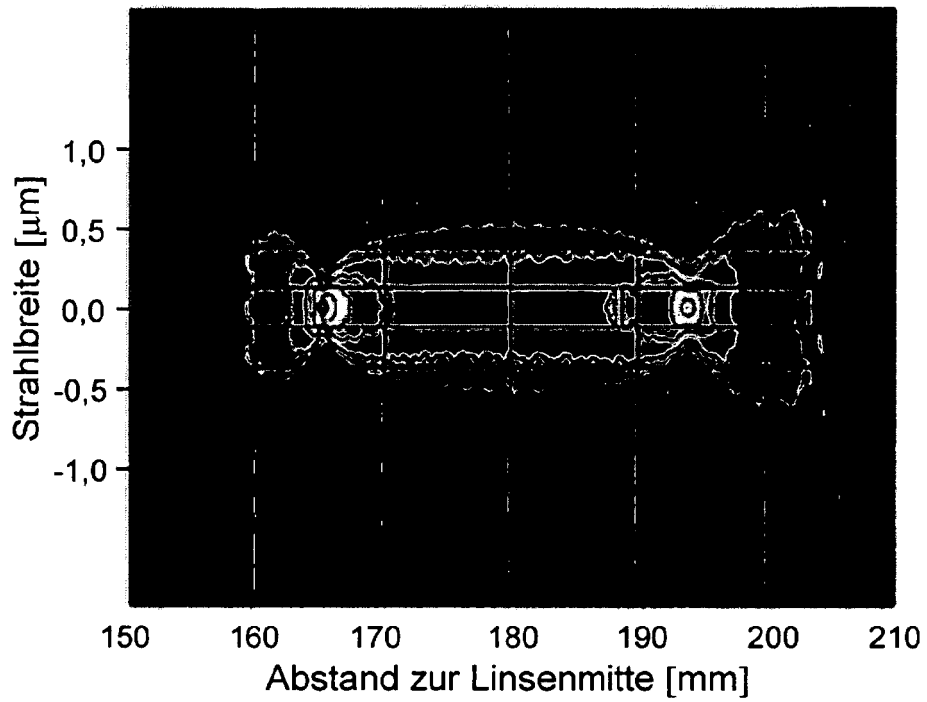


Fig. 3b

