

(19)



(11)

EP 3 136 401 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
01.03.2017 Patentblatt 2017/09

(51) Int Cl.:
G21K 1/04 ^(2006.01) **G21K 1/06** ^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **16001552.5**

(22) Anmeldetag: **13.07.2016**

(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**
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
MA MD

(71) Anmelder: **Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich (DE)**

(72) Erfinder:
• **Jaksch, Sebastian
85375 Neufahrn bei Freising (DE)**
• **Frielinghaus, Henrich
85375 Neufahrn bei Freising (DE)**

(30) Priorität: **27.08.2015 DE 102015011070**

(54) **VORRICHTUNG ZUR KORREKTUR DES LÄNGSFEHLERS DER CHROMATISCHEN
ABERRATION VON STRALUNG MASSEBEHAFTETER TEILCHEN**

(57) Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Korrektur des Längsfehlers der chromatischen Aberration von Strahlung massebehafteter Teilchen umfassend mindestens eine Linse (L), mindestens einen Detektor

(D) und mindestens eine Blende (B) mit einer Blendenöffnung (5), welche in der Größe veränderbar ist. Die Erfindung betrifft ferner Verfahren zur Korrektur der chromatischen Aberration.

EP 3 136 401 A1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Korrektur des Längsfehlers der chromatischen Aberration von Strahlung massebehafteter Teilchen. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur Korrektur des Längsfehlers der chromatischen Aberration.

Stand der Technik

[0002] Es ist bekannt, dass Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge durch Linsen in der Regel an unterschiedlichen Brennpunkten fokussiert wird. Hierbei handelt es sich um den Längsfehler der chromatischen Aberration. Vor und nach dem jeweiligen Brennpunkt divergieren die Strahlen für jede Wellenlänge in kegelförmiger Weise. Daher werden Punkte nur für eine Wellenlänge durch eine Linse mit chromatischer Aberration als Punkte abgebildet. Für alle anderen Wellenlängen entsteht eine Unschärfe der Abbildung. Punkte werden als Scheibchen abgebildet.

[0003] Linsen bilden typischerweise nur genau eine Wellenlänge in einem System aus Eingangsblende, Linse und Detektor scharf auf dem Detektor ab. Die Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex verschiebt den Brennpunkt und damit den Ort der idealen Abbildung für alle anderen Wellenlängen im beobachteten Spektrum.

[0004] Verfahren zur Korrektur der chromatischen Aberration sind bekannt, zum Beispiel die Verwendung von Systemen aus Linsen mit verschiedenen Brechzahlen in sogenannten Achromaten oder Apochromaten.

[0005] Die Korrektur chromatischer Aberration macht bei abbildenden Systemen häufig eine komplexe, asphärische Geometrie der Linse notwendig. Stand der Technik ist die Korrektur chromatischer Aberration durch Linsensysteme mit mehreren, sphärischen und asphärischen Linsen, die eine möglichst wellenlängenunabhängige Brennweite des gesamten Linsensystems erreichen sollen. Linsensysteme aus mehreren, teils asphärischen, Linsen sind teuer und komplex in der Herstellung. Außerdem sind sie empfindlich.

[0006] Auch für Neutronenstrahlung tritt der Effekt der chromatischen Aberration auf. Eine optimale Auflösung bei abbildenden Verfahren mit einer solchen Strahlung liegt vor, wenn bei Proben mit einer kristallinen Struktur diese Struktur in der Abbildung als Gitter aus punktförmigen Interferenzmaxima sichtbar wird. Die Auflösung ist umso besser, je näher zwei Interferenzmaxima beieinander liegen können, die nach der Abbildung durch das abbildende Verfahren voneinander unterscheidbar sind. Die chromatische Aberration, insbesondere der Längsfehler, führt zu einer scheibchenförmigen Vergrößerung dieser Interferenzmaxima während des abbildenden Verfahrens.

[0007] Zur Untersuchung der inneren Struktur von Proben durch Strahlung massebehafteter Teilchen eignet sich insbesondere auch die Neutronenkleinwinkelstreuung. Bei Experimenten zur Neutronenstreuung wird ein Neutronenstrahl aus einer Quelle auf eine Probe gelenkt. Eine mögliche Anordnung zur Durchführung der Neutronenstreuung ist in Jaksch et al. (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 762 (2014) 22-30) angegeben. Von der Probe werden die Neutronen unter einem Streuwinkel auf die Oberfläche eines Detektors gestreut.

[0008] Zur Erzeugung eines parallelen Strahlenverlaufs der Neutronenstrahlen kann ein Kollimator zwischen der Neutronenquelle und der Probe verwendet werden. Die Probe befindet sich dabei in Strahlrichtung unmittelbar hinter dem Kollimator. Die Kollimation der Strahlen im Kollimator gelingt in der Regel nicht ideal, das heißt der Durchmesser des Neutronenstrahls wächst entlang der Strahlachse in Richtung der Propagation an. Die Abweichung von der idealen Kollimation, also die Aufweitung des Neutronenstrahls senkrecht zur Strahlachse, wird durch den Öffnungswinkel der Kollimation oder kurz Kollimationswinkel angegeben. Die Abbildung ist umso besser, je kleiner das Verhältnis dieses Öffnungswinkels zu dem Streuwinkel, also α/ϑ ist.

[0009] Es ist bekannt, bei Neutronenstreuexperimenten zur Untersuchung der Proben mit einer Frequenz Neutronenpulse mit Neutronen verschiedener Wellenlängen zu erzeugen. Die statistische Verteilung der Geschwindigkeiten der Neutronen in einem solchen Puls folgt dabei der Maxwellverteilung. Nach der Streuung an der Probe erreichen die Neutronen den Detektor.

[0010] Zu einer besseren Fokussierung des Strahles ist es bekannt, Neutronenlinsen, unter anderem aus Lithium-Fluor-Verbindungen, Magnesium-Fluor-Verbindungen oder anderen Magnesium-Salz-Verbindungen zu verwenden, zum Beispiel zwischen dem Kollimator und der Probe. Die Linse befindet sich dabei in der Regel in Strahlrichtung unmittelbar hinter dem Kollimator und unmittelbar vor der Probe. Die Linse hat ferner in der Regel die gleiche Ausdehnung wie die Probe. Sie kann unter anderem eine kreisförmige oder quadratische oder rechteckige Form haben. Die Abhängigkeit der Brennweite der Linsen von der Wellenlänge der Neutronenstrahlung in Neutronenstreuexperimenten ist aus Hammouda et al. (J. Appl. Cryst. (2013).46,1361-1371) bekannt. Der Effekt der chromatischen Aberration führt auch im Bereich der Neutronenstreuung zu einer Verschlechterung der Auflösung. Die Pixelgröße von heutzutage zur Verfügung stehenden Detektoren machen eine Beseitigung des Längsfehlers der chromatischen Aberration notwendig.

[0011] Aus US 8735844 ist eine Vorrichtung zur Korrektur von chromatischer Aberration von Neutronenstrahlung aus einer Anordnung von Spiegelflächen nach der Art von Wolter-Teleskopen bekannt. Diese Anordnung besteht aus mehreren axialsymmetrisch übereinander gelagerten Spiegelschichten. Die aus der Neutronenquelle austretenden Neutronen werden an den Spiegelschichten reflektiert und dabei auf die Probe gelenkt.

[0012] In US 6765197 wird zur Korrektur der chromatischen Aberration eine Kombination von Fresnellinsen offenbart, welche entlang der Propagationsachse des Strahls angeordnet sind. Durch die Verwendung einer solchen Kombination von Fresnellinsen kann die chromatische Aberration reduziert werden.

[0013] In ähnlicher Weise wurden in Oku et al. (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 600 (2009) 100-102) Kombinationen von synchron fokussierenden und defokussierenden Linsen vorgeschlagen, um den Effekt der chromatischen Aberration zu verringern.

[0014] Die Nachteile dieser Vorschläge sind in dem hohen Aufwand und der Anzahl der Verfahrensschritte zur Herstellung der jeweiligen Systeme zu sehen, sowie in der Fehleranfälligkeit durch die Kombination einer Mehrzahl von fein aufeinander abgestimmten Bauelementen innerhalb der Systeme.

Aufgabe der Erfindung

[0015] Aufgabe der Erfindung ist die Bereitstellung einer einfacher aufgebauten Vorrichtung zur Korrektur des Längsfehlers der chromatischen Aberration von Strahlung massebehafteter Teilchen. Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist die Bereitstellung eines Verfahrens zur Korrektur dieses Längsfehlers.

Lösung der Aufgabe

[0016] Die Aufgabe wird gelöst mit der Vorrichtung nach Patentanspruch 1 und dem Verfahren gemäß dem Nebenanspruch. Vorteilhafte Ausgestaltungen hierzu ergeben sich aus den jeweils hierauf rückbezogenen Patentansprüchen.

Beschreibung der Erfindung

[0017] Die Vorrichtung zur Korrektur des Längsfehlers der chromatischen Aberration von Strahlung massebehafteter Teilchen umfasst mindestens eine Linse, mindestens einen Detektor und mindestens eine Blende mit einer Blendenöffnung, welche in der Größe veränderbar ist. Hiermit ist gemeint, dass eine Blende verwendet wird, deren Blendenöffnung veränderbar ist, während Strahlung massebehafteter Teilchen hindurchtritt. Optional kann die Vorrichtung mindestens einen Kollimator zur parallelen Ausrichtung der Strahlung massebehafteter Teilchen umfassen. Dieser kann entlang der Strahlachse hinter der Blende angeordnet sein.

[0018] Vorteilhaft kann die Blendenöffnung während des Durchtritts der Strahlung so klein gewählt werden, dass Strahlung, die zu dem unerwünschten Längsfehler der chromatischen Aberration führt, am Rand der Blendenöffnung absorbiert wird und nicht durch diese in Richtung der Probe und des Detektors hindurchtreten kann. Hierdurch wird vorteilhaft bewirkt, dass der Längsfehler korrigiert wird, welcher durch die verschiedenen Wellenlängen der Strahlung verursacht wird.

[0019] Entlang der Strahlachse können somit innerhalb der Vorrichtung von der Quelle ausgehend nacheinander die Blende, die Linse und der Detektor angeordnet sein. Ein Kollimator zur parallelen Ausrichtung der Strahlung massebehafteter Teilchen kann zwischen der Quelle und der Linse angeordnet sein, Quelle und Probe sind kein Bestandteil der erfindungsgemäßen Vorrichtung.

[0020] Die erfindungsgemäße Vorrichtung kann mindestens eine Blendenscheibe umfassen, damit die Blendenöffnung veränderbar ist. Es sind aber auch viele weitere Ausgestaltungsformen möglich. Eine veränderbare Blendenöffnung kann zum Beispiel auch durch paarweise im rechten Winkel angeordnete Bauelemente mit jeweils rechteckigem Querschnitt bewirkt werden, wobei die Bauelemente aufeinander zu bewegt werden können. Zu diesem Zweck verwendbar sind auch Bauelemente, welche eine Oberfläche mit einem Sägezahnprofil haben und zum Beispiel an Bauelementen mit glatter Oberfläche entlanggeführt werden können.

[0021] Eine vorteilhafte Vorrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Blendenöffnung eine Umrandung aufweist, welche durch vier Scheiben gebildet wird. Die Scheiben sind entlang der Strahlachse in einem gleichen ersten Abstand angeordnet. Die Mittelpunkte der Scheiben sind in einem gleichen zweiten Abstand von der Strahlachse angeordnet. Die Strahlachse ist hierbei die Symmetrieachse der Vorrichtung, entlang derer sich die Strahlung ausbreitet. Die Verbindungslinien zwischen der Strahlachse und den Mittelpunkten stehen senkrecht aufeinander. Bei jeder Scheibe nimmt entlang des Randes der Scheibe der Abstand zum Mittelpunkt verschiedene Werte an. Die Umrandung der Blendenöffnung soll hierbei die Gesamtheit der Ränder der Flächen, durch die die Strahlung hindurchtritt, in den Ebenen senkrecht zur Strahlrichtung bezeichnen, in denen die Blendenscheiben angeordnet sind.

[0022] In einer alternativen Ausgestaltung der Vorrichtung umfasst die Blende die Öffnung einer Irisblende.

[0023] Durch die unterschiedlichen Werte des Abstandes zwischen Rand und Mittelpunkt kann vorteilhaft auf einfache Weise eine Veränderung der Blendenöffnung durch Drehen der vier Scheiben erreicht werden.

[0024] Eine weitere vorteilhafte Vorrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Scheiben jeweils einen Rand umfassen, welcher die Form einer Spirale entlang einer Windung aufweist, wobei eine geradlinige Kante zwischen dem Randpunkt des maximalen und minimalen Abstandes vom Mittelpunkt der jeweiligen Scheibe verläuft.

[0025] Durch die unterschiedlichen Abstände zwischen Rand und Mittelpunkt kann vorteilhaft auf einfache Weise eine Veränderung der Blendenöffnung durch Drehen der Scheiben erreicht werden.

[0026] Diese kann bei dieser Ausführung an die Geschwindigkeitsverteilung eines Neutronenpulses, welcher durch die Blendenöffnung hindurchtritt, so angepasst werden, dass der Längsfehler der chromatischen Aberration korrigiert wird.

[0027] In einer vorteilhaften Vorrichtung wird der Rand der maximalen Blendenöffnung durch die geradlinigen Kanten von vier Scheiben in Form eines Quadrates gebildet. Wenn zum Beispiel Neutronenleiter, welche unter anderem zur Ausrichtung der Neutronenstrahlung aus der Neutronenquelle verwendet werden, einen quadratischen Querschnitt haben, entspricht die Form der Blendenöffnung dem Querschnitt dieser Neutronenleiter.

[0028] Eine hohe mechanische Stabilität wird vorteilhaft unter anderem dadurch bewirkt, dass die Blendenöffnung durch eine einfache Drehung der mindestens einen Scheibe verändert werden kann. Ferner genügt auch in vorteilhaften Ausgestaltungen der Vorrichtung eine geringe Zahl von Scheiben im Vergleich zu anderen Formen von Blenden, wie zum Beispiel der Irisblende. Außerdem berühren sich die Scheiben in Strahlrichtung nicht, so dass zum Beispiel Abnutzungseffekte durch Reibung nicht oder in geringerem Maße auftreten.

[0029] Eine hohe mechanische Stabilität ist zum Beispiel von Vorteil, wenn die Blendenöffnung periodisch geöffnet und wieder geschlossen wird. Dies ist bei Neutronenstreuexperimenten der Fall, in denen die Neutronenpulse typischerweise mit einer vorgegebenen Frequenz erzeugt werden. Diese Frequenz liegt typischerweise im zweistelligen Herzbereich. Die mechanische Stabilität von Anordnungen, rotierender Scheiben ist unter anderem aus gut etablierten und zuverlässig funktionierenden Choppersystemen bekannt. Die Stabilität muss mindestens so gut sein, dass die Blende im Takt der Neutronenquelle geöffnet und geschlossen werden kann.

[0030] Die Blende besteht vorteilhaft aus einem Material, welches die Neutronen absorbiert, zum Beispiel aus bor- oder lithium- oder gadolinium-haltigen Materialien.

[0031] Das Verfahren zur Korrektur der chromatischen Aberration in einem Neutronenstreuexperiment erfolgt mit einer Vorrichtung, welche mindestens eine Linse, mindestens einen Detektor und mindestens eine Blende umfasst. Für den jeweiligen Bereich der Wellenlängen der verwendeten Strahlung wird die Größe der Blendenöffnung so gewählt, dass der Längsfehler der chromatischen Aberration korrigiert wird. Optional kann die Vorrichtung mindestens einen Kollimator zur parallelen Ausrichtung der Strahlung massebehafteter Teilchen umfassen. Dieser kann entlang der Strahlachse hinter der Blende angeordnet sein.

[0032] Dies bedeutet, dass während des Experiments die Blendenöffnung aktiv an die Wellenlängen der Neutronen angepasst wird. Vorteilhaft wird hierdurch die chromatische Aberration der unerwünschten Wellenlängen verringert.

[0033] Hierzu sind die nachfolgenden Betrachtungen erfindungswesentlich: Die Brennweite der eingesetzten Linsen ist von der Wellenlänge der massebehafteten Teilchen, hier dargestellt am Beispiel der Neutronen abhängig. Die Oberfläche der Probe hat typischerweise eine Größe bis zu 5 cm x 5 cm. Durch die Verteilung der Geschwindigkeiten ist auch die Verteilung der Wellenlängen der Neutronen bestimmt. Dabei sind die Neutronen umso schneller, je kleiner ihre Wellenlänge ist. Je kleiner ihre Wellenlänge ist, desto schneller durchqueren sie daher eine vorgegebene Distanz, zum Beispiel die zwischen einem optionalen Kollimator und der Probe sowie zwischen der Probe und dem Detektor. Nach der Streuung an der Probe erreichen die Neutronen mit der kleinsten Wellenlänge den Detektor zuerst. Dann folgen die langsameren Neutronen in der Abfolge anwachsender Wellenlängen.

[0034] Der Streuprozess während der Neutronenstreuung lässt sich durch den Streuvektor q beschreiben. Dieser ist definiert als die Differenz zwischen dem Wellenvektor k_i einer auf die Probe einlaufenden Welle und dem Wellenvektor k_f einer nach dem Streuvorgang auslaufenden Welle: $q = k_f - k_i$. Insbesondere lässt sich für elastische Streuvorgänge, wie unter anderem der Neutronenkleinwinkelstreuung, der Betrag des Streuvektors bei einem Streuwinkel 2θ schreiben als:

$$q = 4\pi \frac{\sin \theta}{\lambda} \quad (1)$$

[0035] Der Betrag des Streuvektors bestimmt sich durch die Wellenlänge in der Strahlung und andererseits durch die Streuwinkel. Insbesondere für kleine Beträge des Streuvektors q bedeutet dies, dass Strahlung mit größeren Streuwinkeln gestreut wird, je kleiner die Wellenlänge ist. Kleinere Wellenlängen korrespondieren also mit größeren Streuwinkeln. Für die Neutronenkleinwinkelstreuung sind solche kleinen Beträge des Streuvektors q bis typischerweise $2\text{\AA}^{-1}$ relevant. Für die Korrektur der chromatischen Aberration der Neutronenstreuung sind insbesondere kleine Beträge des Streuvektors q bis zu $0.01\text{\AA}^{-1}$ relevant.

[0036] Die Brennweite einer Neutronenlinse mit Krümmungsradius R und Brechungsindex n ist gegeben durch:

$$f = \frac{R}{2(1-n)} \quad (2)$$

[0037] Der Brechungsindex ist bei einer atomaren Dichte ρ , einer Neutronenstreu­länge b und einer Neutronenwellen­länge λ gegeben durch:

$$n = 1 - \frac{\rho b}{2\pi} \lambda^2 \quad (3)$$

[0038] Zur Beschreibung des Abbildungsfehlers in verschiedene Richtungen wird ein Koordinatensystem eingeführt, dessen x- und y-Achsen in Richtung der Höhe und Breite des Detektors oder eines Detektorpixels verlaufen, der Strahl verläuft in positiver z-Richtung. Außerdem werden folgende Bezeichnungen eingeführt: L_2 bezeichnet den Abstand zwischen Linse und Detektor, L_1 bezeichnet den Abstand zwischen Strahlquelle und Linse, r_1 bezeichnet den Radius der Quelle und r_2 bezeichnet den Radius der Probe, welcher typischerweise mit dem Radius der Linse übereinstimmt, λ bezeichnet die verwendete Neutronenwellenlänge, λ_0 bezeichnet die Wellenlänge von Neutronen, für welche die Strahlen auf der Oberfläche des Detektors in einem Punkt zusammenlaufen, $\Delta\lambda$ bezeichnet den Fehler der Neutronenwellenlängen, welche typischerweise in Neutronenstreuexperimenten auftritt, Δx_3 bezeichnet die Breite der Detektorzelle in x-Richtung.

[0039] Der geometrische Teil der Varianz der räumlichen Auflösung, welche ein Maß für die Vergrößerung der Abbildung durch den Längsfehler der chromatischen Aberration darstellt, ist in x-Richtung gegeben durch:

$$[\sigma_x^2]_{geo} = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^2 \frac{r_1^2}{4} + \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1}\right)^2 \cdot S(\lambda, \lambda_0) \frac{r_2^2}{4} + \frac{(\Delta x_3)^2}{12} \quad (4)$$

mit

$$S(\lambda, \lambda_0) = \left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2\right] + \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2 \left[\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2 - \frac{1}{3}\right] + \frac{1}{15} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^4 \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^4 \quad (5)$$

[0040] Für die y-Richtung ergibt sich die entsprechende Gleichung durch Austausch von y-Koordinate gegen die x-Koordinate. Im Rahmen der Erfindung wurde erkannt, dass die Breite der Varianz vom Radius der Quelle bzw. von der Blendenöffnung abhängt, durch welche der Neutronenstrahl hindurchtritt, bevor er in den Kollimator eintritt.

[0041] Es wurde ferner erkannt, dass nach Festlegung der Parameter, mit denen die Neutronenstreuung durchgeführt wird, sich aus Gleichung (4) der Radius r_1 der Blendenöffnung berechnen lässt unter der Bedingung, dass die Größe der Abbildung einer Fläche, welche die Größe eines Pixels des Detektors hat, auf der Detektoroberfläche gleich dieser Pixelgröße des Detektors ist. Dies bedeutet, dass in Gleichung (4) der Wert der Varianz $[\sigma_x]_{geo}$ gleich dem Wert der Pixelbreite des Detektors gesetzt werden muss. Der Radius der Blendenöffnung in Abhängigkeit von der Wellenlänge, also $r_1(\lambda)$, ist dann aus Gleichung (4) festgelegt. Hierbei kann vorteilhaft näherungsweise $[\sigma_x]_{geo} \approx [\sigma_y]_{geo}$ angenommen werden, also dass die Varianzen in x- und y-Richtung gleich sind.

[0042] Die Blendenscheiben werden vollständig oder teilweise gedreht, während ein Neutronenpuls hindurchtritt. Die Neutronen mit kleinster Wellenlänge treten dabei zuerst durch die Blendenöffnung hindurch. Dann folgen die Neutronen mit ansteigender Wellenlänge. Jede Dreheinstellung der Scheiben während der Drehung, welche zum Beispiel durch einen Drehwinkel gemessen werden kann, korrespondiert mit einer Wellenlänge der Neutronen. Die Blende ist entsprechend stabil, um der erfindungsgemäßen Anforderung während des Verfahrens zu genügen.

[0043] Für den folgenden erfindungswesentlichen Gedanken wird der Randpunkt jeweils einer Scheibe betrachtet, welcher am Rand dieser Scheibe auf der Verbindungslinie zwischen dem Mittelpunkt der Scheibe und dem Mittelpunkt der Blendenöffnung liegt. In diesem Zusammenhang bezeichnet D den Abstand zwischen dem Mittelpunkt einer Scheibe und dem Mittelpunkt der Blendenöffnung. Zu jeder Wellenlänge ergibt sich während der Drehung der Abstand zwischen diesem Randpunkt jeweils einer Scheibe zu dem Mittelpunkt dieser Scheibe als: $d(\lambda) = D - r_1(\lambda)$. Dies bestimmt die Form des Bereichs des Randes der Blendenscheibe, welcher für die Änderung der Blendenöffnung beim Durchgang der Neutronen verwendet wird. Wenn die Scheiben während des Durchgangs der Neutronen vollständig gedreht werden, ist der gesamte Verlauf des Randes der Scheibe bestimmt. Vorteilhaft kann hierbei die Fläche der Blendenöffnung senkrecht zur Strahlrichtung näherungsweise als kreisförmig angenommen werden.

[0044] Vorteilhaft kann die Abhängigkeit dieses Abstandes $d(\lambda)$ als linear approximiert werden. Es genügt dann, die Werte von $r_1(\lambda)$ für die größte und kleinste verwendete Wellenlänge zu bestimmen. Alle anderen Werte von $r_1(\lambda)$ ergeben sich dann aus der linearen Interpolation zwischen diesen Extremwerten.

[0045] Die Drehung der Scheiben kann zum Beispiel durch ein übliches Getriebe über Rotationsachsen erfolgen, welche durch Öffnungen um die Mittelpunkte der Blendscheiben angeordnet sind. Eine synchrone Drehung der Scheiben kann unter anderem unter Verwendung von Zahnriemengetrieben oder Zahnrädern oder eine Synchronisation mehrerer Motoren durch elektrische Schaltungen, zum Beispiel mit TTL-Pulsen, bewirkt werden.

[0046] Es wurde erkannt, dass die Größe der Blendenöffnung so angepasst werden muss, dass die Größe der Abbildung einer Fläche, welche die Größe eines Pixels des Detektors hat, auf der Detektoroberfläche höchstens gleich dieser Pixelgröße des Detektors ist. Dann ist der Abbildungsfehler durch die chromatische Aberration durch den Detektor nicht mehr messbar. Dies ist auch bei modernen Detektoren der Fall, bei denen die Höhe und Breite der Detektorpixel im Bereich von Millimetern liegt.

[0047] Es wurde im Rahmen der Erfindung erkannt, dass dann vorteilhaft immer noch die maximal mögliche Intensität der Neutronenstrahlung, also die maximal mögliche Anzahl von Neutronen pro Zeit pro Fläche, bei gleichzeitiger Unterdrückung des Längsfehlers durch chromatische Aberration durch die Linse hindurchtritt.

[0048] Dies ist zum Beispiel vorteilhaft gegenüber der Möglichkeit, die Abbildungsfehler durch die unterschiedliche Wellenlänge der Neutronen durch eine sehr kleine, fest gewählte Öffnung (unendlich klein für eine vollständige Beseitigung der Abbildungsfehler) zu korrigieren. Je kleiner die Blendenöffnung gewählt wird, desto mehr Intensität der Strahlung geht für die Abbildung verloren. Durch das erfindungsgemäße Verfahren wird vorteilhaft bewirkt, dass noch die maximal mögliche Intensität der Neutronenstrahlung, also die maximal mögliche Anzahl von Neutronen pro Zeit pro Fläche, bei gleichzeitiger Unterdrückung des Längsfehlers durch chromatische Aberration durch die Linse hindurchtritt.

[0049] Die Höhe und Breite der Detektorpixel kann dabei für Neutronenstreuexperimente von $50\ \mu\text{m}$ bis zu einigen Zentimetern reichen. Typisch sind Breiten bzw. Höhen im Bereich von $3\text{ mm} - 8\text{ mm}$. Der maximale Durchmesser der Blendenöffnung nimmt dabei typischerweise Werte von $20\text{ mm} - 30\text{ mm}$ an. Die Blende bewirkt insbesondere bei großen Wellenlängen, typischerweise im Bereich von $10\ \text{\AA} - 15\ \text{\AA}$, eine Korrektur des Längsfehlers der chromatischen Aberration. Die Fläche der Blendenöffnung liegt für diesen Fall in diesem Wellenlängenbereich typischerweise bei einigen Quadratzentimetern.

[0050] Der Kehrwert der Frequenz, mit der Neutronenpulse erzeugt werden, kann typischerweise bei 72 Millisekunden liegen. Dies ist das Zeitintervall, in dem die Blendenöffnung durch Drehen der Blendscheiben von der maximalen Öffnung zur minimalen Öffnung verändert wird.

[0051] In einer vorteilhaften Ausführung des Verfahrens wird die Blendenöffnung kontinuierlich oder schrittweise von der größten Öffnung ausgehend verkleinert. Vorteilhaft wird somit jedes Mal während ein Puls von Neutronen hindurchtritt die Blende geschlossen, so dass die Strahlung, welche den Längsfehler der chromatischen Aberration verursacht, am Rand der Blendenöffnung absorbiert wird.

[0052] Da in einem Neutronenpuls die Neutronen mit kleinen Wellenlängen zuerst durch die Blendenöffnung treten und dann die Neutronen mit zunehmender Wellenlänge, wird die Blendenöffnung vorteilhaft für kleine Wellenlängen zunächst maximal groß gewählt und dann kontinuierlich oder schrittweise verkleinert.

[0053] Die Intensität der Strahlung ist bei den kleinsten verwendeten Wellenlängen am größten. Daher wird die Intensitätsverteilung des Spektrums optimal ausgenutzt und Abbildungsfehler durch chromatische Aberration bei großen Wellenlängen der Neutronen, typischerweise im Bereich von $10\ \text{\AA}, 11\ \text{\AA}, 12\ \text{\AA}, 13\ \text{\AA}, 14\ \text{\AA}, 15\ \text{\AA}$, vermieden.

[0054] Im Falle von Neutronenstreuexperimenten ist die Intensität bei kleinen Wellenlängen, typischerweise im Bereich von $2\ \text{\AA} - 5\ \text{\AA}$, am größten und nimmt für größere Wellenlängen ab. Die Neutronenlinsen wechselwirken auch in der Regel erst mit Neutronen größerer Wellenlängen, so dass für Neutronen kleiner Wellenlängen kein Abbildungsfehler durch die chromatische Aberration entsteht. Ferner werden die Neutronen mit kleiner Wellenlänge in große Streuwinkel gestreut. Dies ist unter anderem an Gleichung (1) zu sehen, insbesondere für kleine Beträge des Streuvektors q mit $q < 1\ \text{\AA}^{-1}$. Daher ist der Abbildungsfehler, welcher durch das Verhältnis von Öffnungswinkel der Kollimation zu Streuwinkel α/ϑ gegeben ist, für Neutronen kleiner Wellenlängen vernachlässigbar. Erst die Strahlung von Neutronen großer Wellenlängen muss durch eine Linse weiter fokussiert werden. Außerdem liegt durch die quadratische Abhängigkeit für kleinere Wellenlängen auch der Brechungsindex viel näher bei 1 als für größere Wellenlängen, das heißt $n \rightarrow 1$ für $\lambda \rightarrow 0$. Dies ist zum Beispiel an Gleichung (3) zu sehen. Dies bedeutet unter anderem, dass die Wirkung der Linse kleiner wird, je kleiner die Wellenlänge der jeweiligen Neutronen ist.

[0055] Da die Zahl der Teilchen zu größeren Wellenlängen, typischerweise grösser als $15\ \text{\AA}$, insbesondere grösser als $17\ \text{\AA}$ hin stark abnimmt, wird in diesem Wellenlängenbereich die Blendenöffnung vorteilhaft nicht mehr verkleinert. Es wird für einen noch verwertbaren Teilchenfluss eine minimale Blendenöffnung beibehalten. Diese minimale Blendenöffnung liegt in der Regel bei einer Fläche von einigen Quadratmillimetern, typischerweise bei $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$. Der Bereich größerer Wellenlängen liegt in der Regel oberhalb von $7,5\ \text{\AA}$, insbesondere in einem Bereich von $10\ \text{\AA} - 15\ \text{\AA}$. Da die Intensität der Strahlung näherungsweise mit der Wellenlänge λ gemäß λ^{-4} abfällt, sind Messungen von Strahlung mit Wellenlängen jenseits von $15\ \text{\AA}$ typischerweise nur unter hohem Intensitätsverlust möglich.

[0056] Zusätzlich können in den Detektorelementen, welche im zentralen Bereich der Detektoroberfläche liegen, die Signale der ersten 10 Millisekunden gelöscht werden. Da die schnellen Neutronen in die äußeren Elemente des Detektors gestreut werden, stammen die Signale der ersten 10 Millisekunden nur aus einem Rauschsignal, etwa von Teilchen, die auf die Detektoroberfläche treffen, aber nicht aus dem auf der Detektoroberfläche auftreffenden Neutronenpuls.

[0057] In einer vorteilhaften Ausführung des Verfahrens wird der Bereich der Wellenlängen der Strahlung vor dem Hindurchtreten durch die Blendenöffnung und die Linse begrenzt.

[0058] Durch diese Begrenzung wird sichergestellt, dass Strahlung im gewünschten Bereich von Wellenlängen auf die Blendenöffnung trifft. In dem Fall der Neutronenstreuung werden hierdurch auch Teilchen aus früheren oder späteren Neutronenpulsen entfernt, zum Beispiel besonders langsame Teilchen aus einem früheren Neutronenpuls oder besonders schnelle Teilchen aus einem späteren Neutronenpuls. Dadurch weisen die einzelnen Neutronenpulse unter anderem eine vergleichbare Zahl von Neutronen auf.

[0059] Hierfür kann vorteilhaft mindestens ein Chopper, insbesondere ein T0-Chopper, verwendet werden. Dieser besteht zum Beispiel aus einem Rotor mit Rotorblättern, welche den Neutronenstrahl blockieren. Die Rotorblätter weisen Öffnungen oder Spalte auf, durch welche der Neutronenstrahl hindurchtreten kann. Der Rotor kann dabei vorteilhaft mit der gleichen Frequenz rotieren, mit der die Neutronenpulse erzeugt werden. Vorteilhaft können mehrere entlang der Strahlachse in einem Abstand angeordnete Chopper verwendet werden, welche synchron rotieren. Die Öffnungen oder Spalte der Rotorblätter der verschiedenen Chopper können dabei gegeneinander verdreht angeordnet sein, wie aus dem Stand der Technik bekannt.

[0060] Vorteilhaft ist das Zeitintervall, in dem die Blendenöffnung durch Drehen der Blendenscheiben von der maximalen Öffnung zur minimalen Öffnung und wieder zurück zur maximalen Blendenöffnung verändert wird, durch den Kehrwert der Frequenz bestimmt, mit dem die Neutronenpulse aus der Neutronenquelle emittiert werden. Die maximale Blendenöffnung wird dann vorteilhaft mit der gleichen Frequenz eingestellt, mit der die Neutronenpulse in der Neutronenquelle erzeugt werden.

[0061] Bei einer kontinuierlichen Neutronenquelle ist das Zeitintervall, in dem die Blendenöffnung durch Drehen der Blendenscheiben von der maximalen Öffnung zur minimalen Öffnung verändert wird, vorteilhaft durch den Kehrwert der Drehfrequenz des T0 Choppers bestimmt.

[0062] In der vorteilhaften Ausgestaltung der Vorrichtung mit vier senkrecht zueinander angeordneten Blendenscheiben mit spiralförmigem Rand wird die maximale Blendenöffnung durch die vier geraden Kanten der Blendenscheiben umrandet. Durch die synchrone Drehung der Scheiben wird die Blendenöffnung von der maximalen Blendenöffnung ausgehend minimiert. Beim Erreichen des Vollwinkels, also einer Drehung um 360° , erfolgt ein sprunghafter Übergang von der minimalen zur maximalen Blendenöffnung.

[0063] Vorteilhaft wird mit dem jeweiligen Schließen der Blendenöffnung nach der Erzeugung eines Neutronenpulses erst nach dem Verstreichen eines Zeitintervalls verzögert begonnen. Dieses Zeitintervall ergibt sich vorteilhaft als Quotient der Strecke zwischen der Neutronenquelle und der Blende einerseits und andererseits der Geschwindigkeit der schnellsten Neutronen in dem jeweiligen Neutronenpuls, welches durch die Blendenöffnung hindurchtreten soll. Danach wird erst mit dem Schließen der Blende begonnen, nachdem die schnellsten Neutronen eines Pulses die Blendenöffnung in Richtung Probe durchtreten haben. Dadurch wird vorteilhaft bewirkt, dass die Blendenöffnung so verändert wird, dass die Neutronen mit solchen Wellenlängen, dass ein Längsfehler der chromatischen Aberration verursacht wird, am Rand der Blendenöffnung absorbiert werden.

[0064] Vorteilhaft rotieren in der Vorrichtung der oder die Chopper mit der gleichen Frequenz, mit der die Blende maximal geöffnet wird, und mit der die Neutronenquelle die Neutronen emittiert.

[0065] Der Schließmechanismus der Blende arbeitet vorteilhaft isochron mit der Neutronenquelle und der Flugzeit der schnellsten Neutronen in dem jeweiligen Neutronenpuls entsprechend phasenverschoben zur Neutronenquelle.

[0066] Vorteilhaft rotieren in der Vorrichtung der oder die Chopper mit der gleichen Frequenz, mit der die Blende maximal geöffnet wird, und mit der die Neutronenquelle die Neutronen emittiert.

[0067] Angenommen, die Neutronenquelle emittiert Neutronenpulse mit einer Frequenz von 14 Hz. Die Dauer der Emission eines einzelnen Neutronenpulses kann bei 2,4 Millisekunden liegen. In diesem Zeitintervall werden aus der Neutronenquelle Neutronen verschiedener Wellenlängen beziehungsweise Geschwindigkeiten emittiert, wobei die statistische Verteilung der Geschwindigkeiten in dem Neutronenpuls der Maxwellverteilung folgt. Nach der Emission aus der Neutronenquelle bewegen sich die Neutronen in dem Neutronenpuls entlang der Strahlenachse in Richtung der Blende beziehungsweise Linse. Zur Ausrichtung des Neutronenpulses können bekannte Neutronenleiter verwendet werden.

[0068] In einer vorteilhaften Ausgestaltung drehen sich die vier Blendenscheiben mit spiralförmigem Rand synchron mit einem gleichen solchen Drehsinn, dass die Blendenöffnung verkleinert wird, z.B. linksdrehend. Die synchrone Drehung der Blendenscheiben kann über ein übliches Getriebe, zum Beispiel über ein Zahnriemengetriebe oder über Zahnräder erfolgen. Dabei erfolgt eine Drehung der Scheiben um 360° in einem ersten Zeitintervall, welches dem Kehrwert der Frequenz entspricht, mit dem die Neutronenquelle Neutronenpulse emittiert. Dieser Wert liegt in diesem Beispiel bei 71,4 Millisekunden. Zu jedem Zeitpunkt, an dem die Neutronenquelle einen Neutronenpuls emittiert, haben

die Blendscheiben sich um 360° gedreht. Die Drehung der Scheiben erfolgt isochron mit den Zeitintervallen zwischen den Anfangszeitpunkten der Emissionen der Neutronenpulse aus der Neutronenquelle.

[0069] In einer vorteilhaften Ausgestaltung wird mit dem Schließen der Blendenöffnung, ausgehend von der maximalen Blendenöffnung, erst nach einem zweiten Zeitintervall begonnen, wenn die schnellsten Neutronen des Neutronenpulses die Blendenöffnung erreicht haben. Das Schließen der Blendenöffnung erfolgt also phasenverschoben zu der Emission der Neutronenpulse aus der Neutronenquelle. Das zweite Zeitintervall, welches diese zeitliche Verzögerung beschreibt, ergibt sich vorteilhaft als Quotient der Strecke zwischen der Neutronenquelle und der Blende einerseits und andererseits der Geschwindigkeit des schnellsten Neutrons in dem jeweiligen Neutronenpuls.

[0070] Die Blendscheiben werden synchron kontinuierlich gedreht, wobei eine Drehung um 360° in dem ersten Zeitintervall und ausgehend von der maximalen Blendenöffnung zu der Emission der Neutronenpulse um das zweite Zeitintervall zeitlich versetzt erfolgt. Die schnellsten Neutronen aus dem Neutronenpuls treten durch die Blendenöffnung hindurch, wenn diese maximal ist. Dann treten die langsameren Neutronen in der Abfolge ansteigender Wellenlängen hindurch, während die Blendenöffnung durch Drehen der Blendscheiben kontinuierlich zu einer minimalen Blendenöffnung hin verkleinert wird. Wenn die minimale Blendenöffnung erreicht ist, sind die Neutronen eines Pulses durch die Blendenöffnung hindurchgetreten. Nun wird durch das Weiterdrehen der Blendscheiben bewirkt, dass zum Ende des ersten Zeitintervalls wieder die maximale Blendenöffnung für die schnellsten Neutronen des nächsten Neutronenpulses eingestellt ist. Hierdurch wird vorteilhaft bewirkt, dass die Neutronen mit solchen Wellenlängen, dass ein Längsfehler der chromatichen Aberration verursacht wird, am Rand der Blendenöffnung absorbiert werden.

[0071] Nachdem die massebehafteten Teilchen, insbesondere Neutronen, durch die Blendenöffnung hindurchgetreten sind, werden sie durch mindestens eine Linse fokussiert, deren Längsfehler der chromatichen Aberration durch die Verwendung der Blende korrigiert wird, und treffen dann auf die Oberfläche mindestens eines Detektors.

[0072] Vorzugsweise sind in der erfindungsgemäßen Vorrichtung somit die Blende vor der Linse und diese wiederum vor dem Detektor angeordnet.

[0073] Wenn mit Hilfe dieses Verfahrens Strukturen von Proben untersucht werden, sind diese Proben typischerweise entlang der Strahlenachse hinter der Linse angeordnet. Die Neutronen werden dann nach der Fokussierung durch die Linse an der Probe gestreut und treffen dann auf die Detektoroberfläche.

[0074] Zur Erzeugung eines parallelen Strahlenverlaufs der Neutronenstrahlen kann ein Kollimator zwischen der Neutronenquelle und der Probe verwendet werden. Die Probe befindet sich dabei entlang der Strahlachse unmittelbar hinter dem Kollimator.

[0075] Der Bereich der Wellenlängen der Strahlung kann vor dem Hindurchtreten durch die Blendenöffnung und die Linse durch Verwendung von bekannten Choppern begrenzt werden. Vorteilhaft können sich die Chopper in dem ersten Zeitintervall um 360° drehen. Die Drehung erfolgt isochron mit der Emission der Neutronenpulse aus der Neutronenquelle. Vorteilhaft kann die Drehung der Chopper zeitlich versetzt zu der Emission der Neutronenpulse aus der Neutronenquelle erfolgen.

[0076] Vorteilhaft wird die Probe möglichst nahe hinter der Linse angeordnet. Dadurch wird vorteilhaft bewirkt, dass ein Teil der Strahlung durch die Probe gestreut wird und die Information über Eigenschaften der Probe im Streubild am deutlichsten sind. Hier kann bei kleiner Wellenlänge mit der maximalen Blendenöffnung gearbeitet werden.

Ausführungsbeispiel:

[0077] Nachstehend wird ein konkretes Ausführungsbeispiel mit Neutronen als massebehaftete Teilchen zu der Erfindung ausgeführt. Dieses Beispiel dient der Erläuterung der Erfindung und ist nicht einschränkend zu verstehen.

Figur 1: Stellung der Blendscheiben bei maximaler Blendenöffnung (a) und bei geschlossenem Zustand der Blende (b).

Figur 2: Aufbau zur Durchführung eines Neutronenstreuexperiments, in dem die erfindungsgemäße Vorrichtung verwendet wird.

Figur 3: Intensität der gestreuten Strahlung von Neutronen als Funktion des Betrags des Streuvektors q für verschiedene Einstellungen der Blendenöffnung.

[0078] Der folgende Text beschreibt die Ausführung für Blenden zur Korrektur chromaticher Aberration bei massebehafteten Teilchen, hier Neutronen.

[0079] Die verwendete Blende ist in Figur 1 dargestellt. Alternativ ist auch eine Irisblende möglich. Die Blendenöffnung weist eine Umrandung auf, welche durch vier Scheiben 1, 2, 3, 4 gebildet wird, welche entlang der Strahlachse in einem gleichen ersten Abstand angeordnet sind, wobei die Scheiben je einen Mittelpunkt aufweisen. Der Mittelpunkt einer Scheibe ist hier stellvertretend für die Mittelpunkte aller Scheiben mit 7 gekennzeichnet. Die Scheiben können

vorteilhaft in ihrer Mitte eine Öffnung aufweisen.

[0080] Die Verbindungslinien zwischen der Strahlachse und den Mittelpunkten stehen senkrecht aufeinander. Bei jeder Scheibe nimmt aufgrund der Spiralform der Scheibe der Abstand zum Mittelpunkt entlang des Randes verschiedene Werte an.

[0081] Die Scheiben umfassen jeweils einen Rand, welcher die Form einer Spirale entlang einer Windung aufweist, wobei eine geradlinige Kante zwischen dem Randpunkt des maximalen und minimalen Abstandes vom Mittelpunkt 7 der jeweiligen Scheibe verläuft. Die geradlinige Kante einer Scheibe wird hier stellvertretend für die geradlinigen Kanten aller Scheiben mit 6 bezeichnet. Der Rand einer Scheibe wird hier stellvertretend für den Rand aller Scheiben mit 8 bezeichnet.

[0082] Die Scheiben werden synchron in eine Drehrichtung gedreht derart, dass die Blendenöffnung ausgehend von der maximalen Blendenöffnung verkleinert wird. In der Figur 1 erfolgt dies durch eine Drehung mit Linksorientierung. Diese wird in der Figur durch einen Pfeil über Scheibe 2 dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die Drehrichtung nur für Scheibe 2 gezeigt, alle anderen Scheiben werden aber synchron mit Scheibe 2 mit dem gleichen Drehsinn gedreht.

[0083] Die Blende B wird bei einer Neutronenstreuung derart in den Strahlengang eingebracht, dass durch Drehung der Scheiben 1, 2, 3, 4 die Apertur, durch welche die Neutronen fliegen, in ihrer Größe angepasst wird.

[0084] Die vorzugsweise Position ist hierbei die längstmögliche Kollimationsstrecke des Aufbaus, in Neutroneninstrumenten ca. 20 m. Die Linse L ist dabei direkt vor der Probe P angebracht.

[0085] Die Scheiben 1, 2, 3, 4 müssen aus einem Material konstruiert sein, das die massebehafteten Teilchen absorbiert, um als effektive Blende zu funktionieren, zum Beispiel Borkarbid für Neutronen, Metalle/leitende Materialien für Elektronen. Die Krümmung der Kurve des Randes ist in einer Art zu wählen, dass das Öffnungsprofil für jede Wellenlänge optimale Abbildungseigenschaften erreicht werden. Die Abbildungseigenschaften sind im Experiment dann optimal, wenn die Abbildung eines Punktes in Größe eines Detektorpixels bei der Abbildung auf dem Detektor die Größe dieses Pixels nicht überschreitet. So kann gleichzeitig eine maximale Intensität bei bestmöglicher Auflösung erreicht werden. Die Höhe und Breite der Detektorpixel lag bei früher in Neutronenstreuexperimenten verwendeten Detektoren im Bereich einiger Zentimeter. Mittlerweile werden typischerweise Detektoren verwendet, bei denen Höhe und Breite der Detektorpixel im Bereich einiger Millimeter liegt. Dies führt zu einer höheren Anforderung an die Auflösung der abbildenden Verfahren.

[0086] In Neutronenstreuexperimenten mit der Untersuchung von Interferenzmustern kommt eine zusätzliche Überlegung hinzu: Kleine Wellenlängen (schnelle Teilchen) werden zu großen Winkeln abgebildet und umgekehrt. Da Linsen hauptsächlich zu einer Verbesserung der Auflösung bei kleinen Winkeln verwendet werden, kann hier die Blende bei schnellen Teilchen vollständig geöffnet sein und wird dann zugefahren. Da die meisten Neutronenquellen eine Maxwellverteilung mit einem Maximum des Neutronenflusses bei 2-5 Å Wellenlänge haben, kann so der hohe Fluss bei diesen Wellenlängen ausgenutzt werden. Bei den größeren Wellenlängen, die auf kleinere Winkel abgebildet werden, wird die Blende dann zugefahren, um die für kleine Winkel optimalen Abbildungseigenschaften zu erreichen. Ab Erreichen einer gewissen Wellenlänge wird zum einen der Fluss so niedrig und die Auflösung wird nur unwesentlich verbessert, dass eine minimale Öffnung vorteilhaft ist.

[0087] Notwendige Voraussetzung zum sinnvollen Einsatz des Blendensystems bzw. Linsensystems ist entweder eine gepulste Quelle oder ein T0-Chopper, so dass für jeden Zyklus der Blende ein Teilchenpaket optimal zugeschnitten wird. Die gleichen Überlegungen wie für Neutronen können bei Streuung unter der Verwendung aller massenbehafteten Teilchen, zum Beispiel Elektronen, angewandt werden. Dies betrifft insbesondere Systeme, in denen Pulse von Teilchen erzeugt und für abbildende Verfahren verwendet werden.

[0088] In Figur 2 ist eine erfindungsgemäße Vorrichtung zur Korrektur der chromatischen Aberration für Neutronenstreuexperimente dargestellt, bei dem der Einsatz des Blendensystems einen Vorteil bringt. Dabei wird die Blende B 20 m vor der Probe P angeordnet und die Linse L direkt vor der Probe P. Der Linsendurchmesser L entspricht etwa dem Probendurchmesser P. Der Detektor D kann je nach Auflösung optimal positioniert werden. Die optimale Position des Detektors wird dabei von der gewünschten Winkelabdeckung durch die Streuwinkel bestimmt.

[0089] Von links nach rechts sind entlang der Strahlachse ein dünner und ein breiter Kollimator mit Choppern C bei 11,5, 14,5 und 21,5 m, die Position der Probe P und die Detektorröhre D zu sehen. Ein dünner Kollimator K_1 mit einer Länge von 8 m ist vor dem ersten Chopper C positioniert, während der breite Kollimator K_2 mit einer Länge von 12 m dahinter folgt.

[0090] Der gesamte Abstand zwischen Detektor D und Probe P beträgt 20 m. Um die Auflösung zu verbessern kann das Blendensystem B 20 m vor der Probe angeordnet werden, die Linse L befindet sich dann direkt vor der Probe P und der Detektor D im Detektortank rechts.

[0091] Die Frequenz, mit der die Neutronenpulse in der Neutronenquelle erzeugt werden, liegt in diesem Ausführungsbeispiel bei 14 Hz. Die Zeitdauer, mit der die einzelnen Pulse in der Neutronenquelle erzeugt werden, liegt hier bei 2,8 Millisekunden. Die Zeitdauer, mit der die Neutronenpulse durch die Blendenöffnung treten, liegt bei etwa dem Kehrwert der Frequenz von 14 Hz bei etwa 72 Millisekunden. In diesem Zeitintervall wird die Blende B von der größten

Blendenöffnung ausgehend auf die minimalen Blendenöffnung verkleinert und anschließend wieder auf die maximale Blendenöffnung vergrößert. Die Höhe und Breite der Pixel liegt in dieser Ausführung bei jeweils 3 mm. Die Größe der Probe liegt hier bei $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$. Die Chopper begrenzen die Wellenlängen der Neutronenstrahlung, welcher zu der Probe gelangt, typischerweise auf einen Bereich von 2 Å bis 15 Å . Das Zeitintervall zwischen der Erzeugung des Neutronenpulses und dem Schließen der Blendenöffnung liegt hier typischerweise bei 2 - 3 Millisekunden. Dieses Zeitintervall wird festgelegt durch die Zeit, die die schnellsten Neutronen brauchen, um von der Neutronenquelle zur Blende zu gelangen.

[0092] Eine Simulation, die die Verbesserung durch die Blende zeigt, ist in Figur 3 zu sehen. Dabei wird die Verbesserung der Auflösung durch das Blendensystem durch eine Simulation von drei Delta Peaks je logarithmischer Dekade bei SKADI gezeigt. Bei einer sinnvollen Wahl der Öffnung als Funktion der Flugzeit der Neutronen lässt sich die Auflösung deutlich verbessern (Datenkurve 32 gegen Datenkurve 31). Die Simulation wurde für die gleiche Anzahl von Neutronen für alle Instrumenteneinstellungen durchgeführt.

[0093] Es wird die normierte Intensität der gestreuten Strahlung von Neutronen als Funktion des Betrags des Streuvektors q gezeigt, welcher logarithmisch aufgetragen ist. Jeder Delta Peak bzw. jede Umgebung eines Maximums einer der dargestellten Datenkurven wäre bei idealer Auflösung unendlich scharf bzw. schmal. An der Verbreiterung der Peaks lässt sich die Auflösung erkennen, je schmaler der Peak ist, desto besser ist die Auflösung. Gezeigt sind hier drei Delta Peaks pro logarithmischer Dekade.

[0094] Die Blende ist maximal offen für kleine Wellenlängen mit $\lambda\ 7,5\text{ Å}$ bzw. große Beträge des Streuvektors q und wird dann mit wachsenden Werten der Wellenlängen bzw. kleineren Beträgen des Streuvektors q weiter geschlossen.

[0095] Die Zahl der Neutronen betrug in den Simulationsrechnungen $10^9/(s\text{ cm}^2)$.

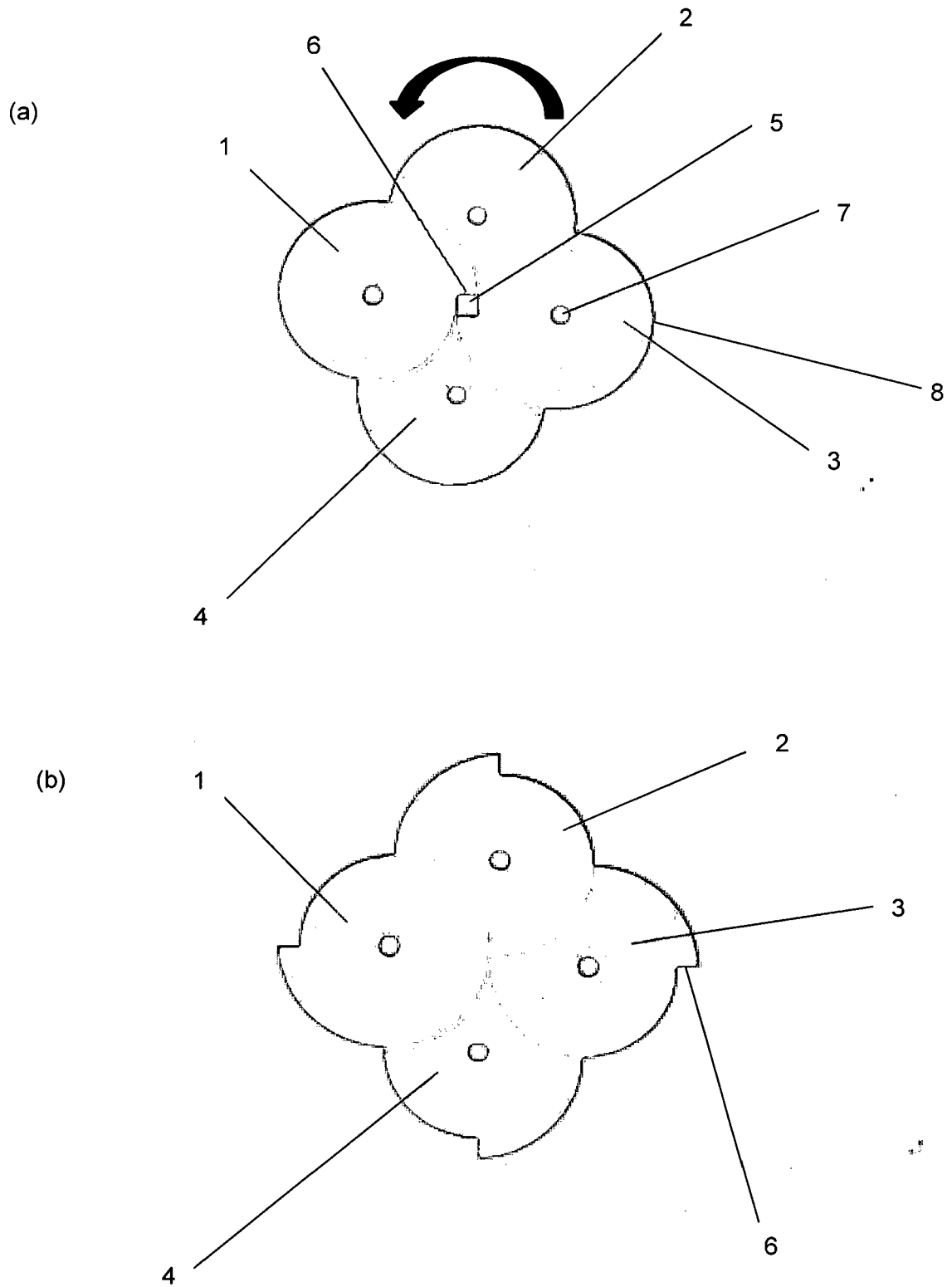
[0096] Die Datenkurve 31 zeigt den Fall, dass keine Linse und eine kleine Blendenöffnung von $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ verwendet wird. Die Datenkurve 32 simuliert den Fall, dass eine Linse mit in Abhängigkeit von der Wellenlänge veränderter Blendenöffnung verwendet wird. Die Schmalheit bzw. "Schärfe" der Peaks, und damit die Auflösung, ist deutlich stärker ausgeprägt als bei der Datenkurve 31, insbesondere bei Werten $q < 0,01\text{ Å}^{-1}$.

Patentansprüche

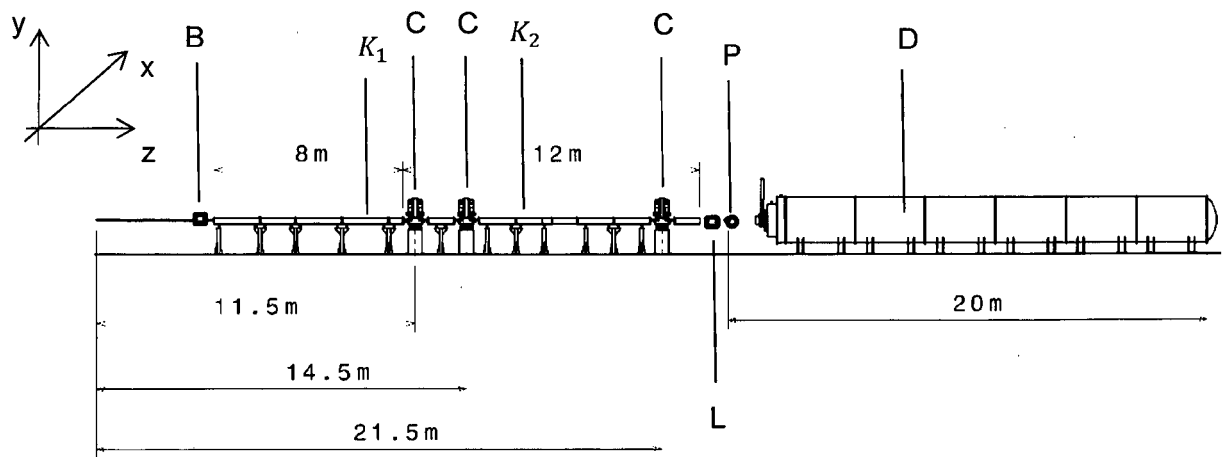
1. Vorrichtung zur Korrektur des Längsfehlers der chromatischen Aberration von Strahlung massebehafteter Teilchen, umfassend mindestens eine Linse (L), mindestens einen Detektor (D) und mindestens eine Blende (B) mit einer Blendenöffnung (5), welche in der Größe in Abhängigkeit von der Wellenlänge der durch diese Blendenöffnung hindurchtretenden Strahlung veränderbar ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Blende (B) durch 1, 2, 3 oder mehr, vorzugsweise 4, Scheiben oder durch eine Irisblende gebildet wird.
3. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Scheiben (1, 2, 3, 4) jeweils einen Rand (8) umfassen, welcher die Form einer Spirale entlang einer Windung aufweist, wobei eine geradlinige Kante (6) zwischen dem Randpunkt des maximalen und minimalen Abstandes vom Mittelpunkt (7) der jeweiligen Scheibe verläuft.
4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei der die Scheiben (1, 2, 3, 4) ein neutronenabsorbierendes Material, insbesondere Borkarbid, umfassen.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Vorrichtung mindestens einen Kollimator umfasst.
6. Verfahren zur Korrektur des Längsfehlers der chromatischen Aberration von Strahlung massebehafteter Teilchen mit einer Vorrichtung, umfassend mindestens eine Linse (L), mindestens einen Detektor (D) und mindestens eine Blende (B), wobei die Blendenöffnung in Abhängigkeit von der Wellenlänge der massebehafteten Teilchen verändert wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** für den jeweiligen Bereich der Wellenlängen der verwendeten Strahlung die Größe der Blendenöffnung so gewählt wird, dass der Längsfehler der chromatischen Aberration korrigiert wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Größe der Blendenöffnung so gewählt wird, dass die Größe der Abbildung einer Fläche, welche die Größe eines Pixels des Detektors hat, auf der

Detektoroberfläche höchstens gleich dieser Pixelgröße des Detektors ist.

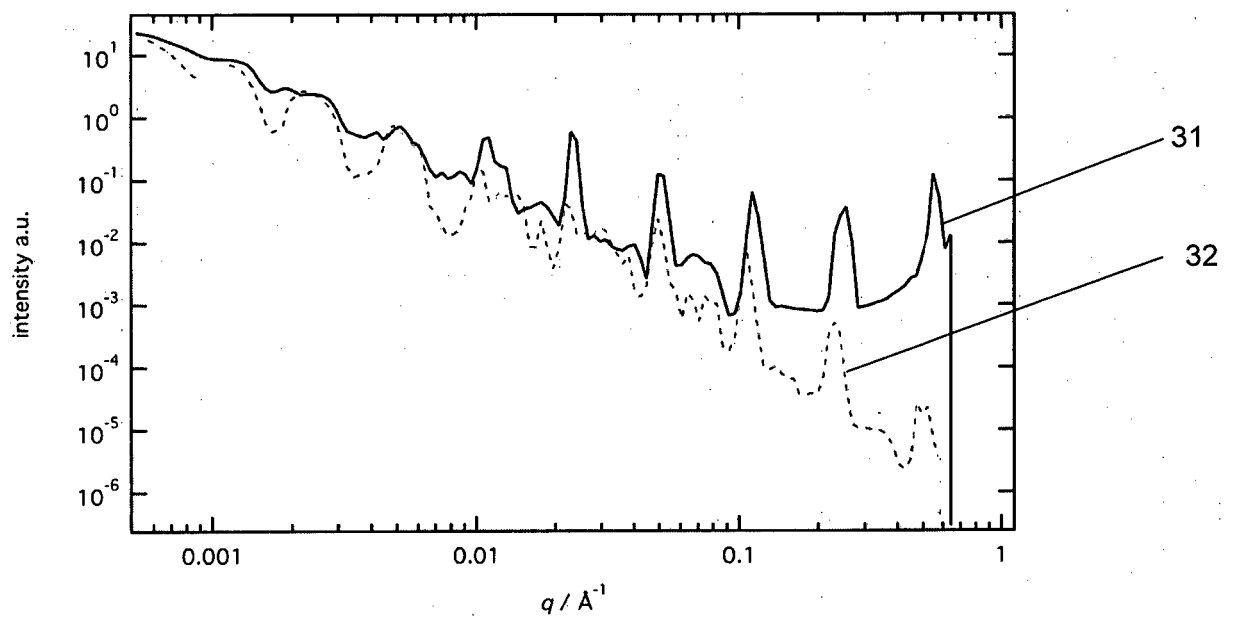
- 5
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Blendenöffnung kontinuierlich oder schrittweise von der größten Öffnung ausgehend verkleinert wird, jedes Mal während ein Puls von Neutronen hindurchtritt.
- 10
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Bereich der Wellenlängen der Strahlung vor dem Hindurchtreten durch die Blendenöffnung und die Linse begrenzt wird, insbesondere durch mindestens einen Chopper und besonders bevorzugt durch mindestens einen T0-Chopper.
- 15
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 10, **gekennzeichnet durch** die Wahl von Neutronen als massebehaftete Teilchen.
- 20
- 25
- 30
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55



Figur 1



Figur 2



Figur 3



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 16 00 1552

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	RADULESCU A ET AL: "KWS-2, the high intensity / wide Q-range small-angle neutron diffractometer for soft-matter and biology at FRM II", JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, BRISTOL, GB, Bd. 351, Nr. 1, 30. März 2012 (2012-03-30), Seite 12026, XP020220196, ISSN: 1742-6596, DOI: 10.1088/1742-6596/351/1/012026	1,5,6	INV. G21K1/04 G21K1/06
A	* Seite 11, letzter Absatz *	2-4,7-11	
A	WO 2005/022581 A2 (SHIMADZU RES LAB EUROPE LTD [GB]; CUBRIC DANE [GB]; KRUIT PIETER [NL]) 10. März 2005 (2005-03-10)	1-11	
A	US 8 884 244 B1 (PURSER KENNETH H [US] ET AL) 11. November 2014 (2014-11-11)	1-11	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			G21K H01J
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 20. Dezember 2016	Prüfer Oestreich, Sebastian
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.92 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 16 00 1552

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

20-12-2016

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
	WO 2005022581	A2	10-03-2005	EP	1661154 A2	31-05-2006
				JP	4523594 B2	11-08-2010
				JP	2007504606 A	01-03-2007
15				US	2007138403 A1	21-06-2007
				WO	2005022581 A2	10-03-2005

	US 8884244	B1	11-11-2014	CN	105765693 A	13-07-2016
				KR	20160074588 A	28-06-2016
20				TW	201519280 A	16-05-2015
				US	8884244 B1	11-11-2014
				WO	2015061101 A1	30-04-2015

25						
30						
35						
40						
45						
50						
55						

EPO FORM P0461

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

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 Patentdokumente

- US 8735844 B [0011]
- US 6765197 B [0012]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **JAKSCH et al.** *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2014, vol. A 762, 22-30 [0007]
- **HAMMOUDA et al.** *J. Appl. Cryst.*, 2013, vol. 46, 1361-1371 [0010]
- **OKU et al.** *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, vol. 600, 100-102 [0013]