



(10) **DE 10 2013 005 173 B4** 2015.06.18

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2013 005 173.8**
(22) Anmeldetag: **25.03.2013**
(43) Offenlegungstag: **09.10.2014**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **18.06.2015**

(51) Int Cl.: **H01J 37/05 (2006.01)**
H01J 37/12 (2006.01)
H01J 37/29 (2006.01)
H01J 49/44 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 55122 Mainz, DE; Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V., 80539 München, DE

(72) Erfinder:
Tusche, Christian, 06114 Halle, DE; Krasnyuk, Alexander, 06114 Halle, DE; Kirschner, Jürgen, 06114 Halle, DE; Schönhense, Gerd, 55130 Mainz, DE

(74) Vertreter:
v. Bezold & Partner Patentanwälte - PartG mbB, 80799 München, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:
siehe Folgeseiten

(54) Bezeichnung: **Messvorrichtung und Verfahren zur Erfassung einer Impulsverteilung geladener Teilchen**

(57) Hauptanspruch: Messvorrichtung (100), die zur Erfassung einer Impulsverteilung eines Ensembles (1) geladener Teilchen eingerichtet ist, umfassend:

- eine elektronenoptische Abbildungseinrichtung (10) mit einer elektronenoptischen Achse (OA), wobei die elektronenoptische Abbildungseinrichtung (10) eine Objektivlinseleinrichtung (11) aufweist, die zur Erzeugung eines Impulsbildes (3) der x- und y-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen senkrecht zur elektronenoptischen Achse (OA) eingerichtet ist,

- einen Energieanalysator, der zur energieaufgelösten Abbildung des Ensembles (1) eingerichtet ist, und

- eine Detektoreinrichtung (30), die zur Aufnahme des Impulsbildes des Ensembles (1) eingerichtet ist, wobei die x- und y-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen durch Koordinaten der Teilchen im Impulsbild erfassbar sind,

dadurch gekennzeichnet, dass

- der Energieanalysator eine Drifteinrichtung (20) umfasst, die angeordnet ist, von den Teilchen des Ensembles (1) mit einer Flugzeit durchlaufen zu werden, die von der z-Komponente der Impulsvektoren der Teilchen parallel zur elektronenoptischen Achse (OA) abhängt,

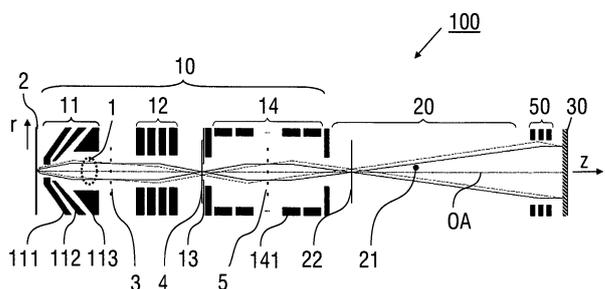
- die Detektoreinrichtung (30) zur zeitaufgelösten Aufnahme des Impulsbildes des Ensembles (1) eingerichtet ist, wobei die z-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen durch die Flugzeit in der Drifteinrichtung (20) erfassbar sind, und

- die elektronenoptische Abbildungseinrichtung (10) des Weiteren umfasst:

- eine erste Teleskopoptik (12), die zur Erzeugung eines ersten Realraumzwischenbildes (4) des Ensembles (1) der Teilchen mit einer räumlich festen Lage eingerichtet ist,

- eine variable und senkrecht zur elektronenoptischen Achse (OA) justierbare erste Blende (13), die zur Definition eines Gesichtsfeldes der Messvorrichtung (100) eingerichtet ist, und

- eine Retardierungsoptik (14), die zur Anpassung der Strahlenergie der Teilchen auf das Potential der Drifteinrichtung (20) eingerichtet ist.



(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE 10 2010 010 981 A1

B. Kromker et al., Development of a momentum microscope for time resolved band structure imaging, Review of Scientific Instruments 79 (2008), 053702-053702

G. Schönhense et al., Time-of-flight photoemission electron microscopy—a new way to chemical surface analysis, Surface science 480 (2001), 180-187

H. Spiecker et al., Time-of-flight photoelectron emission microscopy TOF-PEEM: first results, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 406 (1998), 499-506

M. Kotsugi et al., Microspectroscopic two-dimensional Fermi surface mapping using a photoelectron emission microscope, Review of scientific instruments 74 (2003), 2754-2758

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Messvorrichtung, die zur Erfassung einer Impulsverteilung eines Ensembles geladener Teilchen, z. B. aus einer zu untersuchenden Probe, eingerichtet ist. Die Erfindung betrifft insbesondere ein parallel abbildendes Flugzeit-Mikroskop zur simultanen Erfassung der Impuls- und Energieverteilung des Ensembles geladener Teilchen mit optionaler Spinfilterung. Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zur Erfassung der Impulsverteilung des Ensembles geladener Teilchen. Anwendungen der Erfindung sind insbesondere bei Untersuchungen an Festkörperoberflächen mittels Photoelektronenemission gegeben.

[0002] Der Zustand eines Elektrons ist quantenmechanisch vollständig durch seine Impuls- und Spinfreiheitsgrade definiert, was z. B. in Form der drei kartesischen Komponenten jeweils des polaren Impulsvektors (k_x, k_y, k_z) und des axialen Spinvektors (s_x, s_y, s_z) darstellbar ist. In speziellen Fällen ist nur eine Untermenge dieser sechs Parameter von Null verschieden. Dies gilt z. B. für einen monoenergetischen, unidirektionalen und vollständig polarisierten Elektronenstrahl, bei dem nur zwei Parameter von Null verschieden sind. In Elementarprozessen, wie Elektronenstreuung oder Photoemission, entstehen jedoch allgemein Elektronenensembles, welche eine charakteristische dreidimensionale Impuls- und Spinverteilung aufweisen. Zur vollständigen Charakterisierung solcher Prozesse müssen die drei Komponenten des Impulsvektors gemessen werden, wenn keine spinabhängige Wechselwirkung vorliegt. Bei Vorliegen einer spinabhängigen Wechselwirkung ist zusätzlich der Spinfreiheitsgrad zu bestimmen, welcher in vielen Fällen (z. B. der Photoemission aus ferromagnetischen Proben mit unidirektionaler Spinausrichtung) durch eine Komponente gekennzeichnet ist.

[0003] Es ist allgemein bekannt, die Impulsverteilung eines Ensembles geladener Teilchen, z. B. in der Photoelektronenspektroskopie, mit einem energiedispersiven Spektrometer zu messen. Herkömmliche energiedispersive Spektrometer erfassen Photoelektronen nur in einem beschränkten Winkelbereich über einer Probenoberfläche. Die Messung einer vollen Impulsverteilung, die im Fall der Photoelektronen ein direktes Abbild der elektronischen Bandstruktur im Impulsraum wiedergibt, erfordert daher ein gegenseitiges Verschwenken der Probe und des Spektrometers und eine sequenzielle Messung bei verschiedenen Schwenkpositionen. Die Messung mit herkömmlichen energiedispersiven Spektrometern ist daher eine sehr zeitaufwändige und fehleranfällige Prozedur.

[0004] Eine deutliche Verbesserung wird erreicht, indem eine zweidimensionale Impulsverteilung durch ein abbildendes dispersives Spektrometer **100'** gemäß **Fig. 10** (Stand der Technik) erfasst wird (siehe

B. Krömker et al. in "Rev. Sci. Instrum." Bd. 79, 2008, S. 053702-1 bis 053702-7). Das abbildende Spektrometer **100'** umfasst eine elektronenoptische Abbildungseinrichtung **10'** zur Erzeugung eines Impulsbildes der x- und y-Komponenten (k_x, k_y) der Impulsvektoren der Elektronen senkrecht zur optischen Achse (z-Achse), einen Energieanalysator **20'** zur energieaufgelösten Abbildung der Elektronen und eine Detektoreinrichtung **30'** zur Aufnahme des Impulsbildes der Elektronen eingerichtet ist. Der Energieanalysator **20'** umfasst ein abbildendes Energiefilter in Gestalt eines Halbkugelspektrometers. Das Halbkugelspektrometer ist mit zwei zueinander versetzt angeordneten, halbkugelförmigen Elektroden aufgebaut, die jeweils durch Teilchen ausschließlich mit einer gewählten Energie simultan durchlaufen werden können. Der Energiefilter ermöglicht, dass mit dem Spektrometer **100'** eine laterale Impulsverteilung bei der gewählten Energie simultan erfasst werden kann. Die Messung einer vollen Impulsverteilung erfordert jedoch, dass die laterale Impulsverteilung im interessierenden Energiebereich in kleinen Schritten (d. h. mit kleinen Energie-Inkrementen) sequenziell gemessen wird.

[0005] Somit ist bei allen bisher beschriebenen Spektrometer-Typen eine sequenzielle Erfassung bei verschiedenen Winkeln und/oder bei verschiedenen Energien erforderlich. Mit diesen Methoden ist die Erfassung der gesamten Impulsverteilung von geladenen Teilchen, insbesondere Elektronen, im Halbraum über einer Festkörperprobe sehr zeitaufwändig.

[0006] DE 10 2005 045 622 B4 offenbart eine Anordnung zur Analyse der Elektronen-Spinpolarisation mit einem parallel abbildenden Elektronenmikroskop. Die Anordnung umfasst ein polarisationssensitives Streutarget in einem elektronenoptischen Strahlengang und einen ortsauflösenden Detektor oder eine Anordnung aus mehreren Detektoren zum Nachweis der gestreuten Elektronen. Die herkömmliche Technik ist nicht für parallele energiewahlige Messungen ausgelegt.

[0007] Aus US 6 737 647 B2 ist eine Anordnung zur Abbildung des von einer Probe gepulst emittierten Teilchenensembles auf einem Detektor mit einer Rundlinsenoptik bekannt. Ein Teil der Rundlinsenoptik ist so ansteuerbar, dass die Geschwindigkeit oder Flugbahn der Teilchen beeinflusst wird und chromatische und/oder sphärische Fehler der Abbildung reduziert werden.

[0008] Die herkömmliche Technik ist nicht für parallele Messungen von Teilchenimpulsen ausgelegt.

[0009] In den Publikationen von G. Schönhense et al. („Surface Science“, Bd. 480, 2001, S. 180–187) und H. Spiecker et al. ("Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A", Bd. 406, 1998, S.

499–506) werden Photoelektronen-Emissionsmikroskope beschrieben, die für eine energieaufgelöste Abbildung von Photoelektronen im Ortsraum Flugzeit-Driftstrecken aufweisen. Zur Erzielung einer ausreichenden Ortsauflösung sind die Objektivlinsen der beschriebenen Mikroskope mit Aperturblenden ausgestattet, mit denen die Impulsverteilung der erfassten Teilchen eingeschränkt wird. Eine energieaufgelöste Abbildung von Elektronenensembles im Impulsraum ist mit diesen Mikroskopen nicht möglich.

[0010] Ein weiteres Photoelektronen-Emissionsmikroskop mit Energieauflösung wird von M. Kotzugi et al. („Review of Scientific Instruments“, Band 74, 2003, S. 2754–2758) beschrieben. Aus DE 10 2010 010 981 A1 ist eine elektronenoptische Analyseanordnung zur Analyse der Elektronen-Spinalarisierung von Elektronen bekannt.

[0011] Die Aufgabe der Erfindung ist es, eine verbesserte Messvorrichtung zur Erfassung einer Impulsverteilung eines Ensembles aus geladenen Teilchen bereitzustellen, mit der Nachteile herkömmlicher Techniken vermieden werden. Die Messvorrichtung soll insbesondere die Messung einer vollen Impulsverteilung der Teilchen mit vermindertem Zeitaufwand, verbesserter Energieauflösung und/oder verbesserter Zuverlässigkeit ermöglichen. Die Aufgabe der Erfindung ist es auch, ein verbessertes Verfahren zur Erfassung einer Impulsverteilung eines Ensembles aus geladenen Teilchen bereitzustellen, mit dem Nachteile herkömmlicher Techniken vermieden werden.

[0012] Diese Aufgaben werden durch eine Messvorrichtung bzw. ein Verfahren mit den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen und Anwendungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

[0013] Gemäß einem ersten allgemeinen Gesichtspunkt der Erfindung wird die genannte Aufgabe durch eine Messvorrichtung gelöst, die zur Erfassung einer Impulsverteilung eines Ensembles geladener Teilchen, wie z. B. Elektronen, Ionen oder Positronen, insbesondere aus einer zu untersuchenden Probe, eingerichtet ist und eine elektronenoptische Abbildungseinrichtung, einen Energieanalysator und eine Detektoreinrichtung umfasst. Die elektronenoptische Abbildungseinrichtung weist eine Objektivlinse ein, die zur Erzeugung eines Impulsbildes (reziprokes Bild) der x- und y-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen senkrecht zu einer elektronenoptischen Achse (im Folgenden als optische Achse bezeichnet) der Messvorrichtung, insbesondere der elektronenoptischen Abbildungseinrichtung, eingerichtet ist. Das reziproke Bild ist nicht durch eine Aperturblende begrenzt. Der Energieanalysator ist für eine energieaufgelöste Abbildung des Ensembles der Teilchen konfiguriert. Die Detektor-

einrichtung ist zur Aufnahme des Impulsbildes des Ensembles der Teilchen eingerichtet, wobei die x- und y-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen durch Koordinaten der Teilchen im Impulsbild erfassbar sind.

[0014] Gemäß der Erfindung umfasst der Energieanalysator eine Drifteinrichtung, die angeordnet ist, von den Teilchen des Ensembles mit einer Flugzeit durchlaufen zu werden, die von der Komponente der Impulsvektoren der Teilchen parallel zur optischen Achse (z-Komponente der Impulsvektoren der Teilchen) abhängt. Vorteilhafterweise stellt die Drifteinrichtung im Unterschied zum herkömmlich verwendeten Energieanalysator keinen Energiefilter dar, mit dem Teilchen mit Energien abweichend von einem bestimmten Intervall aus dem Abbildungsstrahlengang ausgelenkt werden. Vielmehr wird eine energieaufgelöste Abbildung erreicht, indem alle Teilchen, die untersucht werden sollen und zum Beispiel an einer Probe generiert werden, in Abhängigkeit von ihrer Energie aufeinanderfolgend die Driftstrecke der Drifteinrichtung durchlaufen und am Ende der Drifteinrichtung eintreffen. Die Beschränkung der herkömmlichen Technik auf die sequenzielle Messung in engen Energieintervallen wird überwunden.

[0015] Des Weiteren ist gemäß der Erfindung die Detektoreinrichtung für eine zeitaufgelöste Aufnahme des Impulsbildes des Ensembles der geladenen Teilchen eingerichtet. Daher ist mit der Detektoreinrichtung die Flugzeit aller Teilchen in der Drifteinrichtung messbar. Die Flugzeit wird aufgrund der Funktion der Drifteinrichtung durch die z-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen bestimmt. Vorteilhafterweise können daher gemeinsam mit den x- und y-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen aus den Koordinaten der Teilchen im Impulsbild alle x-, y- und z-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen mit der Detektoreinrichtung in einem gemeinsamen Messvorgang erfasst werden. Die Messdauer und die Fehleranfälligkeit der Messung, wie sie bei den herkömmlichen sequentiellen Messungen auftreten, werden verringert. Die Energieauflösung der Messung wird gegenüber herkömmlichen Techniken verbessert.

[0016] Gemäß einem zweiten allgemeinen Gesichtspunkt der Erfindung wird die genannte Aufgabe durch ein Verfahren zur Erfassung einer Impulsverteilung eines Ensembles geladener Teilchen, wie z. B. Elektronen, Ionen oder Positronen, gelöst, die an einer untersuchten Probe generiert werden, z. B. aus der Oberfläche der Probe austreten. Vorzugsweise wird das erfindungsgemäße Verfahren mit der Messvorrichtung gemäß dem ersten allgemeinen Gesichtspunkt der Erfindung ausgeführt. Das Verfahren umfasst eine Erzeugung eines Impulsbildes der Teilchen mit einer Objektivlinse einrichtung einer elektronenoptischen Abbildungseinrichtung, wo-

bei das Impulsbild die x- und y-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen in einer reziproken Ebene der Objektivlinseneinrichtung senkrecht zu einer optischen Achse der elektronenoptischen Abbildungseinrichtung umfasst. Des Weiteren umfasst das Verfahren eine energieaufgelöste Abbildung des Ensembles mit einer Drifteinrichtung, die von den Teilchen des Ensembles mit einer Flugzeit durchlaufen wird, die von der z-Komponente der Impulsvektoren der Teilchen parallel zur optischen Achse abhängt.

[0017] Des Weiteren umfasst das Verfahren eine zeitaufgelöste Aufnahme des Impulsbildes des Ensembles mit einer Detektoreinrichtung, wobei die x- und y-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen durch Koordinaten der Teilchen im Impulsbild und die z-Komponenten der Impulsvektoren der geladenen Teilchen in Abhängigkeit von der Flugzeit in der Drifteinrichtung erfasst werden. Vorzugsweise ist die Lage der reziproken Ebene der Objektivlinseneinrichtung achromatisch, so dass sich diese Ebene bei geänderter Teilchenenergie räumlich nicht verschiebt.

[0018] Die erfindungsgemäße Messvorrichtung, im Folgenden auch als "Flugzeit-Impulsmikroskop" bezeichnet, und das erfindungsgemäße Verfahren vermeiden den mit der herkömmlichen sequenziellen Erfassung verbundenen Verlust an Nachweiseffizienz dadurch, dass alle drei kartesischen Komponenten des Impulsvektors simultan mit hoher Präzision erfasst werden. Dabei werden für jedes nachgewiesene Teilchen zwei Impulskomponenten (k_x , k_y) durch die elektronenoptische Abbildungseinrichtung, insbesondere eine abbildende elektronenoptische Säule, die wie in einem Elektronenmikroskop aufgebaut sein kann, dargestellt. Dies entspricht der vergrößerten Abbildung der reziproken Bildebene. Die dritte Impulskomponente (k_z) wird mit der Messung der Flugzeit des geladenen Teilchens durch die in die Säule integrierte niederenergetische Driftstrecke der Drifteinrichtung erfasst. Damit lassen sich z. B. bei der Untersuchung von Elektronen im interessierenden Energieintervall mit einer Breite von mehreren Elektronenvolt alle drei Impulskomponenten jedes einzelnen emittierten geladenen Teilchens ohne Verluste im Halbraum über einer Festkörperprobe nachweisen.

[0019] Ein wesentlicher Vorteil des Flugzeit-Impulsmikroskops ist, dass im Gegensatz zur konventionellen hochauflösenden Elektronenmikroskopie keine Aperturblende in der reziproken Bildebene (cross-over) der Objektivlinseneinrichtung platziert ist, da gerade die Teilchenverteilung in dieser reziproken Ebene abgebildet wird. Im Gegensatz zu konventionellen Flugzeitspektrometern können das k-parallele Gesichtsfeld immer konstant, der Skalierungsfaktor konstant und die k-Auflösung konstant sein. Bei hinreichend kleiner Startenergie der Teilchen ist der Akzeptanzwinkelbereich unbegrenzt. Insbeson-

dere kann auch bei hohen Startenergien immer ein konstantes Gesichtsfeld von etwa ein bis zwei Brillouin-Zonen typischer Einkristalloberflächen im Impulsraum abgebildet werden. Dies ist besonders bei einer Anwendung zur hochenergetischen Photoelektronenspektroskopie (HAXPES) vorteilhaft. Für die Anwendung der Impulsabbildung wird dabei generell die sphärische Aberration minimiert, um ein möglichst großes Gesichtsfeld im Impulsraum gleichzeitig abzubilden.

[0020] Vorteilhafterweise kann die energieselektive Messung bei festen Einstellungen erfolgen, d. h. ohne geometrische Variation des Beobachtungswinkels und ohne Durchfahren von Spannungen. Das Verfahren erfordert eine Zeitstruktur (Zeitmuster), die bei der Erzeugung und/oder während der Abbildung der geladenen Teilchen dem Teilchenensemble aufgeprägt wird. Die Zeitstruktur des dem Teilchenensemble wird z. B. bei der Untersuchung von Festkörperoberflächen durch eine Zeitstruktur der anregenden Strahlung bereitgestellt. Vorteilhafterweise ist diese Zeitstruktur sowohl bei niederenergetischen Laserquellen als auch bei Synchrotronstrahlungsquellen zur Anregung von Photoelektronen an Festkörperoberflächen verfügbar.

[0021] Ein weiterer Vorteil der Erfindung ist, dass bei Verwendung einer angepassten Elektronenoptik mit ausschließlich elektrostatischen Elementen das Flugzeit-Impulsmikroskop grundsätzlich zur Analyse der Impulsverteilung aller Arten von geladenen Teilchen, insbesondere von Elektronen, Ionen oder Positronen, geeignet ist.

[0022] Der Gewinn an Messeffizienz lässt sich aus verfügbaren Größen abschätzen. Mit der Flugzeittechnik lässt sich ohne großen Aufwand eine Energieauflösung von 10 meV erreichen, siehe z. B. P. S. Kirchmann et al. in "Appl. Phys. A." Bd. 91, 2008, S. 211–217. Elektronenoptische Simulationen ergeben, dass ohne Aberrationskorrektur ein Energieintervall von etwa 10% der Driftenergie simultan nutzbar ist. Für eine angenommene Driftenergie von 30 eV ergibt sich ein zulässiges Intervall von ca. 3 eV. Bei einer detektorseitigen Zeitauflösung von 200 ps und einer Driftstrecke der Drifteinrichtung von 800 mm folgt daraus eine Energieauflösung von 30 meV, siehe z. B. A. Oelsner et al. in "Rev. Sci. Instrum." Bd. 72, Nr. 10, 2001, S. 3968. Somit sind ca. 100 Energieintervalle simultan erfassbar.

[0023] Ein großer praktischer Vorteil der erfindungsgemäßen Messvorrichtung ist ihre Baugröße. Während z. B. ein herkömmliches abbildendes dispersives Elektronenspektrometer ein Volumen von mehr als 1 m³ einnimmt, ist die erfindungsgemäße Messvorrichtung in Form einer linearen Säule mit Durchmesser von 150 mm und einer Länge im Bereich von 1 m realisierbar.

[0024] Ein besonderer Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens ist, dass Prozesse untersucht werden können, bei denen zwei Elektronen mit unterschiedlicher Energie gleichzeitig entstehen, welche in Koinzidenz nachgewiesen werden können, auch wenn ihre Energie und Richtung des Impulsvektors unterschiedlich sind. Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit, die Strahlenbelastung der untersuchten Probe um Größenordnungen zu reduzieren. Ferner ist das Verfahren besonders gut geeignet, um ultraschnelle dynamische Prozesse zu untersuchen. Beispielsweise lässt sich ein schnelles Anregungssignal (Photonen- oder Feldpuls) mit dem Abtastsignal über eine variable Zeitverzögerung synchronisieren, um so genannte „Pump-Probe Experimente“ durchzuführen. Zur Steigerung der Auflösung ist zusätzlich eine konventionelle Aberrationskorrektur (Spiegel, Multi-pol) oder eine dynamische Aberrationskorrektur möglich.

[0025] Gemäß der Erfindung umfasst die elektronenoptische Abbildungseinrichtung eine erste Teleskopoptik, die zur Erzeugung eines ersten Realraum-Zwischenbildes (erstes Gauß'sches Zwischenbild) des Ensembles der Teilchen mit einer räumlich festen Lage eingerichtet ist, eine variable und senkrecht zur optischen Achse justierbare erste Blende (Bildblende, Aperturblende), die zur Definition eines Gesichtsfeldes der Messeinrichtung eingerichtet ist, und eine Retardierungsoptik, die zur Anpassung der Strahlenergie der Teilchen auf das Potential der Drifteinrichtung eingerichtet ist.

[0026] Mit der ersten Teleskopoptik wird vorteilhafterweise das erste Zwischenbild in einer raumfesten Ebene erzeugt, wobei durch die justierbare erste Blende eine Definition von Position und Größe des zur Abbildung gelangenden Probenbereiches ermöglicht wird. Mit der justierbaren ersten Blende kann ferner zur Steigerung der Impulsauflösung die Größe des Quellvolumens auf der Probe in dem ersten Zwischenbild entlang der optischen Achse begrenzt und definiert werden.

[0027] Vorteilhafterweise kann das Ensemble mit der Retardierungsoptik abgebremst und bezüglich seiner Bildvergrößerung und Impulsbild-Skalierung an die Drifteinrichtung angepasst werden. Die Retardierungsoptik ist eingerichtet, die Einschussbedingungen in die Flugzeitstrecke in Energie und Winkeldivergenz anzupassen. Die Anpassung umfasst insbesondere eine Bereitstellung eines Impulszwischenbildes des Ensembles am Anfang der Drifteinrichtung und eine gemeinsame z-Komponenten-Impulsverschiebung aller Teilchen für eine Anpassung an das Potential in der Drifteinrichtung.

[0028] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist eine zweite Teleskopoptik vorgesehen, mit der ein teleskopischer Strahlen-

gang von der Drifteinrichtung zur Detektoreinrichtung bereitgestellt wird. Die zweite Teleskopoptik ermöglicht vorteilhafterweise eine Fokussierung eines weiteren Impulszwischenbildes des Ensembles auf die Detektoreinrichtung, so dass die zeitaufgelöste Aufnahme des Impulsbildes des Ensembles verbessert werden kann.

[0029] Vorzugsweise weist die Objektivlinseneinrichtung eine Extraktorelektrode auf, die zur Erzeugung eines Extraktorfeldes relativ zu der Probe angeordnet ist und entlang der optischen Achse eine Dicke von mindestens dem halben Durchmesser der Elektrodenapertur (Bohrungsdurchmesser) besitzt, wobei innerhalb der Extraktorelektrode entlang der optischen Achse ein Abschnitt mit einer im Vergleich zum Extraktorfeld verringerten Feldstärke gebildet ist. Vorteilhafterweise wird mit der genannten Dicke der Extraktorelektrode erreicht, dass ein unerwünschter Felddurchgriff von den strahlabwärts folgenden Elektroden vermieden wird und die Teilchen im Extraktorfeld die gewünschte Beschleunigungsenergie, z. B. 20 keV, zur Aberrationsminimierung und zur Minimierung der Bildfeldkrümmung erreichen.

[0030] Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst die Extraktorelektrode mehrere Extraktorelektroden-Segmente, die um die optische Achse in azimuthaler Richtung verteilt angeordnet sind. Die Extraktorelektroden-Segmente bieten die Möglichkeit, ein nicht-rotationssymmetrisches Extraktorfeld zu erzeugen und eine Strahlkorrektur zu erzeugen. Die Strahlkorrektur ist insbesondere von Vorteil, wenn die optische Achse nicht senkrecht zu der Oberfläche der untersuchten Probe ausgerichtet, sondern die Oberfläche relativ zur optischen Achse verkippt ist. Wenn ein Manipulator zur Probenverkipfung fehlt oder nur einen beschränkten Arbeitsbereich hat, können die Extraktorelektroden-Segmente mit unterschiedlichen Spannungen beaufschlagt werden, um die Strahlkorrektur zu erzielen. Die Qualität der Strahlkorrektur wächst mit der Zahl der Extraktorelektroden-Segmente. In der Praxis hat es sich als vorteilhaft erwiesen, wenn die Extraktorelektrode mindestens vier, insbesondere mindestens acht Extraktorelektroden-Segmente umfasst.

[0031] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung umfasst die Retardierungsoptik mindestens fünf, entlang der optischen Achse angeordnete Retardierungsoptik-Segmente, mit denen eingangs- und ausgangsseitige Brennweiten der Retardierungsoptik unabhängig voneinander einstellbar sind. Hierzu kann in Abhängigkeit von den Spannungen der Retardierungsoptik-Segmente der Ort der elektrostatischen Linsenwirkung innerhalb der Retardierungsoptik verschoben werden. Vorteilhafterweise ermöglichen die Retardierungsoptik-Segmente die Anpassung der Strahlenergie der Teilchen auf das

Potential der Drifteinrichtung unabhängig von dem Potential der strahlaufwärts vorgeschalteten Elektroden.

[0032] Vorteilhafterweise bietet die Erfindung die Möglichkeit, eine spinabhängige Abbildung des Ensembles der geladenen Teilchen durchzuführen. Die Messvorrichtung kann gemäß einer Variante der Erfindung mit einer verstellbaren Spinfiltereinrichtung ausgestattet sein. Die Spinfiltereinrichtung ist vorzugsweise unmittelbar vor der niederenergetischen Driftstrecke angeordnet. Durch die Spinfilterung kann zusätzlich zu den Impulsbestandteilen der Teilchen eine Komponente des Spinpolarisationsvektors bestimmt werden. Dabei ist von besonderem Vorteil, dass durch die Flugzeit in der Drifteinrichtung gleichzeitig der Wert der energieabhängigen Asymmetriefunktion $S(E)$ der Teilchen genau bekannt ist, was die Datenauswertung erheblich erleichtert. Der Gewinn an Messeffizienz ist bei dem erfindungsgemäßen Verfahren mit der Spinfiltereinrichtung besonders groß, da bei herkömmlichen Techniken typischerweise ein einkanaliger Spindetektor verwendet wird. Demgegenüber wurde bereits nachgewiesen, dass mit einem abbildenden Spinfilter 3800 Punkte einer lateralen Elektronenverteilung gleichzeitig darstellbar sind, siehe z. B. C. Tusche et al. in "Appl. Phys. Lett." Bd. 99, 2011, S. 032505.

[0033] Vorzugsweise ist die Spinfiltereinrichtung für eine Spinfilterung konfiguriert, wie in DE 10 2005 045 622 B4 beschrieben ist. Daher umfasst die Spinfiltereinrichtung gemäß einer bevorzugten Variante der Erfindung einen Spinfilterkristall, der relativ zur optischen Achse der Messvorrichtung drehbar ist. Vorzugsweise ist der Spinfilterkristall zwischen der elektronenoptischen Abbildungseinrichtung und der Drifteinrichtung, besonders bevorzugt unmittelbar vor der Drifteinrichtung, angeordnet. Alternativ oder zusätzlich ist die Spinfiltereinrichtung vorzugsweise so angeordnet, dass sich eine reelle oder reziproke Bildebene der elektronenoptischen Abbildungseinrichtung auf dem Spinfilterkristall der Spinfiltereinrichtung befindet.

[0034] Besonders bevorzugt ist die Drehbarkeit um mindestens einen von drei Freiheitsgraden vorgesehen, die eine Drehung zur Einstellung eines Polarwinkels θ relativ zur strahlaufwärts gelegenen optischen Achse (Einfallswinkel auf dem Spinfilterkristall), eine Drehung um einen Azimutalwinkel Φ um die Oberflächennormale des Spinfilterkristalls und eine Drehung um einen Kristallorientierungswinkel α der Orientierung um die strahlaufwärts gelegene optische Achse umfassen. Der Polarwinkel θ kann insbesondere 45° betragen, so dass sich eine 90° -Reflexion am Spinfilterkristall ergibt.

[0035] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung kann zwischen der Spinfiltereinrichtung

und der Drifteinrichtung eine Anpassungs-Linsengruppe derart angeordnet sein, dass die Streuenergie der Spinfiltereinrichtung und die kinetische Energie der Teilchen in der Drifteinrichtung unabhängig voneinander einstellbar sind.

[0036] Wenn gemäß einer weiteren vorteilhaften Variante der Erfindung in der Drifteinrichtung eine zweite Blende angeordnet ist, können diffus gestreute Teilchen vorteilhafterweise aufgefangen werden. Die zweite Blende ist z. B. eine Bildblende am Ort eines Zwischenbildes in der Driftstrecke, die der Eliminierung von Sekundärelektronen dient, falls diese beim Beugungsprozess im Spinfilterkristall entstehen und zu einem inelastischen Untergrund in den Beugungsbildern führen können.

[0037] Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst die Messvorrichtung eine Choppereinrichtung, mit der ein Ensemble der geladenen Teilchen entsprechend einer vorbestimmten Zeitstruktur (Zeitfunktion des Teilchenstroms) modulierbar ist, um die zeitaufgelöste Aufnahme des Impulsbildes auch im Falle eines zeitlich kontinuierlichen Ensembles zu ermöglichen. Mit der Choppereinrichtung werden Teile des kontinuierlichen Teilchenstrahls vor Eintritt in die Driftstrecke so ausgeblendet, dass eine Messung der Flugzeit der passierenden Teilchen möglich ist. Die Choppereinrichtung ermöglicht vorteilhafterweise die Anwendung der Erfindung selbst bei der Erzeugung eines kontinuierlichen Ensembles geladener Teilchen, z. B. wenn die geladenen Teilchen aufgrund eines Prozesses ohne Zeitstruktur von der Probe emittiert werden und insbesondere die Quelle zur Anregung der von der Probe ausgehenden geladenen Teilchen keine inhärente Zeitstruktur aufweist. Die Choppereinrichtung und die Detektoreinrichtung werden synchronisiert, um die zeitaufgelöste Aufnahme des Impulsbildes des Ensembles der geladenen Teilchen in Abhängigkeit von der mit der Choppereinrichtung eingeführten Zeitstruktur bereitzustellen.

[0038] Vorzugsweise umfasst die Choppereinrichtung eine Aperturblende und eine Ablenkoptik, die in der Retardierungsoptik oder zwischen der Retardierungsoptik und der Drifteinrichtung angeordnet sind. Die Ablenkoptik ist für eine hochfrequente Anregung eines elektrischen Ablenkkfeldes eingerichtet, mit dem z. B. ein kontinuierliches Ensemble geladener Teilchen entsprechend der vorbestimmten Zeitstruktur modulierbar ist. Vorteilhafterweise sind verschiedene Varianten von Ablenkoptiken möglich, die z. B. eine Multipolanordnung, und/oder zwei antisymmetrische Ablenker und Linsengruppen auf beiden Seiten der Aperturblende umfassen, und/oder in die Retardierungsoptik der elektronenoptischen Abbildungseinrichtung integriert oder an deren Ausgang angeordnet sind. Insbesondere die Multipolanordnung kann Vorteile bei der Reduzierung von Abbildungsfehlern

haben. Die Aperturblende ist vorzugsweise die o. g. zweite Blende.

[0039] Im Folgenden sind weitere Vorteile der Erfindung zusammengefasst. Es wird ein Verfahren zur verlustfreien Darstellung der vollen Impulsverteilung eines Teilchenensembles, insbesondere Elektronenensembles, auf einem ortsauflösenden (displayartigen) 2D-Detektor geschaffen, bei dem die x- und y-Komponenten des Impulsvektors eines nachgewiesenen Teilchens durch die Koordinate seines Auftreffpunktes auf dem Detektor und die z-Komponente durch seine Flugzeit in einer niederenergetischen Driftstrecke im elektronenoptischen Linsensystem gemessen wird. Es wird insbesondere ermöglicht, die Energie des Teilchens durch seine Flugzeit in der niederenergetischen Driftstrecke zu messen. Der Teilchenstrahl kann über mehrere Stufen abgebremst und bezüglich seiner Bildvergrößerung und Impulsbild-Skalierung angepasst werden. Zur Steigerung der Impulsauflösung kann die Größe des Quellvolumens auf der untersuchten Probe durch die variable und lateral justierbare erste Blende in einem Gauß'schen Bild in der elektronenoptischen Säule begrenzt und definiert werden.

[0040] Weitere Einzelheiten und Vorteile der Erfindung werden aus der folgenden Beschreibung der beigefügten Zeichnungen ersichtlich. Es zeigen:

[0041] Fig. 1: eine schematische Querschnittsansicht einer ersten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Messvorrichtung;

[0042] Fig. 2: schematische Querschnittsansichten verschiedener Varianten einer Objektivlinseneinrichtung der erfindungsgemäßen Messvorrichtung;

[0043] Fig. 3 und Fig. 4: schematische Querschnittsansichten weiterer Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Messvorrichtung mit einer Spinfiltierung;

[0044] Fig. 5 bis Fig. 8: weitere Varianten der erfindungsgemäßen Messvorrichtung mit einer Spinfiltierung;

[0045] Fig. 9: schematische Querschnittsansicht weiterer Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Messvorrichtung mit einer Choppereinrichtung; und

[0046] Fig. 10: eine schematische Illustration eines herkömmlichen abbildenden Spektrometers.

[0047] Bei der folgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen der Erfindung wird beispielhaft auf eine Messvorrichtung zur Detektion von Elektronen Bezug genommen, die von einer Oberfläche einer zu untersuchenden Probe emittiert werden. Es wird betont, dass die Umsetzung der Erfindung nicht

auf dieses Beispiel beschränkt ist, sondern auch bei der Messung anderer geladener Teilchen möglich ist. Es werden die Teile der Messvorrichtung und Schritte des Verfahrens insbesondere in Bezug auf die Messung der Impulskomponenten der geladenen Teilchen beschrieben. Die Messvorrichtung, insbesondere die Elektroden und die mit diesen erzeugten Felder, können vom Fachmann unter Verwendung an sich bekannter Simulations- und Designtechniken, z. B. aus der Elektronenmikroskopie, gestaltet werden, um die Funktion der erfindungsgemäßen Messvorrichtung bereitzustellen.

[0048] Fig. 1 zeigt eine erste Ausführungsform der erfindungsgemäßen Messvorrichtung **100** in Gestalt eines Flugzeit-Impuls-Mikroskops auf der Basis einer linearen elektronenoptischen Säule mit mehreren Linsengruppen und einer niederenergetischen Driftstrecke vor dem Bilddetektor. Bei dieser Ausführungsform der Messvorrichtung **100** ist kein Spinfilter vorgesehen.

[0049] Die Messvorrichtung **100** umfasst eine elektronenoptische Abbildungseinrichtung **10** mit einer optischen Achse OA, die sich in z-Richtung erstreckt. Die elektronenoptische Abbildungseinrichtung **10** umfasst eine Objektivlinseneinrichtung **11**, eine erste Teleskopoptik **12**, eine variable erste Blende **13** mit einer senkrecht zur optischen Achse OA justierbaren Blendenöffnung, und eine Retardierungsoptik **14** mit mehreren, entlang der optischen Achse OA angeordneten Retardierungsoptik-Segmenten **141**. Die Objektivlinseneinrichtung **11** ist mit drei Elektroden aufgebaut, die eine Extraktorelektrode **111**, eine Fokuselektrode **112** und eine elektronenoptische Säule **113** umfassen. Weitere Einzelheiten der Objektivlinseneinrichtung **11** werden unten mit Bezug auf Fig. 2 beschrieben.

[0050] Des Weiteren umfasst die Messvorrichtung **100** eine Drifteinrichtung **20** mit einer Driftstrecke **21** entlang der optischen Achse OA. Die Länge der Driftstrecke **21** beträgt z. B. 80 cm. Die Drifteinrichtung **20** kann einen Abschnitt der optischen Achse OA umfassen, der durch keine Elektrode begrenzt wird, oder sie kann die Gestalt einer hohlzylinderförmigen Elektrode aufweisen, in deren feldfreiem Innenraum die Driftstrecke **21** gebildet ist. Die Drifteinrichtung **20** arbeitet als Energieanalysator, da sie von geladenen Teilchen mit einer energieabhängigen Flugzeit durchlaufen wird, ohne die Teilchenposition in einer Ebene senkrecht zur optischen Achse OA zu verändern, und daher eine energieaufgelöste Abbildung der Teilchen strahlabwärts von der Driftstrecke **21** ermöglicht.

[0051] Zur zeitaufgelösten Aufnahme eines Impulsbildes eines Ensembles **1** (in Fig. 1 gepunktet markiert) geladener Teilchen weist die Messvorrichtung **100** eine in der optischen Achse A angeordnete zweite Teleskopoptik **50** und eine Detektoreinrichtung **30**

auf. Die Detektoreinrichtung **30**, die z. B. einen Multichannelplate-Detektor oder einen Halbleiter-Bilddetektor umfasst, ist für eine Bildaufnahme mit einer charakteristischen Zeitauflösung von z. B. 150 ps eingerichtet, siehe A. Oelsner et al. in "Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena" Bd. 137–140, 2004, S. 757–761.

[0052] Bei einem Verfahren zur Erfassung einer Impulsverteilung eines Ensembles **1** von Photoelektronen aus einer untersuchten Probe **2** werden die aus der Probe **2** ausgelösten Photoelektronen in einem mit der Extraktorelektrode **111** erzeugten Extraktorfeld auf eine Energie von z. B. 20 keV beschleunigt. Die Dicke der Extraktorelektrode **111** entlang der optischen Achse OA beträgt z. B. 2 mm, während der Bohrungsdurchmesser in der Extraktorelektrode **111** z. B. 4 mm beträgt. Anschließend werden die Photoelektronen durch die Fokuselektrode **112** so in die elektronenoptische Säule **113** abgebildet, dass sich in einer ersten reziproken Ebene **3** ein hochaufgelöstes Bild der lateralen Impulsverteilung der ausgelösten Photoelektronen (erstes Impulsbild) ergibt. Im Impulsbild repräsentieren Koordinaten der Teilchen in radialer Richtung (siehe Pfeil r) die x - und y -Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen. Die Lage der reziproken Ebene **3** (Beugungsebene) ist achromatisch, d. h. die erste reziproke Ebene **3** verschiebt sich bei Variation der Elektronenenergie räumlich nicht. Mit der ersten Teleskopoptik **12** wird in einer ersten Zwischenbildebene **4** ein Gauß'sches Bild erzeugt, dessen Größe und Position durch Variation der ersten Blende **13** (Bildfeldblende) ausgewählt werden kann. Im Inneren der Retardierungsoptik **14** befindet sich ein zweites Impulsbild **5**. Mit der Retardierungsoptik **14** wird ein zweites Zwischenbild in einer zweiten Zwischenbildebene **22** am Beginn der Driftstrecke **21** der Drifteinrichtung **20** erzeugt und die Energie des Strahls auf die gewünschte Driftenergie angepasst.

[0053] In der Driftstrecke **21** der Drifteinrichtung **20** wird der Elektronenstrahl bezüglich seiner kinetischen Energie dispergiert, so dass am Ende der Driftstrecke **21** eine Flugzeitverteilung der Elektronen gemäß der kinetischen Energien gebildet ist. Mit der zweiten Teleskopoptik **50** wird ein teleskopischer Strahlengang erzeugt, so dass ein drittes Impulsbild (Bild der Impulsverteilung) auf die Detektoreinrichtung **30** fokussiert wird. Mit der Detektoreinrichtung **30** wird das Impulsbild des Ensembles **1** der Photoelektronen zeitaufgelöst aufgenommen, wobei die z -Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen parallel zur optischen Achse OA durch die Flugzeit in der Drifteinrichtung **20** erfasst werden.

[0054] Die Fig. 2A bis Fig. 2D zeigen schematische Skizzen mehrerer Varianten von Objektivlinseneinrichtungen **11** auf der Basis von planaren Elektroden (Fig. 2A), konisch geformten Elektroden

(Fig. 2B) oder hinterdrehten Elektroden zur Erhöhung der Feldstärke und Reduktion der Brennweite (Fig. 2C). In allen Fällen nimmt der Durchmesser der drei Elektroden **111** bis **113** strahlabwärts schrittweise zu. Die Variante gemäß Fig. 2B hat Vorteile bei einer Messgeometrie, bei der ein Anregungsstrahl **7** schräg auf die Oberfläche der Probe **2** einfällt. Bei der Variante gemäß Fig. 2C ist die Extraktorelektrode **111** so hinterdreht, dass sich im Bereich hinter der Extraktorelektrode **111** eine möglichst hohe Feldstärke ergibt. Dies hat vorteilhafterweise eine Steigerung der Impulsauflösung zur Folge. Die Gestaltung von Elektronenlinsen mit minimierten Aberrationen wird z. B. von M. Szilagyí et al. in "Appl. Phys. Lett." Bd. 49, No. 13, 1986, S. 767; M. Szilagyí et al. "J. Vac. Sci. Technol." Bd. A 5 (2), 1987, S. 273; oder M. Szilagyí et al. in "J. Vac. Sci. Technol." Bd. B 6 (3), 1988, S. 953 beschrieben.

[0055] Fig. 2D illustriert in schematischer Draufsicht entlang der optischen Achse eine Objektivlinseneinrichtung **11** gemäß einem axial-symmetrischen Typ, z. B. aus den Fig. 2A bis Fig. 2C, wobei eine oder mehrere der Elektroden **111** bis **113**, insbesondere die Extraktorelektrode **111**, durch eine nicht-rotationssymmetrische Multipol-Anordnung ersetzt sind. In der Variante gemäß Fig. 2D sind somit anstelle von Rundlinsen Multipolelemente, die mit variablen Potenzialen u_1 bis u_N beaufschlagt werden, in die Objektivlinseneinrichtung **11** integriert. Diese Ausführungsform ermöglicht eine Korrektur der Strahlage bereits in der Objektivlinseneinrichtung **11**. Dies ist vorteilhaft, um Abbildungsfehler zu reduzieren, die durch eine Fehljustage der reziproken Ebene **3** des ersten Impulsbildes (siehe Fig. 1), welches nicht durch eine Aperturblende begrenzt wird, in den darauf folgenden Linsengruppen hervorgerufen werden könnten.

[0056] Die Fig. 3 und Fig. 4 zeigen schematische Darstellungen der erfindungsgemäßen Messvorrichtung **100** zur Flugzeit-Impulsmikroskopie mit einer integrierten abbildenden Spinfiltereinrichtung **40**. Die Messvorrichtung **100** ist mit den Komponenten **10**, **20**, **30** und **50** aufgebaut, wie oben unter Bezug auf die Fig. 1 und Fig. 2 beschrieben wurde. Gemäß Fig. 3 enthält die Spinfiltereinrichtung **40** einen Spinfilterkristall **41**, dessen Kristalloberfläche für eine spinabhängige Reflexion mit einer Ablenkung um 90° ausgerichtet ist, während Fig. 4 den allgemeinen Fall einer Streuung um einen frei wählbaren Polarwinkel θ zeigt. Bei den in den Fig. 3 und Fig. 4 gezeigten Ausführungsformen liegt auf oder in der Nähe des Spinfilterkristalls **41** ein Zwischenbild und auf der Detektoreinrichtung **30** ein Impulsbild (reziprokes Bild). Die Energie der Photoelektronen in der Driftstrecke **21** der Drifteinrichtung **20** ist identisch mit der Streuenergie am Spinfilterkristall **41**.

[0057] Die Spinfiltereinrichtung **40** umfasst den Spinfilterkristall **41** und eine Stelleinrichtung (nicht

dargestellt), mit welcher der Spinfilterkristall **41** in Bezug auf alle drei Raumrichtungen drehbar und verschiebbar ist. Der Spinfilterkristall **41** ist in oder in der Nähe der Ebene des zweiten Zwischenbildes (siehe Bezugszeichen **22** in **Fig. 1**) positioniert und kann mit der Stelleinrichtung bezüglich Position und Winkelkoordinaten justiert werden. Wahlweise kann der Spinfilterkristall **41** mit der Stelleinrichtung aus dem Strahlengang herausgefahren werden, um ein nicht-spinfiltertes Bild in Geradeausrichtung (gemäß **Fig. 1**) durchzulassen.

[0058] Die folgenden Drehungen des Spinfilterkristalls **41** sind einzeln oder in Kombination vorgesehen. Eine erste Drehung des Spinfilterkristalls **41** um eine von drei Raumachsen ist die Drehung zur Einstellung des Polarwinkels θ relativ zur optischen Achse OA der strahlaufrwärts angeordneten Elektroden. Der Polarwinkel θ bezeichnet den Winkel zwischen der z-Richtung vor und der z'-Richtung nach dem Spinfilterkristall **41**. Gemäß **Fig. 3** beträgt der Polarwinkel θ 45° , so dass die gezeigte 90° -Reflexion am Spinfilterkristall **41** resultiert.

[0059] Des Weiteren ist eine Drehung um eine Oberflächennormale des Spinfilterkristalls **41** möglich. Diese Drehung bestimmt den Azimutalwinkel Φ . Bei Variation des Azimutalwinkels Φ wird die Streubedingung der Niederenergie-Elektronenbeugung so geändert, dass sich die Spinasymmetrie in großem Maße variieren lässt. Diese Abhängigkeiten von Intensität und Spinasymmetrie vom Azimutalwinkel Φ (auch Rotationsdiagramme genannt) werden z. B. von J. Kirscher and R. Feder in "Phys. Rev. Lett." Bd. 42, Nr. 15, 1979, S. 1008, beschrieben.

[0060] Eine weitere Drehung, die den Kristallorientierungswinkel α definiert, kann um die strahlaufrwärts gelegene optische Achse OA (z-Richtung) erfolgen. Bei Variation des Kristallorientierungswinkels α lässt sich die Quantisierungsrichtung der Spinanalyse des Spinpolarisationsvektors P verändern. Der Spinpolarisationsvektor P steht immer senkrecht auf der Streuebene. Durch eine Änderung des Kristallorientierungswinkels α von 0° auf 90° lassen sich somit beide transversalen Spinpolarisationskomponenten des einfallenden Elektronenstrahls analysieren. Durch Änderung des Kristallorientierungswinkels α von 0° auf 180° (und analog von 90° auf 270°) lässt sich darüber hinaus die Spinasymmetrie umkehren. Auf diese Weise lassen sich vorteilhafterweise apparative Asymmetrien bei der spinabhängigen Beugung eliminieren.

[0061] Die **Fig. 5** und **Fig. 6** zeigen weitere Varianten der erfindungsgemäßen Messvorrichtung **100** zur Flugzeit-Impulsmikroskopie mit den Komponenten **10**, **20**, **30** und **50** und der integrierten abbildenden Spinfiltereinrichtung **40**. Zusätzlich ist eine Anpassungs-Linsengruppe **60** zwischen der Spinfilter-

einrichtung **40** und der Drifteinrichtung **20** angeordnet. Die Anpassungs-Linsengruppe **60** ermöglicht eine unabhängige Variation der Streuenergie am Spinfilterkristall **41** und der kinetischen Energie (Driftenergie) bei Eintritt in die niederenergetische Driftstrecke **21** der Drifteinrichtung **20**. Die Anpassungs-Linsengruppe **60** bildet eine asymmetrische Einzellinse (Immersionslinse), die unmittelbar hinter dem Spinfilterkristall **41** in den Strahlengang eingefügt ist.

[0062] Wahlweise kann die Impulsverteilung (**Fig. 6**) oder die Bildebene (**Fig. 5**) in die Ebene des Spinfilterkristalls **41** gelegt werden. So ist in dem in **Fig. 5** gezeigten Fall eine zweite reziproke Ebene **5** mit dem zweiten Impulsbild wie bei der Ausführungsform der **Fig. 1** in der Retardierungsoptik **14** positioniert. Die Anpassungs-Linsengruppe **60** ist nur schwach erregt und dient der Anpassung der Strahlenergie der Teilchen von der Streuenergie auf die Driftenergie. Beide Energien liegen typischerweise im Bereich von 20–80 eV. In dem in **Fig. 6** gezeigten Fall wurde das zweite Impulsbild aus dem Inneren der Retardierungsoptik **14** auf den Spinfilterkristall **41** verschoben. In diesem Fall ist die Anpassungs-Linsengruppe **60** stärker erregt, so dass hinter dieser die zweite Zwischenbildebene **22** mit dem zweiten Zwischenbild liegt.

[0063] Auf die Detektoreinrichtung **30** wird in beiden Fällen der **Fig. 5** und **Fig. 6** ein Impulsbild fokussiert. Eine zweite Blende **23** am Ort der zweiten Zwischenbildebene **22** dient der Eliminierung von Sekundärelektronen, welche beim Beugungsprozess im Spinfilterkristall **41** entstehen und zu einem inelastischen Untergrund in den Beugungsbildern führen können (aus Übersichtlichkeitsgründen sind die zweite Blende **23** und die zweite Zwischenbildebene **22** nebeneinander gezeigt).

[0064] Gemäß **Fig. 6** ist zusätzlich beispielhaft illustriert, dass unmittelbar vor der Drifteinrichtung **20** eine elektronenoptische Choppereinrichtung **70** in den Strahlengang eingefügt sein kann. Da die zweite Blende **23** den Elektronenstrahl nur auf der optischen Achse passieren lässt, wird mit dieser Anordnung eine Zeitstruktur des abgebildeten Elektronenstrahls erzeugt. Die Funktion der Choppereinrichtung **70** wird unten unter Bezug auf die **Fig. 9A** bis **Fig. 9D** mit weiteren Einzelheiten beschrieben.

[0065] Die **Fig. 7** und **Fig. 8** zeigen weitere Varianten der erfindungsgemäßen Messvorrichtung **100** mit den Komponenten **10**, **20**, **30** und **40**, wobei ein reelles Ortsbild auf dem Bilddetektor der Detektoreinrichtung **30** abgebildet wird. So zeigt **Fig. 7** die Betriebsart, bei der auf dem Bilddetektor der Detektoreinrichtung **30** anstelle des Impulsbildes ein Realraumbild (Gauß'sches Bild) fokussiert wird. Diese Betriebsart ist vorteilhaft, um den analysierten Probenbereich im Realraum festzulegen. Für diese Betriebsart kann die erste Blende **13** geöffnet werden, so dass ein aus-

gedehntes Bildfeld zur Festlegung des zu analysierenden Bereiches abgebildet wird. Der gewünschte Bildbereich kann dann mittels der Lateraljustierung der Probe **2** in radialer Richtung (r-Richtung) zentriert werden und anschließend durch Hineinfahren einer kleinen ersten Blende **13** ausgewählt werden. Auf dem Spinfilterkristall **41** kann entweder ein Impulsbild (Fig. 7) oder ein Zwischenbild liegen (Fig. 8).

[0066] Alternativ lässt sich die Abbildung eines realen Bildes auf dem Bilddetektor der Detektoreinrichtung **30** durch eine geänderte Erregung der elektronenoptischen Abbildungseinrichtung **10** und der Retardierungsoptik **14** erreichen, indem in die Ebene der ersten Blende **13** ein Impulsbild fokussiert wird.

[0067] Bei der Erzeugung der geladenen Teilchen mit einer Anregungsquelle ohne Zeitstruktur wird ein kontinuierliches Ensemble der geladener Teilchen erzeugt. Auch in diesem Fall kann ein gepulster Betrieb erreicht werden, indem an einer geeigneten Position innerhalb der Messvorrichtung **100** eine Choppereinrichtung **70** mit einer Ablenkoptik (Zerhacker, elektrostatischer Chopper) eingefügt ist. In den Fig. 9A bis Fig. 9D sind Varianten der Erfindung illustriert, bei denen mit der Choppereinrichtung **70** ein Ensemble geladener Teilchen entsprechend einer vorbestimmten Zeitfunktion moduliert wird. Der Strom der geladenen Teilchen wird zeitabhängig moduliert. Die Verarbeitung des zeitaufgelösten Impulsbildes des Ensembles geladener Teilchen erfolgt unter Berücksichtigung der Zeitfunktion, so dass im Ergebnis die z-Komponenten der Impulse wie im Fall eines inhärent pulsförmigen Ensembles geladener Teilchen ermittelt werden können.

[0068] Die Choppereinrichtung **70** umfasst z. B. zwei parallele Platten oder ein Multipolelement, welche von einem elektrischen Pulsgenerator oder von einer Hochfrequenz-Spannungsquelle (nicht dargestellt) angesteuert werden. Die Anregungsfrequenz der Choppereinrichtung **70** wird in Abhängigkeit vom gewünschten Zeitabstand der mit der Detektoreinrichtung **30** aufzunehmenden pulsförmigen Impulsbilder gewählt. Beispielsweise führt eine Frequenz von 10 MHz zu einem Abstand der einzelnen Pulse von 100 ns. Die Amplitude der Hochfrequenz und die Lochgröße der zweiten Blende **23** (siehe unten) können so aufeinander abgestimmt werden, dass sich Pulse von 1 ns Länge ergeben. Dies entspricht einem Tastverhältnis von 1:100, d. h. die Intensität wird im Vergleich zum Betrieb ohne Zeitstruktur um 2 Größenordnungen reduziert. Für gängige Laborquellen ohne Zeitstruktur, z. B. intensive Edelgasentladungslampen, ist dieser Verlust tolerierbar, da insgesamt die erfindungsgemäße Methode durch die parallele Winkel- und Energieerfassung einen Effizienzgewinn von 6 Größenordnungen ermöglicht.

[0069] Die Choppereinrichtung **70** kann wahlweise in der Nähe des Gauß'schen Bildes am Anfang der Driftstrecke der Drifteinrichtung **20** (Fig. 9A) oder in der Nähe der zweiten reziproken Bildebene im Inneren (Fig. 9B) oder hinter der Retardierungsoptik **14** (Fig. 9C) angeordnet sein. Zur Eliminierung von Aberrationen durch die Strahlableitung durch die Choppereinrichtung **70** kann eine antisymmetrische Tandemanordnung mit zwei Chopperelementen ausgenutzt werden (Fig. 9D). Wenn die Choppereinrichtung **70** in die Retardierungsoptik **14** (Fig. 9B) integriert ist, kann die Strahlableitung durch die Choppereinrichtung **70** in der zweiten reziproken Ebene **5** des zweiten Impulsbildes erfolgen.

[0070] Zur unabhängigen Wahl der Energie des Elektronenstrahls im Bereich der Choppereinrichtung **70** und in der niederenergetischen Driftstrecke **21** der Drifteinrichtung **20** lässt sich eine Adaptions-Linsengruppe **60** verwenden, wie in den Fig. 9C und Fig. 9D gezeigt ist. Gemäß Fig. 9C ist die Choppereinrichtung **70** am Ausgang der Retardierungsoptik **14** angeordnet, wobei zur Vermeidung von Abbildungsfehlern die zweite reziproke Ebene **5** so verschoben wird, dass sie am Ort der Choppereinrichtung **70** liegt und ein Gauß'sches Zwischenbild an der zweiten Blende **23** mit Hilfe der Adaptions-Linsengruppe **60** erzeugt wird.

[0071] Bei Nutzung eines Signals mit z. B. 10 MHz Repetitionsrate und 1 ns Pulslänge lässt sich die Energie und Länge der Driftstrecke so anpassen, dass das Intervall von 100 ns zwischen den aufeinander folgenden Pulsen für die Flugzeitdispersion voll ausgenutzt wird. Durch Wahl einer Biasspannung an der Probe **2** und die Wahl der Betriebsspannungen der elektronenoptischen Abbildungseinrichtung **10** und der Retardierungsoptik **14** lässt sich erreichen, dass Elektronen mit Energien unterhalb einer Mindestenergie effektiv unterdrückt werden. Dies ist vorteilhaft, wenn vermieden werden soll, dass besonders niederenergetische Elektronen mit Flugzeiten > 100 ns durch die Driftstrecke hindurchtreten können. Solche Elektronen würden zu einem Untergrund im Messsignal führen, da sie nicht mehr eindeutig mit der Zeitstruktur der Quelle korreliert werden können.

[0072] Bei der Tandemanordnung gemäß Fig. 9D umfasst die Choppereinrichtung **70** zwei antisymmetrische Ablenkoptiken **71**, **72**, die zur Reduzierung von Abbildungsfehlern mit Linsengruppen **73**, **74** auf beiden Seiten der zweiten Blende **23** zusammenwirken, wobei in der Mitte beider Ablenkoptiken **71**, **72** jeweils eine zweite und dritte reziproke Ebene **5**, **6** liegt.

[0073] Die in der vorstehenden Beschreibung, den Zeichnungen und den Ansprüchen offenbarten Merkmale der Erfindung können sowohl einzeln als auch

in Kombination für die Verwirklichung der Erfindung in ihren verschiedenen Ausgestaltungen von Bedeutung sein.

Bezugszeichenliste

100, 100'	Messvorrichtung
1	Ensemble geladener Teilchen
2	Probe
3	erste reziproke Ebene
4	erste Zwischenbildebene
5	zweite reziproke Ebene
6	dritte reziproke Ebene
7	Anregungsstrahl
10, 10'	elektronenoptische Abbildungseinrichtung
11	Objektivlinseneinrichtung
111	Extraktorelektrode
112	Fokuselektrode
113	elektronenoptische Säule
12	erste Teleskopoptik
13	erste Blende
14	Retardierungsoptik
141	Retardierungsoptik-Segmenten
20,	Drifteinrichtung
20'	Energieanalysator
21	Driftstrecke
22	zweite Zwischenbildebene
23	zweite Blende
30, 30'	Detektoreinrichtung
40	Spinfiltereinrichtung
41	Spinfilterkristall
50	zweite Teleskopoptik
60	Anpassungs-Linsengruppe
70	Choppereinrichtung
71, 72	Ablenkoptiken
73, 74	Linsengruppen
OA, OA'	optische Achsen
θ	Polarwinkel
Φ	Azimutalwinkel
α	Kristallorientierungswinkel
P	Spinpolarisationsvektor
$u_1, u_2 \dots u_N$	Potenziale der Elektroden
r, r'	Radialkoordinaten
z, z'	Axialkoordinaten

Patentansprüche

1. Messvorrichtung (**100**), die zur Erfassung einer Impulsverteilung eines Ensembles (**1**) geladener Teilchen eingerichtet ist, umfassend:

– eine elektronenoptische Abbildungseinrichtung (**10**) mit einer elektronenoptischen Achse (OA), wobei die elektronenoptische Abbildungseinrichtung (**10**) eine Objektivlinseneinrichtung (**11**) aufweist, die zur Erzeugung eines Impulsbildes (**3**) der x- und y-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen senkrecht zur elektronenoptischen Achse (OA) eingerichtet ist,

– einen Energieanalysator, der zur energieaufgelösten Abbildung des Ensembles (**1**) eingerichtet ist, und

– eine Detektoreinrichtung (**30**), die zur Aufnahme des Impulsbildes des Ensembles (**1**) eingerichtet ist, wobei die x- und y-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen durch Koordinaten der Teilchen im Impulsbild erfassbar sind,

dadurch gekennzeichnet, dass

– der Energieanalysator eine Drifteinrichtung (**20**) umfasst, die angeordnet ist, von den Teilchen des Ensembles (**1**) mit einer Flugzeit durchlaufen zu werden, die von der z-Komponente der Impulsvektoren der Teilchen parallel zur elektronenoptischen Achse (OA) abhängt,

– die Detektoreinrichtung (**30**) zur zeitaufgelösten Aufnahme des Impulsbildes des Ensembles (**1**) eingerichtet ist, wobei die z-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen durch die Flugzeit in der Drifteinrichtung (**20**) erfassbar sind, und

– die elektronenoptische Abbildungseinrichtung (**10**) des Weiteren umfasst:

– eine erste Teleskopoptik (**12**), die zur Erzeugung eines ersten Realraumzwischenbildes (**4**) des Ensembles (**1**) der Teilchen mit einer räumlich festen Lage eingerichtet ist,

– eine variable und senkrecht zur elektronenoptischen Achse (OA) justierbare erste Blende (**13**), die zur Definition eines Gesichtsfeldes der Messvorrichtung (**100**) eingerichtet ist, und

– eine Retardierungsoptik (**14**), die zur Anpassung der Strahlenergie der Teilchen auf das Potential der Drifteinrichtung (**20**) eingerichtet ist.

2. Messvorrichtung gemäß Anspruch 1, die umfasst

– eine zweite Teleskopoptik (**50**), die zur Erzeugung eines teleskopischen Strahlengangs von der Drifteinrichtung (**20**) zur Detektoreinrichtung (**30**) eingerichtet ist.

3. Messvorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der

– die Objektivlinseneinrichtung (**11**) eine Extraktorelektrode (**111**) aufweist, die zur Erzeugung eines Extraktorfeldes angeordnet ist und eine Dicke von mindestens dem halben Bohrungsdurchmesser aufweist.

4. Messvorrichtung gemäß Anspruch 3, bei der

– die Extraktorelektrode (**111**) mehrere Extraktorelektroden-Segmente (u_1, \dots, u_N) umfasst, die um die elektronenoptische Achse (OA) in azimutaler Richtung verteilt angeordnet sind.

5. Messvorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der

– die Retardierungsoptik (**14**) mindestens fünf, entlang der elektronenoptischen Achse (OA) angeordnete Retardierungsoptik-Segmente (**141**) aufweist, mit denen eingangs- und ausgangsseitige Brennwei-

ten der Retardierungsoptik (14) unabhängig voneinander einstellbar sind.

6. Messvorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, die umfasst

- eine abbildende, verstellbare Spinfiltereinrichtung (40), die zur spinabhängigen Abbildung des Ensembles (1) eingerichtet ist.

7. Messvorrichtung gemäß Anspruch 6, bei der die Spinfiltereinrichtung (40)

- einen Spinfiler-Kristall (41) umfasst, der relativ zur elektronenoptischen Achse (OA) drehbar ist,
- zwischen der elektronenoptischen Abbildungseinrichtung (10) und der Drifteinrichtung (20), insbesondere unmittelbar vor der Drifteinrichtung (20), angeordnet ist, und/oder
- so angeordnet ist, dass eine reelle oder reziproke Bildebene der elektronenoptischen Abbildungseinrichtung (10) auf der Spinfiltereinrichtung (40) liegt.

8. Messvorrichtung gemäß einem der Ansprüche 6 oder 7, bei der

- zwischen der Spinfiltereinrichtung (40) und der Drifteinrichtung (20) eine Anpassungs-Linsengruppe (60) so angeordnet ist, dass die Streuenergie der Spinfiltereinrichtung (40) und die kinetische Energie der Teilchen in der Drifteinrichtung (20) unabhängig voneinander einstellbar sind.

9. Messvorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der

- in der Drifteinrichtung (20) eine Blende (22) angeordnet ist, mit der diffus gestreute Teilchen aufgefangen werden können.

10. Messvorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, die umfasst

- eine Choppereinrichtung (70), mit der ein kontinuierliches Ensemble (1) entsprechend einer vorbestimmten Zeitstruktur modulierbar ist, um die zeitaufgelöste Aufnahme des Impulsbildes des Ensembles (1) zu ermöglichen.

11. Messvorrichtung gemäß Anspruch 10, bei der

- die Choppereinrichtung (70) eine Aperturblende (23) und eine Ablenkoptik (71–72) umfasst, die in der elektronenoptischen Abbildungseinrichtung (10) oder zwischen der elektronenoptischen Abbildungseinrichtung (10) und der Drifteinrichtung (20) so angeordnet sind, dass durch eine hochfrequente Anregung der Ablenkoptik (71–72) ein kontinuierliches Ensemble (1) entsprechend der vorbestimmten Zeitstruktur modulierbar ist.

12. Messvorrichtung gemäß Anspruch 11, bei welcher die Ablenkoptik (71–72)

- eine Multipolanordnung umfasst,
- zwei antisymmetrische Ablenker (71, 72) und Linsengruppen (73, 74) auf beiden Seiten der Apertur-

blende (23) umfasst, wobei die antisymmetrischen Ablenker (71, 72) zur Eliminierung von Aberrationen durch die Strahlablenkung in den Linsengruppen (73, 74) der Choppereinrichtung (70) eingerichtet sind, und/oder

- in die Retardierungsoptik (14) integriert oder an deren Ausgang angeordnet ist.

13. Verfahren zur Erfassung einer Impulsverteilung eines Ensembles (1) geladener Teilchen aus einer untersuchten Probe (2), mit den Schritten:

- Erzeugung eines Impulsbildes (3) der Teilchen mit einer Objektivlinseneinrichtung (11) einer elektronenoptischen Abbildungseinrichtung (10), wobei das Impulsbild (3) in einer reziproken Ebene der Objektivlinseneinrichtung (11) die x- und y-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen senkrecht zu einer elektronenoptischen Achse (OA) der elektronenoptischen Abbildungseinrichtung (10) umfasst,
- energieaufgelöste Abbildung des Ensembles (1) mit einem Energieanalysator,
- Aufnahme des Impulsbildes des Ensembles (1) mit einer Detektoreinrichtung (30), wobei die x- und y-Komponenten der Impulsvektoren der Teilchen durch Koordinaten der Teilchen im Impulsbild erfasst werden,

dadurch gekennzeichnet, dass

- der Energieanalysator eine Drifteinrichtung (20) umfasst, die von den Teilchen des Ensembles (1) mit einer Flugzeit durchlaufen wird, die von der z-Komponente der Impulsvektoren der Teilchen parallel zur elektronenoptischen Achse (OA) abhängt, und
- das Impulsbild des Ensembles (1) mit der Detektoreinrichtung (30) mit Zeitauflösung aufgenommen wird, wobei die z-Komponenten der Impulsvektoren der geladenen Teilchen durch die Flugzeit in der Drifteinrichtung (20) erfasst werden.

14. Verfahren gemäß Anspruch 13, bei dem

- das Ensemble (1) mit einer Retardierungsoptik (14) abgebremst und bezüglich seiner Bildvergrößerung und Impulsbild-Skalierung angepasst wird.

15. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 13 bis 14, bei dem

- zur Steigerung der Impulsauflösung die Größe des Quellvolumens auf der Probe (2) durch eine variable und senkrecht zur elektronenoptischen Achse (OA) justierbare Blende (13) in einem Gauß'schen Zwischenbild entlang der optischen Achse (OA) begrenzt und definiert wird.

16. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 13 bis 15, mit dem Schritt

- spinabhängige Abbildung des Ensembles (1) mit einer abbildenden, verstellbaren Spinfiltereinrichtung (40).

17. Verfahren gemäß Anspruch 16, bei dem

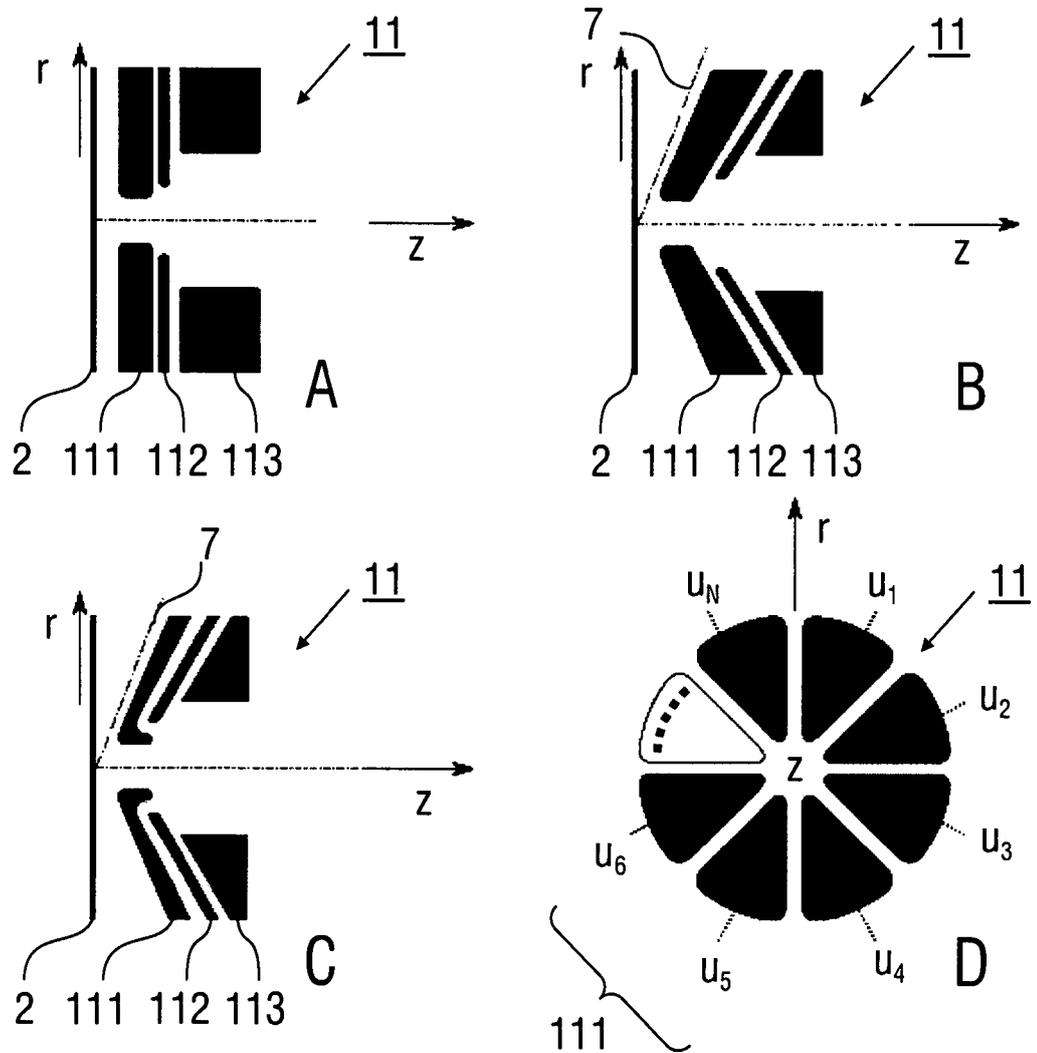
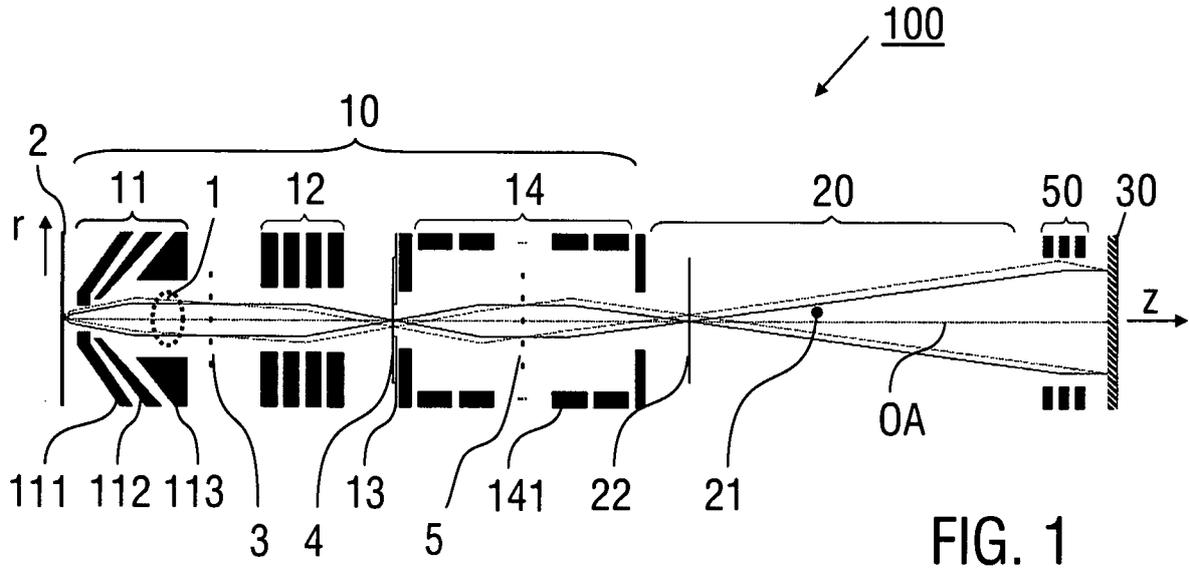
– durch Variation eines Kristallorientierungswinkels α (Rotation um den einfallenden Strahl) die Quantisierungsrichtung der Spinfilterung verändert wird und/oder durch Variation eines Azimutalwinkels Φ (Rotation um die Oberflächennormale des Spinfilterkristalls) der Kontrast der Spinfilterung verändert wird.

18. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 13 bis 17, mit den Schritten

- Modulation eines kontinuierlichen Ensembles (**1**) entsprechend einer vorbestimmten Zeitstruktur mit einer Choppereinrichtung (**70**), und
- zeitaufgelöste Aufnahme des Impulsbildes des Ensembles (**1**) nach Durchlaufen der Drifteinrichtung (**20**).

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



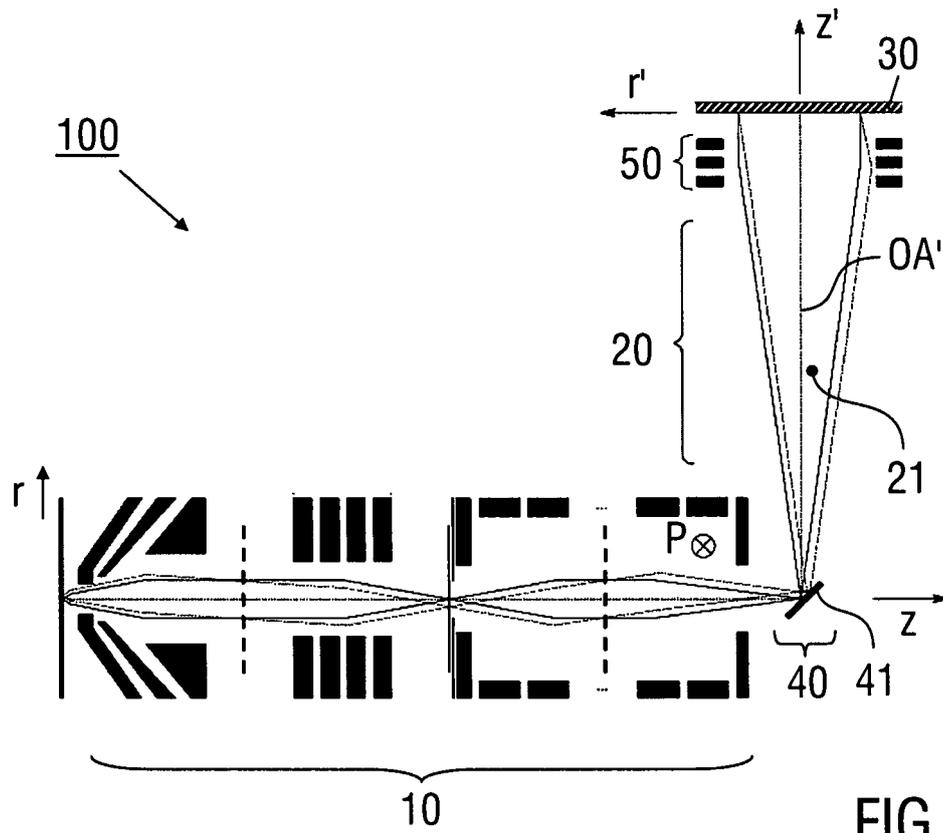


FIG. 3

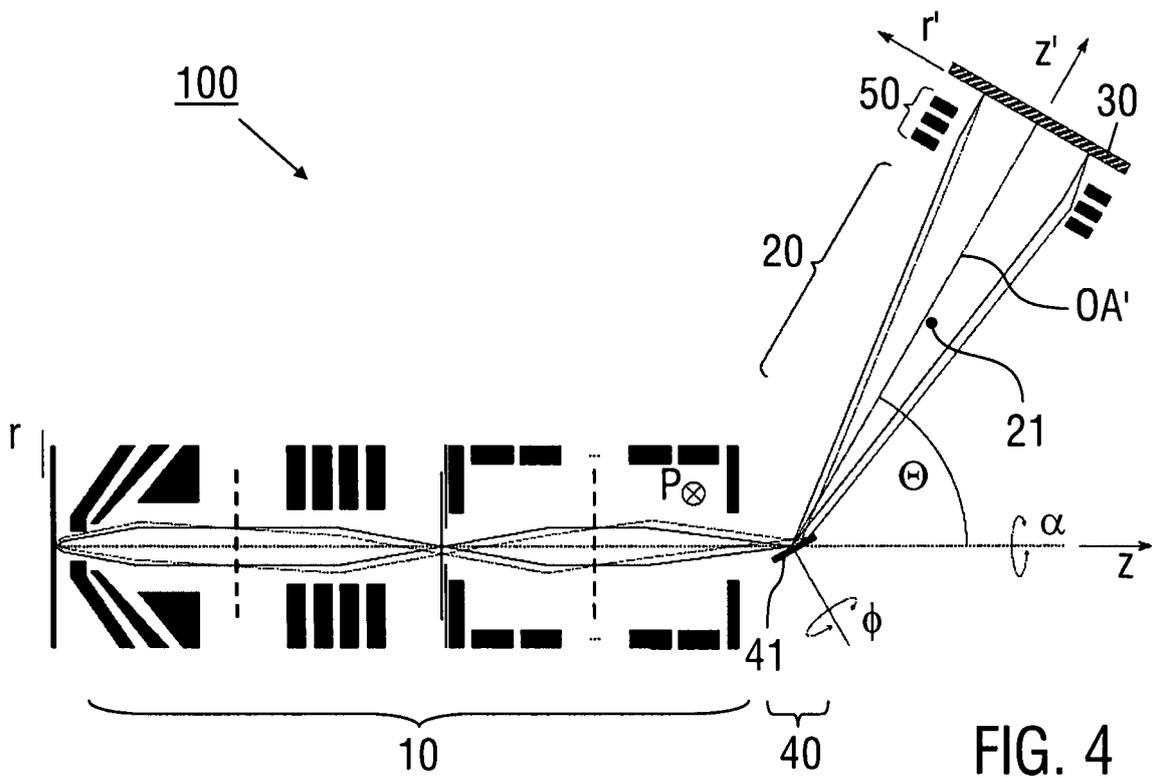


FIG. 4

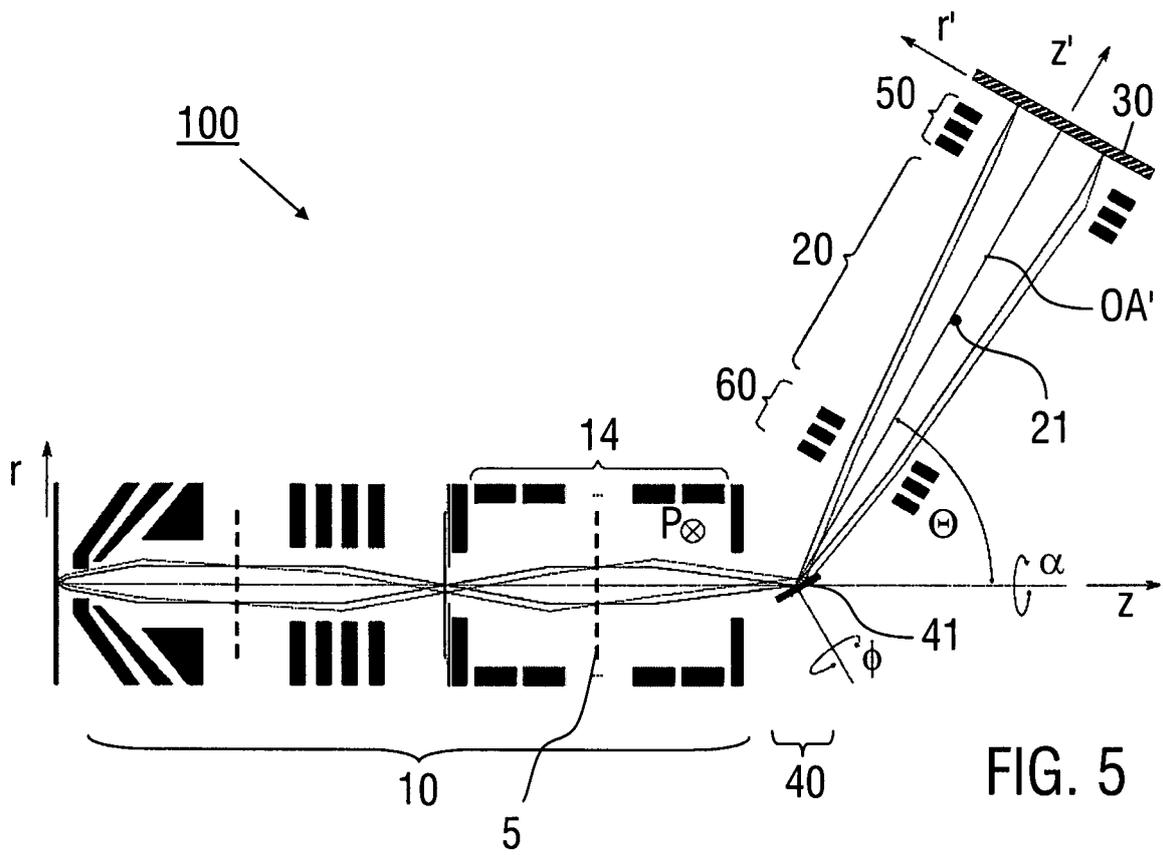


FIG. 5

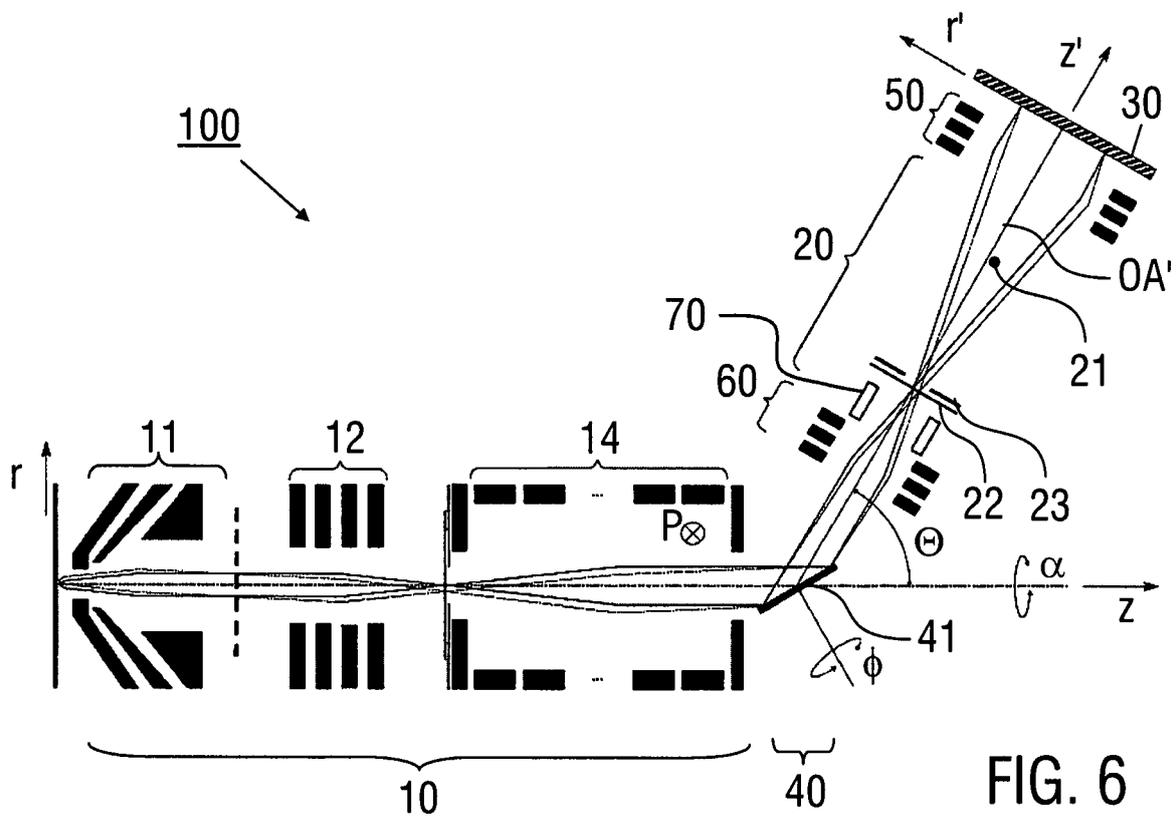
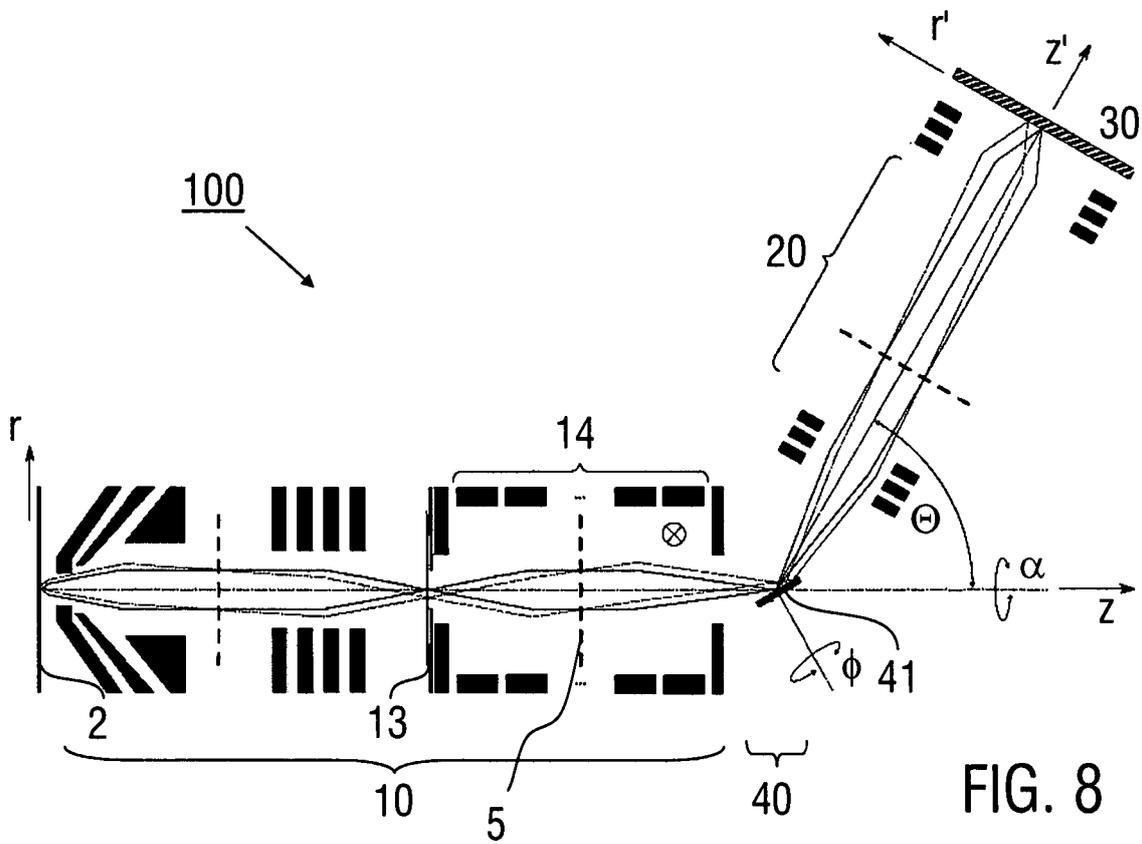
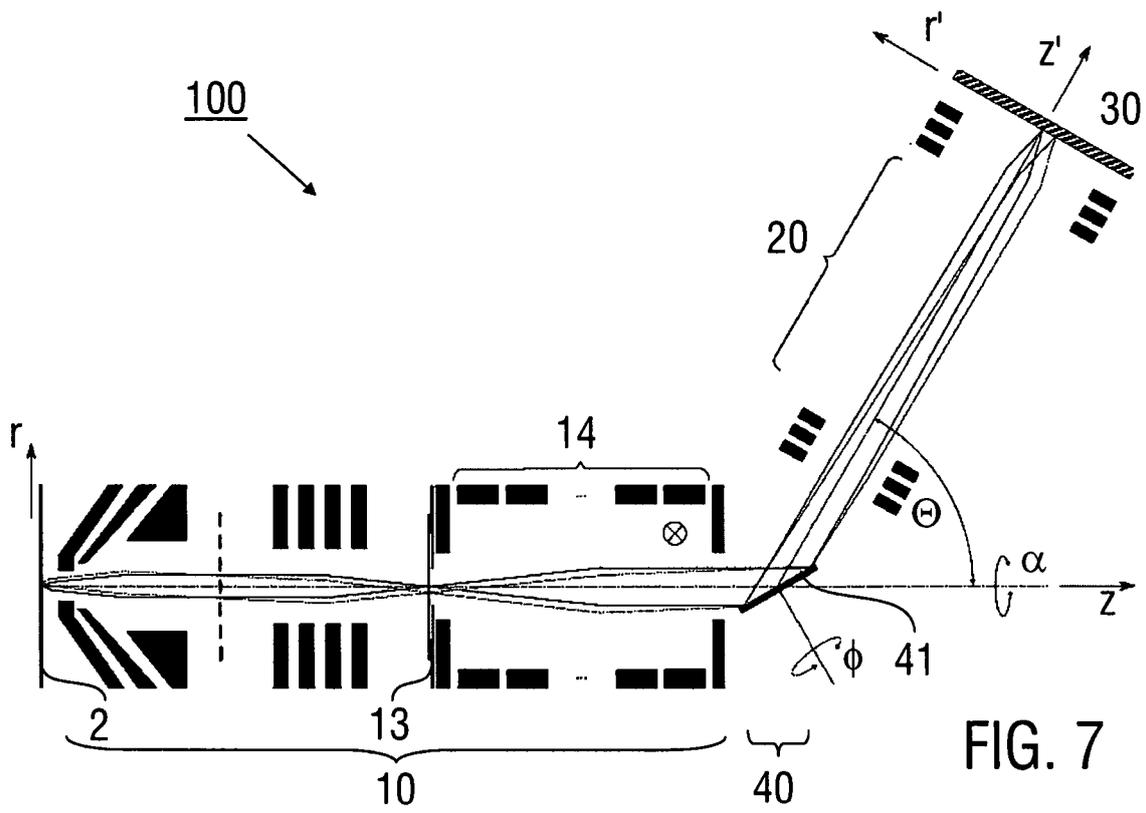


FIG. 6



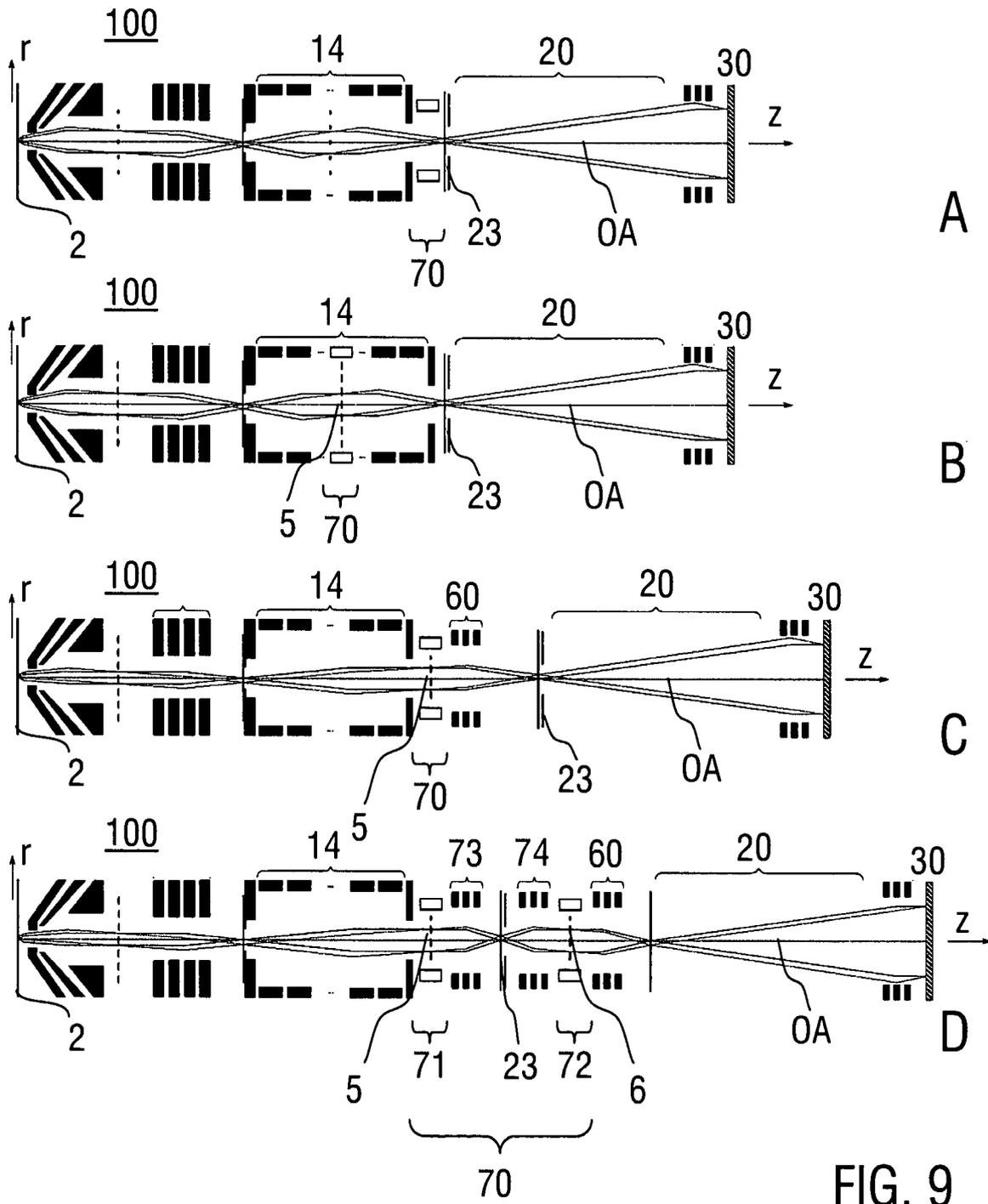


FIG. 9

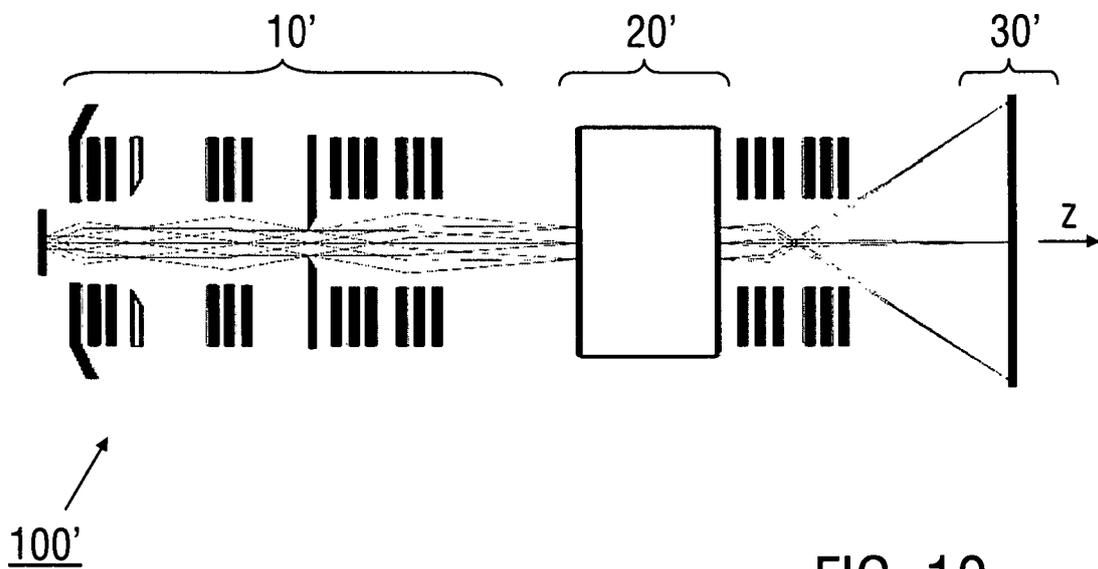


FIG. 10
(Stand der Technik)