



(10) **DE 10 2020 104 151 B3** 2021.04.08

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 104 151.9**

(22) Anmeldetag: **18.02.2020**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **08.04.2021**

(51) Int Cl.: **H01J 37/05** (2006.01)

H01J 49/44 (2006.01)

G01N 27/62 (2021.01)

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:
**GST Gesellschaft für systembezogene
Technologieentwicklung mbH, 55276 Oppenheim,
DE**

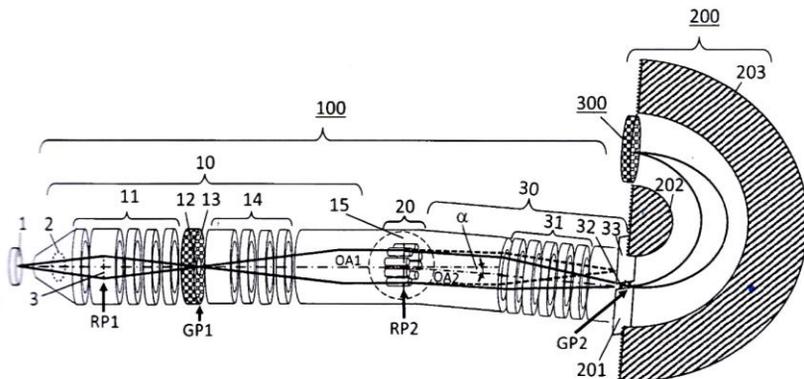
(72) Erfinder:
**Schönhense, Johannes Gerhard, 55276
Oppenheim, DE; Schönhense, Benedikt Marian,
London, GB**

(74) Vertreter:
**Walther Hinz Bayer PartGmbB Patentanwälte,
34130 Kassel, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:
siehe Folgeseiten

(54) Bezeichnung: **Abbildungsvorrichtung für Elektronen und ein Abbildungsverfahren zur Reduktion des
Untergrundsignals in abbildenden elektronenoptischen Geräten**

(57) Zusammenfassung: Eine Elektronen-Abbildungsvorrichtung (100), die für einen Transfer einer Elektronenverteilung (100), die für einen Transfer einer Elektronenverteilung (2) von einer Probe (1) zu einer Energieanalysatorvorrichtung (200) mit Elektronendetektor (300) eingerichtet ist, umfassend ein probenseitiges Segment (10) mit optischer Achse (OA1) bestehend aus einer ersten Linsengruppe (11), einer Feldblende (13) und einer zweiten Linsengruppe (14), gefolgt von einer Deflektorvorrichtung (20) und einem analysatorseitigen Segment (30), mit einer um einen kleinen Winkel (α) gegenüber (OA1) verkippten optischen Achse (OA2), umfassend eine dritte Linsengruppe (31) gefolgt von einer Selektorblende (33), wobei Linsengruppe (11) ein erstes Impulsbild (reziprokes Bild) (3) in Ebene RP1 innerhalb der Linsengruppe und ein erstes Gaußbild (Realraumbild) (12) in Ebene GP1 im Zentrum der Feldblende (13) erzeugt und die zweite Linsengruppe (14) ein zweites Impulsbild (15) in Ebene RP2 im Zentrum der Deflektorvorrichtung (20) erzeugt und die Elektronen durch den Deflektor so um einen Winkel (α) abgelenkt werden, dass im zweiten Gaußbild (32) in der Ebene GP2 hinter der dritten Linsengruppe (31) mittels der Selektorblende (33) der gewünschte Energiebereich der Elektronen ausgewählt und Untergrundelektronen mit zu hoher oder zu niedriger Energie ausgeblendet werden. Die Energieanalysatorvorrichtung kann als Halbkugelanalysator (200) mit Eintrittsblende (201), Innenkugelelektrode (202), Außenkugelelektrode (203) und nachfolgendem ortsauflösendem Elektronendetektor (300) oder als Flugzeit-Analysator eingerichtet sein.



(19)



Deutsches
Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2020 104 151 B3** 2021.04.08

(56) Ermittelte Stand der Technik:

DE 10 2017 009 299 B3
DE 10 2013 005 173 A1

E. Essers et al., Energy resolution of an Omega-type monochromator and imaging properties of the MANDOLINE filter, Ultramicroscopy 110 (2010), S 971 - 980

K. Grzelakowski et al., A new surface microscope for magnetic imaging, IEEE Transactions on Magnetics 30 (1994), S. 4500 - 4502

L. Veneklasen, Design of a spectroscopic low-energy electron microscope, Ultramicroscopy 36 (1991), S. 76 - 90

P. Adamec et al., Compact low-energy electron microscope for surface imaging, Review of scientific instruments 69 (1998), S. 3583 - 3587

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Abbildungsvorrichtung für Elektronen, die für einen Transfer einer Elektronenverteilung von einer Probe zu einer Energieanalysatorvorrichtung eingerichtet ist, umfassend:

ein probenseitiges erstes Segment, welches eine erste Linsengruppe, eine Feldblende und eine zweite Linsengruppe aufweist, wobei die Linsen der ersten und zweiten Linsengruppe zur Erzeugung eines ersten Impulsbildes der von der Probe emittierten Elektronenverteilung in der ersten reziproken Bildebene, eines ersten Realraumbildes in der ersten Gauß'schen Bildebene und eines zweiten Impulsbildes in der zweiten reziproken Bildebene eingerichtet sind;

eine Deflektorvorrichtung, die zentriert bezüglich der ersten Gauß'schen Bildebene angeordnet ist sowie ein analysatorseitiges zweites Segment, welches eine dritte Linsengruppe und eine Selektorblende aufweist, wobei die dritte Linsengruppe zur Erzeugung eines zweiten Realraumbildes im Zentrum der Selektorblende in der zweiten Gauß'schen Bildebene eingerichtet ist;

und eine Energieanalysatorvorrichtung mit Elektronendetektor, die zur energieaufgelösten Abbildung der Elektronenverteilung eingerichtet ist.

[0002] Außerdem betrifft die Erfindung ein Abbildungsverfahren zur Reduktion des Untergrundes beim Transfer einer Elektronenverteilung von einer Probe zu einem Energieanalysator mittels einer Abbildungsvorrichtung, umfassend ein probenseitiges erstes Segment mit einer ersten Linsengruppe, einer Feldblende und einer zweiten Linsengruppe, eine Deflektorvorrichtung und ein analysatorseitiges zweites Segment mit einer dritten Linsengruppe und einer Selektorblende.

[0003] Insofern bezieht sich die Erfindung auf eine Messvorrichtung, die zur Erfassung einer Energieverteilung und einer Winkelverteilung bzw. einer Impulsverteilung eines Ensembles von Elektronen eingerichtet ist, welche aus einer zu untersuchenden Probe emittiert werden. Die Erfindung bezieht sich insbesondere auch auf winkelauflösende Energieanalysatoren, parallel abbildende Impulsmikroskope auf der Basis von Halbkugelanalysatoren und Flugzeit-Impulsmikroskope zur simultanen Erfassung der Impuls- und Energieverteilung der Elektronen. Die Erfindung kann auch für ein Verfahren zur Nutzung dieser Vorrichtung zur Erfassung der Winkelverteilung oder Impulsverteilung von Elektronen eingesetzt werden, z. B. als Anwendung bei der Analyse von Festkörperproben mittels Photoelektronen oder Auger-Elektronen.

[0004] Es ist allgemein bekannt, für die Analyse von Photoelektronen und Auger-Elektronen aus Festkörperproben verschiedene Arten von Energieanalysatoren zu verwenden [1]. Bei speziellen Ausführungsarten werden die von der Probe emittierten Elektronen winkelaufgelöst detektiert, ein allgemein als ARPES (ARPES: angular-resolved photo-electron spectroscopy) bezeichnetes Verfahren. Bei anderen Ausführungsarten erfolgt eine Abbildung der Impulsverteilung der vom Festkörper emittierten Elektronen, wobei die nötige Energieauflösung entweder mit dispersiven Energieanalysatoren, insbesondere mit Doppel-Halbkugelanalysatoren [2, 3], mit Einfach-Halbkugelanalysatoren [4, 5], mit Flugzeit-Analysatoren [6] oder mit einer Kombination von beiden Arten [7] erreicht wird. Aus der Winkel- oder Impulsverteilung in Verbindung mit der Energieverteilung lässt sich die elektronische Bandstruktur eines Materials bestimmen [1]. In allen Verfahren kann die Analysatoreinrichtung mit einem abbildenden Spinfilter versehen werden [6, 8].

[0005] In allen genannten Verfahren werden die Elektronen mittels einer Transferoptik aus elektronenoptischen Linsen von der Festkörperprobe zum Eintritt des Energieanalysators übertragen und auf den Eintrittsspalt, z. B. bei dispersiven Analysatoren oder den Eintrittspunkt der niederenergetischen Driftstrecke, z. B. bei Flugzeit-Analysatoren fokussiert. Solche Transferoptiken sind breitbandig ausgelegt, d.h. sie übertragen ein weites Energieband, nur begrenzt durch die chromatische Aberration der Linsen. In den Eintrittsspalt treten deshalb im allgemeinen Fall Elektronen mit sehr unterschiedlichen Energien ein. Einen typischen Fall stellen Photoelektronen dar, die mit Röntgenstrahlung ausgelöst werden. Dabei handelt es sich um eine weit verbreitete Methode, die als ESCA bezeichnet wird (ESCA: electron spectroscopy for chemical analysis [1]). Ein ebenfalls sehr gebräuchlicher Fall sind Auger-Elektronen, welche durch einen Primärelektronenstrahl mit einer Energie von typisch mehreren keV ausgelöst werden. In diesen und vielen anderen Fällen liegt das interessierende Signal in einem sehr breiten Spektrum. Je nach Anregungsenergie treten Breiten von bis zu mehreren keV auf. Die Transferoptik überträgt die Elektronen mit dieser breiten spektralen Verteilung in den Eintritt des Energieanalysators.

[0006] In dispersiven Analysatoren - gebräuchlichster Prototyp ist der Halbkugelanalysator - treffen Elektronen mit zu hoher Energie auf die Innenseite der Außenkugelelektrode und Elektronen mit zu niedriger Energie auf die Außenseite der Innenkugelelektrode, bzw. auf Korrektorelektroden in der Nähe des Strahlaustritts. Dort lösen diese Elektronen Streuelektronen und Sekundärelektronen aus, welche zum Teil durch den Austrittsspalt hindurchtreten und das echte Signal als Untergrund überlagern. In Flugzeit-Analysatoren führen Elektronen mit höheren Energien zu

Serien von diskreten Artefaktensignalen. Diese Serien resultieren aus der Bedingung, dass die Flugzeit der betreffenden zumeist schnelleren Elektronen um eine oder mehrere Perioden der gepulsten Anregungsquelle kürzer ist als die der echten Signale. Für geringere Energien treten Artefaktensignale auf, wenn die Flugzeit um ein ganzzahliges Vielfaches der Anregungsperiode länger ist als die der echten Signalelektronen. In der Praxis führt der letztere Fall zu einem diffusen Untergrund, da diese langsamen Elektronen in der Driftstrecke zeitlich stark dispergiert werden. Beide Fälle führen zu zeitlichen Koinzidenzen mit den echten Signalen, die für ungünstige Kombinationen von Periode der gepulsten Anregung und Driftenergie zu einer massiven Beeinträchtigung der echten Signale führen können. Eine systematische Zusammenstellung der Bedingungen für solche ungewollten zeitlichen Koinzidenzen der Untergrundsignale mit den echten Signalen für realistische Arbeitsbedingungen ist in [9] angegeben.

[0007] Alle bisherigen Transportsysteme in Elektronen-Energieanalysatoren [2-7] nutzen für den Strahltransport lineare elektronenoptische Linsensysteme, d.h. zylindersymmetrische Linsenanordnungen, was mit Blick auf die Minimierung von Aberrationen vorteilhaft erscheint.

[0008] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, die störenden Signalbeiträge falscher Energien substanziell zu reduzieren bzw. in günstigen Fällen völlig zu eliminieren.

[0009] Diese Aufgabe wird ausgehend von einer Abbildungsvorrichtung für Elektronen gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1 und ausgehend von einem Abbildungsverfahren gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 11 mit den jeweils kennzeichnenden Merkmalen gelöst.

[0010] Hierzu wird eine Symmetriebrechung in Form einer zweifach segmentierten elektronenoptischen Säule mit einem linearen probenseitigen Segment und einem linearen analysatorseitigen Segment mit einem kleinen Knickwinkel α am Schnittpunkt der beiden optischen Achsen eingeführt. Aberrationen durch die Symmetriebrechung werden dadurch eliminiert, dass exakt im Knickpunkt ein reziprokes Bild (Impulsraumbild) positioniert wird und ferner in diesem Punkt eine Deflektorvorrichtung angeordnet ist, die das Strahlenbündel mit der korrekten Energie zentrisch in das analysatorseitige Segment der elektronenoptischen Säule einfädelt. Die unerwünschten Energien werden aus dem Strahl eliminiert, indem in der ersten Gauß'schen Bildebene (im folgenden kurz Gaußebene genannt) eine erste Blende und in der zweiten Gaußebene hinter der Deflektoreinheit eine zweite Blende angebracht ist. Die erste Blende hat die Funktion einer Feldblende, die den zur Abbildung gelangenden Bildbereich eingrenzt. Eine

ausreichend kleine Feldblende ist insbesondere für die Impulsauflösung in Impulsmikroskopen wichtig [3, 6]. Die zweite Blende ist in konventionellen, linearen Transferoptiken nicht vorhanden, da sie ebenfalls in einer Gaußebene positioniert ist und damit keine weitere Wirkung als die erste Feldblende hat. In der erfindungsgemäßen zweifach segmentierten Transferoptik blockiert diese zweite Blende jedoch die unerwünschten zu langsamen und zu schnellen Elektronen im Strahl und hat deshalb die Funktion einer Selektorblende für den gewünschten Energiebereich.

[0011] Die erfindungsgemäße Anordnung besteht in der einfachsten Ausführung aus einer zweifach segmentierten elektronenoptischen Säule mit einem kleinen Knickwinkel von typisch $\alpha \approx 2^\circ$ bis 4° (oder größeren Winkeln, nur begrenzt durch die Aberration des Deflektors) und einem Deflektorelement am Knickpunkt sowie einer zusätzlichen Selektorblende im analysatorseitigen Segment der optischen Säule. In einer bevorzugten zweiten Ausführungsform kann die Strahlkipfung hinter der Selektorblende wieder rückgängig gemacht werden, indem die optische Säule dreifach segmentiert wird und entsprechend ein weiterer komplementärer Kippwinkel von α eingeführt wird, sodass das Strahlenbündel im dritten Segment wieder parallel zum ersten Segment verläuft. Aufgrund des kleinen Knickwinkels ist der resultierende Strahlversatz zwischen erstem und drittem Segment in einem praktischen Aufbau nur wenige Millimeter, sodass die Gesamtanordnung in einem linearen Tragrohr und linearem Vakuumrohr untergebracht werden kann.

[0012] Das erfindungsgemäße Verfahren basiert auf der kombinierten Nutzung von drei bekannten Grundsachen teilchenoptischer Systeme:

- (i) Die Winkelinformation des zur Abbildung gelangenden Strahls ist in einer reziproken Bildebene als Bild der Impulsverteilung (kurz: Impulsbild) kodiert, wobei die Radialkoordinate den Transversalimpuls quantifiziert. Analog ist die Ortsinformation des zur Abbildung gelangenden Strahls in einer reziproken Bildebene als Winkelinformation kodiert.
- (ii) Der Transversalimpuls lässt sich durch einen elektrischen oder magnetischen Deflektor in wohldefinierter Weise verändern.
- (iii) Bei einer festen Deflektoreinstellung ist der Impulsübertrag auf ein durchfliegendes Elektron proportional zu seiner Aufenthaltszeit im Deflektorfeld und damit abhängig von seiner kinetischen Energie.

[0013] Die erfindungsgemäße Anordnung ist insbesondere vorteilhaft zur Erhöhung des nützlichen Signalanteils in Experimenten; die durch die Messeffizienz des Detektors begrenzt sind. Dies ist z.B. der Fall bei gepulster Anregung und Nachweis mit einem Ein-

kanal Delayline-Detektor [10], der nur ein Zählereignis pro Anregungspuls registrieren kann. Die Zählereignisse verteilen sich auf das gesamte erfasste Energieintervall. Dadurch wird ein hoher Anteil an Elektronen registriert, die nicht zum gewünschten Signal beitragen. Die erfindungsgemäße Reduktion des erfassten Energieintervalls führt damit unmittelbar zu einer Effizienzsteigerung um den Faktor der Reduktion der Breite des Intervalls. In [11] ist eine alternative Methode beschrieben, bei der die Reduktion des erfassten Energiebandes mittels eines elektronenoptischen Hochpass-Filters realisiert wird. Dieser Ansatz ist jedoch mit einem massiven Verlust an Schärfentiefe verbunden, sodass die in Publikation [11] gezeigten Messdaten aus Einzelintervallen von nur 0,5 eV Bandbreite zusammengesetzt sind.

[0014] Die erfindungsgemäße Anordnung bietet einen besonderen Vorteil auch in Fällen, in denen Untergrundbeiträge mit wesentlich höheren Energien dem untersuchten Photoemissions-Signal beigemischt sind. Dies ist der Fall in Experimenten mit Synchrotronstrahlung, wenn Beiträge von Licht höherer Ordnungen des Monochromators im anregenden Strahl vorhanden sind. Die dadurch erzeugten Untergrundsignale werden mit dem erfindungsgemäßen Verfahren vollständig eliminiert. Der in [9] beschriebene alternative Ansatz, die Artefaktsignale höherer Ordnungen durch Veränderung der Photonenenergie aus dem Messfenster heraus zu schieben, ist mit dem Verlust an freier Wahlmöglichkeit der Photonenenergie verbunden. Für viele Experimente wie die dreidimensionale Tomographie des Impulsraumes [12] ist aber die exakte Einstellung einer bestimmten Photonenenergie unverzichtbar.

[0015] Des Weiteren bietet das erfindungsgemäße Verfahren Vorteile bei der Nutzung eines abbildenden Spinfilters [6, 8, 13]. Bei der Spinanalyse führt ein dem Messsignal überlagerter Untergrund zu einer Verringerung der gemessenen Spinasymmetrie. Aufgrund des Berechnungsalgorithmus für die Spinpolarisation kann der Untergrund nicht durch Subtraktion eliminiert werden. Dasselbe gilt für den statistischen Fehler der Spinmessung, der durch Beimischung eines Fremdsignals überproportional stark erhöht wird. Details zu Spinmessungen sind in [14] dargelegt. Damit ist die Problematik eines beigemischten Untergrundsignals für spinaufgelöste Messungen noch wesentlich größer als für spinintegrale Experimente. Insbesondere lösen hochenergetische Untergrundelektronen bei der Streuung an einem Spinfilterkristall niederenergetische Sekundärelektronen aus, welche das echte niederenergetische Signal von Elektronen, die spinselektiv gestreut wurden, überlagern.

[0016] Aus den Druckschriften [15] und [16] ist eine Ablenkvorrichtung zwischen zwei Säulenordnungen bekannt, in der die optische Achsen der Säulen um 10° [15] bzw. 45° [16] geneigt sind. Abbildenden

de Energiefilter zur Teilchen-Spektrometrie sind beispielsweise aus [17] bekannt.

[0017] Der Stand der Technik lehrt ferner die achromatische Ablenkung [15, 16] oder die symmetrische Ablenkung [18], bei der u. a. die Dispersion kompensiert wird. Bei der erfindungsgemäßen Anordnung wird aber gerade die Dispersion dieses Ablenkelements zur Energie-Vorfilterung ausgenutzt.

[0018] Die erfindungsgemäße Anordnung ist insbesondere vorteilhaft im Zusammenhang mit folgenden Druckschriften zu verwenden.

[0019] Die EP 1 559 126 B9 offenbart einen bildgebenden Energiefilter für elektrisch geladene Teilchen mit mindestens zwei toroidalen hintereinander angeordneten Energieanalysatoren, wobei mindestens ein Energieanalysator in seiner Eintritts- und Austrittsebene jeweils eine Blende aufweist. Eine erfindungsgemäße invertierende Linse zwischen den beiden Analysatoren dient zur Aberrationskorrektur. Diese Erfindung bezieht sich auch auf die Verwendung dieses bildgebenden Energiefilters für die Photoelektronenspektroskopie.

[0020] Die DE 10 2019 107 327 A1 beschreibt eine Elektronen-Abbildungsvorrichtung und ein Elektronentransferverfahren zur Übertragung von Elektronen von einer Probe zu einer Energieanalysatorvorrichtung, eingerichtet insbesondere für eine impuls- und energieaufgelöste Detektion der Elektronen, wie z. B. Photoelektronen. Des Weiteren betrifft diese Erfindung eine Elektronen-Spektrometervorrichtung vom Typ einer Einfachhalbkugel, die mit der Elektronen-Abbildungsvorrichtung ausgestattet ist.

[0021] Die DE 10 2013 005 173 C5 offenbart eine Messvorrichtung, die zur Erfassung einer Impuls- und/oder Energieverteilung eines Ensembles geladener Teilchen aus einer zu untersuchenden Probe eingerichtet ist. Diese Erfindung betrifft insbesondere ein parallel abbildendes Flugzeit-Mikroskop zur simultanen Erfassung der Impuls- und Energieverteilung des Ensembles geladener Teilchen, insbesondere von Elektronen aus einer Festkörperoberfläche. Die Vorrichtung umfasst eine elektronenoptische Säule aus mehreren Linsengruppen darunter Zoomlinsen zur Anpassung von Strahlenergie und Bildgröße, ferner Blenden, die erfindungsgemäß lateral verschiebbar sind, eine Niederenergie-Driftstrecke zur Energiedispersion und einen zeitauflösenden Detektor. Diese Erfindung betrifft auch ein Verfahren zur simultanen Erfassung der Impuls- und Energieverteilung des Ensembles geladener Teilchen.

[0022] Die DE 10 2017 009 299 B3 lehrt eine Vorrichtung zur Analyse einer Probe mittels Elektronen, beinhaltend eine Elektronenoptik zur Erzeugung von Bildern, aus welchen entweder eine räumliche

Struktur der Probe oder die Winkelverteilung der aus der Probe kommenden Elektronen jeweils in Kombination mit der Energieverteilung ermittelbar ist. In den verschiedenen Ausführungsformen findet sich die Kombination von Einfach- oder Doppelhalbkugelanalysator mit einer nachgeschalteten Driftstrecke und zeitauflösendem Detektor.

[0023] In allen vorstehend genannten Anordnungen und Verfahren ist die optische Achse der Transferoptiken linear, abgesehen von den Kreisbahnen in den Halbkugelanalysatoren. Bis auf die natürlich vorhandene chromatische Aberration der Transferoptiken bestehen keinerlei aktive Vorkehrungen zur Unterdrückung unerwünschter Energien, die in den Analysatoren zu Untergrund oder Artefaktsignalen führen. Für diese Instrumente und viele weitere hier nicht aufgeführte Geräte ist die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Reduzierung des Untergrundes sehr vorteilhaft.

[0024] Weitere Einzelheiten und Vorteile der Erfindung werden aus der folgenden Beschreibung der beigefügten Zeichnungen ersichtlich. Es zeigen:

Fig. 1: eine schematische Querschnittsansicht einer ersten einfachen Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit zweifach segmentierter optischer Säule in Verbindung mit einem konventionellen Halbkugelanalysator;

Fig. 2: eine schematische Querschnittsansicht einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit zweifach segmentierter optischer Säule in Verbindung mit einem Halbkugelanalysator in der Betriebsart eines Impulsmikroskops;

Fig. 3: eine schematische Querschnittsansicht einer weiteren Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit zweifach segmentierter optischer Säule in Verbindung mit einem Flugzeit-Analysator;

Fig. 4: eine schematische Querschnittsansicht einer weiteren Variante der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit dreifach segmentierter optischer Säule in Verbindung mit einem Flugzeit-Analysator;

Fig. 5 (A-E): berechnete realistische Elektronen trajektorien (B-E) für die Variante der erfindungsgemäßen Vorrichtung aus **Fig. 4**;

Fig. 6: eine schematische Querschnittsansicht einer weiteren Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit zweifach segmentierter optischer Säule in Verbindung mit einem abbildenden Spinfilter und einem Flugzeit-Analysator;

Fig. 7: schematische Darstellungen von Deflektorvorrichtungen bestehend aus einem elektrostatischen Oktupolelement (A) und der Kombi-

nation eines Oktupolelements mit einem Zylindersegmentablenker (B);

Fig. 8: eine schematische Illustration eines herkömmlichen Halbkugelanalysators ohne die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Untergrundunterdrückung (Stand der Technik).

[0025] **Fig. 1** zeigt eine erste Ausführungsform der erfindungsgemäßen Elektronen-Abbildungs- vorrichtung **100** in Gestalt eines zweifach segmentierten elektronenoptischen Transportsystems das für einen Transfer einer Elektronenverteilung **2** von einer Elektronen emittierenden Probe **1** zu einer Halbkugel- Energieanalysatorvorrichtung **200** mit Elektronendetektor **300** eingerichtet ist, umfassend ein probenseitiges erstes Segment **10** mit optischer Achse **OA1** und ein analysatorseitiges zweites Segment **30** mit optischer Achse **OA2**, welche um einen Winkel α gegen die Achse **OA1** verkippt ist. Das probenseitige Segment **10** beinhaltet eine erste Linsengruppe **11**, die ein erstes Impulsbild **3** in der ersten reziproken Bildebene **RP1** innerhalb der Linsengruppe und ein erstes Gaußbild **12** in der ersten Bildebene **GP1** im Zentrum einer Feldblende **13** erzeugt, gefolgt von einer zweiten Linsengruppe **14**, welche die Elektronen in ein zweites Impulsbild **15** in einer zweiten reziproken Bildebene **RP2** im Schnittpunkt der beiden optischen Achsen **OA1** und **OA2** fokussiert.

[0026] Eine Deflektoreinheit **20** im Schnittpunkt der optischen Achsen **OA1** und **OA2** überträgt auf die durchfliegenden Elektronen einen Transversalimpuls, dessen Größe von der kinetischen Energie abhängt, sodass das durch die dritte Linsengruppe **31** in der Ebene **GP2** erzeugte zweite Gaußbild **32** von der Selektorblende **33** in einem reduzierten Energieintervall durchgelassen wird, siehe schematisch dargestellte durchgezogene Trajektorien, während Elektronen außerhalb dieses Energieintervalls die Blende **33** nicht passieren können und so aus dem Strahl eliminiert werden, siehe gestrichelte Trajektorien.

[0027] Das erfindungsgemäße Verfahren nach **Fig. 1** dient zur Unterdrückung von Untergrundsignalen, welche durch Streuprozesse von Elektronen mit höheren oder niedrigeren Energien im Halbkugel- Energieanalysator **200** entstehen. Zu langsame Elektronen können auf die Innenkugelelektrode **202** und zu schnelle Elektronen auf die Außenkugelelektrode **203** auftreffen und dort störende Streu- und Sekundärelektronen auslösen. Im hier gezeigten einfachsten Fall ist die Selektorblende **33** identisch mit der Eintrittsblende **201**; im allgemeinen Fall kann ein weiteres Linsenelement zwischen Blenden **33** und **201** angeordnet sein. In der hier gezeigten Ausführungsform ist ferner der ortsauflösende Detektor **300** direkt in der Austrittsebene des Halbkugelanalysators angeordnet. Die Eintrittsblende **201** kann als Kreisblende oder als Schlitzblende ausgeführt sein.

[0028] Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist in allen schematischen Querschnitten ein übertrieben großer Ablenkwinkel von $\alpha = 5^\circ$ gezeichnet. Laut Simulationen sind kleinere Winkel von ca. $2-4^\circ$ für das erfindungsgemäße Verfahren ausreichend.

[0029] Fig. 2 zeigt eine weitere bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Elektronen-Abbildungsanordnung 100, identisch aufgebaut wie in Fig. 1, in Verbindung mit einer Halbkugel-Energieanalysatorvorrichtung 200 in der Betriebsart eines Impulsmikroskops. In Erweiterung von Fig. 1 umfasst der Halbkugelanalysator bei dieser Betriebsart zusätzlich zu Eintrittsblende 201, Innenkugelelektrode 202 und Außenkugelelektrode 203 eine Austrittsblende 204 und eine nachfolgende Austrittslinsengruppe 205 zur Erzeugung eines Impulsbildes 206 auf dem ortsauflösenden Elektronendetektor 300. Das erfindungsgemäße Verfahren der Abtrennung von Elektronen mit zu hohen oder zu niedrigen Energien in der Selektorblende 33 durch die kombinierte Wirkung der ersten, zweiten und dritten Linsengruppen 11, 14, 31 und der Deflektoreinheit 20 ist identisch wie in Fig. 1.

[0030] Fig. 3 zeigt die erfindungsgemäße Elektronen-Abbildungsanordnung 100, identisch aufgebaut wie in Fig. 1, bei der Nutzung in Verbindung mit einer Flugzeit-Energieanalysatorvorrichtung 400. Der Flugzeit-Analysator umfasst eine Eintrittslinsengruppe 42, welche über eine niederenergetische Driftstrecke 43 ein Impulsbild 44 in die dritte reziproke Ebene RP3 auf den orts- und zeitauflösenden Elektronendetektor 500 fokussiert.

[0031] Schematisch dargestellt sind die Trajektorien der Elektronen mit kinetischen Energien in dem zu untersuchenden Energieintervall (durchgezogene Linien) und für ein Untergrundsignal mit zu hoher Energie (gestrichelte Trajektorien). Diese Art von Untergrund tritt z.B. bei der Photoemission von inneren Schalen oder bei der Existenz von höheren Ordnungen im anregenden Röntgenstrahl auf.

[0032] Diese Anwendung erfordert eine gepulste Lichtquelle. Die Energie der vom Detektor 500 registrierten Elektronen wird aus der Flugzeit der Elektronen von der Probe 1 zum Detektor 500 bestimmt. Das erfindungsgemäße Verfahren der Abtrennung von Elektronen mit zu hohen oder zu niedrigen Energien in der Selektorblende 33 durch die kombinierte Wirkung der ersten bis dritten Linsengruppen 11, 14, 31 und der Deflektoreinheit 20 ist identisch wie in Fig. 1 und Fig. 2. Das erfindungsgemäße Verfahren nach Fig. 3 dient zur Unterdrückung von Artefaktensignalen in den Zeitspektren, die in konventionellen Anordnungen mit linearer elektronenoptischer Säule durch zufällige zeitliche Koinzidenz von Elektronen mit höheren oder niedrigeren Energien im Vergleich zum gewünschten Signal entstehen.

[0033] Fig. 4 zeigt eine weitere Ausführungsform der erfindungsgemäßen Elektronen-Abbildungsanordnung 100 bei der Nutzung in Verbindung mit einer Flugzeit-Energieanalysatorvorrichtung 400. Abweichend von Fig. 1 - Fig. 3 besteht die Gesamtanordnung hier aus einer dreifach segmentierten optischen Säule, wobei die ersten beiden Segmente mit optischen Achsen OA1 und OA2 identisch mit Fig. 1 - Fig. 3 sind, und einem zusätzlichen dritten Segment mit optischer Achse OA3, welche parallel zu OA1 orientiert ist. Eine zweite Deflektorvorrichtung 41 unmittelbar hinter der zweiten Gaußebene GP2 am Eintritt der Flugzeit-Energieanalysatorvorrichtung 400 bewirkt eine zweite Strahlablenkung mit dem Winkel $-\alpha$, sodass die Achse OA3 des Strahlenbündels im dritten Segment wieder parallel zum ersten Segment verläuft und von der Eintrittslinsengruppe 42 über die Driftstrecke 43 als Impulsbild 44 in die dritte reziproke Ebene RP3 auf den zeit- und ortsauflösenden Detektor 500 fokussiert wird.

[0034] Der Vorteil dieser Ausführungsform liegt in der Geometrie der Gesamtanordnung. Bei einem Ablenkwinkel von $\alpha = 3^\circ$ und einer angenommenen Länge von 120 mm zwischen erstem Deflektor 20 und zweitem Deflektor 41 beträgt der Strahlversatz zwischen den optischen Achsen OA1 und OA3 nur 6 mm, sodass der gesamte mechanische Aufbau in einem linearen Tragrohr und Vakuumrohr untergebracht werden kann.

[0035] Fig. 5A zeigt die Ausführungsform der erfindungsgemäßen Elektronen-Abbildungsanordnung 100 wie in Fig. 4. Die Fig. 5B bis Fig. 5E zeigen simulierte Trajektorien für verschiedene kinetische Energien, berechnet unter Zugrundelegung eines realistischen elektronenoptischen Systems. Als Sollenergie bezeichnen wir die Mitte der durch die Selektorblende 33 transmittierten Verteilung von kinetischen Energien. In der Simulation wurde eine Sollenergie von 60 eV angenommen. Bei einer kinetischen Energie von 40 eV (B) wird das Strahlenbündel vom Deflektor 20 deutlich zu stark abgelenkt, in der zweiten Gaußebene GP2 auf einen kleinen Fleck fokussiert und von der Selektorblende 33 ausgeblendet. Bei der korrekten Sollenergie von 60 eV (C) wird das fokussierte Strahlenbündel von der Selektorblende 33 durchgelassen und im nachfolgenden dritten Segment von Deflektor 41 auf die optische Achse OA3 abgelenkt und von Linsengruppe 42 über Driftstrecke 43 als Impulsbild 44 auf den zeitauflösenden Detektor 500 fokussiert. Bei einer kinetischen Energie von 80 eV (D) wird das Strahlenbündel zu schwach abgelenkt und bei einer kinetischen Energie von 300 eV (E) wird es noch schwächer abgelenkt. Nach dem Ähnlichkeitsatz ist das relative Verhalten prozentual für beliebige Sollenergien identisch, solange eine gute Abbildung möglich ist, d.h. im Fall von ausreichender Magnetfeldabschirmung bis herab zu wenigen eV.

[0036] Bei einer gegebenen Sollenergie hängt die Breite der von Selektorbende **33** transmittierten Verteilung von der Linsengeometrie, dem Winkel α zwischen den Achsen **OA1** und **OA2**, dem Vergrößerungsverhältnis der Gaußbilder in Blende **13** und Blende **33** sowie von den Blendendurchmessern ab. Typisch für Impulsmikroskope sind Feldblenden mit Durchmessern im Bereich von 100 - 500 μm für Standardanwendungen und bis hinab zu 10 μm für hoch-ortsauflösende Messungen bei hinreichend hoher Beleuchtungsintensität. Für die Simulationen in **Fig. 5B-E** wurde eine Feldblende von 100 μm und ein Ablenkwinkel von $\alpha = 3^\circ$ angenommen. Damit wird die transmittierte Verteilung der kinetischen Energien auf ca. 10 % der Passenergie begrenzt, im simulierten Beispiel also auf 6 eV, was der typischen Breite einer Valenzelektronenverteilung in der Photoemission entspricht.

[0037] **Fig. 6** zeigt eine weitere Ausführungsform der erfindungsgemäßen Elektronen-Abbildungsvorrichtung **100** bei der Nutzung in Verbindung mit einem Flugzeit-Analysator **400** wie in **Fig. 3** und einem zusätzlichen abbildenden Spinfilter **600**, bestehend aus einer Spinfilter-Linsengruppe **61** und einem Spinfilterkristall **62** gefolgt von dem Flugzeit-Analysator **400**, in welchem das Strahlenbündel von der Eintrittslinsengruppe **42** über die niederenergetische Driftstrecke **43** in ein Impulsbild **44** auf dem orts- und zeitauflosenden Detektor **500** fokussiert wird.

[0038] Der Spinfilterkristall **62** ist unter dem für die Spinanalyse benötigten Streuwinkel angebracht und der an seiner Oberfläche reflektierte Strahl tritt in den Flugzeit-Analysator **400** ein. Für Elektronen mit der korrekten Streuenergie wirkt der Spinfilterkristall wie ein polarisationsselektiver Spiegel. Alternativ kann ein abbildender Spinfilter auch hinter der Austrittsblende eines Halbkugelanalysators wie in **Fig. 2** angeordnet werden. Das erfindungsgemäße Verfahren nach **Fig. 6** dient zur Unterdrückung von Untergrundbeiträgen im spingefilterten Impulsbild **44**. Solche Beiträge entstehen einerseits durch Streuung von Untergrundelektronen im einfallenden Strahl oder durch Auslösung von Sekundärelektronen im Spinfilterkristall selbst.

[0039] **Fig. 7** zeigt schematische Darstellungen von zwei bevorzugten Ausführungsformen der Deflektorvorrichtung **20**, die für eine Optimierung der Abbildungseigenschaften eingerichtet sind. In **Fig. 7A** besteht der Deflektor aus einem Oktupolelement mit Elektroden **21** (gezeichneter Ablenkwinkel $\alpha = 5^\circ$), in **Fig. 7B** ist hinter dem Oktupolelement ein Zylindersegmentablenker mit Außenelektrode **22** und Innenelektrode **23** angeordnet (gezeichneter Ablenkwinkel $\alpha = 20^\circ$). Für sehr kleine Ablenkwinkel bis $\alpha = 2^\circ$ sind gemäß der Simulationen die Aberrationen eines einfachen Ablenkplattenpaars noch vernachlässigbar. Für Ablenkwinkel um $\alpha = 5^\circ$ ist ein Oktupol-Ab-

lenker vorteilhaft. Der Vorteil der Ausformung des Ablenkers als Oktupol liegt in der zusätzlichen Möglichkeit, diesen als Stigmator zu betreiben und so einen durch die Ablenkung induzierten Astigmatismus zu korrigieren. Der Oktupol-Ablenker bietet ferner den Vorteil, dass die Ablenebene in jeder beliebigen azimutalen Orientierung eingestellt werden kann und so mögliche Bild Drehungen durch magnetische Streufelder ausgeglichen werden können.

[0040] Wichtige Bedingungen für die Minimierung des Astigmatismus durch die Ableneinheit ist, dass im zweiten Segment **30** der optischen Säule das Elektronenbündel im gewünschten Energiebereich parallel zur optischen Achse **OA2** verläuft und so zentrisch durch die Linsengruppe **31** hindurchtritt. Ohne die erfindungsgemäße Kippung des Segments **30** führt der Astigmatismus bereits bei $\alpha = 2^\circ$ zu einer deutlichen Verschlechterung der Abbildungseigenschaften.

[0041] Durch Erzeugung eines Impulsbildes **15** mit parallelen Strahlenbündeln im Zentrum des Ablenkers wird gewährleistet, dass alle Elektronen mit derselben Energie die gleiche Ablenkung erfahren. Im angenommenen Fall eines homogenen elektrischen Feldes im Deflektor nimmt der Transversalimpuls der Elektronen p_\perp (kleine vertikalen Pfeile in **Fig. 7A**) linear mit ihrer Durchflugzeit zu: $p_\perp = mat(m \text{ Elektronenmasse}, a \text{ transversale Beschleunigung durch das Ablenkerfeld}, t \text{ Durchflugzeit})$. Die Durchflugzeit und damit auch der Impulsübertrag nimmt mit wachsender Energie der Elektronen proportional zu $1/(\sqrt{E_{\text{kin}}})$ ab (E_{kin} kinetische Energie). Die Strahlablenkung führt folglich zu einer energieabhängigen lateralen Verschiebung des Gaußbildes **32** strahlabwärts des Ablenkers in Ebene **GP2**. Durch diese Verschiebung wird erreicht, dass die Selektorbende **33** nur die Elektronen im gewünschten Energieintervall durchlässt.

[0042] Gewünschte Breiten des selektierten Energieintervalls liegen zwischen wenigen eV für Untersuchungen von elektronischen Valenzbändern von Festkörpern und bis zu ca. 100 eV für Untersuchungen an Photoelektronen aus inneren Schalen und von Auger-Elektronen. Im Einzelfall können sehr kleine Energiebreiten von Interesse sein, welche nur mit deutlich größeren Ablenkwinkeln realisierbar sind. Für Winkel im Bereich $\alpha = 10^\circ$ und darüber werden die Aberrationen eines einzelnen Oktupolablenkers zu groß, weil das Elektronenbündel zu schräg in den Ablenker eintritt. Für solche Fälle ist ein Zylindersegment-Ablenker (siehe **Fig. 7B**) besser geeignet, weil das Elektronenbündel parallel zur gekrümmten optischen Achse ein- und austritt. Die Fokussierungswirkung eines kurzen Zylindersegments (in **Fig. 7B** gezeichnet für $\alpha = 20^\circ$) wird durch einen vorgeschalteten Oktupolstigmator kompensiert. Mit großen Ablenkwinkeln α und kleinen Feldblenden **13** und Selektorbenden **33** kann das Energieintervall des durchge-

lassenem Strahlenbündels auf Breiten von 100 meV oder weniger reduziert werden kann, sodass die erfindungsgemäße Vorrichtung bereits die Funktion eines impulsauflösenden Elektronen-Energieanalysators mit moderater Auflösung erfüllt, ohne dass ein weiterer Analysator nachgeschaltet ist. Dies kann insbesondere für Testmessungen oder Übersichtsspektren vor den eigentlichen hochauflösenden Messungen bzw. für Spektroskopie an inneren Schalen interessant sein.

[0043] Fig. 8 zeigt eine schematische Illustration eines herkömmlichen Halbkugelanalytors ohne die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Untergrundunterdrückung (Stand der Technik). Das Eintrittslinsensystem **10** ist nicht segmentiert und hat eine lineare optische Achse **OA**. Im Eintrittslinsensystem gibt es keine aktiven Vorkehrungen zur Unterdrückung von Elektronen mit zu hohen oder zu niedrigen Energien, sodass zu schnelle Elektronen auf die Außenkugelelektrode **203** (gestrichelte Trajektorien) und zu langsame Elektronen auf die Innenkugelelektrode **202** treffen und dort Untergrundelektronen auslösen können.

Literaturliste zum technischen Hintergrund der Erfindung

- [1] S. Hüfner, Photoelectron spectroscopy: Principles and applications, Advanced Texts in Physics (Springer, 2003)
- [2] EP 1 559 126 B9;
- [3] DE 10 2014 019 408 B4, 2017.02.09;
- [4] US 6 104 029 A;
- [5] DE 10 2019 107 327 A1;
- [6] DE 10 2013 005 173 C5, 2019.04.04 und DE 10 2013 005 173 A1;
- [7] DE 10 2017 009 299 B3, 2019.02.21;
- [8] DE 10 2005 045 622 B4, 2009.04.30;
- [9] K. Medjanik et al., Progress in HAXPES Performance Combining Full-Field k-Imaging with Time-of-Flight Recording, Journal of Synchrotron Radiation 26, 1996-2012 (2019);
- [10] A. Oelsner et al., Microspectroscopy and imaging using a delay line detector in time-of-flight photoemission microscopy, Rev. Sci. Instrum. 72, 3968-3974 (2001);
- [11] C. Tusche et al., Multi-MHz time-of-flight electronic bandstructure imaging of graphene on Ir(111), Appl. Phys. Lett. 108, 261602 (2016);
- [12] K. Medjanik et al., Rapid 3D Mapping of the Fermi Surface and Fermi Velocity, Nature Materials 16, 615 (2017);
- [13] M. Kolbe et al., Highly Efficient Multichannel Spin-Polarization Detection, Phys. Rev. Letters 107, 207601 (2011);
- [14] J. Kessler, Polarized Electrons, Springer-Verlag, Berlin, (1985 2nd Edition);
- [15] P. Adamec et al., Compact low-energy electron microscope for surface imaging, Review of scientific instruments 69 (1998), S. 3583 - 3587;
- [16] K. Grzelakowski et al., A new surface microscope for magnetic imaging, IEEE Transactions on Magnetics 30 (1994), S. 4500 - 4502;
- [17] L. H. Veneklasen, Design of a spectroscope low-energy electron microscope, Ultramicroscopy 36 (1991), S. 76 - 90;
- [18] E. Essers et al., Energy resolution of an Omega-type monochromator and imaging properties of the MANDOLINE filter, Ultramicroscopy 110 (2010), S. 971 - 980.

Bezugszeichenliste

1	Probe
2	Elektronenverteilung
3	erstes Impulsbild
100	erfindungsgemäße Abbildungsvorrichtung
10	probenseitiges Segment der erfindungsgemäßen Abbildungsvorrichtung
11	erste Linsengruppe
12	erstes Gaußbild
13	Feldblende
14	zweite Linsengruppe
15	zweites Impulsbild
20	Deflektorvorrichtung
21	Oktupolelektrode
22	Außenzylinderelektrode
23	Innenzylinderelektrode
30	analysatorseitiges Segment der erfindungsgemäßen Abbildungsvorrichtung
31	dritte Linsengruppe
32	zweites Gaußbild
33	Selektorblende
200	Halbkugel-Energieanalysatorvorrichtung
201	Eintrittsblende
202	Innenkugelelektrode
203	Außenkugelelektrode
204	Austrittsblende

205	Austrittslinsengruppe
206	Impulsbild
300	ortsauflösender Detektor
400	Flugzeit-Energieanalysatorvorrichtung
41	zweite Deflektorvorrichtung
42	Eintrittslinsengruppe des Flugzeit-Analysators
43	niederenergetische Driftstrecke
44	Impulsbild
500	orts- und zeitauflösender Detektor
600	abbildende Spinfiltrovorrichtung
61	Spinfilter-Linsengruppe
62	Spinfilterkristall
GP1	erste Gauß'sche Bildebene
GP2	zweite Gauß'sche Bildebene
GP3	dritte Gauß'sche Bildebene
RP1	erste reziproke Bildebene
RP2	zweite reziproke Bildebene
RP3	dritte reziproke Bildebene
OA1	optische Achse des probenseitigen Segments
OA2	optische Achse des analysatorseitigen Segments
OA3	optische Achse des dritten Segments
OA	optische Achse einer konventionellen Abbildungsvorrichtung
α	Kippwinkel

Patentansprüche

1. Abbildungsvorrichtung für Elektronen (100), die für einen Transfer einer Elektronenverteilung (2) von einer Probe (1) zu einer Energieanalysatorvorrichtung eingerichtet ist, umfassend:
ein probenseitiges erstes Segment (10), welches eine erste Linsengruppe (11), eine Feldblende (13) und eine zweite Linsengruppe (14) aufweist, wobei die Linsen zur Erzeugung eines ersten Impulsbildes (3) der von der Probe (1) emittierten Elektronenverteilung (2) in der ersten reziproken Bildebene RP1, eines ersten Gaußbildes (12) in der Ebene GP1 und eines zweiten Impulsbildes (15) in der Ebene RP2 eingerichtet ist;
eine Deflektorvorrichtung (20), die zentriert bezüglich der Ebene RP2 angeordnet ist;
ein analysatorseitiges zweites Segment (30), welches eine dritte Linsengruppe (31) und eine Selektorblende (33) aufweist, wobei die dritte Linsengruppe

(31) zur Erzeugung eines zweiten Gaußbildes (32) im Zentrum der Selektorblende (33) in der Ebene GP2 eingerichtet ist; und
eine Energieanalysatorvorrichtung mit Elektronendetektor, die zur energieaufgelösten Abbildung der Elektronenverteilung (2) eingerichtet ist, **dadurch gekennzeichnet**,
dass die optische Achse (OA2) des analysatorseitigen Segments (30) um einen Winkel (α) von wenigen Grad gegenüber der optischen Achse (OA1) des probenseitigen Segments (10) verkippt ist und sich die Achsen (OA1) und (OA2) im Zentrum der Deflektorvorrichtung (20) schneiden, wobei die Deflektorvorrichtung (20) angeordnet ist, um das Strahlenbündel so abzulenken, dass in dem zweiten Gaußbild (32) in Ebene GP2 nur solche Elektronen die Selektorblende (33) passieren können, deren kinetische Energie im gewünschten Energiebereich liegt, während zu schnelle oder zu langsame Elektronen auf die Selektorblende (33) treffen und aus dem Strahl eliminiert werden, sodass in der Energieanalysatorvorrichtung die Menge an Untergrundelektronen signifikant verringert wird; und der durch die Abbildungsvorrichtung (100) selektierte Energiebereich bei vorgegebener Linsen- und Deflektorgeometrie mittels der Größen von Feldblende (13) und Selektorblende (33) sowie durch die Wahl der kinetischen Energie der Elektronen in der Deflektorvorrichtung (20) eingestellt werden kann.

2. Abbildungsvorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Energieanalysatorvorrichtung einen Halbkugelanalysator (200) mit Eintrittsblende (201), Innenkugelelektrode (202), Außenkugelelektrode (203) und einen nachfolgenden ortsauflösenden Elektronendetektor (300) in der Austrittsebene des Analysators umfasst, wobei die Selektorblende (33) gleichzeitig die Funktion der Eintrittsblende (201) des Halbkugelanalysators (200) erfüllt oder zwischen den Blenden (33) und (201) eine weitere Elektronenlinse angeordnet ist.

3. Abbildungsvorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Energieanalysatorvorrichtung einen Halbkugelanalysator (200) mit Eintrittsblende (201), Innenkugelelektrode (202) und Außenkugelelektrode (203), jedoch in der Betriebsart eines Impulsmikroskops umfasst, wobei in der Austrittsebene eine Austrittsblende (204) und weiter strahlabwärts eine Austrittslinsengruppe (205) angeordnet ist, die ein Impulsbild (206) auf dem ortsauflösenden Elektronendetektor (300) erzeugt.

4. Abbildungsvorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Energieanalysatorvorrichtung einen Flugzeit-Analysator (400) mit Eintrittslinsengruppe (42) zur Fokussierung der Elektronen durch die niederenergetische Driftstrecke (43) in ein Impulsbild (44) am Eingang eines nachfolgenden orts- und zeitauflösenden Detektors (500) umfasst,

wobei die Selektorblende (33) gleichzeitig die Funktion der Eintrittsblende des Flugzeit-Analysators (400) erfüllt.

5. Abbildungsvorrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass am Eintritt des Flugzeit-Analysators (400) eine zweite Deflektorvorrichtung (41) angeordnet ist, welche eine Strahlablenkung um den komplementären Winkel ($-\alpha$) bewirkt, sodass die optische Achse (OA3) des Flugzeit-Analysators (400) wieder parallel zur optischen Achse (OA1) des ersten Segments verläuft und der Parallelversatz zwischen (OA1) und (OA3) nur wenige mm beträgt, sodass die Gesamtanordnung in einem geraden Tragrohr und geraden Vakuumrohr untergebracht werden kann.

6. Abbildungsvorrichtung nach einem oder mehreren der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Deflektorvorrichtung (20) als ein Paar von Ablenkplatten oder magnetischen Polschuhen zur Erzeugung eines Dipolfeldes, oder als Anordnung von vier elektrischen oder magnetischen Elementen zur Überlagerung eines Quadrupolfeldes oder als Anordnung von acht elektrischen oder magnetischen Elementen zur Überlagerung eines Oktupolfeldes und zur Nutzung der Wirkung eines Stigmators zur Eliminierung eines Astigmatismus eingerichtet ist.

7. Abbildungsvorrichtung nach einem oder mehreren der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet** dass die Feldblende (13) und die Selektorblende (33) als feststehende Blenden oder als Wechselblenden auf beweglichen Haltern ausgeführt sind, wobei ihre Größe verändert und ihre laterale Position senkrecht zur jeweiligen optischen Achse (OA1) oder (OA2) variiert und so die Bildqualität optimiert werden kann.

8. Abbildungsvorrichtung nach einem oder mehreren der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Selektorblende (33) auf einem beweglichen Halter angebracht ist, wobei die Position der Blende entlang der optischen Achse (OA2) variiert und so die Breite der transmittierten Energieverteilung optimiert werden kann.

9. Abbildungsvorrichtung nach einem oder mehreren der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Deflektorvorrichtung (20) als Kombination eines Oktupolablenkers mit acht Elektroden (21) und eines Zylindersektorablenkers mit Außenzylinderelektrode (22) und Innenzylinderelektrode (23) eingerichtet ist, wobei größere Ablenkwinkel im Bereich bis zu $\alpha \approx 20^\circ$ mit geringen Aberrationen realisierbar sind und damit sehr kleine Energiebreiten des von der Selektorblende (33) durchgelassenen Strahlenbündels erreicht werden.

10. Abbildungsvorrichtung nach einem oder mehreren der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass hinter der Selektorblende (33) oder hinter der Austrittsblende (204) des Halbkugelanalysator eine abbildende Spinfiltervorrichtung (600) angebracht ist, wobei die Selektorblende (33) gleichzeitig die Funktion der Eintrittsblende der Spinfiltervorrichtung (600) erfüllt, oder der Halbkugelanalysator nach Art eines Impulsmikroskops ausgebildet ist, wobei die Spinfiltervorrichtung (600) eine Spinfilter-Linsengruppe (61) und einen Spinfilterkristall (62) umfasst, sodass die reduzierte Breite der von der Selektorblende (33) durchgelassenen Energieverteilung eine signifikante Reduktion des Untergrundes bei der spinabhängigen Streuung in der Spinfiltervorrichtung bewirkt.

11. Abbildungsverfahren zur Reduktion des Untergrundes beim Transfer einer Elektronenverteilung (2) von einer Probe (1) zu einem Energieanalysator mittels einer Abbildungsvorrichtung (100), umfassend ein probenseitiges erstes Segment (10) mit einer ersten Linsengruppe (11), einer Feldblende (13) und einer zweiten Linsengruppe (14), eine Deflektorvorrichtung (20) und ein analysatorseitiges zweites Segment (30) mit einer dritten Linsengruppe (31) und einer Selektorblende (33), **dadurch gekennzeichnet**, dass die optischen Achsen des probenseitigen Segments (OA1) und des analysatorseitigen Segments (OA2) um einen Winkel (α) von wenigen Grad gegeneinander verkippt sind und die Elektronen durch die Deflektorvorrichtung (20) im Schnittpunkt der beiden optischen Achsen derart abgelenkt werden, dass die Elektronen zunächst im probenseitigen Segment (10) in ein Gaußbild (12) in Ebene GP1 im Zentrum der Feldblende (13) fokussiert werden und dann in ein Impulsbild (15) in der reziproken Bildebene RP2 im Zentrum der Deflektorvorrichtung (20) fokussiert werden; und im analysatorseitigen Segment (30) durch die dritte Linsengruppe (31) in ein zweites Gaußbild (32) in Ebene GP2 fokussiert werden, sodass aufgrund der Energieabhängigkeit der Strahlablenkung im Deflektor (20) nur Elektronen in einem gewünschten Energiebereich die Selektorblende (33) passieren können, während zu schnelle oder zu langsame Elektronen auf die Selektorblende (33) treffen und nicht in den Energieanalysator eintreten können und so der Untergrund im Energieanalysator signifikant verringert wird.

12. Abbildungsverfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass der durch die Anordnung (100) selektierte Energiebereich bei vorgegebener Linsen- und Deflektorgeometrie mittels der Größen von Feldblende (13) und Selektorblende (33) sowie durch die Wahl der kinetischen Energie der Elektronen in der Deflektorvorrichtung (20) eingestellt und so die Untergrundsreduktion optimiert werden kann.

13. Abbildungsverfahren nach Anspruch 11 oder 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Energieanalysatorvorrichtung einen Halbkugelanalysator (200) mit Eintrittsblende (201), Innenkugelelektrode (202), Außenkugelelektrode (203) und ortsauflösendem Elektronendetektor (300) umfasst, wobei die Selektorblende (33) gleichzeitig die Funktion der Eintrittsblende (201) des Halbkugelanalysators (200) erfüllt oder zwischen Blenden (33) und (201) eine weitere Elektronenlinse angeordnet ist und durch die Reduzierung der Energiebreite der in den Analysator eintretenden Elektronen die Streuung von zu schnellen oder zu langsamen Elektronen an den Elektroden im Inneren des Analysators signifikant verringert wird.

14. Abbildungsverfahren nach Anspruch 11 oder 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Energieanalysatorvorrichtung einen Halbkugelanalysator (200) wie in Anspruch 13 jedoch in der Betriebsart eines Impulsmikroskops umfasst, wobei in der Austrittsebene eine Austrittsblende (204) und weiter strahlabwärts eine Austrittslinsengruppe (205) angeordnet ist, die ein Impulsbild (206) auf dem ortsauflösenden Elektronendetektor (300) erzeugt, welches in Folge der Eliminierung von zu hohen und zu niedrigen Energien vor dem Strahleintritt in den Analysator einen signifikant reduzierten Untergrund aufweist.

15. Abbildungsverfahren nach Anspruch 11 oder 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Energieanalysatorvorrichtung einen Flugzeit-Analysator (400) mit Eintrittslinsengruppe (42), niederenergetischer Driftstrecke (43) und einen nachfolgenden orts- und zeitauflösenden Detektor (500) umfasst, wobei die Selektorblende (33) gleichzeitig die Funktion der Eintrittsblende des Flugzeit-Analysators (400) erfüllt und das detektierte Signal einen signifikant reduzierten Untergrund aufweist, der insbesondere von Artefakten zufälliger zeitlicher Koinzidenzen von Untergrundelektronen mit echten Signalelektronen bereinigt ist.

16. Abbildungsverfahren nach Anspruch 15 **dadurch gekennzeichnet**, dass am Eintritt des Flugzeit-Analysators (400) eine zweite Deflektorvorrichtung (41) angeordnet ist, welche eine Strahlablenkung um den komplementären Winkel $-\alpha$ bewirkt, sodass die optische Achse (OA3) des Flugzeit-Analysators (400) wieder parallel zur optischen Achse (OA1) des probenseitigen Segments (10) verläuft und der Parallelversatz zwischen (OA1) und (OA3) nur wenige mm beträgt, sodass die Gesamtanordnung in einem geraden Tragrohr und geraden Vakuumrohr untergebracht werden kann.

17. Abbildungsverfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Deflektorvorrichtung (20) als ein Paar von Ablenkplatten oder magnetischen Polschuhern zur Erzeugung eines Dipolfeldes, oder als An-

ordnung von vier elektrischen oder magnetischen Elementen zur Überlagerung eines Quadrupolfeldes oder als Anordnung von acht elektrischen oder magnetischen Elementen zur Überlagerung eines Oktupolfeldes und zur Nutzung der Wirkung eines Stigmators zur Bildkorrektur eingerichtet ist.

18. Abbildungsverfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Feldblende (13) und die Selektorblende (33) als Festblenden oder als Wechselblenden auf beweglichen Haltern ausgeführt sind, sodass ihre Größe verändert und ihre laterale Position senkrecht zur jeweiligen optischen Achse (OA1) oder (OA2) variiert und damit die Bildqualität optimiert werden kann.

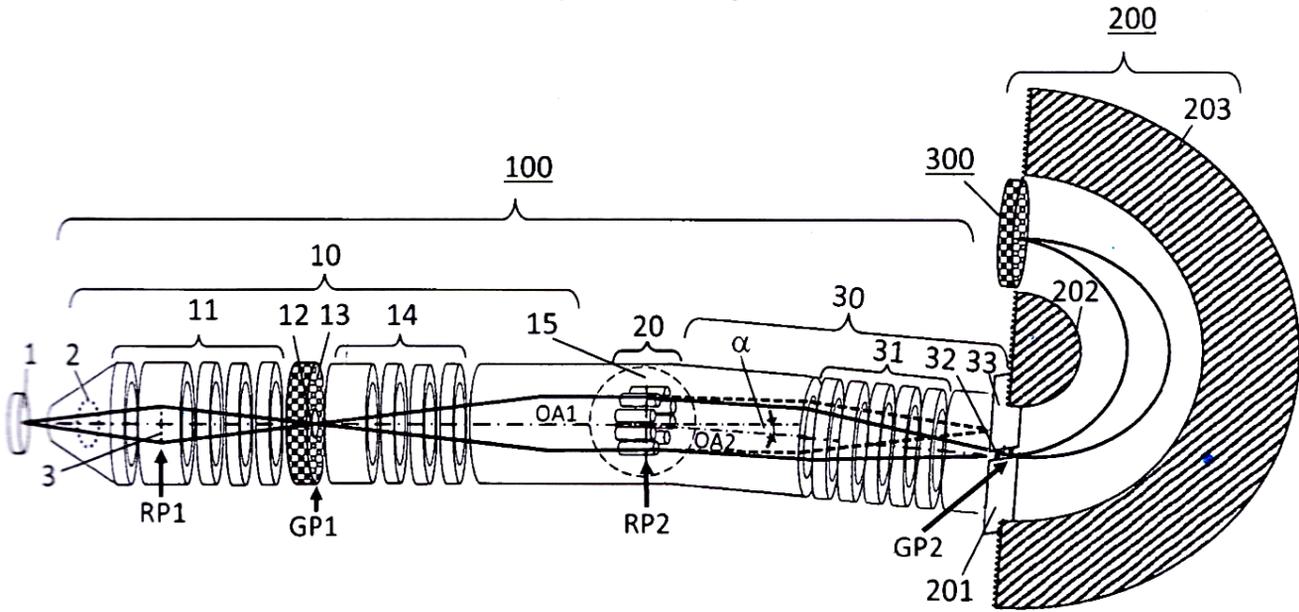
19. Abbildungsverfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Selektorblende (33) auf einem beweglichen Halter angebracht ist, wobei die Position der Blende entlang der optischen Achse (OA2) variiert und so die Breite der transmittierten Energieverteilung optimiert werden kann.

20. Abbildungsverfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass hinter der Selektorblende (33) oder hinter der Austrittsblende (204) des Halbkugelanalysators eine abbildende Spinfiltervorrichtung (600) angeordnet ist, wobei die Selektorblende (33) gleichzeitig die Funktion der Eintrittsblende der Spinfiltervorrichtung (600) erfüllt, oder der Halbkugelanalysator nach Art eines Impulsmikroskops ausgebildet ist, wobei die Spinfiltervorrichtung (600) eine Spinfilter-Linsengruppe (61) und einen Spinfilterkristall (62) umfasst, sodass die reduzierte Breite der von der Selektorblende (33) durchgelassenen Energieverteilung eine signifikante Verringerung des Untergrundes bei der spinabhängigen Streuung in der Spinfiltervorrichtung bewirkt.

21. Abbildungsverfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Deflektorvorrichtung (20) als Kombination eines Oktupolablenkers mit acht Elektroden (21) und eines Zylindersektorablenkers mit Außenzylinderelektrode (22) und Innenzylinderelektrode (23) eingerichtet ist, sodass größere Ablenkwinkel im Bereich bis zu $\alpha \approx 20^\circ$ mit geringen Aberrationen realisierbar sind und damit das Energieintervall des von der Selektorblende (33) durchgelassenen Strahlenbündels auf Breiten von 100 meV oder weniger reduziert werden kann, sodass die erfindungsgemäße Vorrichtung bereits die Funktion eines impulsauflösenden Elektronen-Energieanalysators mit begrenzter Auflösung erfüllt, ohne dass ein weiterer Analysator nachgeschaltet ist.

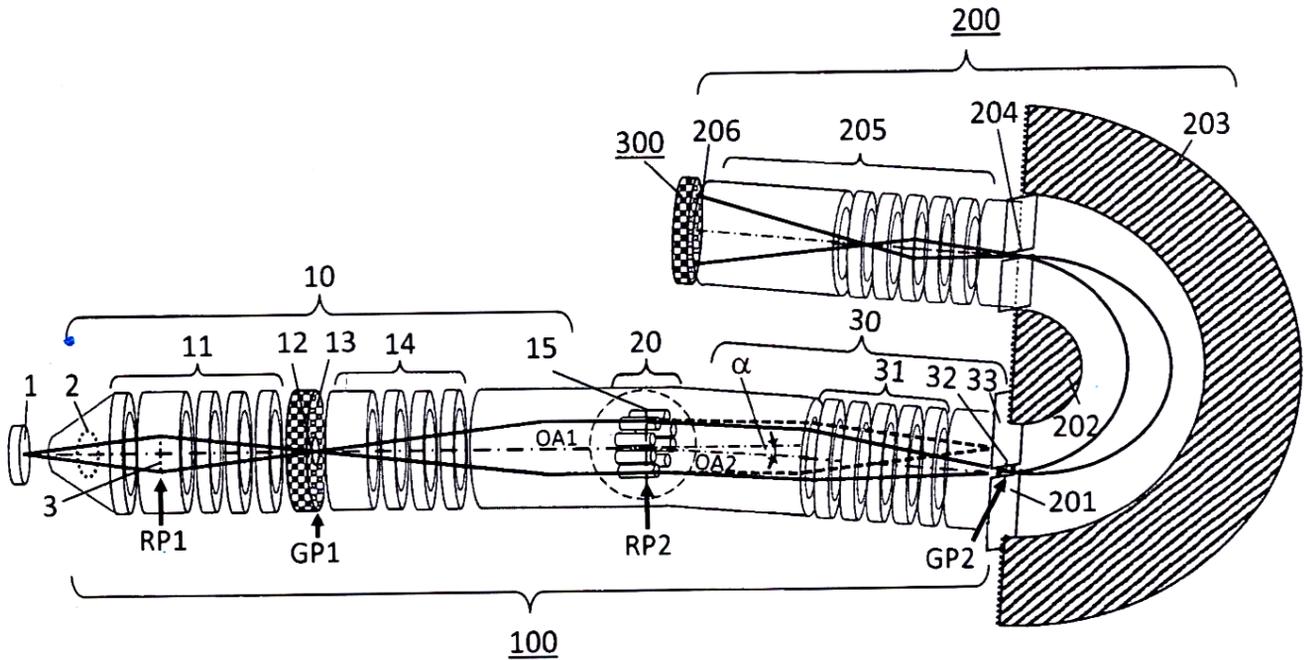
Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



13/20

FIG. 1



14/20

FIG. 2

