



(10) **DE 10 2019 005 362 A1** 2021.02.04

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2019 005 362.1**

(22) Anmeldetag: **31.07.2019**

(43) Offenlegungstag: **04.02.2021**

(51) Int Cl.: **H01J 37/30 (2006.01)**

H01J 37/26 (2006.01)

G21K 1/08 (2006.01)

G01N 23/225 (2018.01)

H01J 37/147 (2006.01)

(71) Anmelder:
**Carl Zeiss MultiSEM GmbH, 73447 Oberkochen,
DE**

(72) Erfinder:
**Fritz, Hans, 79286 Glottertal, DE; Müller, Ingo,
73430 Aalen, DE**

(74) Vertreter:
**Tesch-Biedermann, Carmen, Dipl.-Phys. Dr. rer.
nat., 81829 München, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

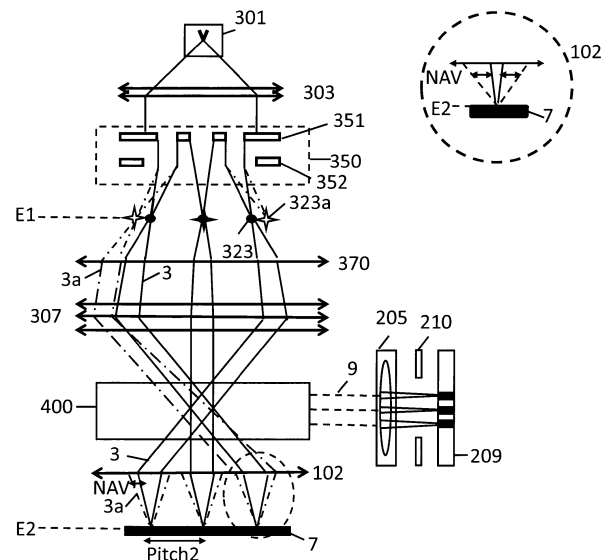
DE	10 2013 014 976	A1
DE	10 2014 008 105	A1
DE	10 2014 008 383	A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Betreiben eines Vielzahl-Teilchenstrahlsystems unter Veränderung der numerischen Apertur, zugehöriges Computerprogrammprodukt und Vielzahl-Teilchenstrahlsystem**

(57) Zusammenfassung: Offenbart wird ein Verfahren zum Betreiben eines Vielzahl-Teilchenstrahlsystems an unterschiedlichen Arbeitspunkten. Für jeden der Arbeitspunkte ist es möglich, die numerische Apertur so einzustellen, dass die Auflösung des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems optimal ist. Dabei wird als Randbedingung der Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen auf der abzurasternden Probe konstant gehalten. Es erfolgen zur Variation der numerischen Apertur keinerlei mechanische Umbauten am System.



Beschreibung

Gebiet der Erfindung

[0001] Die Erfindung betrifft Teilchenstrahl-Systeme, welche mit einer Vielzahl von Teilchenstrahlen arbeiten.

Stand der Technik

[0002] Mehrstrahl-Teilchenmikroskope können ebenso wie Einzelstrahl-Teilchenmikroskope dazu verwendet werden, Objekte auf einer mikroskopischen Skala zu analysieren. Bspw. können mittels dieser Teilchenmikroskope Bilder eines Objekts aufgenommen werden, welche eine Oberfläche des Objekts repräsentieren. Auf diese Weise kann bspw. die Struktur der Oberfläche analysiert werden. Während in einem Einzelstrahl-Teilchenmikroskop ein einziger Teilchenstrahl aus geladenen Teilchen wie bspw. Elektronen, Positronen, Myonen oder Ionen, dazu verwendet wird, das Objekt zu analysieren, wird in einem Mehrstrahl-Teilchenmikroskop eine Mehrzahl von Teilchenstrahlen dazu verwendet. Die Mehrzahl der Teilchenstrahlen, welche auch als Bündel bezeichnet wird, wird gleichzeitig auf die Oberfläche des Objekts gerichtet, wodurch verglichen mit einem Einzelstrahl-Teilchenmikroskop eine deutlich größere Fläche der Oberfläche des Objekts während eines gleichen Zeitraums abgetastet und analysiert werden kann.

[0003] Aus der WO 2005/ 024 881 A2 ist ein Vielzahl-Teilchenstrahlsystem in Form eines Elektronenmikroskopiesystems bekannt, welches mit einer Vielzahl von Elektronenstrahlen arbeitet, um ein zu untersuchendes Objekt mit einem Bündel von Elektronenstrahlen parallel abzurastern. Das Bündel von Elektronenstrahlen wird erzeugt, indem ein von einer Elektronenquelle erzeugter Elektronenstrahl auf eine Multiaperturplatte gerichtet wird, welche eine Vielzahl von Öffnungen aufweist. Ein Teil der Elektronen des Elektronenstrahls trifft auf die Multiaperturplatte und wird dort absorbiert, und ein anderer Teil des Strahls durchsetzt die Öffnungen der Multiaperturplatte, so dass im Strahlengang hinter einer jeden Öffnung ein Elektronenstrahl geformt wird, dessen Querschnitt durch den Querschnitt der Öffnung definiert ist. Weiterhin führen geeignet gewählte elektrische Felder, welche im Strahlengang vor und/ oder hinter der Multiaperturplatte bereitgestellt sind, dazu, dass eine jede Öffnung in der Multiaperturplatte als eine Linse auf den die Öffnung durchsetzenden Elektronenstrahl wirkt, so dass die Elektronenstrahlen in einer Ebene fokussiert werden, welche in einem Abstand von der Multiaperturplatte liegt. Die Ebene, in der die Foki der Elektronenstrahlen gebildet werden, wird durch eine nachfolgende Optik auf die Oberfläche des zu untersuchenden Objekts abgebildet, so dass die einzelnen Elektronenstrahlen als Pri-

märstrahlen fokussiert auf das Objekt treffen. Dort erzeugen sie von dem Objekt ausgehende Wechselwirkungsprodukte wie Rückstreuелеktronen oder Sekundärelektronen, welche zu Sekundärstrahlen geformt und von einer weiteren Optik auf einen Detektor gerichtet werden. Dort trifft ein jeder der Sekundärstrahlen auf ein separates Detektorelement, so dass die mit diesem detektierten Elektronenintensitäten Informationen zu dem Objekt an dem Ort bereitstellen, an dem der entsprechende Primärstrahl auf das Objekt trifft. Das Bündel von Primärstrahlen wird systematisch über die Oberfläche des Objekts gescannt, um in der für Rasterelektronenmikroskope üblichen Weise ein elektronenmikroskopisches Bild des Objekts zu erzeugen.

[0004] Bei dem beschriebenen Vielzahl-Teilchenstrahlsystem ist eine hohe Auflösung bei der teilchenoptischen Abbildung in der Praxis von hoher Relevanz. Entscheidend für eine gute Auflösung ist der Wert der numerischen Apertur. Die numerische Apertur wird bereits beim Systemdesign vom Optikdesigner optimiert, um die bestmögliche Auflösung zu erzielen. Die Auflösung setzt sich aus mehreren Beiträgen zusammen wie zum Beispiel der Vergrößerung bzw. Verkleinerung des virtuellen Durchmessers der Teilchenquelle, der Beugung und den Aberrationen von teilchenoptischen Komponenten, wobei diese Beiträge auf unterschiedliche Weise von der numerischen Apertur abhängig sind. Außerdem existiert eine Abhängigkeit dieser Beiträge vom jeweiligen Arbeitspunkt des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems, der zum Beispiel durch die Strahlstromstärke und/ oder die Landeenergie der Teilchen auf dem Objekt gekennzeichnet sein kann. Bei gegebenem Arbeitspunkt und bei festgelegten Systemparametern (z.B. Aberrationskoeffizienten, Helligkeit der Quelle) existiert jedenfalls ein Wert für die numerische Apertur an der Probe, für den die Fleckgröße der Einzel-Teilchenstrahlen auf dem Objekt minimal ist. Dabei wird die numerische Apertur typischerweise nur für einen Arbeitspunkt des Systems optimiert und auch hier kann es vorkommen, dass die numerische Apertur für diesen einen Arbeitspunkt trotz aller Berechnungen nicht optimal ist.

[0005] Es ist deshalb wünschenswert, die numerische Apertur des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems verändern zu können. Dies würde es erlauben, die Auflösung im Betrieb zu verbessern oder zu optimieren.

Beschreibung der Erfindung

[0006] Es ist somit die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zum Betreiben eines Vielzahl-Teilchenstrahlsystems bereitzustellen, das es erlaubt, die numerische Apertur zu variieren, und zwar insbesondere auf einfache Weise und ohne konstruktive Veränderungen an dem Vielzahl-Teilchenstrahlsystem vorzunehmen, wobei andere teilchen-

optische Parameter wie zum Beispiel der Abstand der Einzel-Teilchenstrahlen beim Auftreffen auf die Probe (der sog. „Pitch“) dennoch nicht verändert werden.

[0007] Die Aufgabe wird gelöst durch den Gegenstand der unabhängigen Patentansprüche. Vorteilhaftige Ausführungsformen der Erfindung gehen aus den abhängigen Patentansprüchen hervor.

[0008] Der Erfindung liegen dabei folgende Überlegungen zugrunde: Ein Vielzahl-Teilchenstrahlsystem, das mit einer einzelnen Säule arbeitet, weist einen Multistrahl-Generator zur Erzeugung einer Vielzahl von Einzel-Teilchenstrahlen aus einem einzelnen Teilchenstrahl auf. Dieser Multistrahl-Generator kann dabei eine Multiaperturplatte in Kombination mit einem Multilinsen-Array oder/oder einem Multidefektor-Array umfassen. Durch den Multistrahl-Generator wird also die Vielzahl von Einzel-Teilchenstrahlen erzeugt und auf eine Zwischenbildebene abgebildet. Bei dieser Zwischenbildebene kann es sich um eine reelle Zwischenbildebene oder um eine virtuelle Zwischenbildebene handeln. In beiden Fällen ist es so, dass die Orte der Einzel-Teilchenstrahlen in dem Zwischenbild als virtuelle Teilchenquellen und somit als Ursprünge für die weitere teilchenoptische Abbildung angesehen werden können. Die virtuellen Teilchenquellen in dieser Zwischenbildebene werden somit abgebildet auf ein Objekt bzw. in die Objektebene und das zu untersuchende Objekt kann mit der Vielzahl von Einzel-Teilchenstrahlen abgerastert werden.

[0009] Bei der teilchenoptischen Abbildung der virtuellen Teilchenquellen auf die Objektebene gilt dabei folgende Erhaltungsgröße:

$$NA \times Pitch \times \sqrt{U} = const \quad (1)$$

wobei NA die numerische Apertur, der Pitch den Abstand zwischen den benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen und U das elektrische Potenzial in einer Zwischenbildebene oder in der Objektebene bezeichnen. Dabei sind die elektrischen Potenziale U wie in der elektronenoptischen Theorie üblich auf den Nullpunkt der kinetischen Energie der Teilchen bezogen, d.h. die Nullpunkte der elektrischen Potenziale stimmen mit dem Nullpunkt der kinetischen Energie der Teilchen überein. Werden die numerische Apertur und die Spannung nicht verändert, so lässt sich der Wert der Erhaltungsgröße dennoch durch eine Veränderung des Abstandes von benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen festlegen. Dieser geänderte Wert der Erhaltungsgröße gilt dann für die teilchenoptische Abbildung insgesamt, also auch in jeder Zwischenbildebene oder in der Objektebene.

[0010] Betrachtet man nun die Situation in der Zwischenbildebene (bezeichnet mit dem Index **1**) und in der Objektebene (bezeichnet mit dem Index **2**), so gilt:

$$NA1 \times Pitch1 \times \sqrt{U1} = NA2 \times Pitch2 \times \sqrt{U2} \quad (2)$$

[0011] Umformung von Gleichung (2) und Auflösen zur numerischen Apertur bezogen auf die Objektebene ergibt:

$$NA2 = \frac{NA1 \times Pitch1 \times \sqrt{U1}}{Pitch2 \times \sqrt{U2}} \quad (3)$$

[0012] Wird das elektrische Potenzial **U2** und der Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der Objektebene Pitch2 konstant gehalten, so lassen sich aus Gleichung (3) die verschiedenen Möglichkeiten ablesen, wie die numerische Apertur NA2 eingestellt werden könnte:

- Man kann die numerische Apertur bezogen auf die Zwischenbildebene verändern, z.B. durch Variieren des Apertur-Durchmessers der Multiaperturplatte des Multistrahl-Generators.
- Man kann einen anderen Multistrahl-Generator mit anderen Abständen zwischen den Öffnungen der Multiaperturplatte verwenden, wodurch der Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der Zwischenbildebene verändert wird.
- Man kann auch das elektrische Potenzial im Zwischenbild durch eine spezielle Booster-Elektrode verändern.

[0013] Die ersten zwei vorgeschlagene Lösungen haben den Nachteil, dass die Multiaperturplatte bei jeder Änderung des Arbeitspunktes ausgetauscht werden muss, was zeitaufwendig ist und schlimmstenfalls sogar dazu führen kann, dass das System neu zu justieren ist. Die dritte Lösung würde eine neue Hochspannungseinrichtung notwendig machen und zusätzliche Aberrationen einführen.

[0014] Die Erfinder haben stattdessen eine neue Möglichkeit entwickelt, um die numerische Apertur NA2 zu verändern, ohne die Abstände zwischen den Öffnungen oder den Durchmesser der Öffnungen der Multiaperturplatte zu ändern. Dabei wird der Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der Zwischenbildebene verändert, wobei gleichzeitig der Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen (Pitch2) in der Objektebene konstant gehalten wird. Ein Austausch der Multiaperturplatte ist dabei nicht notwendig, sondern es werden nur die Wirkungen von teilchenoptischen Komponenten, insbesondere des Multistrahl-Generators, anders eingestellt. Für die Einstellung des Strahlabstandes in der Zwischenbildebene benötigt man mindestens eine zusätzliche teilchenoptische Komponente, um auch bei einer Änderung des Strahlabstandes in der Zwischenbildebene die ande-

ren teilchenoptischen Parameter, die die teilchenoptische Abbildung charakterisieren, unabhängig voneinander einstellen oder konstant halten zu können. Diese zusätzliche teilchenoptische Komponente kann beispielsweise eine zusätzliche elektrostatische oder magnetische Feldlinse sein.

[0015] Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung bezieht sich diese somit auf ein Verfahren zum Betreiben eines Vielzahl-Teilchenstrahlsystems, wobei das teilchenoptische System eine Mehrzahl von teilchenoptischen Komponenten aufweist, die einen Multistrahlgenerator zur Erzeugung einer Vielzahl von Einzel-Teilchenstrahlen aus einem Teilchenstrahl umfassen und die von dem Einzel-Teilchenstrahl oder der Vielzahl von Einzel-Teilchenstrahlen im Wesentlichen durchsetzt werden, und wobei die Wirkungen der teilchenoptischen Komponenten auf den Einzel-Teilchenstrahl oder auf die Vielzahl von Einzel-Teilchenstrahlen einstellbar sind, und wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- Definieren eines ersten Arbeitspunktes des Systems;
- Einstellen der Wirkungen (**W11**..Wn1) der teilchenoptischen Komponenten an dem ersten Arbeitspunkt des Systems derart, dass eine erste Ebene mit Teilchen der Einzel-Teilchenstrahlen teilchenoptisch in eine zweite Ebene abgebildet wird, wobei die teilchenoptische Abbildung bei der Einstellung für den ersten Arbeitspunkt durch eine Vielzahl von n voneinander unabhängig einstellbaren teilchenoptischen Parametern p (p11..pn1) insbesondere vollständig charakterisierbar ist, wobei
 - p11 den Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene repräsentiert,
 - p21 den Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene repräsentiert, und
 - p31 die numerische Apertur der Mehrstrahl-Teilchenoptik bezogen auf die zweite Ebene repräsentiert, und

wobei die Werte folgender Parameter beim Einstellen der Wirkungen (**W11**..Wn1) am ersten Arbeitspunkt verändert werden:

- Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene, also p11, und
- die numerische Apertur der Mehrstrahl-Teilchenoptik bezogen auf die zweite Ebene, also p31, und

wobei die Werte der übrigen Parameter p beim Einstellen der Wirkungen (**W11**..Wn1) am ersten Arbeitspunkt im Wesentlichen konstant gehalten

werden und somit auch folgender Parameter p im Wesentlichen konstant gehalten wird:

- Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene, also p21.

[0016] In der obigen Notation bezieht sich der zweite Index immer auf den Arbeitspunkt, während der erste Index jedes Parameters gemäß der Parameteranzahl durchnummeriert wird.

[0017] Bei den geladenen Teilchen kann es sich zum Beispiel um Elektronen, Positronen, Myonen oder Ionen oder andere geladene Partikel handeln. Bevorzugt handelt es sich um Elektronen, die zum Beispiel mithilfe einer thermischen Feldemissionsquelle (TFE) erzeugt werden. Aber auch andere Teilchenquellen können Verwendung finden.

[0018] In der ersten Ebene liegen die virtuellen Teilchenquellen, die durch eine mehrfache Abbildung (Multibild) der einzelnen Teilchenquelle erzeugt werden. Bei der zweiten Ebene handelt es sich um die Objektebene, in die die virtuellen Teilchenquellen ihrerseits abgebildet werden.

[0019] Beim Einstellen der Wirkungen werden teilchenoptische Parameter p verändert oder konstant gehalten. Die teilchenoptischen Parameter p, die verändert werden, haben also zumindest am Ende eines Einstellvorganges andere Werte als zum Beginn des Einstellvorganges. Entsprechend haben teilchenoptische Parameter p, die konstant gehalten werden, zumindest am Ende des Einstellvorganges im Wesentlichen denselben Wert wie zu Beginn des Einstellvorganges.

[0020] Die teilchenoptische Abbildung wird durch n voneinander unabhängig einstellbare teilchenoptische Parameter p insbesondere vollständig charakterisiert. Charakterisiert sind also somit alle teilchenoptischen Parameter, die von Interesse sind. Es kann auch weitere Parameter geben, die nicht von Interesse sind. Ist die Charakterisierung der teilchenoptischen Abbildung vollständig, so beschreibt die Anzahl n der voneinander unabhängig einstellbaren teilchenoptischen Parameter die minimale Anzahl von Parametern p, die notwendig sind, um die gewünschte Charakterisierung zu erreichen. Sind mehr teilchenoptische Parameter m mit $m \geq n$ vorhanden, so müssen diese m Parameter zumindest teilweise voneinander abhängig sein. Um das System bei einer Vielzahl von n voneinander unabhängig einstellbaren teilchenoptischen Parametern p auf einen bestimmten Wert einstellen zu können, müssen die teilchenoptischen Komponenten des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems also über n Wirkungen verfügen, die jeweils unabhängig voneinander eingestellt werden können.

[0021] Ein Sonderfall, der von der oben beschriebenen allgemeinsten Ausführungsvariante der Erfindung mit

umfasst ist, liegt dann vor, wenn die teilchenoptische Abbildung durch drei voneinander unabhängig einstellbare Parameter p hinreichend charakterisiert wird. Weitere Parameter können dann zwar existieren, sind aber nicht von Interesse und werden deshalb bei der Charakterisierung auch nicht weiter berücksichtigt. Dann ist es so, dass die Art der drei Parameter bereits festgelegt ist. Es handelt sich dann um die folgenden Parameter:

- p_{11} , der den Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene repräsentiert,
- p_{21} , der den Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene repräsentiert, und
- p_{31} , der die numerische Apertur der Mehrstrahl-Teilchenoptik bezogen auf die zweite Ebene repräsentiert.

[0022] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist die Anzahl voneinander unabhängig einstellbarer Parameter p , die konstant gehalten werden, mindestens um eins kleiner als die Anzahl aller Wirkungen W_{ij} der teilchenoptischen Komponenten, die im System zur Verfügung stehen. Bei den teilchenoptischen Wirkungen handelt es sich um Einstellungsmöglichkeiten für Linsen und/ oder Deflektoren. Abzugrenzen sind die teilchenoptischen Parameter p insbesondere gegenüber mechanischen Parametern oder Parametern zur Arbeitspunkteinstellung des Systems.

[0023] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung erfolgt eine Variation des Abstandes der Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene im Wesentlichen durch das Einstellen einer Wirkung am Multistrahl-Generator und/ oder ein Einstellen des Fokus in der zweiten Ebene erfolgt im Wesentlichen durch das Einstellen einer Wirkung an einer anderen teilchenoptischen Komponente als dem Multistrahl-generator, insbesondere durch das Einstellen einer Wirkung an einer Feldlinse. Bei herkömmlichen Vielzahl-Teilchenstrahlensystemen gemäß dem Stand der Technik ist es oftmals so, dass mithilfe des Multistrahl-Generators (zusätzlich zu dessen Funktion der Einzel-Teilchenstrahlerzeugung) der Fokus der teilchenoptischen Abbildung in der zweiten Ebene eingestellt wird. Dass mithilfe des Multistrahl-Generators auch der Abstand der Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene variiert werden kann, ist so zunächst nicht zu erwarten, sondern hat sich überraschend bei Berechnungen und Simulationen gezeigt. Um zusätzlich zu der Variation des Abstandes der Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene auch den Fokus (ggf. wieder) einstellen zu können, wird deshalb eine andere teilchenoptische Komponente verwendet, die die Fokuseinstellungsfunktion des Multistrahl-Generators übernimmt. Eine einfache teilchenoptische Komponente für diese Fokuseinstellung stellt die er-

wähnte Feldlinse dar. Alternativ kann dafür eine Objektivlinse oder eine andere teilchenoptische Komponente verwendet werden.

[0024] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird bei dem Verfahren die numerische Apertur in der zweiten Ebene (Objektebene) optimiert. Diese Optimierung der numerischen Apertur kann direkt oder indirekt erfolgen. Es ist dafür also nicht notwendig, dass die numerische Apertur tatsächlich bestimmt oder gemessen wird. Stattdessen kann auch eine andere Größe gemessen werden, die prinzipiell mit der numerischen Apertur zusammenhängt.

[0025] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird die Auflösung der teilchenoptischen Abbildung optimiert. Die Auflösung kann durch Messungen ermittelt werden und ist deshalb einer Optimierung besonders gut zugänglich.

[0026] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung erfolgt das Einstellen der Wirkungen am ersten Arbeitspunkt iterativ. Hierbei nähert man sich also schrittweise der gesuchten Einstellung. Iterative Verfahren sind zum Betreiben des Vielzahl-Teilchenstrahlensystems bevorzugt, da das Einstellen einer einzigen Wirkung einer teilchenoptischen Komponente normalerweise Auswirkungen auf zum Teil deutlich mehr als einen einzelnen Parameter p hat. Dies ist also der Komplexität des Vielzahl-Teilchenstrahlensystems als solchem geschuldet.

[0027] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird an dem teilchenoptischen System kein mechanisch einstellbarer Parameter k verändert; und/ oder weder ein Durchmesser von Löchern einer Multiaperturplatte des Multistrahl-Generators, noch deren Abstände zueinander werden verändert; und/ oder der Multistrahl-Generator oder eine seiner Komponenten wird weder baulich verändert noch ganz oder teilweise ausgetauscht, noch in seiner Position verschoben; und/ oder die Position der zweiten Ebene und des Objektes bleibt unverändert. Hier zeigt sich die Eleganz des erfindungsgemäßen Verfahrens sehr deutlich: eine Variation der numerischen Apertur unter Konstanzhaltung des Strahlabstandes benachbarter Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene (Objektebene) kann allein durch die Einstellung von Wirkungen der teilchenoptischen Komponenten bewirkt werden. Das erfindungsgemäße Verfahren arbeitet somit sehr effizient, schnell und präzise.

[0028] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung wird ein Arbeitspunkt durch mindestens einen der folgenden Parameter definiert: Strahlstromstärke, Landeenergie, Position des Objektes, Durchmesser der Einzelstrahlquelle. Dabei wird der Durchmesser der virtuellen Teilchenquellen durch den

Durchmesser der Einzelstrahlquelle beeinflusst. Eine Variation der Strahlstromstärke hat einen Einfluss auf die Auflösung und den Durchsatz beim Abrastern eines Objektes. Eine Variation der Landeenergie hat einen Einfluss auf die Eindringtiefe in das Objekt.

[0029] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst das Einstellen der Wirkungen jeweils das Einstellen einer Spannung und/ oder eines Stromes.

[0030] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsvariante der Erfindung beschreiben die Parameter p teilchenoptische Eigenschaften der Mehrstrahl-Teilchenoptik, insbesondere den Strahlabstand der Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene, den Strahlabstand der Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene, eine Lage der zweiten Ebene (Objektebene, Fokusebene), Telezentrie der Einzel-Teilchenstrahlen beim Auftreffen auf die zweite Ebene und/ oder Rotation der Einzel-Teilchenstrahlen beim Auftreffen auf die zweite Ebene.

[0031] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist die erste Ebene eine Zwischenbildebene und/ oder die zweite Ebene ist eine Objektebene (Probenebene). In der Zwischenbildebene liegen die virtuellen Teilchenquellen.

[0032] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst der Multistrahl-Generator ein Multilinsen-Array und/ oder das Bild in der ersten Ebene ist ein reales Zwischenbild. Alternativ umfasst der Multistrahl-Generator ein Multideflektor-Array und/ oder das Bild in der ersten Ebene ist ein virtuelles Zwischenbild. In beiden Fällen liegen in der ersten Ebene die virtuellen Teilchenquellen. Das erfindungsgemäße Verfahren ist also in konstruktiv sehr unterschiedlichen Vielzahl-Teilchenstrahlssystemen einsetzbar und somit vorteilhaft sehr flexibel.

[0033] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung weist das Verfahren des Weiteren folgendes auf:

- Definieren eines zweiten Arbeitspunktes des Systems;
- Einstellen der Wirkungen ($W_{12}..W_{n2}$) der teilchenoptischen Komponenten an dem zweiten Arbeitspunkt des Systems derart, dass die erste Ebene mit Teilchen der Einzel-Teilchenstrahlen teilchenoptisch in die zweite Ebene abgebildet wird, wobei die teilchenoptische Abbildung bei der Einstellung für den zweiten Arbeitspunkt wiederum durch die n teilchenoptischen Parameter p ($p_{12}..p_{n2}$) charakterisierbar ist, und wobei

- p_{12} den Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene repräsentiert,

- p_{22} den Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene repräsentiert, und

- p_{32} die numerische Apertur der Mehrstrahl-Teilchenoptik bezogen auf die zweite Ebene repräsentiert,

wobei die Werte folgender Parameter beim Einstellen am zweiten Arbeitspunkt verglichen mit ihren Werten am ersten Arbeitspunkt des Systems verändert werden:

- Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene, also $p_{12} \neq p_{11}$ und

- die numerische Apertur der Mehrstrahl-Teilchenoptik bezogen auf die zweite Ebene, also $p_{32} \neq p_{31}$, und

wobei die Werte der übrigen Parameter p beim Einstellen am zweiten Arbeitspunkt verglichen mit ihren Werten am ersten Arbeitspunkt des Systems im Wesentlichen konstant gehalten werden und somit auch folgender Parameter p im Wesentlichen konstant gehalten wird:

- Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene, also $p_{22} = p_{21}$.

[0034] Das Einstellen der Wirkungen der teilchenoptischen Komponenten an dem zweiten Arbeitspunkt erfolgt also im Prinzip in völlig analoger Weise zur Einstellung der Wirkungen der teilchenoptischen Komponenten am ersten Arbeitspunkt. Entsprechend können auch ein dritter Arbeitspunkt, ein vierter Arbeitspunkt, ein fünfter Arbeitspunkt und weitere Arbeitspunkte definiert und die Wirkungen an diesen Arbeitspunkten eingestellt werden. Bevorzugt erfolgt das Einstellen der Wirkungen am zweiten Arbeitspunkt, an einem dritten, vierten, fünften und/ oder einem oder mehreren weiteren Arbeitspunkten iterativ.

[0035] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird das Verfahren ganz oder teilweise mehrfach ausgeführt. Dies kann sich insbesondere auf Einstellungen für mehrere Arbeitspunkte beziehen, es kann sich aber auch auf die iterative Ausführungsweise eines Einstellungsvorganges beziehen. Außerdem ist es möglich, dass ein Einstellen wiederholt wird, wenn die gefundene Einstellung aus irgendeinem Grunde nicht das gewünschte Resultat liefert.

[0036] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung werden die ermittelten Wirkungen, insbesondere Ströme und/ oder Spannungen, für einen

oder mehrere Arbeitspunkte in einer Nachschlagetabelle gespeichert. Dabei ist es möglich, dass in dieser Nachschlagetabelle bereits die Wirkungen für einen ersten Arbeitspunkt vorab eingetragen sind, da diese Werte bereits aus dem Optikdesign bekannt sind. Es ist aber auch möglich, dass auch die Wirkungen am ersten Arbeitspunkt erst ermittelt werden müssen und die (optimalen) Wirkungen erst eingestellt werden. Das Ablegen der Werte von Wirkungen für einen oder mehrere Arbeitspunkte in einer Nachschlagetabelle hat den Vorteil, dass das Vielzahl-Teilchenstrahlensystem sehr schnell optimal an unterschiedlichen Arbeitspunkten betrieben werden kann. Es ist also nicht notwendig, bei jeder Änderung eines Arbeitspunktes erneut das gesamte System neu einzustellen bzw. neu bezüglich der Auflösung zu optimieren. Das erfindungsgemäße Verfahren dient also zur Justierung des Vielzahl-Teilchenstrahlensystems an einer Mehrzahl von Arbeitspunkten. Bei späteren Messungen ist es dann durch Auswahl eines Arbeitspunktes möglich, sofort mit optimalen Einstellungen der Wirkungen, die vorab bestimmt und gespeichert wurden, den Messprozess zu beginnen.

[0037] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung bezieht sich diese auf ein Computerprogrammprodukt mit einem Programmcode zum Ausführen des Verfahrens gemäß einer der vorstehend beschriebenen Ausführungsvarianten. Der Programmcode kann dabei in einen oder mehrere Teilcodes untergliedert sein. Es bietet sich zum Beispiel an, den Code zur Steuerung des Vielzahl-Teilchenstrahlensystems separat in einem Programmteil vorzusehen, während ein anderer Programmteil die Routinen für das Betreiben des Vielzahl-Teilchenstrahlensystems im Rahmen der vorstehend beschriebenen Justierung beinhaltet.

[0038] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung bezieht sich diese auf ein Vielzahl-Teilchenstrahlensystem, insbesondere zum Ausführen des Verfahrens wie im Zusammenhang mit dem ersten Aspekt der Erfindung beschrieben, das Folgendes aufweist:

- eine erste Mehrstrahl-Teilchenoptik mit teilchenoptischen Komponenten, die einen Multistrahlgenerator zur Erzeugung einer Vielzahl von Einzel-Teilchenstrahlen aus einem Teilchenstrahl umfasst, und die dazu konfiguriert ist, die Einzel-Teilchenstrahlen auf ein Objekt zu richten; und
- eine Steuerung;

wobei die Steuerung konfiguriert ist, die Wirkungen der teilchenoptischen Komponenten der ersten Mehrstrahl-Teilchenoptik auf die Einzel-Teilchenstrahlen an einem ersten Arbeitspunkt derart einzustellen, dass eine erste Ebene mit Teilchen der Einzel-Teilchenstrahlen teilchenoptisch in eine zweite Ebene abgebildet wird, wobei die zweite Ebene mit der Ebene des Objektes zusammenfällt; und

wobei die Steuerung ferner dazu konfiguriert ist, den Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene zu variieren, den Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene konstant zu halten, und die numerische Apertur bezogen auf die zweite Ebene zu variieren.

[0039] Außerdem ist es möglich, alle übrigen teilchenoptischen Parameter p , die die teilchenoptische Abbildung charakterisieren, durch die Steuerung ebenfalls konstant zu halten und die Wirkungen der teilchenoptischen Komponenten durch die Steuerung entsprechend so einzustellen, dass dieses Ziel realisiert wird. Ein Variieren der numerischen Apertur bezogen auf die zweite Ebene ist bevorzugt ein Optimieren der numerischen Apertur.

[0040] Hinsichtlich der Definition der teilchenoptischen Komponenten gilt das bereits im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren Ausgeführte.

[0041] Auch hinsichtlich der übrigen Definitionen und der Terminologie gilt das bereits in Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren Ausgesagte.

[0042] Die Steuerung des Vielzahl-Teilchenstrahlensystems erfolgt computerimplementiert. Sie kann insbesondere konfiguriert sein, um das erfindungsgemäße Verfahren - wie oben beschrieben - auszuführen.

[0043] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsvariante der Erfindung ist die Steuerung des Vielzahl-Teilchenstrahlensystems so konfiguriert, dass eine Variation des Abstandes der Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene im Wesentlichen durch das Einstellen einer Wirkung am Multistrahlgenerator erfolgt, und/ oder die Steuerung ist so konfiguriert, dass ein Einstellen des Fokus in der zweiten Ebene im Wesentlichen durch das Einstellen einer Wirkung an einer anderen teilchenoptischen Komponente als dem Multistrahlgenerator, insbesondere durch das Einstellen einer Wirkung an einer Feldlinse, erfolgt.

[0044] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist der Multistrahlgenerator relativ zu den übrigen teilchenoptischen Komponenten des Vielzahl-Teilchenstrahlensystems, raumfest angeordnet. Auch erfolgt keine mechanische Veränderung der Position des Objekts in Richtung der optischen Achse, d.h. des Arbeitsabstands zwischen der Objektfläche und der Objektivlinse. Es ist also für die Einstellung der Wirkungen mithilfe der Steuerung nicht erforderlich, den Multistrahlgenerator oder irgendeine andere teilchenoptische Komponente des Vielzahl-Teilchenstrahlensystems oder das Objekt in irgendeiner Form zu bewegen..

[0045] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst der Multistrahl-Generator ein Multilinsen-Array und/oder das Bild in der ersten Ebene ist ein reelles Zwischenbild. Alternativ umfasst der Multistrahl-Generator ein Multidefektor-Array und/oder das Bild in der ersten Ebene ist ein virtuelles Zwischenbild. In beiden Fällen gilt auch hier, dass in der Zwischenbildebene virtuelle Teilchenquellen liegen, die mehrfache Bilder der realen Teilchenquelle sind. Das Vielzahl-Teilchenstrahlsystem kann also flexibel realisiert werden.

[0046] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist die Steuerung des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems ferner dazu konfiguriert, die Auflösung der teilchenoptischen Abbildung zu optimieren. Hierzu kann in dem System insbesondere ein Feedback-Loop vorgesehen sein, wobei für verschiedene Einstellungen von Wirkungen die erzielte Auflösung der Abbildung ermittelt und an die Steuerung rückgemeldet wird. Konvergiert der Wert für die Auflösung bei solch einem iterativen Prozess, so handelt es sich bei dem Grenzwert normalerweise um die optimierte Auflösung.

[0047] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung weist das Vielzahl-Teilchenstrahlsystem des Weiteren einen Speicher mit einer Nachschlagetabelle auf, in der Wirkungen der teilchenoptischen Komponenten, insbesondere Ströme und/oder Spannungen, für einen oder mehrere Arbeitspunkte abspeicherbar oder abgespeichert sind. Es ist also möglich, dass die Nachschlagetabelle bereits mit Werten versehen ist, es ist aber auch möglich, dass die Nachschlagetabelle lediglich angelegt ist, um dann in der Folge mit Werten versehen zu werden. Diese können insbesondere mithilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung ermittelt werden. Hinsichtlich der Arbeitspunkte gilt das bereits in Zusammenhang mit dem ersten Aspekt der Erfindung Ausgeführte.

[0048] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung weist das Vielzahl-Teilchenstrahlsystem des Weiteren eine Eingabeeinheit zum Auswählen eines Arbeitspunktes aus der Nachschlagetabelle auf. Dabei ist es bevorzugt so, dass nach dem Justieren des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems für mehrere Arbeitspunkte für die sich anschließenden eigentlichen Aufnahmen oder Messungen mithilfe des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems ein Arbeitspunkt aus der Nachschlagetabelle ausgewählt wird. Für diesen Arbeitspunkt sind dann sämtliche Wirkungen der teilchenoptischen Komponenten bekannt, die zum Beispiel erforderlich sind, um das Vielzahl-Teilchenstrahlsystem mit einer optimalen Auflösung zu betreiben. Das Vorsehen der Eingabeeinheit erlaubt also ein sehr flexibles Arbeiten mithilfe des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems bei verschiedenen Anforderungen an das Abrastern eines Objektes.

[0049] Natürlich ist es möglich, das Vielzahl-Teilchenstrahlsystem auch mit einer zweiten Mehrstrahl-Teilchenoptik auszustatten, die zum Beispiel eine entsprechende Detektion von aus dem Objekt ausgelösten Sekundärelektronen in orts aufgelöster Art und Weise ermöglicht. Einzelheiten zu entsprechenden Optiken finden sich zum Beispiel in der vorgenannten WO 2005/024 881 A2.

[0050] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung weist der Multistrahl-Generator ein Multilinsen-Array auf, wobei in Strahlrichtung hinter dem Multistrahl-Generator ein Feldlinsensystem angeordnet ist, das mindestens vier voneinander unabhängig einstellbare Teilchenlinsen aufweist.

[0051] Gemäß einer alternativen Ausführungsform der Erfindung weist der Multistrahl-Generator ein Multidefektor-Array auf, wobei in Strahlrichtung hinter dem Multistrahl-Generator ein Feldlinsensystem angeordnet ist, das mindestens drei voneinander unabhängig einstellbare Teilchenlinsen aufweist.

[0052] Gemäß einem vierten Aspekt der Erfindung bezieht sich diese auf die Verwendung des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems, wie in Zusammenhang mit dem dritten Aspekt der Erfindung beschrieben, zum Optimieren der numerischen Apertur und/oder der Auflösung des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems an einem Arbeitspunkt. Die Tatsache, dass es das erfindungsgemäße Vielzahl-Teilchenstrahlsystem ermöglicht, die numerische Apertur und/oder die Auflösung des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems an einem Arbeitspunkt einzustellen, ist die wesentliche Stärke des beschriebenen Vielzahl-Teilchenstrahlsystems. Hierdurch gelingen bestmögliche Aufnahmen von Objekten.

[0053] Verschiedene Ausführungsformen der Erfindung können ganz oder teilweise miteinander kombiniert werden, sofern sich hierdurch keinerlei technische Widersprüche ergeben.

[0054] Die Erfindung wird noch besser verstanden werden unter Bezugnahme auf die beigefügten Figuren. Dabei zeigen:

Fig. 1: zeigt ein Mehrstrahl-Teilchenmikroskop in schematischer Darstellung;

Fig. 2: zeigt zwei Vielzahl-Teilchenstrahlsysteme mit unterschiedlichen Multistrahl-Generatoren in schematischer Darstellung;

Fig. 3: illustriert den Strahlengang der Teilchenstrahlen des Systems aus **Fig. 2a** zu Beginn und am Ende eines Einstellungsvorganges für die numerische Apertur;

Fig. 4: illustriert den Strahlengang der Teilchenstrahlen an zwei verschiedenen Arbeitspunkten des Systems aus **Fig. 2b**;

Fig. 5: zeigt das System aus **Fig. 2a** mit nachfolgender Abbildung von Sekundärelektronen auf einen Teilchen-Multi-Detektor;

Fig. 6: zeigt das System aus **Fig. 2b** mit nachfolgender Abbildung von Sekundärelektronen auf einen Teilchen-Multi-Detektor; und

Fig. 7: zeigt ein Flussdiagramm zur Optimierung der Auflösung.

[0055] **Fig. 1** ist eine schematische Darstellung eines Teilchenstrahlsystems **1** in Form eines Mehrstrahl-Teilchenmikroskops **1**, welches eine Vielzahl von Teilchenstrahlen einsetzt. Das Teilchenstrahlsystem **1** erzeugt eine Vielzahl von Teilchenstrahlen, welche auf ein zu untersuchendes Objekt treffen, um dort Wechselwirkungsprodukte, bspw. Sekundärelektronen, zu generieren, welche von dem Objekt ausgehen und nachfolgend detektiert werden. Das Teilchenstrahlsystem **1** ist vom Rasterelektronenmikroskop-Typ („scanning electron microscope“, SEM), welches mehrere primäre Teilchenstrahlen **3** einsetzt, die an mehreren Orten **5** auf eine Oberfläche des Objekts **7** auftreffen und dort mehrere räumlich voneinander getrennte Elektronenstrahlflecken oder Spots erzeugen. Das zu untersuchende Objekt **7** kann von einer beliebigen Art sein, bspw. ein Halbleiterwafer oder eine biologische Probe, und eine Anordnung miniaturisierter Elemente oder dergleichen umfassen. Die Oberfläche des Objekts **7** ist in einer ersten Ebene **101** (Objektebene) einer Objektivlinse **102** eines Objektivlinsensystems **100** angeordnet.

[0056] Der vergrößerte Ausschnitt I_1 der **Fig. 1** zeigt eine Draufsicht auf die Objektebene **101** mit einem regelmäßigen rechtwinkligen Feld **103** von Auftrefforten **5**, welche in der ersten Ebene **101** gebildet werden. In **Fig. 1** beträgt die Zahl der Auftrefforte **25**, welche ein 5×5 -Feld **103** bilden. Die Zahl **25** an Auftrefforten ist eine aus Gründen der vereinfachten Darstellung gewählte Zahl. In der Praxis kann die Zahl an Strahlen, und damit die Zahl der Auftrefforte, wesentlich größer gewählt werden, wie bspw. 20×30 , 100×100 und dergleichen.

[0057] In der dargestellten Ausführungsform ist das Feld **103** von Auftrefforten **5** ein im Wesentlichen regelmäßiges rechtwinkliges Feld mit einem konstanten Abstand P_1 zwischen benachbarten Auftrefforten. Beispielhafte Werte des Abstands P_1 sind 1 Mikrometer, 10 Mikrometer und 40 Mikrometer. Es ist jedoch auch möglich, dass das Feld **103** andere Symmetrien aufweist, wie bspw. eine hexagonale Symmetrie.

[0058] Ein Durchmesser der in der ersten Ebene **101** geformten Strahlflecken kann klein sein. Beispielhafte Werte dieses Durchmessers betragen 1 Nanometer, 5 Nanometer, 10 Nanometer, 100 Nanometer und 200 Nanometer. Das Fokussieren der Partikelstrah-

len **3** zur Formung der Strahlflecken **5** erfolgt durch das Objektivlinsensystem **100**.

[0059] Die auf das Objekt treffenden Primärteilchen generieren Wechselwirkungsprodukte bspw. Sekundärelektronen, Rückstreuелеktronen oder Primärteilchen, die aus anderweitigen Gründen eine Bewegungsumkehr erfahren haben, welche von der Oberfläche des Objekts **7** oder von der ersten Ebene **101** ausgehen. Die von der Oberfläche des Objekts **7** ausgehenden Wechselwirkungsprodukte werden durch die Objektivlinse **102** zu sekundären Teilchenstrahlen **9** geformt. Das Teilchenstrahlsystem **1** stellt einen Teilchenstrahlengang **11** bereit, um die Vielzahl sekundärer Teilchenstrahlen **9** einem Detektorsystem **200** zuzuführen. Das Detektorsystem **200** umfasst eine Teilchenoptik mit einer Projektionslinse **205**, um die sekundären Teilchenstrahlen **9** auf einen Teilchen-Multi-Detektor **209** zu richten.

[0060] Der Ausschnitt I_2 in **Fig. 1** zeigt eine Draufsicht auf die Ebene **211**, in welcher einzelne Detektionsbereiche des Teilchen-Multi-Detektors **209** liegen, auf welche die sekundären Teilchenstrahlen **9** an Orten **213** auftreffen. Die Auftrefforte **213** liegen in einem Feld **217** mit einem regelmäßigen Abstand P_2 zueinander. Beispielhafte Werte des Abstands P_2 sind 10 Mikrometer, 100 Mikrometer und 200 Mikrometer.

[0061] Die primären Teilchenstrahlen **3** werden in einer Strahlerzeugungsvorrichtung **300** erzeugt, welche wenigstens eine Teilchenquelle **301** (z.B. eine Elektronenquelle), wenigstens eine Kollimationslinse **303**, eine Multiaperturanordnung **305** und eine Feldlinse **307**, oder ein Feldlinsensystem aus mehreren Feldlinsen, umfasst. Die Teilchenquelle **301** erzeugt einen divergierenden Teilchenstrahl **309**, welcher durch die Kollimationslinse **303** kollimiert oder zumindest weitgehend kollimiert wird, um einen Strahl **311** zu formen, welcher die Multiaperturanordnung **305** beleuchtet.

[0062] Der Ausschnitt I_3 in **Fig. 1** zeigt eine Draufsicht auf die Multiaperturanordnung **305**. Die Multiaperturanordnung **305** umfasst eine Multiaperturplatte **313** welche eine Mehrzahl von darin ausgebildeten Öffnungen bzw. Aperturen **315** aufweist. Mittelpunkte **317** der Öffnungen **315** sind in einem Feld **319** angeordnet, welches auf das Feld **103** abgebildet wird, welches durch die Strahlflecken **5** in der Objektebene **101** gebildet wird. Ein Abstand P_3 der Mittelpunkte **317** der Aperturen **315** voneinander kann beispielhafte Werte von 5 Mikrometer, 100 Mikrometer und 200 Mikrometer aufweisen. Die Durchmesser D der Aperturen **315** sind kleiner als der Abstand P_3 der Mittelpunkte der Aperturen. Beispielhafte Werte der Durchmesser D sind $0,2 \times P_3$, $0,4 \times P_3$ und $0,8 \times P_3$.

[0063] Teilchen des beleuchtenden Teilchenstrahles **311** durchsetzen die Aperturen **315** und bilden Teilchenstrahlen **3**. Teilchen des beleuchtenden Strahles **311**, welche auf die Platte **313** treffen, werden durch diese abgefangen und tragen nicht zur Bildung der Teilchenstrahlen **3** bei.

[0064] Die Multiaperturanordnung **305** fokussiert aufgrund eines angelegten elektrostatischen Felds jeden der Teilchenstrahlen **3** derart, dass in einer Ebene **325** Strahlfoki **323** gebildet werden. Alternativ können die Strahlfoki **323** virtuell sein. Ein Durchmesser der Strahlfoki **323** kann bspw. 10 Nanometer, 100 Nanometer und 1 Mikrometer betragen.

[0065] Die Feldlinse **307** und die Objektivlinse **102** stellen eine erste abbildende Teilchenoptik bereit, um die Ebene **325**, in der die Strahlfoki **323** gebildet werden, auf die erste Ebene **101** abzubilden, so dass dort ein Feld **103** von Auftrefforten **5** bzw. Strahlflecken entsteht. Soweit in der ersten Ebene eine Oberfläche des Objekts **7** angeordnet ist, werden die Strahlflecken entsprechend auf der Objektoberfläche gebildet.

[0066] Die Objektivlinse **102** und die Projektionslinsenordnung **205** stellen eine zweite abbildende Teilchenoptik bereit, um die erste Ebene **101** auf die Detektionsebene **211** abzubilden. Die Objektivlinse **102** ist somit eine Linse, welche sowohl Teil der ersten als auch der zweiten Teilchenoptik ist, während die Feldlinse **307** nur der ersten Teilchenoptik und die Projektionslinse **205** nur der zweiten Teilchenoptik angehören.

[0067] Eine Strahlweiche **400** ist in dem Strahlengang der ersten Teilchenoptik zwischen der Multiaperturanordnung **305** und dem Objektivlinsensystem **100** angeordnet. Die Strahlweiche **400** ist auch Teil der zweiten Optik im Strahlengang zwischen dem Objektivlinsensystem **100** und dem Detektorsystem **200**.

[0068] Weitergehende Informationen zu solchen Vielstrahl-Teilchenstrahlsystemen und darin eingesetzten Komponenten, wie etwa Teilchenquellen, Multiaperturplatte und Linsen, kann aus den internationalen Patentanmeldungen WO 2005/ 024881, WO 2007/028595, WO 2008/028596, WO 2011/124352 und WO 2007/060017 und den deutschen Patentanmeldungen mit den Anmeldeummern DE 10 2013 026 113.4 und DE 10 2013 014 976.2 erhalten werden, deren Offenbarung vollumfänglich durch in Bezugnahme in die vorliegende Anmeldung aufgenommen wird.

[0069] Das Vielzahl-Teilchenstrahlsystem weist weiterhin ein Computersystem **10** auf, das sowohl zur Steuerung der einzelnen teilchenoptischen Komponenten des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems ausgebil-

det ist, als auch zur Auswertung und Analyse der mit dem Multi-Detektor **209** gewonnenen Signale. Das Computersystem **10** kann dabei aus mehreren Einzelcomputern oder Komponenten aufgebaut sein.

[0070] In dieses Vielzahl-Teilchenstrahlsystem kann nun eine teilchenoptische Variationskomponente zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens integriert werden.

[0071] Fig. 2 zeigt zwei Vielzahl-Teilchenstrahlsysteme mit unterschiedlichen Multistrahl-Generatoren in schematischer Darstellung. Fig. 2a zeigt dabei ein System mit einem Multistrahl-Generator **350**, der ein Multilinsen-Array bestehend aus einer Multiaperturplatte **351** und einer Gegenelektrode **352** aufweist. Demgegenüber umfasst das System gemäß Fig. 2b einen Multistrahl-Generator **360**, der eine Multiaperturplatte **361** und ein Multidefektor-Array **362** aufweist.

[0072] Der Strahlengang der Teilchen ist dabei zunächst in beiden Fällen ähnlich: in der Teilchenstrahlquelle **301**, der sogenannten Tip, treten Teilchen, zum Beispiel Elektronen, aus. Die optische Achse des Systems verläuft dabei ausgehend von der Teilchenquelle **301** in Fig. 2 (sowie den folgenden Fig. 3 bis Fig. 6) senkrecht von oben nach unten. Die aus der Teilchenstrahlquelle **301** austretenden Teilchen durchsetzen ein Kondensor-Linsen-System **303** und treffen dann als ein im Wesentlichen parallelisiertes Teilchenstrahlenbündel auf den Multistrahl-Generator **350** (Fig. 2a), oder als ein leicht divergentes oder konvergentes Teilchenstrahlenbündel auf den Multistrahl-Generator **360** (Fig. 2b zeigt den divergenten Fall). In dem Multistrahl-Generator **350**, **360** werden also die Einzel-Teilchenstrahlen erzeugt. Der Erzeugungsmechanismus ist je nach verwendetem Multistrahl-Generator-Typ **350**, **360** verschieden.

[0073] In dem Multistrahl-Generator **350**, der das Multilinsen-Array bestehend aus einer Multiaperturplatte **351** und einer Gegenelektrode **352** umfasst, werden die beim Durchsetzen der Multiaperturplatte **351** gebildeten Einzel-Teilchenstrahlen **3** fokussiert und ein Stück weit auseinandergezogen. Dazu wird eine Spannungsdifferenz zwischen der Multiaperturplatte **351** und einer Gegenelektrode **352** angelegt. Dabei werden die Einzel-Teilchenstrahlen auf die Foki **323** in einer Ebene **E1** fokussiert, die in Strahlausbreitungsrichtung gesehen hinter (auf der von der Teilchenstrahlquelle **301** abgewandten Seite) der Multiaperturplatte **350** liegt, und es entsteht ein reelles Zwischenbild der Foki **323** in der Ebene **E1**. Die Foki **323** bilden dabei mehrfache Bilder der realen Teilchenstrahlquelle **301**. Diese Bilder können im Folgenden als virtuelle Teilchenstrahlquellen **323** aufgefasst werden. Es ist die Funktionalität des Auseinanderziehens der Einzel-Teilchenstrahlen **3**, die es dem Multistrahl-Generator **350** erlaubt, den Strahlabstand

der Einzel-Teilchenstrahlen in der Ebene **E1**, oder anders gesagt, den Abstand zwischen den Foki **323**, zu ändern.

[0074] Die erste Ebene **E1** mit den Foki **323** wird im Folgenden teilchenoptisch in die zweite Ebene **E2** abgebildet, die hier durch die Oberfläche der Probe **7** gebildet wird. Im Strahlengang zwischen den Ebenen **E1** und **E2** befindet sich zusätzlich zu einem Feldlinsensystem **307**, das drei unabhängig voneinander einstellbare Linsen aufweist, der Strahlweiche **400** und der Objektivlinse **102** eine zusätzliche Feldlinse **370**.

[0075] Das in **Fig. 2b** dargestellten System weist in dem Multistrahl-Generator **360** ein Multideflektor-Array auf, um eine Vielzahl von divergenten Einzel-Teilchenstrahlen **3** zu erzeugen. Verfolgt man die Einzel-Teilchenstrahlen **3** in Richtung der Teilchenstrahlquelle **301** zurück, so scheinen diese ihren Ursprung in den Foki **323** in einer Bildebene **E1** zu haben, die von der Multiaperturplatte **360** aus betrachtet auf der Seite der Teilchenstrahlquelle **301** liegt. Daher spricht man in diesem Fall von virtuellen Foki **323** und einer virtuellen Zwischenbildebene **E1**. Ähnlich wie beim Ausführungsbeispiel in **Fig. 2a** können die Foki **323** als virtuelle Teilchenquellen und Bilder der realen Teilchenstrahlquelle **301** angesehen werden. Auch bei der Ausführungsvariante gemäß **Fig. 2b** werden die virtuellen Teilchenquellen **323** durch eine teilchenoptische Abbildung auf die Ebene **E2** abgebildet, in der die Oberfläche des Objektes **7** positioniert sein sollte. Auch hier ist im Strahlengang der Einzel-Teilchenstrahlen **3** zusätzlich zu einem Feldlinsensystem **307** eine zusätzliche Feldlinse **370** vorgesehen. Bei der Ausführungsform in **Fig. 2b** kann durch Einstellen der Deflektionsstärke der Einzeldeflektoren im Multideflektor-Array der Strahlabstand der Einzel-Teilchenstrahlen in der Ebene **E1**, oder anders gesagt, der Abstand zwischen den Foki **323**, geändert werden.

[0076] Der Multistrahl-Generator kann auch eine Kombination eines Multilinsen-Arrays und eines Multideflektor-Arrays aufweisen (nicht dargestellt). Auch ist es möglich, dass mittels eines Multideflektor-Arrays reale Foki **323** gebildet werden, z.B. indem der primäre Einzel-Teilchenstrahl konvergent auf den Multistrahl-Generator **360** trifft. Wichtig ist aber, dass der Multistrahl-Generator **350**, **360** es erlaubt, die Abstände der Foki **323** der Einzel-Teilchenstrahlen **3** zu ändern.

[0077] In den beiden Fällen, die in den **Fig. 2a** und **Fig. 2b** gezeigt sind, ist die numerische Apertur in der Objektebene **E2** einstellbar. Dabei wird im Wesentlichen mithilfe des Multistrahl-Generators **350**, **360** der Abstand der Foki **323** zueinander in der Zwischenbildebene **E1** eingestellt. Bei der in **Fig. 2a** dargestellten Ausführungsform erfolgt die Einstellung der Ab-

stände der Foki **323** durch eine geeignete Änderung der Linsenwirkung der aus der Multiaperturplatte **351** und der Gegenelektrode **352** gebildeten elektrostatischen Linse durch eine Änderung der Potenzialdifferenz zwischen Multiaperturplatte **351** und der Gegenelektrode **352**. Bei der in **Fig. 2b** dargestellten Ausführungsform erfolgt die Einstellung der Abstände der Foki **323** durch eine geeignete Änderung der Ablenkungen durch das Multideflektor-Array **362**. Gleichzeitig wird mindestens eine teilchenoptische Komponente im System so eingestellt, dass sich der Strahlabstand in der Objektebene **E2**, also der Pitch2, nicht ändert.

[0078] Die zusätzliche Feldlinse **370** dient im gezeigten Beispiel im Wesentlichen zur Einstellung oder Beibehaltung des Fokus in der Objektebene **E2**. Mit einer Änderung der Abstände der Foki **323** geht grundsätzlich auch eine Verlagerung der reellen oder virtuellen Zwischenbildebene **E1** einher. Allerdings ist diese Verlagerung der reellen oder virtuellen Zwischenbildebene **E1** entlang der optischen Achse gering im Vergleich zu der erzielten Änderung der Abstände der Foki **323**. Durch die zusätzliche Feldlinse **370** wird der erforderliche Freiheitsgrad gewonnen, die Abbildung der Zwischenbildebene **E1** in die Objektebene **E2** bei gleichzeitiger Beibehaltung der Orientierung der Foki in der Objektebene (Rotation), des Abstands der Foki in der Objektebene (Pitch2) und der Telezentriebedingungen der in die Objektebene **E2** einfallenden Einzel-Teilchenstrahlen **3**, **3a** sicher zu stellen. Die Position der zusätzlichen Feldlinse **370** im Strahlengang ist dabei nicht fest vorgegeben.

[0079] Wesentlich für die vorliegende Erfindung ist, dass sich durch eine Änderung der Linsenwirkung der aus der Multiaperturplatte **351** und der Gegenelektrode **352** bestehenden Linse das Produkt aus numerischer Apertur und Pitch in der Zwischenbildebene **E1** verändern lässt. Das ist deshalb möglich, weil für die Wirkung dieses Systems aus Multiaperturplatte **351** und der Gegenelektrode **352** nicht die sonst üblichen paraxialen Näherungen anwendbar sind.

[0080] **Fig. 3** illustriert den Strahlengang der Teilchenstrahlen bei zwei unterschiedlich eingestellten numerischen Aperturen des Systems aus **Fig. 2a**. Diese zwei unterschiedlichen numerischen Aperturen liegen im gezeigten Beispiel zu Beginn eines Einstellungsvorganges und am Ende eines Einstellungsvorganges für die numerische Apertur vor. Alternativ ist es möglich, mit den in **Fig. 3a** und **Fig. 3b** gezeigten Beispielen optimal eingestellte numerische Aperturen an zwei verschiedenen Arbeitspunkten des Systems aufzufinden.

[0081] Der Multistrahl-Generator **350** weist ein Multilinsen-Array bestehend aus einer Multiaperturplatte **351** und einer Gegenelektrode **352** auf. In **Fig. 3a** ist der Strahlengang der Einzel-Teilchenstrahlen **3** zu

Beginn des Einstellvorganges dargestellt, das in **Fig. 3b** gezeigte Beispiel zeigt das dargestellte System am Ende des Einstellvorganges. Der Strahlengang am Ende des Einstellvorganges ist für die Einzel-Teilchenstrahlen **3a** dargestellt, die strichpunktiert gezeichnet sind. Am Ende des Einstellvorganges sollte die numerische Apertur so eingestellt sein, dass eine bestmögliche Auflösung bei der teilchenoptischen Abbildung erhalten wird. Für eine optimale Einstellung ist dabei der Fokusbereich der Einzel-Teilchenstrahlen **3a** auf dem Objekt minimiert. Zum Bestimmen der Auflösung sind dem Fachmann verschiedene Vorgehensweise geläufig. Zum Beispiel kann mithilfe einer Testprobe gearbeitet werden, die eine definierte scharfe Kante aufweist. In einem teilchenoptischen Bild erscheint diese Kante nicht mehr ganz so scharf, sondern ist aufgrund des endlichen Fokusbereichs der Einzel-Teilchenstrahlen verschmiert, woraus Rückschlüsse auf den Fokusbereich der Einzel-Teilchenstrahlen gezogen werden können. Die mit dem Vielzahl-Teilchenstrahlensystem erreichbare Auflösung ist im Wesentlichen durch den Fokusbereich der Einzel-Teilchenstrahlen definiert.

[0082] In **Fig. 3b** erkennt man Folgendes: Die in der Ebene **E1** erzeugten Bilder **323a** der Teilchenstrahlquelle **301** liegen nun weiter auseinander als in **Fig. 3a**. Die virtuellen Teilchenquellen **323a** sind hier durch Sterne kenntlich gemacht und ihre verschobene Position zu den Strahlfoki **323** zu Beginn des Einstellvorganges des Systems ist dargestellt. Das System aus der zusätzlichen Feldlinse **370** mit dem dreilinsigen Feldlinsensystem **307** (das System ist hier also insgesamt vierlinsig) ist so eingestellt, dass die Einzel-Teilchenstrahlenbündel **3a** unter Beibehaltung der Telezentriebedingungen in der Ebene **E2** oder Objektebene auftreffen (in der **Fig. 3b** ist ein telezentrischer Einfall der Einzel-Teilchenstrahlenbündel **3a** dargestellt), aber unter einer größeren numerischen Apertur (erkennbar an dem aufgeweiteten Strahlkegel der Einzel-Teilchenstrahlen **3a** zwischen der Objektivlinse **102** und der Ebene **E2**). Diese Ausweitung des Strahlkegels entspricht der Veränderung der numerischen Apertur, die in der Figur durch den Doppelpfeil und die Bezeichnung NAV angedeutet ist. Dennoch bleibt der Strahlabstand der Einzel-Teilchenstrahlen **3, 3a** in der Ebene **E2** zueinander unverändert (Pitch2 bleibt konstant). Weiterhin können optional die Orientierung der Einzel-Teilchenstrahlen **3, 3a** in der Ebene **E2** um die optische Achse herum und die Fokussierung der Einzel-Teilchenstrahlen **3, 3a** in der Ebene **E2** unverändert beibehalten werden.

[0083] Außerdem können auch alle anderen nicht explizit genannten teilchenoptischen Parameter p , die die teilchenoptische Abbildung insbesondere vollständig charakterisieren, konstant gehalten werden. Verändert werden dann also nur der Strahlabstand

zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene **E1** sowie die numerische Apertur der Mehrstrahl-Teilchenoptik bezogen auf die zweite Ebene **E2** und ggf. davon abhängige Größen.

[0084] Bei dem System in **Fig. 3** wurden außer den Wirkungs-Einstellungen an den teilchenoptischen Komponenten keine weiteren Veränderungen vorgenommen. Die Änderung der numerischen Apertur kann also allein über die Einstellung der Wirkungen beziehungsweise Erregungen erfolgen. Es sind keine baulichen Veränderungen notwendig, es muss insbesondere kein Multistrahl-Generator oder eine seiner Komponenten baulich verändert, bewegt oder gar ausgetauscht werden.

[0085] **Fig. 4.** illustriert den Strahlengang der Teilchenstrahlen an zwei verschiedenen Arbeitspunkten des Systems aus **Fig. 2b** mit jeweils final eingestellter numerischer Apertur. Hierbei kommt als Multistrahl-Generator **360** ein Multidefektor-Array **362** in Kombination mit einer Multiaperturplatte **361** zum Einsatz. Der Strahlengang am ersten Arbeitspunkt ist als durchgezogene Linie (Einzel-Teilchenstrahlen **3**), der Strahlengang am zweiten Arbeitspunkt wiederum strichpunktiert dargestellt (Einzel-Teilchenstrahlen **3a**).

[0086] Auch bei dieser Ausführungsvariante der Erfindung ist es so, dass der Abstand der Einzel-Teilchenstrahlen in der virtuellen Zwischenbildebene **E1** durch eine Veränderung der mit dem Multidefektor-Array **362** erzielten Ablenkungen variiert wird (Pitch1 variiert). Die Foki **323a** am zweiten Arbeitspunkt sind durch die Sterne angedeutet. Die Foki **323a** werden teilchenoptisch auf die Oberfläche der Probe **7** beziehungsweise in die Ebene **E2** abgebildet. Das System aus der zusätzlichen Feldlinse **370** mit dem zweilinsigen Feldlinsensystem **307** (das System ist hier also insgesamt dreilinsig) ist so eingestellt, dass die Einzel-Teilchenstrahlenbündel **3a** unter Beibehaltung der Telezentriebedingungen auf die Ebene **E2** oder Objektoberfläche auftreffen (in der **Fig. 4b** ist wieder ein telezentrischer Einfall der Einzel-Teilchenstrahlenbündel **3a** dargestellt), aber unter einer größeren numerischen Apertur. Dabei bleibt der Strahlabstand zwischen den Einzel-Teilchenstrahlen **3, 3a** unverändert (Pitch2 konstant). Auch hier ist es so, dass der Teilchenstrahlkegel, der auf die Probe **7** trifft, im Vergleich zum ersten Arbeitspunkt aufgeweitet ist. Auch hier wird also die numerische Apertur verändert, wie dies durch den Doppelpfeil beziehungsweise die Bezeichnung NAV in der Zeichnung angedeutet ist. Weiterhin können optional wieder die Orientierung der Einzel-Teilchenstrahlen **3, 3a** in der Ebene **E2** um die optische Achse herum und die Fokussierung der Einzel-Teilchenstrahlen **3, 3a** in der Ebene **E2** unverändert beibehalten werden.

[0087] Bei dem System in **Fig. 4** wird die Arbeitspunkteinstellung verändert. Ein Arbeitspunkt kann dabei zum Beispiel durch die Strahlstromstärke, die Landeenergie, die Position des Objektes (durch eine Veränderung der Stage-Position) und/ oder die verwendete Einzelstrahl-Quelle (die Tip) definiert sein. Auch andere Definitionen sind prinzipiell denkbar und werden sich dem Fachmann erschließen. Abgesehen von Einstellungen des Arbeitspunktes werden dann aber zum Einstellen der numerischen Apertur außer den Wirkungs-Einstellungen an den teilchenoptischen Komponenten keine weiteren Veränderungen vorgenommen. Die Änderung der numerischen Apertur kann also auch an einem anderen Arbeitspunkt allein über die Einstellung der Wirkungen beziehungsweise Erregungen erfolgen. Es sind keine baulichen Veränderungen notwendig, es muss insbesondere kein Multistrahl-Generator oder eine seiner Komponenten baulich verändert, bewegt oder gar ausgetauscht werden.

[0088] Die **Fig. 5** und **Fig. 6** zeigen noch einmal die Vielzahl-Teilchenstrahlsysteme aus den **Fig. 3** bzw. **Fig. 4**, und zwar jeweils in Kombination mit einem Teilchen-Multi-Detektor **209**. Die aus der Probe **7** austretenden Sekundärelektronen werden durch die Strahlweiche **400** orts aufgelöst in Richtung des Teilchen-Multi-Detektors **209** abgelenkt. Dabei treffen die sekundären Teilchenstrahlen **9** nach dem Hindurchtreten durch das Projektionslinsensystem **205** sowie nach Hindurchtreten durch eine Aperturblende **210** auf den Teilchen-Multi-Detektor **209**. Zu beachten ist, dass es sich hier um eine sehr schematische Darstellung handelt. Hinsichtlich Details wird auf die eingangs zitierten Druckschriften verwiesen.

[0089] In dem gestrichelten Kreis ist sowohl in **Fig. 5** als auch **Fig. 6** zusätzlich ein Ausschnitt aus dem Strahlengang bei dem Vielzahl-Teilchenstrahlsystem in vergrößerter Darstellung gezeigt, der noch einmal die Variation der numerischen Apertur durch die Verbreiterung des Teilchenstrahlkegels verdeutlicht. Die numerische Apertur wird also verändert, was durch den Doppelpfeil mit der Bezeichnung NAV angedeutet ist. Die Auftreffpunkte der Strahlen **3** beziehungsweise **3a** auf die Probe **7** bleiben dabei aber unverändert. Pitch2 wird nicht variiert.

[0090] **Fig. 7** zeigt ein Flussdiagramm zur Optimierung der Auflösung bei einer teilchenoptischen Abbildung unter Verwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens. Dabei wird automatisch die numerische Apertur mit verändert. Es sei nun zunächst vorausgesetzt, dass das Gesamtsystem für einen ersten Arbeitspunkt bereits eingestellt ist. Hier sind also für den ersten Arbeitspunkt, der zum Beispiel durch die Strahlstromstärke und/ oder die Landeenergie der Teilchen auf der Probe charakterisiert sein kann, sämtliche Wirkungen der teilchenoptischen Komponenten bereits bekannt.

[0091] In einem ersten Schritt **S1** wird nun der Arbeitspunkt geändert, das heißt ein zweiter oder weiterer Arbeitspunkt wird definiert und entsprechend eingestellt. Im Schritt **S2** wird dann die Auflösung gemessen, die mit den bereits voreingestellten Wirkungen der teilchenoptischen Komponenten erzielt wird. In einem weiteren Schritt **S3** wird nun der Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene **E1**, also im Zwischenbild, variiert (Variation Pitch1). Bei dem Zwischenbild kann es sich entweder um ein virtuelles oder um ein reelles Zwischenbild handeln. Die Variation des Strahlabstandes erfolgt dabei durch entsprechende Einstellungen am Multistrahl-Generator **350, 360**.

[0092] In einem weiteren Verfahrensschritt **S4** erfolgt nun das Einstellen der übrigen interessierenden teilchenoptischen Komponenten an dem zweiten Arbeitspunkt, so dass diese übrigen teilchenoptischen Parameter konstant bleiben bzw. dieselben Werte aufweisen wie bei der Einstellung des Gesamtsystems am ersten Arbeitspunkt. Das dafür notwendige Einstellen (Re-Justieren) der übrigen teilchenoptischen Komponenten zum Konstanthalten aller übrigen teilchenoptischen Parameter erfolgt vorteilhaft durch einen iterativen Prozess. Beispielhaft sind in der großen Box von **Fig. 7** mehrere Schritte dieses iterativen Prozesses gezeigt: Bei diesem Einstellen ist eine Zielvorgabe, dass der Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene **E2**, also auf der Probe, verglichen mit dem Strahlabstand am ersten Arbeitspunkt gleichbleibt (Pitch2 konstant). Weitere Zielvorgaben können sein, dass die Fokussierung der Einzel-Teilchenstrahlen in der Ebene **E2**, und/oder die Telezentriebedingungen der Einzel-Teilchenstrahlen bei Einfall der Einzelteilchenstrahlen in das Objektiv **102**, und/ oder die Orientierung der Einzel-Teilchenstrahlen um die optische Achse herum (Rotation) konstant bleiben. Das Re-Justieren erfolgt in Schritt **S5** des Flussdiagramms. Im Schritt **S6** wird, sofern erforderlich, die Telezentrie eingestellt, in Schritt **S7** wird, sofern erforderlich, die Rotation eingestellt, und in Schritt **S8** wird der Fokus, sofern erforderlich, eingestellt.

[0093] Durch die Variation des Strahlabstandes zwischen den Einzel-Teilchenstrahlen **3, 3a** an der Zwischenbildebene **E1** (Variation Pitch1) und durch das gleichzeitige Konstanthalten der anderen teilchenoptischen Parameter (insbesondere des Strahlabstandes der Einzel-Teilchenstrahlen auf dem Objekt (Pitch2), der numerischen Apertur am Zwischenbild (keine bauliche Veränderung des Multistrahl-Generators) sowie der elektrischen Potentiale **U1** und **U2**), wird hierbei die numerische Apertur NA2 in der Ebene **E2** und somit am Objekt verändert und kann optimiert werden.

[0094] Nach jedem Iterationsdurchgang wie oben beschrieben wird durch eine Messung überprüft, ob

die Auflösung nun optimal ist (Schritt **S9**). Ist dies der Fall, werden die gefundenen Wirkungen für den zweiten Arbeitspunkt in einer Nachschlagetabelle gespeichert. Ist die Auflösung noch nicht optimal, so wird der Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene **E1** in Schritt **S3** erneut variiert. Im Folgenden werden dann andere Einstellungen für die teilchenoptischen Komponenten vorgenommen und die dann erzielte Auflösung wird gemessen. Dies wird solange wiederholt, bis eine Einstellung gefunden wird, in der die Auflösung optimal und somit maximal ist oder zumindest vordefinierten Soll-Anforderungen entspricht.

[0095] Es ist möglich, einen oder mehrere Verfahrensschritte aus **Fig. 7** wegzulassen oder Verfahrensschritte in einer anderen Reihenfolge auszuführen. Insofern ist das in **Fig. 7** gezeigte Beispiel nicht einschränkend zu verstehen.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- WO 2005/024881 A2 [0003, 0049]
- WO 2005/024881 [0068]
- WO 2007/028595 [0068]
- WO 2008/028596 [0068]
- WO 2011/124352 [0068]
- WO 2007/060017 [0068]
- DE 102013026113 [0068]
- DE 102013014976 [0068]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Vielzahl-Teilchenstrahlsystems,

wobei das teilchenoptische System eine Mehrzahl von teilchenoptischen Komponenten aufweist, die einen Multistrahl-Generator zur Erzeugung einer Vielzahl von geladenen Einzel-Teilchenstrahlen aus einem Teilchenstrahl umfassen und die von dem Einzel-Teilchenstrahl oder der Vielzahl von Einzel-Teilchenstrahlen im Wesentlichen durchsetzt werden, und

wobei die Wirkungen der teilchenoptischen Komponenten auf den Einzel-Teilchenstrahl oder auf die Vielzahl von Einzel-Teilchenstrahlen einstellbar sind, und wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

Definieren eines ersten Arbeitspunktes des Systems; Einstellen der Wirkungen ($W_{11}..W_{n1}$) der teilchenoptischen Komponenten an dem ersten Arbeitspunkt des Systems derart, dass eine erste Ebene mit Teilchen der Einzel-Teilchenstrahlen teilchenoptisch in eine zweite Ebene abgebildet wird,

wobei die teilchenoptische Abbildung bei der Einstellung für den ersten Arbeitspunkt durch eine Vielzahl von n voneinander unabhängig einstellbaren teilchenoptischen Parametern p ($p_{11}..p_{n1}$) insbesondere vollständig charakterisierbar ist, wobei

- p_{11} den Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene repräsentiert,
- p_{21} den Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene repräsentiert, und
- p_{31} die numerische Apertur der Mehrstrahl-Teilchenoptik bezogen auf die zweite Ebene repräsentiert,

wobei die Werte folgenden Parameter beim Einstellen am ersten Arbeitspunkt verändert werden:

- Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene, also p_{11} , und
- die numerische Apertur der Mehrstrahl-Teilchenoptik bezogen auf die zweite Ebene, also p_{31} , und

wobei die Werte der übrigen Parameter p beim Einstellen am ersten Arbeitspunkt im Wesentlichen konstant gehalten werden und somit auch der Wert des folgenden Parameters p im Wesentlichen konstant gehalten wird:

- Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene, p_{21} .

2. Verfahren gemäß dem vorangehenden Anspruch, wobei die Anzahl voneinander unabhängig einstellbarer Parameter p , die konstant gehalten werden, mindestens um eins kleiner ist als die Anzahl aller Wirkungen W_{ij} der teilchenoptischen Komponenten, die im System zur Verfügung stehen.

3. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche,

wobei eine Variation des Abstandes der Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene im Wesentlichen durch das Einstellen einer Wirkung am Multistrahl-Generator erfolgt, und/ oder

wobei ein Einstellen des Fokus in der zweiten Ebene im Wesentlichen durch das Einstellen einer Wirkung an einer anderen teilchenoptischen Komponente als dem Multistrahlgenerator, insbesondere durch das Einstellen einer Wirkung an einer Feldlinse, erfolgt.

4. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die numerische Apertur in der zweiten Ebene optimiert wird.

5. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Auflösung der teilchenoptischen Abbildung optimiert wird.

6. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei das Einstellen der Wirkungen am ersten Arbeitspunkt iterativ erfolgt.

7. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei das Einstellen der Wirkungen das Einstellen einer Spannung und/ oder eines Stromes umfassen.

8. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche,

wobei an dem teilchenoptischen System kein mechanisch einstellbarer Parameter k verändert wird; und/ oder

wobei weder ein Durchmesser von Löchern in einer Multiaperturplatte des Multistrahl-Generators, noch deren Abstände zueinander verändert werden; und/ oder

wobei der Multistrahl-Generator oder eine seiner Komponenten weder baulich verändert, noch ganz oder teilweise ausgetauscht, noch in seiner Position verschoben wird; und/ oder

wobei die Position der zweiten Ebene und des Objektes unverändert bleibt.

9. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei ein Arbeitspunkt durch mindestens einen der folgenden Parameter definiert wird: Stromstärke der Einzel-Teilchenstrahlen, Landeenergie, Position des Objektes, Durchmesser der Einzelstrahlquelle.

10. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Parameter p optische Eigenschaften der Mehrstrahl-Teilchenoptik beschreiben, insbesondere den Strahlabstand der Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene, den Strahlabstand der Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene, eine Lage der zweiten Ebene, Telezentrie der Einzel-Teilchenstrahlen und/ oder Rotation der Einzel-Teilchenstrahlen.

11. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die erste Ebene eine Zwischenbildebene und/ oder die zweite Ebene eine Objektebene ist.

12. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei der Multistrahl-Generator ein Multilinsen-Array umfasst und/ oder das Bild in der ersten Ebene ein reelles Zwischenbild ist.

13. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei der Multistrahl-Generator ein Multidefektor-Array umfasst und/ oder das Bild in der ersten Ebene ein virtuelles Zwischenbild ist.

14. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, das des Weiteren Folgendes aufweist: Definieren eines zweiten Arbeitspunktes des Systems;

Einstellen der Wirkungen ($W_{12}..W_{n2}$) der teilchenoptischen Komponenten an dem zweiten Arbeitspunkt des Systems derart, dass die erste Ebene mit Teilchen der Einzel-Teilchenstrahlen teilchenoptisch in die zweite Ebene abgebildet wird,

wobei die teilchenoptische Abbildung bei der Einstellung für den zweiten Arbeitspunkt wiederum durch die n teilchenoptischen Parameter p ($p_{12}... p_{n2}$) charakterisierbar ist, und

wobei

- p_{12} den Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene repräsentiert,
- p_{22} den Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene repräsentiert, und
- p_{32} die numerische Apertur der Mehrstrahl-Teilchenoptik bezogen auf die zweite Ebene repräsentiert,

wobei die Werte folgenden Parameter beim Einstellen am zweiten Arbeitspunkt verglichen mit ihren Werten am ersten Arbeitspunkt des Systems verändert werden:

- Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene, also $p_{12} \neq p_{11}$, und
 - die numerische Apertur der Mehrstrahl-Teilchenoptik bezogen auf die zweite Ebene, also $p_{32} \neq p_{31}$, und
- wobei die Werte der übrigen Parameter p beim Einstellen am zweiten Arbeitspunkt verglichen mit ihren Werten am ersten Arbeitspunkt des Systems im Wesentlichen konstant gehalten werden und somit auch der Wert des folgenden Parameters p im Wesentlichen konstant gehalten wird:
- Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene, also $p_{22} = p_{21}$.

15. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei das Einstellen der Wirkungen am zweiten Arbeitspunkt iterativ durchgeführt wird.

16. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei das Verfahren ganz oder teilweise mehrfach ausgeführt wird.

17. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die ermittelten Wirkungen, insbesondere Ströme und/ oder Spannungen, für einen oder mehrere Arbeitspunkte in einer Nachschlagetabelle gespeichert werden.

18. Computerprogrammprodukt mit einem Programmcode zum Ausführen des Verfahrens gemäß einem der vorangehenden Ansprüche.

19. Vielzahl-Teilchenstrahlssystem, insbesondere zum Ausführen des Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 1 bis 17, das folgendes aufweist:

eine erste Mehrstrahl-Teilchenoptik mit teilchenoptischen Komponenten, die einen Multistrahl-Generator zur Erzeugung einer Vielzahl von Einzel-Teilchenstrahlen aus einem Teilchenstrahl umfasst, und die dazu konfiguriert ist, die Einzel-Teilchenstrahlen auf ein Objekt zu richten; und

eine Steuerung;

wobei die Steuerung konfiguriert ist, die Wirkungen der teilchenoptischen Komponenten der ersten Mehrstrahl-Teilchenoptik auf die Einzel-Teilchenstrahlen derart einzustellen, dass eine erste Ebene mit Teilchen der Einzel-Teilchenstrahlen teilchenoptisch in eine zweite Ebene abgebildet wird, wobei die zweite Ebene mit der Ebene des Objektes zusammenfällt; und

wobei die Steuerung ferner dazu konfiguriert ist, den Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene zu variieren; den Strahlabstand zwischen benachbarten Einzel-Teilchenstrahlen in der zweiten Ebene konstant zu halten; und

die numerische Apertur bezogen auf die zweite Ebene zu variieren.

20. Vielzahl-Teilchenstrahlssystem gemäß Anspruch 19,

wobei die Steuerung so konfiguriert ist, dass eine Variation des Abstandes der Einzel-Teilchenstrahlen in der ersten Ebene im Wesentlichen durch das Einstellen einer Wirkung am Multistrahl-Generator erfolgt, und/ oder

wobei die Steuerung so konfiguriert ist, dass ein Einstellen des Fokus in der zweiten Ebene im Wesentlichen durch das Einstellen einer Wirkung an einer anderen teilchenoptischen Komponente als dem Multistrahlgenerator, insbesondere durch das Einstellen einer Wirkung an einer Feldlinse, erfolgt.

21. Vielzahl-Teilchenstrahlssystem gemäß einem der Ansprüche 19 bis 20, wobei der Multistrahl-Generator relativ zu den übrigen teilchenoptischen Komponenten des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems raumfest angeordnet ist.

22. Vielzahl-Teilchenstrahlsystem gemäß einem der Ansprüche 19 bis 21, wobei der Multistrahl-Generator ein Multilinsen-Array umfasst und/ oder das Bild in der ersten Ebene ein reelles Zwischenbild ist.

23. Vielzahl-Teilchenstrahlsystem gemäß einem der Ansprüche 19 bis 22, wobei der Multistrahl-Generator ein Multideflektor-Array umfasst und/ oder das Bild in der ersten Ebene ein virtuelles Zwischenbild ist.

24. Vielzahl-Teilchenstrahlsystem gemäß einem der Ansprüche 19 bis 23, wobei die Steuerung ferner dazu konfiguriert ist, die Auflösung der teilchenoptischen Abbildung zu optimieren.

25. Vielzahl-Teilchenstrahlsystem gemäß einem der Ansprüche 19 bis 24, das des Weiteren Folgendes aufweist:
einen Speicher mit einer Nachschlagetabelle, in der Wirkungen der teilchenoptischen Komponenten, insbesondere Ströme und/ oder Spannungen, für einen oder mehrerer Arbeitspunkte abspeicherbar oder abgespeichert sind.

26. Vielzahl-Teilchenstrahlsystem gemäß dem vorangehenden Anspruch, das des Weiteren Folgendes aufweist:
eine Eingabeeinheit zum Auswählen eines Arbeitspunktes aus der Nachschlagetabelle.

27. Vielzahl-Teilchenstrahlsystem nach einem der Ansprüche 19 bis 26, wobei der Multistrahl-Generator ein Multilinsen-Array aufweist und wobei in Strahlrichtung hinter dem Multistrahl-Generator ein Feldlinsensystem angeordnet ist, das mindestens vier voneinander unabhängig einstellbare Teilchenlinsen aufweist.

28. Vielzahl-Teilchenstrahlsystem nach einem der Ansprüche 19 bis 26, wobei der MultiStrahlgenerator ein Multideflektor-Array aufweist und wobei in Strahlrichtung hinter dem Multistrahl-Generator ein Feldlinsensystem angeordnet ist, das mindestens drei voneinander unabhängig einstellbare Teilchenlinsen aufweist

29. Verwendung des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems gemäß einem der Ansprüche 19 bis 28 zum Optimieren der numerischen Apertur und/ oder der Auflösung des Vielzahl-Teilchenstrahlsystems an einem Arbeitspunkt.

Es folgen 7 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

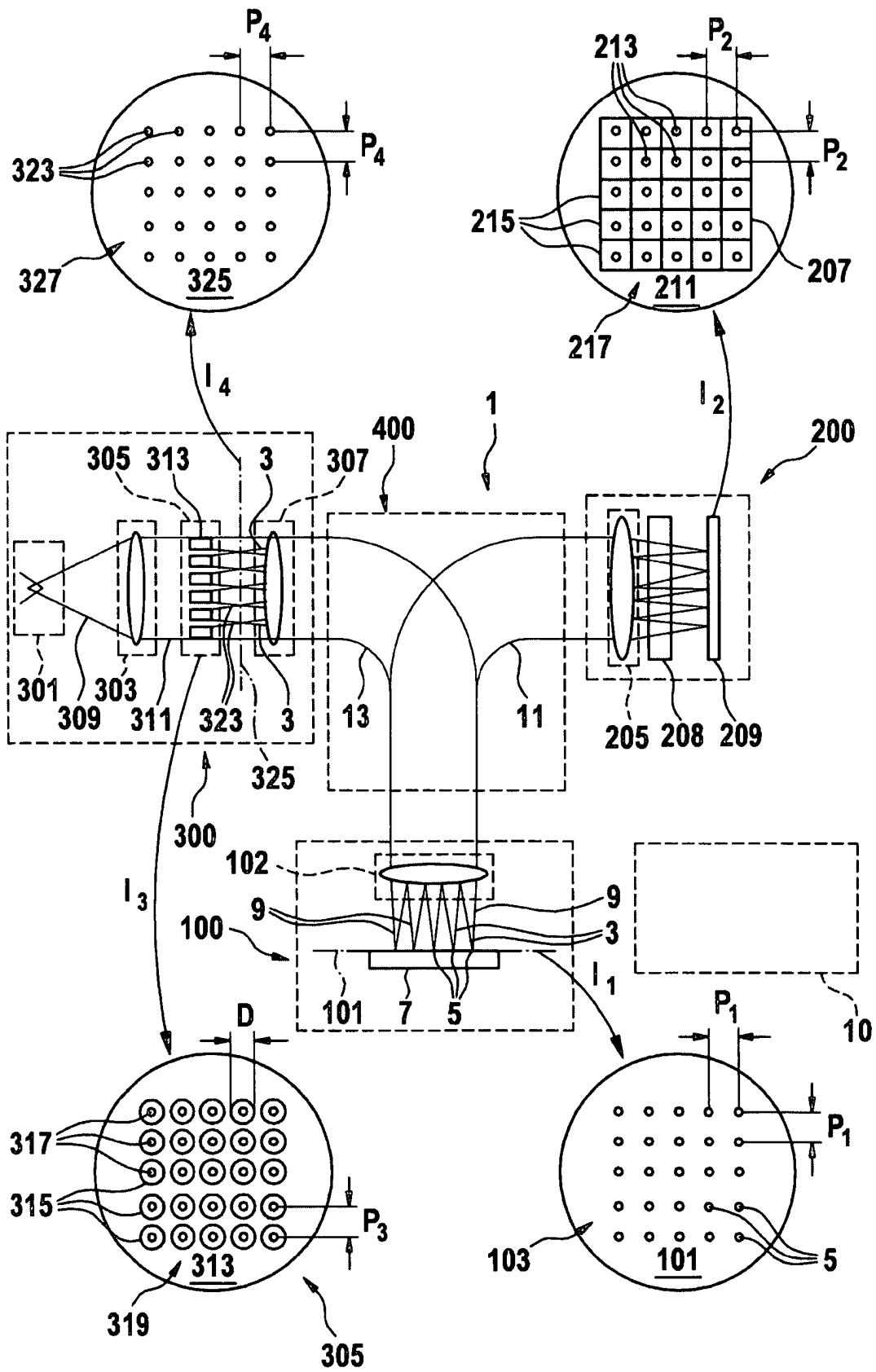


Fig. 1

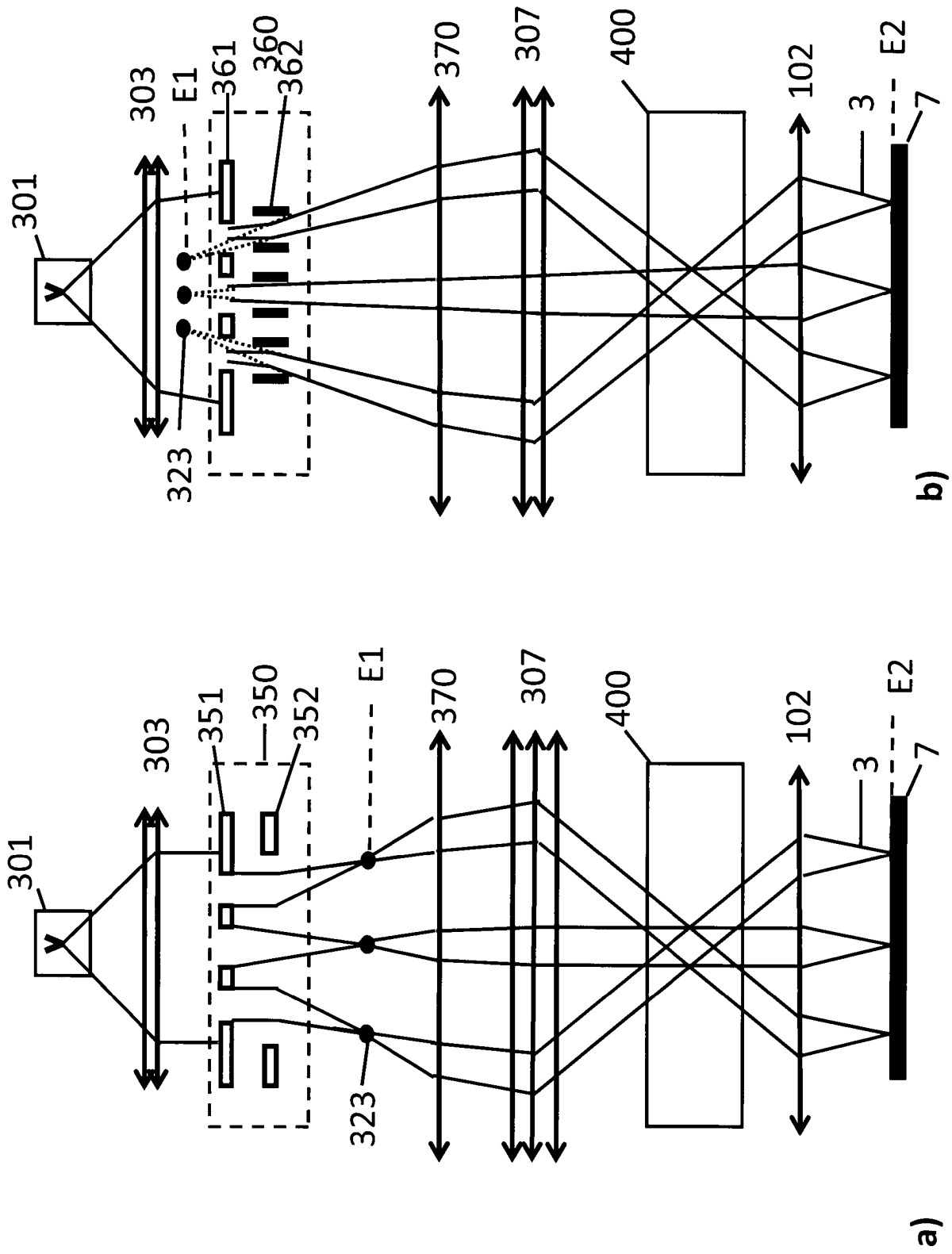


Fig. 2

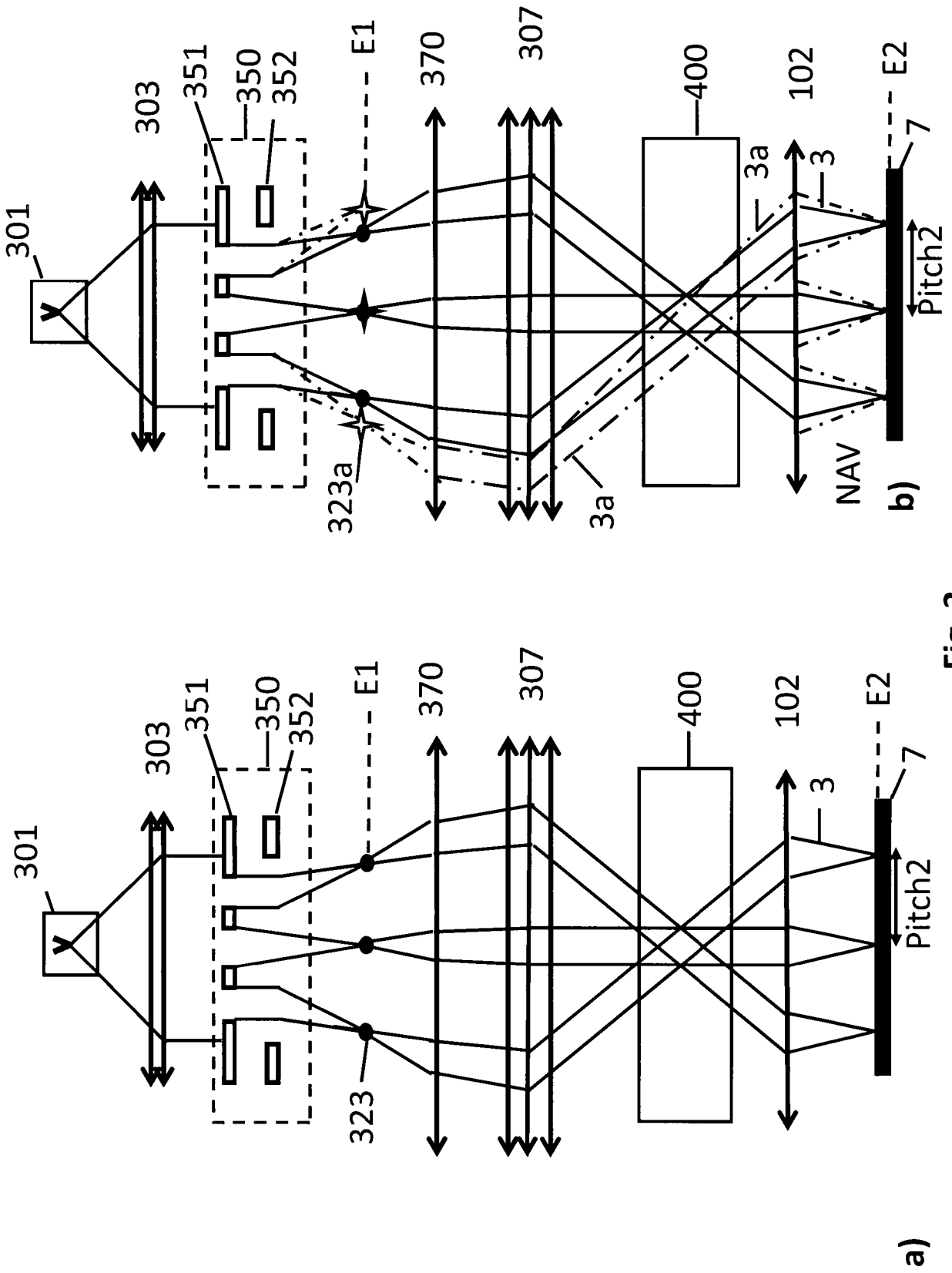


Fig. 3

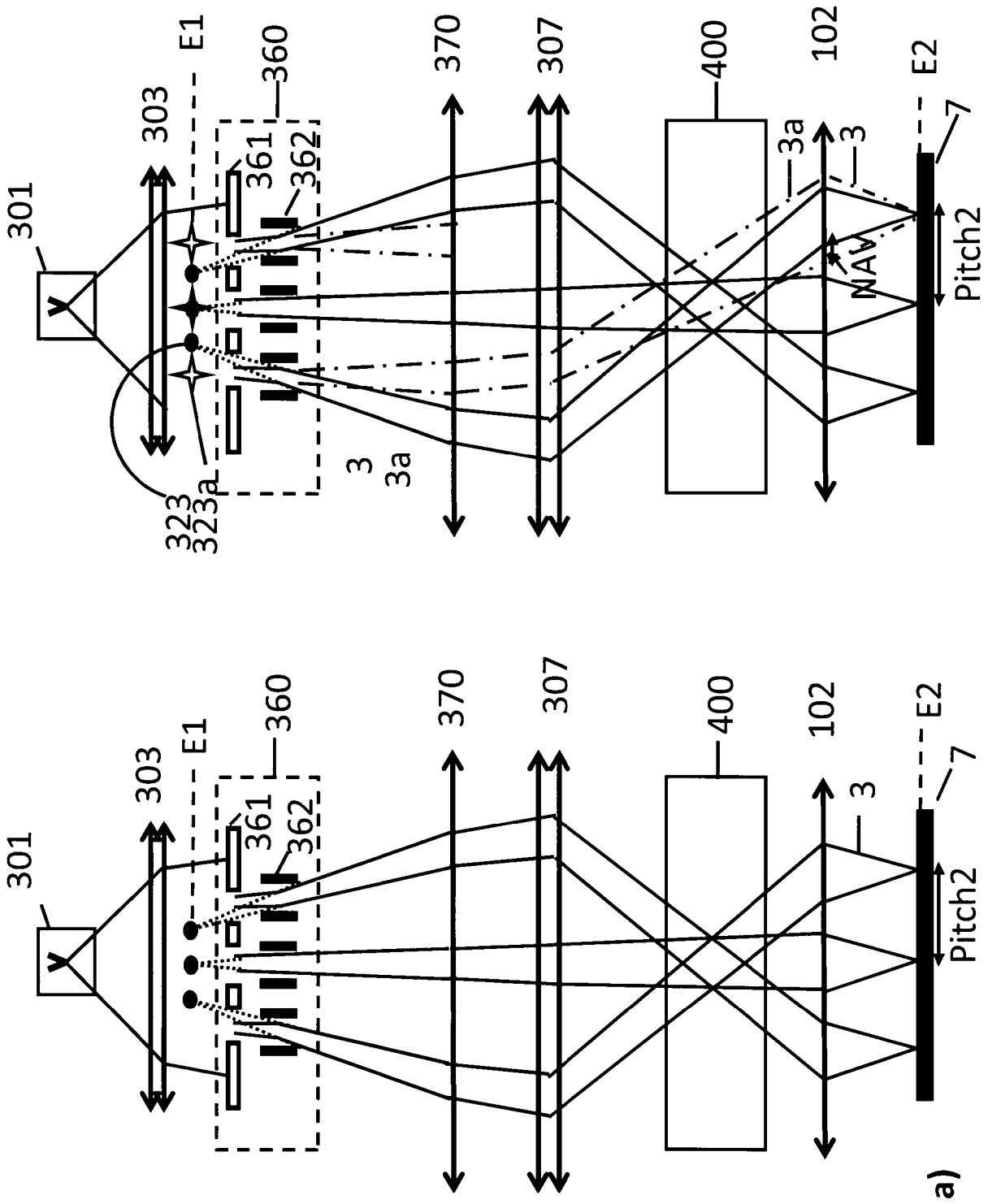


Fig. 4

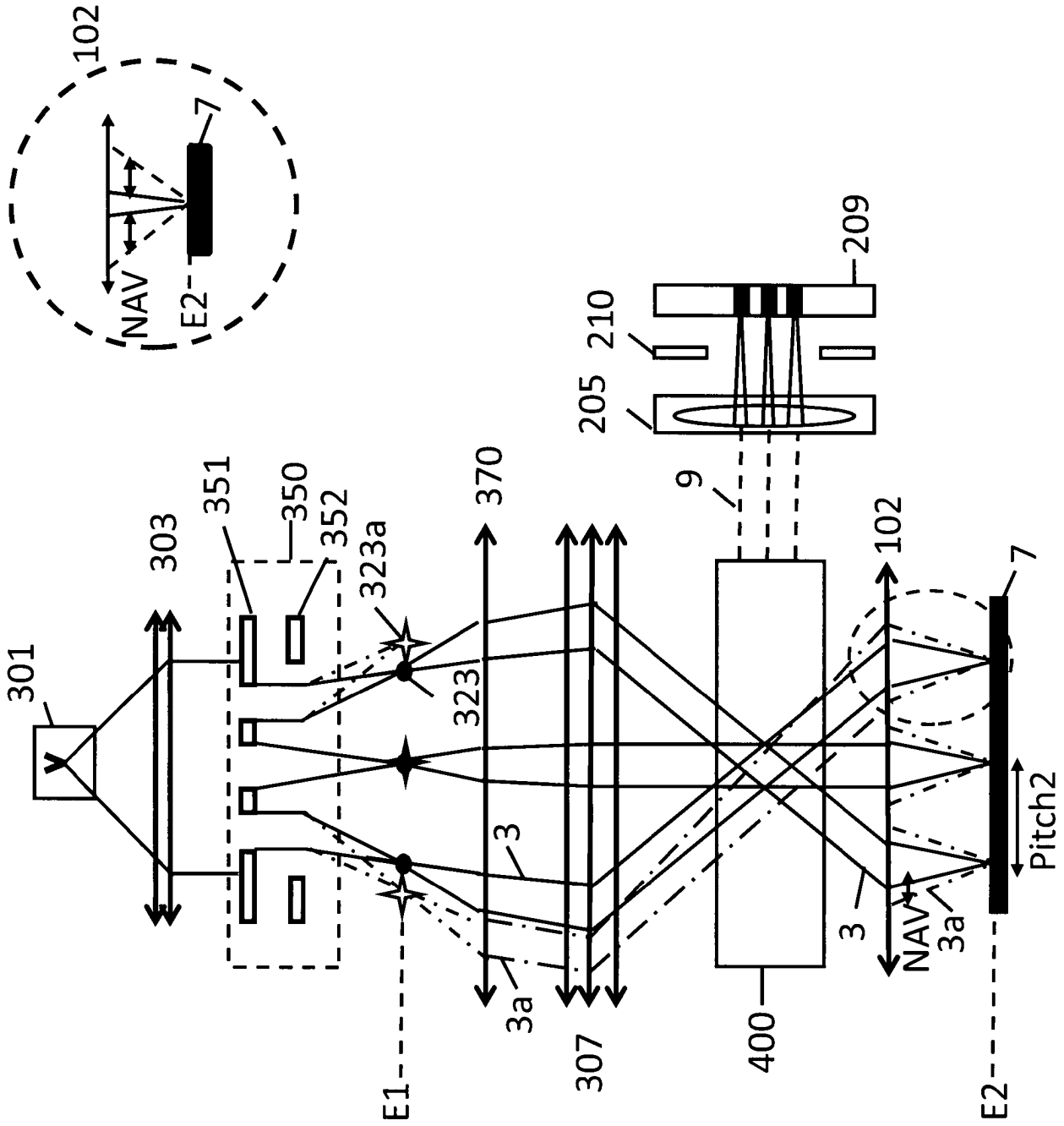


Fig. 5

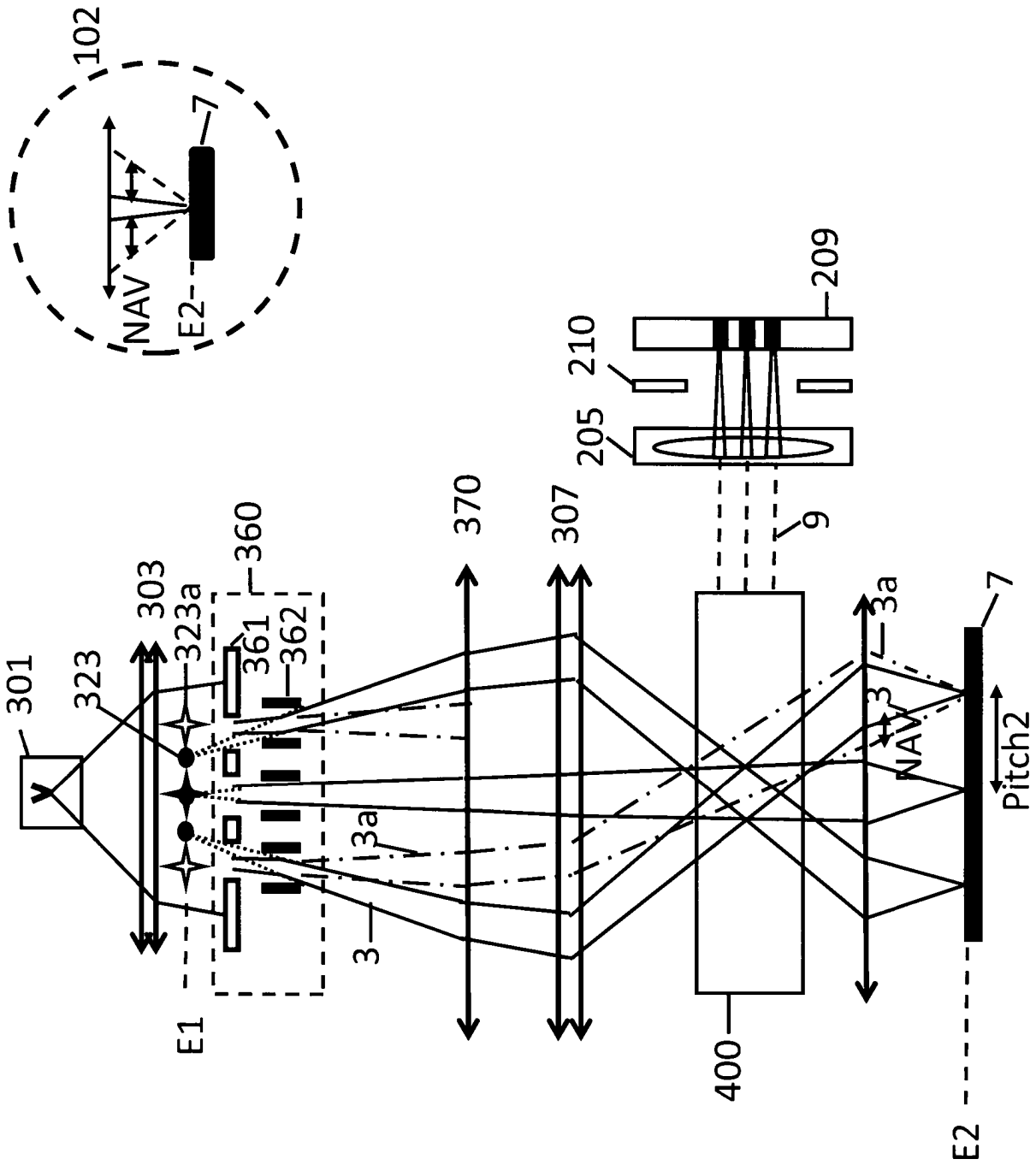


Fig. 6

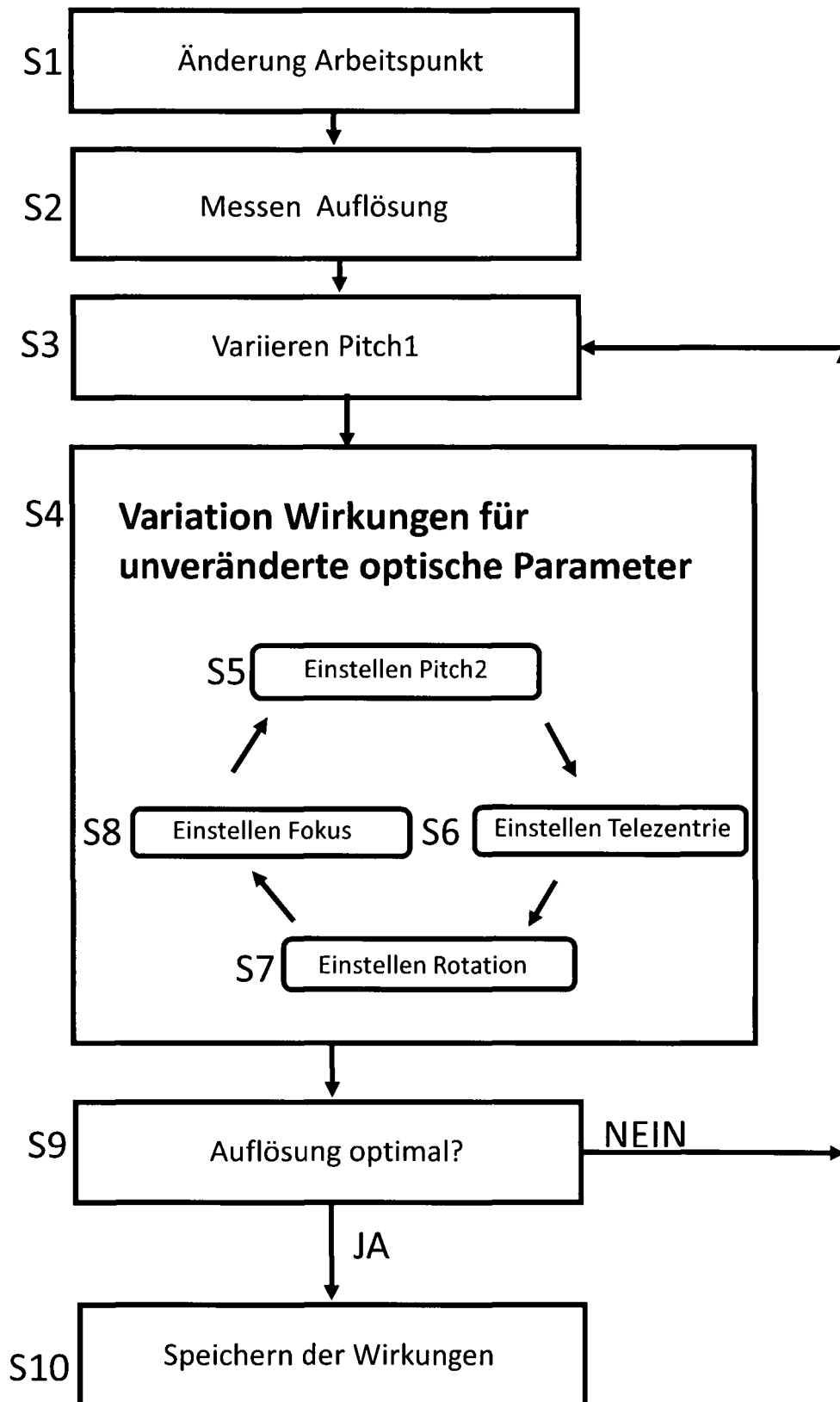


Fig. 7