

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
11. August 2016 (11.08.2016)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2016/124394 A1

- (51) Internationale Patentklassifikation:
G03F 7/20 (2006.01) **G02B 7/02** (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2016/051027
- (22) Internationales Anmeldedatum:
19. Januar 2016 (19.01.2016)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2015 201 870.9
3. Februar 2015 (03.02.2015) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **CARL ZEISS SMT GMBH** [DE/DE]; Rudolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE).
- (72) Erfinder; und
(71) Anmelder (nur für US): **SCHOENHOFF, Ulrich** [DE/DE]; Nagelstrasse 34, 89073 Ulm (DE). **BEKTAS, Eylem** [TR/DE]; Hoelderlinstrasse 7, 73431 Aalen (DE). **HAUF, Markus** [DE/DE]; Hafenberg 4, 89075 Ulm (DE).
- (74) Anwalt: **FRANK, Hartmut**; Bonsmann · Bonsmann · Frank Patentanwälte, Reichspräsidentenstraße 21-25, 45470 Mülheim a.d. Ruhr (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,

BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)

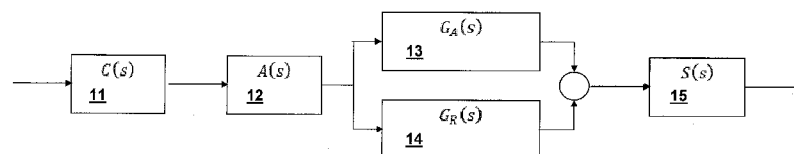
Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)

(54) Title: ARRANGEMENT FOR MANIPULATING THE POSITION OF AN ELEMENT, IN PARTICULAR IN AN OPTICAL SYSTEM

(54) Bezeichnung : ANORDNUNG ZUR POSITIONSMANIPULATION EINES ELEMENTES, INSBESONDERE IN EINEM OPTISCHEN SYSTEM

Fig. 1



(57) Abstract: The invention relates to arrangements for manipulating the position of an element, in particular in an optical system. An arrangement according to the invention has at least one actuator (22, 52, 72, 102a, 102b, 122a, 122b, 142a, 142b, 162a, 162b) for each degree of freedom of the position manipulation for exerting variable forces onto the element (21, 51, 71, 101, 121, 141, 161), at least one position sensor (23, 53, 73, 103, 163a, 163b) for each degree of freedom of the position manipulation for generating a sensor signal which is characteristic for the position of the element in each case, and at least one position regulator (27, 57, 77, 107), which regulates a force exerted by the at least one actuator for positioning the element onto the element in a position control loop in a manner dependent on the at least one sensor signal, wherein at least one actuator and at least one position sensor are assembled on a common module frame (24, 54, 74, 104, 124, 144, 164) and wherein this module frame is mechanically connected to a reference frame (25, 55, 75, 105, 125, 145) in such a way that the condition $0.5 \cdot \omega_B \leq \omega_{MR} \leq 2 \omega_B$ is satisfied for the resonance frequencies (ω_{MR}) of this connection, where ω_B denotes the bandwidth of the position control loop.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2016/124394 A1



Die Erfindung betrifft Anordnungen zur Positionsmanipulation eines Elementes, insbesondere in einem optischen System. Eine erfindungsgemäße Anordnung weist wenigstens einen Aktor (22, 52, 72, 102a, 102b, 122a, 122b, 142a, 142b, 162a, 162b) je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation zur Ausübung stellbarer Kräfte auf das Element (21, 51, 71, 101, 121, 141, 161), wenigstens einen Positionssensor (23, 53, 73, 103, 163a, 163b) je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation zur Erzeugung jeweils eines für die Position des Elementes charakteristischen Sensorsignals, und wenigstens einen Positionsregler (27, 57, 77, 107), welcher in einem Positionsregelkreis eine von dem wenigstens einen Aktor zur Positionierung des Elementes auf das Element ausgeübte Kraft in Abhängigkeit von dem wenigstens einen Sensorsignal regelt, auf, wobei wenigstens ein Aktor und wenigstens ein Positionssensor auf einem gemeinsamen Modulrahmen (24, 54, 74, 104, 124, 144, 164) montiert sind, und wobei dieser Modulrahmen an einen Referenzrahmen (25, 55, 75, 105, 125, 145) mechanisch derart angebunden ist, dass für die Resonanzfrequenzen (ω_{MR}) dieser Anbindung die Bedingung $0.5 \cdot \omega_B \leq \omega_{MR} \leq 2\omega_B$ erfüllt ist, wobei ω_B die Bandbreite des Positionsregelkreises bezeichnet.

Anordnung zur Positionsmanipulation eines Elementes,
insbesondere in einem optischen System

5

Die vorliegende Anmeldung beansprucht die Priorität der Deutschen Patentanmeldung DE 10 2015 201 870.9, angemeldet am 03. Februar 2015. Der Inhalt dieser DE-Anmeldung wird durch Bezugnahme („incorporation by reference“) mit
10 in den vorliegenden Anmeldungstext aufgenommen.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

15 Gebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft eine Anordnung zur Positionsmanipulation eines Elementes, insbesondere in einem optischen System. Dabei kann es sich insbesondere um ein optisches System einer Projektionsbelichtungsanlage handeln.

20

Stand der Technik

Mikrolithographie wird zur Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente, wie beispielsweise integrierter Schaltkreise oder LCD's, angewendet. Der Mikrolithographieprozess wird in einer sogenannten Projektionsbelichtungsanlage durchgeführt, welche eine Beleuchtungseinrichtung und ein Projektionsobjektiv aufweist. Das Bild einer mittels der Beleuchtungseinrichtung beleuchteten Maske (= Retikel) wird hierbei mittels des Projektionsobjektivs auf ein mit einer lichtempfindlichen Schicht
25 (Photoresist) beschichtetes und in der Bildebene des Projektionsobjektivs angeordnetes Substrat (z.B. ein Siliziumwafer) projiziert, um die Maskenstruktur auf die lichtempfindliche Beschichtung des Substrats zu übertragen.
30

In einer für EUV (d.h. für elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge unterhalb von 15 nm) ausgelegten Projektionsbelichtungsanlage werden mangels Vorhandenseins lichtdurchlässiger Materialien Spiegel als optische Komponenten für den Abbildungsprozess verwendet. In der Beleuchtungseinrichtung einer für den Betrieb im EUV ausgelegten mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage ist insbesondere der Einsatz von Facettenspiegeln in Form von Feldfacettenspiegeln und Pupillenfacettenspiegeln als bündelführende Komponenten z.B. aus DE 10 2008 009 600 A1 bekannt. Derartige Facettenspiegel sind aus einer Vielzahl von Einzelspiegeln oder Spiegelfacetten aufgebaut, welche jeweils zum Zwecke der Justage oder auch zur Realisierung bestimmter Beleuchtungswinkelverteilungen über Festkörpergelenke kippbar ausgelegt sein können.

Grundsätzlich kann in einer Projektionsbelichtungsanlage bei der Positionsmanipulation eines Elementes wie z.B. eines Spiegels die jeweilige Spiegelposition mittels eines Positionssensors gemessen und mittels eines Reglers über einen Aktor auf den gewünschten Wert eingestellt werden. Hierbei tritt jedoch grundsätzlich das Problem auf, dass jede von einem Aktor auf ein Element wie z.B. den jeweiligen Spiegel ausgeübte Kraft aufgrund des Newtonschen Prinzips „ $actio = reactio$ “ mit einer in entgegengesetzter Richtung wirkenden Reaktionskraft gleichen Betrages einhergeht.

Zu Veranschaulichung zeigt Fig. 1 die Zerlegung eines offenen Regelkreises in einen Aktionspfad und einen Reaktionspfad. Ein Positionsregler 11 erzeugt gemäß Fig. 1 ein Signal für einen Aktor 12, wobei ein Anteil der von dem Aktor 12 erzeugten Kraft im Aktionspfad auf ein zu positionierendes Element (z.B. Spiegel) 13 und der andere Anteil der von dem Aktor 12 erzeugten Kraft im Reaktionspfad auf in diesem befindliche mechanische Komponenten (z.B. Kraft- oder Sensorrahmen) übertragen wird. Hierbei können - typischerweise schwach gedämpfte - Resonanzen der im Reaktionspfad befindlichen mechanischen Komponenten angeregt werden, welche wiederum bei der gewünschten Bandbreite den Positionsregelkreis destabilisieren können.

Bekannte Ansätze zur Überwindung dieses Problems beinhalten den Einsatz von Reaktionsmassen für die jeweiligen Aktoren sowie die Realisierung eines von einem Tragrahmen mechanisch entkoppelten Sensorrahmens.

- 5 Zum Stand der Technik wird lediglich beispielhaft auf US 6,788,386 B2 und WO 2012/152520 A1 verwiesen.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

10

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine Anordnung zur Positionsmanipulation eines Elementes in einer Projektionsbelichtungsanlage bereitzustellen, welche bei verhältnismäßig geringem konstruktivem Aufwand und kompaktem Aufbau eine möglichst präzise und störungsfreie Manipulation des Elementes ermöglicht.

15

Diese Aufgabe wird durch die Anordnung gemäß den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs 1 gelöst.

20

Eine Anordnung zur Positionsmanipulation eines Elementes, insbesondere in einem optischen System, in wenigstens einem Freiheitsgrad, weist auf:

25

- wenigstens einen Aktor je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation zur Ausübung stellbarer Kräfte auf das Element;
- wenigstens einen Positionssensor je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation zur Erzeugung jeweils eines für die Position des Elementes charakteristischen Sensorsignals; und

30

- wenigstens einen Positionsregler, welcher in einem Positionsregelkreis eine von dem wenigstens einen Aktor zur Positionierung des Elementes auf das Element ausgeübte Kraft in Abhängigkeit von dem wenigstens einen Sensorsignal regelt;
- wobei wenigstens ein Aktor und wenigstens ein Positionssensor auf einem gemeinsamen Modulrahmen montiert sind; und
- wobei dieser Modulrahmen an einen Referenzrahmen mechanisch derart

angebunden ist, dass für die Resonanzfrequenzen (ω_{MR}) dieser Anbindung die Bedingung $0.5 \cdot \omega_B \leq \omega_{MR} \leq 2\omega_B$ erfüllt ist, wobei ω_B die Bandbreite des Positionsregelkreises bezeichnet.

- 5 Dabei geht die Erfindung von der Überlegung aus, dass hinsichtlich der mechanischen Anbindung des Modulrahmens an den Referenzrahmen grundsätzlich zwei unterschiedliche - und zueinander in gewisser Weise gegenläufige bzw. einander widersprechende - Anforderungen gestellt werden. Während nämlich einerseits unter dem Gesichtspunkt der erzielbaren Positionsstabilität des zu positionieren-
- 10 den Elementes (dahingehend, dass dieses Element der Position des Referenzrahmens möglichst gut folgen sollte) eine möglichst steife Anbindung wünschenswert ist, ist andererseits unter dem dynamischen Gesichtspunkt der anzustrebenden Schwingungsentkopplung des Reaktionspfades (dahingehend, dass sich die Schwingungseigenschaften des Referenzrahmens möglichst nicht auf den Positi-
- 15 onsregelkreis auswirken sollten) eine eher weiche mechanische Anbindung des Modulrahmens an den Referenzrahmen wünschenswert.

- Ausgehend von dieser Überlegung liegt der vorliegenden Erfindung nunmehr insbesondere das Konzept zugrunde, hinsichtlich der mechanischen Anbindung des
- 20 Modulrahmens an den Referenzrahmen insofern einen Mittelweg zu wählen, als die Resonanzfrequenzen dieser mechanischen Anbindung in ein Frequenzband von dem $\frac{1}{2}$ -fachen bis zum 2-fachen der Bandbreite ω_B des Positionsregelkreises gelegt werden. Hierbei wird unter der Bandbreite eines Regelkreises die Frequenz des „0 dB-Durchganges“ im Frequenzgang des offenen Regelkreises verstanden
- 25 (d.h. diejenige Frequenz, bei welcher der offene Regelkreis die Verstärkung Eins besitzt). Hier wird der theoretische 0 dB-Durchgang des Aktionspfades, d.h. ohne die Anbindungsresonanz des Modulrahmens, als Bandbreite bezeichnet. Dabei beinhaltet die Erfindung insbesondere eine Abkehr von einem sich intuitiv zunächst anbietenden Ansatz, das Vorhandensein mechanischer Resonanzen in der
- 30 mechanischen Anbindung des Modulrahmens an den Referenzrahmen nahe der Bandbreite des Regelkreises in Erwartung von damit einhergehenden Stabilitätsproblemen des Regelkreises in jedem Falle zu vermeiden.

Die Erfindung macht sich dabei die Erkenntnis zunutze, dass bei der Wahl bzw. Platzierung der Resonanzfrequenzen der mechanischen Anbindung des Modulrahmens an den Referenzrahmen in dem vorstehend definierten Frequenzband erreicht werden kann, dass die Anbindungsresonanzen der mechanischen Anbindung nicht etwa zu einer Destabilisierung des Positionsregelkreises führen, sondern sogar von dem Positionsregelkreis wirksam gedämpft werden können, ohne dass hierfür zusätzliche aktive oder passive Dämpfungsmaßnahmen erforderlich sind.

Des Weiteren wird dadurch, dass wenigstens ein Aktor und wenigstens ein Positionssensor (insbesondere auch sämtliche Aktoren und Positionssensoren) auf einem gemeinsamen Modulrahmen montiert sind, ein modularer Aufbau der Anordnung bzw. Positioniervorrichtung geschaffen, welcher einen einfachen Zusammenbau sowie eine einfache Integration in das jeweilige System ermöglicht. Aufgrund der vorstehend erwähnten, weitgehenden Entkopplung des Modulrahmens von der Dynamik des Referenzrahmens kann das o.g., den Aktor und den Positionssensor auf einem gemeinsamen Modulrahmen enthaltende Modul separat eingebaut und auch noch vor dem Einbau separat getestet werden, wobei zugleich hinsichtlich der mechanischen Anbindung des Modulrahmens an den Referenzrahmen auf zusätzliche aktive Elemente wie Sensoren, Aktoren oder Regler verzichtet werden kann.

Im Ergebnis wird so gemäß der Erfindung unter gemeinsamer Betrachtung sowohl des mechanischen bzw. dynamischen Aufbaus einerseits als auch der regelungstechnischen Aspekte andererseits eine besonders einfache und vergleichsweise kostengünstige Architektur einer Anordnung bzw. Positioniervorrichtung verwirklicht, welche z.B. (ohne dass die Erfindung hierauf beschränkt wäre) zur aktiven Positionierung optischer Elemente wie Spiegel oder Linsen, insbesondere auch von Spiegelfacetten eines Facettenspiegels, besonders geeignet ist.

Gemäß der Erfindung wird es ermöglicht, bei der Manipulation des Elementes einerseits einem Referenzrahmen gut zu folgen und andererseits durch hinreichen-

de Unterdrückung des Reaktionspfades eine hohe Reglerbandbreite zu realisieren.

5 Gemäß einer Ausführungsform weist die Anordnung genau einen Aktor je „manipuliertem Freiheitsgrad“, d.h. je Freiheitsgrad, in welchem eine Manipulation erfolgt, auf.

10 In weiteren Ausführungsformen weist die Anordnung wenigstens zwei Aktoren je manipuliertem Freiheitsgrad auf, wobei die von diesen Aktoren auf das Element ausgeübten Kräfte voneinander unabhängig stellbar sind.

Gemäß einer Ausführungsform weist die Anordnung auf:

- wenigstens zwei Aktoren je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation; und
- 15 – wenigstens einen Positionsregler, welcher in einem Positionsregelkreis in Abhängigkeit von dem wenigstens einen Sensorsignal von den Aktoren ausgeübte Kräfte voneinander unabhängig regelt, wobei wenigstens einer der Aktoren eine Kraft auf das Element ausgeübt;
- wobei wenigstens einem dieser Aktoren ein weiteres Element mit einer Reaktionsmasse derart zugeordnet ist, dass die mit der von dem betreffenden
- 20 – Aktor auf das zu positionierende Element ausgeübte Kraft einhergehende Reaktionskraft auf diese Reaktionsmasse wirkt.

Gemäß einem Aspekt betrifft die Offenbarung auch eine Anordnung zur Positionsmanipulation eines Elementes, insbesondere in einem optischen System, mit:

- 25 – wenigstens zwei Aktoren je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation;
- wenigstens einem Positionssensor je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation zur Erzeugung jeweils eines für die Position des Elementes charakteristischen Sensorsignals; und
- wenigstens einem Positionsregler, welcher in einem Positionsregelkreis in
- 30 – Abhängigkeit von dem wenigstens einen Sensorsignal von den Aktoren ausgeübte Kräfte voneinander unabhängig regelt, wobei wenigstens einer

der Aktoren eine Kraft auf das Element ausgeübt; und

- wobei wenigstens einem dieser Aktoren ein weiteres Element mit einer Reaktionsmasse derart zugeordnet ist, dass die mit der von dem betreffenden Akteur auf das zu positionierende Element ausgeübte Kraft einhergehende Reaktionskraft auf diese Reaktionsmasse wirkt.

Gemäß diesem Ansatz liegt der Erfindung weiter das Konzept zugrunde, unter Verwendung von wenigstens zwei unabhängig voneinander betreibbaren Aktoren Kräfte einerseits auf das zu positionierende Element und andererseits auf den Modulrahmen aufzubringen. Dabei kann insbesondere ein erster dieser Aktoren eine Kraft auf das zu positionierende Element erzeugen, welche mit einer Reaktionskraft auf den Modulrahmen einhergeht. Zugleich kann ein zweiter dieser Aktoren so angesteuert werden, dass er die besagte, zum ersten Akteur gehörige Reaktionskraft kompensiert. Im Ergebnis kann auf diese Weise der durch den wenigstens einen zusätzlichen Akteur gewonnene Freiheitsgrad dazu genutzt werden, dass effektiv keine resultierende Kraft mehr auf den Referenzrahmen aufgebracht wird mit der Folge, dass eine Entkopplung von der Dynamik des Referenzrahmens erzielt wird.

Gemäß einer Ausführungsform ist die mit der von wenigstens einem der Aktoren auf das zu positionierende Element ausgeübte Kraft einhergehende Reaktionskraft durch einen anderen Akteur der wenigstens zwei Aktoren kompensierbar.

Gemäß einer Ausführungsform sind die wenigstens zwei Aktoren und der Positionssensor auf einem gemeinsamen Modulrahmen montiert.

Gemäß einer Ausführungsform ist die wenigstens eine Reaktionsmasse mechanisch an diesen Modulrahmen angebunden.

Gemäß einer Ausführungsform weist die Anordnung ferner eine Beschleunigungsvorsteuerung auf, welche die auf das zu positionierende Element ausgeübte Kraft basierend auf einer Beschleunigung des Referenzrahmens modifiziert.

Die Verwendung einer solchen Beschleunigungsvorsteuerung bietet die Möglichkeit, die Kraft, die auf das zu positionierende Element aufgebracht werden muss, damit dieses dem Referenzrahmen möglichst abweichungsfrei folgt, vorab aus der Beschleunigung des Referenzrahmens unter Zugrundlegung der Beziehung $f_E = m_E a_{BR} \approx m_E a_{MR}$ zu bestimmen und entsprechend vorzusteuern, wodurch die Positionsstabilität des Elements zum Modulrahmen erheblich gesteigert werden kann.

Gemäß einer Ausführungsform weist die Anordnung einen Beschleunigungssensor zur Messung der Beschleunigung des Referenzrahmens auf. Gemäß einer Ausführungsform ist dieser Beschleunigungssensor auf dem Modulrahmen montiert. Hierbei ist die Platzierung des Beschleunigungssensors auf dem Modulrahmen zum einen in Hinblick darauf vorteilhaft, dass die Modularität unterstützt wird und der Beschleunigungssensor direkt mit dem Positionssensor und dem Aktor mit einer ggf. lokalen Regeleinheit verschaltet werden kann. Zum anderen bietet, wie im Weiteren noch näher erläutert wird, die Filterung mit der schwach gedämpften Anbindungsresonanz eine wirksame Unterdrückung von unerwünschten hochfrequenten Beschleunigungssignalen, ohne hierbei die erwünschten niederfrequenten Beschleunigungssignale signifikant zu verzögern.

In weiteren Ausführungsformen kann der Beschleunigungssensor auch auf dem Referenzrahmen montiert sein.

Gemäß einer Ausführungsform weist die Anordnung ferner einen Deformationskompensationsregler auf, welcher eine Deformation der mechanischen Anbindung des Modulrahmens an den Referenzrahmen wenigstens teilweise kompensiert.

Eine solche Ausgestaltung hat den Vorteil, dass die Deformation der Anbindungssteifigkeit des Modulrahmens berücksichtigt werden kann, wobei diese Deformation bei Kenntnis der Steifigkeit und der Masse des Systems sowie der (z.B. mit dem o.g. Beschleunigungssensor ermittelten) Beschleunigung berechnet werden kann. Das hierbei ermittelte Signal kann wiederum an den Positionsregelkreis als Sollwertaufschaltung gegeben werden, damit der dem Positionsregler vorgegebe-

ne Sollwert entsprechend erhöht oder verringert wird, um die besagte Deformation der Anbindungssteifigkeit des Modulrahmens auszugleichen.

Gemäß einer Ausführungsform ist die Anordnung zur Positionsmanipulation des Elementes in einer Mehrzahl von Freiheitsgraden ausgelegt, wobei die Anordnung wenigstens einen Aktor je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation zur Ausübung stellbarer Kräfte auf das Element und wenigstens einen Positionssensor je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation zur Erzeugung eines für die Position des Elementes charakteristischen Sensorsignals aufweist.

Gemäß einer Ausführungsform ist die Anordnung zur Positionsmanipulation einer Mehrzahl von Elementen in wenigstens einem Freiheitsgrad ausgelegt, wobei die Elemente gemeinsam auf dem Modulrahmen montiert sind.

Gemäß einer Ausführungsform weist die Anordnung für eine Mehrzahl von Elementen einen gemeinsamen zusätzlichen Aktor je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation zur Kompensation von Reaktionskräften auf.

Gemäß einer Ausführungsform besitzt der Modulrahmen eine Masse, welche nicht mehr als das 10-fache der Masse des zu positionierenden Elementes beträgt, wobei die Masse des Modulrahmens vorzugsweise im Bereich vom 2-fachen bis zum 6-fachen der Masse des zu positionierenden Elementes liegt. Je geringer die Modulrahmenmasse im Verhältnis zur Elementmasse ist, desto höher ist die erreichbare Dämpfung der Anbindungsresonanz des Modulrahmens durch den Lageregelkreis des Elements. Eine solche vergleichsweise kleine und kompakte Ausgestaltung des Modulrahmens ermöglicht weiterhin eine Anordnung, in der Resonanzen erst wesentlich oberhalb (z.B. um einen Faktor 10 über) der Bandbreite auftreten mit der Folge, dass Stabilitätsprobleme im Positionsregelkreis wirksam verhindert werden können.

Bei dem gemäß der Erfindung zu positionierenden Element kann es sich insbesondere um einen Spiegel oder um eine Linse handeln. Insbesondere kann das zu

positionierende Element eine Spiegelfacette eines Facettenspiegels sein, wobei dieser Facettenspiegel eine Mehrzahl von Spiegelfacetten aufweist.

Die Erfindung betrifft ferner eine Projektionsbelichtungsanlage mit einer erfindungsgemäßen Anordnung. Die Projektionsbelichtungsanlage kann insbesondere für einen Betrieb im EUV ausgelegt sein. In weiteren Anwendungen kann die Projektionsbelichtungsanlage auch für einen Betrieb im VUV-Bereich ausgelegt sein, beispielsweise für Wellenlängen kleiner als 200 nm, insbesondere kleiner als 160 nm.

Weitere Ausgestaltungen der Erfindung sind der Beschreibung sowie den Unteransprüchen zu entnehmen.

Die Erfindung wird nachstehend anhand von in den beigefügten Abbildungen dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Es zeigen:

Figur 1 eine schematische Darstellung zur Veranschaulichung des Aktions- und Reaktionspfades in einem Positionsegelkreis;

Figur 2-14 schematische Darstellungen zur Erläuterung des erfindungsgemäßen Konzepts anhand unterschiedlicher Ausführungsformen;

Figur 15 eine schematische Darstellung einer weiteren Ausführungsform, bei welcher eine Positionsmanipulation in zwei Freiheitsgraden erfolgt; und

Figur 16 eine schematische Darstellung einer für den Betrieb im EUV ausgelegten lithographischen Projektionsbelichtungsanlage.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

- 5 Fig. 2 zeigt eine schematische Darstellung des möglichen Aufbaus einer Anordnung zur Positionsmanipulation eines Elementes in einer ersten Ausführungsform.

In der Anordnung von Fig. 2 bringt ein Aktor 22 eine Kraft auf ein zu positionierendes Element 21 (z.B. einen Spiegel) auf. Diese vom Aktor 22 auf das Element 21 ausgeübte Kraft geht aufgrund des Newtonschen Prinzips „actio = reactio“ mit einer in entgegengesetzter Richtung wirkenden Reaktionskraft gleichen Betrages einher. Der Aktor 22 sowie ein Positionssensor 23 sind auf einem gemeinsamen Modulrahmen 24 montiert, so dass die Reaktionskraft auf den Modulrahmen 24 zurückwirkt. Der Modulrahmen 24 ist an einen Referenzrahmen 25 mechanisch angebunden, wobei diese mechanische Anbindung über eine Feder 26 mit einer Federsteifigkeit k symbolisiert ist. Der Positionssensor 23 misst die Position des Elementes 21 zu dem Modulrahmen 24, wobei bei Vorhandensein einer Abweichung dieses Positionssignals von der gewünschten Position des Elementes mittels eines Positionsreglers 27 über den Aktor 22 Kräfte eingestellt werden, die in dem so gebildeten Positionsregelkreis der ermittelten Abweichung entgegenwirken.

Erfindungsgemäß ist nun in dem Aufbau gemäß Fig. 2 der Modulrahmen 24 an den Referenzrahmen 25 mechanisch derart angebunden, dass für die Resonanzfrequenzen (ω_{MR}) dieser Anbindung die Bedingung

25

$$0.5 \cdot \omega_B \leq \omega_{MR} \leq 2\omega_B \quad (1)$$

erfüllt ist, wobei ω_B die Bandbreite des Positionsregelkreises bezeichnet.

- 30 Grundsätzlich wäre unter dem Aspekt der bestmöglichen Reaktion des Positionsregelkreises auch auf kleinste Abweichungen des Positionssignals von der gewünschten Position des Elementes 21 eine Maximierung der Verstärkung des Positionsregelkreises wünschenswert, wobei jedoch einer Erhöhung dieser Verstär-

kung durch das Vorhandensein von Resonanzen in der mechanischen Anbindung des Modulrahmens 24 an den Referenzrahmen 25 und die damit grundsätzlich bestehende Gefahr des Auftretens von Stabilitätsproblemen Grenzen gesetzt sind. Dieses Problem wird durch die in einem EUV-System mangels geeigneter in Frage kommender Materialien typischerweise nicht verfügbare Dämpfung der auftretenden Eigenschwingungen noch erschwert.

In Fig. 3a-b ist ausgehend von der Anordnung gemäß Fig. 2 zunächst das Frequenzverhalten des offenen Regelkreises anhand von Bode-Diagrammen für die Regelung jeweils entlang einer Achse dargestellt (d.h. zu positionierendes Element 21 bzw. Spiegel, Positionssensor 23, Positionsregler 27 und Aktor 22 sind in Reihe geschaltet). Dabei ist jeweils die auf der horizontalen Achse aufgetragene Frequenz auf die Bandbreite normiert, wobei die Bandbreite derjenigen Frequenz entspricht, bei der die Verstärkung des offenen Regelkreises Eins (entsprechend 0dB) beträgt, der Regler also dazu in der Lage ist, Störungen zu unterdrücken. Oberhalb der Bandbreite nimmt die Verstärkung auf einen Wert unterhalb von 1 ab, so dass der Regler dann nicht mehr wirksam ist. Die Phasenlage des Regelkreises ist in Fig. 3b dargestellt. Der Abstand der Kurve gemäß Fig. 3b zum 180°-Wert bei der Frequenz, die der Bandbreite entspricht, wird auch als „Phasenreserve“ bezeichnet. Aus Fig. 3 ergibt sich eine Phasenreserve von etwa 31° und die Schlussfolgerung, dass die Positionsregelung sich bei Schließen des Regelkreises stabil verhält. Es wird sogar die Anbindungsresonanz des Modulrahmens durch den Regelkreis aufgrund der erheblichen Verstärkung ($>> 0\text{dB}$) bei der Resonanzfrequenz gedämpft.

Fig. 4 dient zur Darstellung der „dynamischen Nachgiebigkeit“ der in Fig. 3 gezeigten Anordnung. Kurve „A“ in Fig. 4 zeigt das dynamische Verhalten des zu positionierenden Elementes 21 relativ zum Modulrahmen 24, Kurve „B“ das dynamische Verhalten des Modulrahmens 24 relativ zum Referenzrahmen 25, und Kurve „C“ das resultierende (und sich aus einer Addition der beiden Kurven „A“ und „B“ ergebende) dynamische Verhalten des zu positionierenden Elementes 21 relativ zum Referenzrahmen 25. Dabei beruht der Anteil aufgrund der Kurve „B“ im Wesentlichen auf der mechanischen Anbindung des Modulrahmens 24 an den Referenzrahmen 25.

renzrahmen 25, wohingegen der Anteil aufgrund der Kurve „A“ im Wesentlichen auf der Positionsregelung basiert. Wie aus Fig. 4 ersichtlich wird zum einen eine recht gute Ausbalancierung der beiden Anteile und zum anderen auch bereits eine wirksame Dämpfung der Resonanz durch den Positionsregelkreis erzielt.

5

Eine zu steife mechanische Anbindung des Modulrahmens 24 an den Referenzrahmen 25 hätte zur Folge, dass der Modulrahmen 24 mit dem Referenzrahmen 25 effektiv gewissermaßen „einen Körper“ bilden würde und die vom Referenzrahmen 25 herrührenden (und schon bei relativ niedrigen Frequenzen liegenden) Resonanzen im Positionsregelkreis „sichtbar“ würden. Die erfindungsgemäße, vorstehend unter Bezugnahme auf Fig. 2-5 beschriebene Architektur hat demgegenüber den Vorteil, dass zum einen der Modulrahmen 24 vergleichsweise kompakt und mit hohen Eigenfrequenzen ausgestaltet werden kann, wobei er von dem Referenzrahmen 25 entkoppelt ist, zugleich aber noch die mechanische Anbindung steif genug ist, dass die vom Referenzrahmen 25 zu übernehmende Position nicht verloren wird.

Wie im Weiteren unter Bezugnahme auf Fig. 5-6 näher erläutert kann die resultierende Positionsstabilität des an dem Referenzrahmen angebundenen Modulrahmens bzw. des zu positionierenden Elements unter Verwendung einer Beschleunigungsvorsteuerung weiter gesteigert werden. Dabei sind von Fig. 5 im Vergleich zu der Anordnung von Fig. 2 analoge bzw. im Wesentlichen funktionsgleiche Komponenten mit um „30“ erhöhten Bezugsziffern bezeichnet.

Die in der Anordnung gemäß Fig. 5 realisierte Beschleunigungsvorsteuerung geht von der Überlegung aus, die Kraft f_E , die auf das zu positionierende Element 51 aufgebracht werden muss, damit dieses dem Referenzrahmen 55 möglichst abweichungsfrei folgt, aus der mit einem Beschleunigungssensor 59 gemessenen Beschleunigung des Referenzrahmens 55 gemäß

30

$$f_E = m_E a_{BR} \approx m_E a_{MR} \quad (2)$$

zu bestimmen und vorzusteuern, wodurch die Positionsstabilität des Elementes 51 zum Modulrahmen 54 erheblich gesteigert werden kann. Hier bezeichnet m_E die Masse des zu positionierenden Elementes 51, a_{BR} die Beschleunigung des Referenzrahmens 55 und a_{MR} die Beschleunigung des Modulrahmens 54.

5

Wie aus Fig. 6 ersichtlich wird infolgedessen der durch die Kurve „A“ repräsentierte Beitrag der Nachgiebigkeit des Elementes 51 relativ zum Modulrahmen 54, also der Beitrag aufgrund der Regelung, wesentlich reduziert (und praktisch zu Null).

10 Wie im Weiteren unter Bezugnahme auf Fig. 7-8 näher erläutert kann die resultierende Positionsstabilität des an dem Referenzrahmen angebundenen Modulrahmens bzw. des zu positionierenden Elements unter Verwendung einer Kompensation der „quasistatischen Deformation“ der Anbindung weiter gesteigert werden. Hierbei wird berücksichtigt, dass die Positionsstabilität des zu positionierenden
15 Elementes gegenüber dem Referenzrahmen u.a. auch durch die („quasistatische“) Nachgiebigkeit der Anbindung des Modulrahmens an den Referenzrahmen für Störungen mit Frequenzen unterhalb der Anbindungsresonanzfrequenz bestimmt wird.

20 Dabei sind von Fig. 7 im Vergleich zu der Anordnung von Fig. 5 analoge bzw. im Wesentlichen funktionsgleiche Komponenten mit um „20“ erhöhten Bezugsziffern bezeichnet.

Auf diese Weise kann das bei den Ausführungsformen gemäß Fig. 2 und Fig. 5
25 verbleibende Problem der Deformation der Anbindungssteifigkeit, d.h. eines Anbindungsfehlers in der mechanischen Anbindung des Modulrahmens 74, berücksichtigt werden. Dieser Ansatz beruht darauf, bei Kenntnis der Steifigkeit und die Masse des Systems sowie Kenntnis der Beschleunigung (aus dem Beschleunigungssensor 79) auszurechnen, wie groß die Deformation der die mechanische
30 Anbindung repräsentierenden Feder 76 sein wird. Dieses Signal kann wiederum an den Positionsregelkreis gegeben werden, damit der vorgegebene Sollwert der auf das Element 71 zur Positionierung ausgeübten Kraft entsprechend erhöht oder verringert werden soll, um die besagte Deformation der Feder 76 bzw. der Anbin-

dungssteifigkeit des Modulrahmens 74 auszugleichen. Mit „79a“ ist in Fig. 7 ein entsprechender Deformationskompensationsregler bezeichnet, welcher eine Deformation der mechanischen Anbindung des Modulrahmens 74 an den Referenzrahmen 75 wenigstens teilweise kompensiert.

5

Hierzu wird die quasistatische Deformation der Anbindung des Modulrahmens 74 aus dem Beschleunigungssignal gemäß

$$q_{MR} = \frac{m_{MR} + m_E}{k_{MR}} a_{BR} \approx \frac{m_{MR} + m_E}{k_{MR}} a_{MR} \quad (3)$$

10

ermittelt und dem Positionsregelkreis als Sollwert aufgeschaltet. Das zu positionierende Element 71 führt dann eine der Deformation gegenläufige, gleich große ausgleichende Bewegung aus.

15 Eine etwaige kinematische Umlenkung zwischen Aktor 72 und Element 71 (z.B. „Translation“ auf „Winkel“ wie in der weiter unten beschriebenen Ausführungsform gemäß Fig. 15) kann in den Gleichungen entsprechend berücksichtigt werden. Sollen auch Störungen bei oder oberhalb der Anbindungsresonanz unterdrückt werden, so kann das quasistatische Kompensationsmodell durch ein dynamisches
20 Kompensationsmodell ersetzt werden. Weiterhin kann man zur Driftkorrektur unterhalb der Bandbreite des Beschleunigungssensors 79 einen Positionssensor zwischen Modulrahmen 74 und Referenzrahmen 75 einführen, dessen stark tiefpassgefiltertes Deformationssignal ($\ll \omega_B$) auf die Führungsgröße aufaddiert wird.

25 Wie aus Fig. 8 ersichtlich ist, erzeugt zwar das dynamische Verhalten des Modulrahmens 74 (Kurve „B“) unverändert einen Fehler bei Werten Frequenz/Bandbreite unterhalb 10^0 , der Beitrag der Bewegung des Elementes 71 relativ zum Modulrahmen 74 (Kurve „A“) erzeugt jedoch exakt denselben Fehler mit anderem Vorzeichen (letzteres ist in der Betragsdarstellung nicht erkennbar), so
30 dass die Summe der beiden Beiträge im Wesentlichen Null ergibt, wenn die Signale exakt in Phase sind (was bei niedrigen Frequenzen der Fall ist). Infolgedessen geht die insgesamt erhaltene Nachgiebigkeit für niedrige Frequenzen gegen Null.

Im Ergebnis folgt für den Fall, dass sich der Referenzrahmen 75 bewegt, dass zu positionierende Element für niedrige Frequenzen im Wesentlichen tatsächlich dieser Bewegung des Referenzrahmens 75.

- 5 Der Beschleunigungssensor 79 kann entweder auf dem Referenzrahmen 75 oder auf dem Modulrahmen 74 platziert werden, da der Modulrahmen 74 dem Referenzrahmen 75 bis zur Anbindungsfrequenz annähernd verzögerungsfrei folgt. Hierbei ist die Platzierung des Beschleunigungssensors 79 auf dem Modulrahmen 74 zum einen in Hinblick darauf vorteilhaft, dass die Modularität unterstützt wird
10 und der Beschleunigungssensor 79 direkt mit dem Positionssensor 73 und dem Aktor 72 mit einer ggf. lokalen Regeleinheit verschaltet werden kann. Zum anderen bietet die Filterung mit der schwach gedämpften Anbindungsresonanz eine wirksame Unterdrückung von unerwünschten hochfrequenten Beschleunigungssignalen (-40 dB/Dekade ab der Anbindungsresonanzfrequenz), ohne hierbei die erwünschten niederfrequenten Beschleunigungssignale signifikant zu verzögern.
15 Andererseits kann sich die Platzierung des Beschleunigungssensors 79 auf dem Modulrahmen 74 bei der hier zunächst diskutierten Realisierung mit einem Aktor 72 insofern als problematisch erweisen, als sie dazu führt, dass die Beschleunigungsvorsteuerung zu einer Rückkopplung wird, da die erzeugte Vorsteuerungskraft auf den Modulrahmen 74 und damit auf den Beschleunigungssensor 79
20 rückwirkt, was bei kleiner Masse des Modulrahmens 74 (wie sie etwa in einer Größenordnung des 2- bis 6-fachen der Masse des Elementes 71 grundsätzlich möglich ist) zu einer Instabilität des Systems führen kann. Bei vergleichsweise großer Masse des Modulrahmens ($m_{MR} \gg 10m_E$) kann hingegen eine Platzierung
25 des Beschleunigungssensors 79 auf dem Modulrahmen 74 erfolgen.

In Fig. 9 sind nochmals in einer Zusammenschau die vorstehend unter Bezugnahme auf Fig. 2, Fig. 5 und Fig. 7 beschriebenen Ausbaustufen der erfindungsgemäßen Anordnung mit einem Aktor ohne zusätzliche Vorsteuerung (Kurve „D“),
30 mit zusätzlicher Beschleunigungsvorsteuerung (Kurve „E“) und mit zusätzlicher Beschleunigungsvorsteuerung und zusätzlicher Deformationskompensation hinsichtlich der Anbindung des Modulrahmens 74 (Kurve „F“) dargestellt.

Im Folgenden wird unter Bezugnahme auf Fig. 10ff. ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung beschrieben. Diesem liegt das Konzept zugrunde, unter Einsatz von wenigstens zwei voneinander unabhängigen Aktoren eine Konfiguration zu verwirklichen, in welcher effektiv gar nicht erst Kräfte auf den Referenzrahmen zurückwirken, wobei durch eine vorteilhafte Anordnung dieser Aktoren bereits eine gute Entkopplung erreicht werden kann. Das Vorhandensein von zwei Aktoren ermöglicht es hierbei jeweils, Kräfte im Wesentlichen unabhängig voneinander einerseits auf das zu positionierende Element und andererseits auf den Modulrahmen aufzubringen. Mit anderen Worten kann ein aufgrund des Vorhandenseins von zwei Aktoren zusätzlich gewonnener „Hebel“ bzw. Freiheitsgrad genutzt werden, dass effektiv gar keine Kräfte mehr auf den Referenzrahmen aufgebracht werden und dadurch eine Entkopplung von dessen Dynamik erzielt wird.

Dabei können die mit den von den beiden Aktoren erzeugten Kräften einhergehenden Reaktionskräfte von jeweils einer zusätzlichen Hilfsmasse (im Folgenden auch als „Reaktionsmasse“ bezeichnet) aufgenommen werden. Wie in Fig. 11a schematisch dargestellt ist, kann dabei eine Reaktionsmasse pro Aktuator eingesetzt werden. In weiteren Ausführungsformen kann gemäß Fig. 11b,c die Anzahl der benötigten Reaktionsmassen auch auf Eins reduziert werden, indem einer der beiden Aktoren mit Kraft bzw. Reaktionskraft auf das zu positionierende Element und den Modulrahmen wirkt und der andere der beiden Aktoren so angesteuert wird, dass er die zum anderen Aktor gehörige Reaktionskraft kompensiert.

Konkret ist gemäß Fig. 11a jedem der zwei Aktoren 112a, 112b eine Hilfsmasse 113a bzw. 113b („Reaktionsmasse“) zugeordnet werden. Gemäß Fig. 11b wird in Verbindung mit einem Aktor 112c, welcher sowohl eine Aktionskraft als auch eine Reaktionskraft erzeugt, ein zweiter Aktor 112d mit einer Hilfsmasse 113d eingesetzt, wobei effektiv über den zweiten Aktor 112d eine zweite Kraft erzeugt werden kann, die nur auf den Modulrahmen 114b wirkt. Da die von dem ersten Aktor 112c aufgebrauchten Reaktionskräfte bekannt sind, können diese über den zweiten Aktor 112d wieder kompensiert werden.

Die Hilfsmasse(n) ist bzw. sind ihrerseits gemäß Fig. 11a-c über eine vergleichsweise weiche Feder 115a, 115b, 115d bzw. 115e mechanisch an den Modulrahmen 114a, 114b bzw. 114c angebunden, so dass insoweit keine nennenswerten Kräfte mehr auf den Modulrahmen 114a, 114b bzw. 114c übertragen werden. In weiteren Ausführungsformen kann die Feder 115a, 115b, 115d bzw. 115e auch an das zu positionierende Element 111a, 111b bzw. 111c oder an den (in Fig. 11a-c nicht dargestellten) Referenzrahmen mechanisch angebunden sein.

In Fig. 12 ist mit m_E die Masse des zu positionierenden Elements 121 bezeichnet, und mit m_D ist eine zusätzliche Hilfsmasse eines zusätzlichen Elementes 121x bezeichnet, bei der es sich z.B. um eine nicht genutzte Spiegelfacetten in einem Facettenspiegel handeln kann. Ein erster Aktor 122a übt auf das zu positionierende Element 121 eine Kraft aus, die mit einer Reaktionskraft auf den Modulrahmen 124 einhergeht. Auf die Hilfsmasse des zusätzlichen Elementes 121x wird mittels eines zweiten Aktors 122b eine zweite (von der Kraft des Aktors 122a unabhängige) Kraft erzeugt, die ebenfalls auf den Modulrahmen 124 wirkt.

Die wie vorstehend beschrieben verwirklichte Erzeugung von zwei voneinander unabhängigen Kräften kann in der Prinzipdarstellung von Fig. 10 auch so dargestellt werden, dass über einen zweiten (virtuellen) Aktor, der nur auf den Modulrahmen 104 wirkt, in Verbindung mit einem Beschleunigungssensor 109 eine aktive Dämpfung erzeugt wird. Im Ergebnis kann dies insofern gewissermaßen als effektiv „reaktionskraftfreie“ Realisierung eines Aktors angesehen werden, als die Reaktionskraft nicht auf den sowohl an das optische Element als auch den Positionssensor angebundenen Modulrahmen wirkt, sondern auf eine andere (Hilfs-) Masse.

In der Ausführungsform von Fig. 11b lässt sich die Reaktionsmasse beispielsweise durch ein nur für diesen Zweck eingesetztes und im Übrigen im System nicht benötigtes bzw. keine weitere Funktion wahrnehmendes Element (= „Dummy-Element“) realisieren, wobei in einer Anordnung mit einer Mehrzahl von zu positionierenden Elementen auch ein einzelnes Dummy-Element ausreichend ist, um für alle zu positionierenden Elemente die jeweils resultierende Reaktionskraft kom-

- pensieren. Eine solche Anordnung ist schematisch in Fig. 13 angedeutet, wobei es sich bei der Mehrzahl von zu positionierenden Elementen 121a, 121b,..., die gemäß Fig. 13 jeweils über eine Feder 125a, 125b,... an einen gemeinsamen Modulrahmen 124 mechanisch angebunden sind, z.B. um Spiegelfacetten eines Facettenspiegels (z.B. eines Feldfacettenspiegels oder eines Pupillenfacettenspiegels) handeln kann. Das zusätzliche, allein die Funktion als Hilfs- bzw. Reaktionsmasse wahrnehmende „Dummy-Element“ ist in Fig. 13 mit „121x“ bezeichnet, wobei hier der weitere Vorteil deutlich wird, dass bei einer typischerweise hohen Anzahl von zu positionierenden Elementen 121a, 121b,... (die je nach Anwendung mehrere zehn oder sogar mehrere hundert betragen kann) die Platzierung lediglich eines zusätzlichen, als Hilfs- bzw. Reaktionsmasse wirkenden „Dummy-Elements“ nicht zu einer nennenswerten Erhöhung des konstruktiven Aufwandes führt.
- Selbstverständlich können die zuvor unter Bezugnahme auf die Ausführungsformen von Fig. 5 und Fig. 7 erläuterten Maßnahmen einer zusätzlichen Beschleunigungsvorsteuerung sowie einer zusätzlichen Deformationskompensation hinsichtlich der Anbindung des Modulrahmens auch in Verbindung mit dem vorstehend beschriebenen Einsatz von zwei Aktoren verwirklicht werden. Eine entsprechende Anordnung ist in Fig. 14 schematisch dargestellt, wobei zu Fig. 7 analoge bzw. im Wesentlichen funktionsgleiche Komponenten mit um „70“ erhöhten Bezugsziffern bezeichnet sind. Im Unterschied zur Ausführungsform mit nur einem Aktor gemäß Fig. 7 ist in der Anordnung von Fig. 14 mit zwei Aktoren 142a, 142b eine aktive Dämpfung realisiert, wobei der entsprechende Regler in der äußeren Schleife von Fig. 14 angedeutet und mit „149b“ bezeichnet ist.

Wenngleich die Abbildungen und Gleichungen in der vorliegenden Anmeldung aus Gründen der einfacheren und anschaulicheren Darstellung für ein System mit einem translatorischen Freiheitsgrad angegeben sind, können diese jeweils in einfacher Weise auf rotatorische Bewegungen und Systeme mit mehr als einem Freiheitsgrad übertragen werden, wobei in diesem Falle je Freiheitsgrad wenigstens ein Sensor und wenigstens ein Aktor verwendet werden. Der Positionsregelkreis kann entweder mit wenigstens einem Eingrößenregler (SISO-System mit einem

Eingang und einem Ausgang) je manipuliertem Freiheitsgrad oder mit einem oder mehreren Mehrgrößenreglern (MIMO) geschlossen werden. Im Falle der Ausgestaltung mit Mehrgrößenregler(n) muss die Summe der Anzahl der Eingänge und die Summe der Anzahl der Ausgänge der verwendeten Mehrgrößenregler größer oder gleich der Anzahl der manipulierten Freiheitsgrade sein.

Fig. 15 zeigt eine Ausführungsform mit zwei Freiheitsgraden der Positionsmanipulation, wobei es sich hier um die rotatorischen Freiheitsgrade R_x (= Rotation um die x-Achse) und R_y (= Rotation um die y-Achse) handelt. Das zu positionierende Element 161 ist in einem Kugelgelenk 165 in Bezug auf einen Modulrahmen 164 gelagert, wobei ein Aktor 162a und ein Sensor 163a für den Freiheitsgrad R_x vorgesehen sind und wobei ein weiterer Aktor 162b und ein weiterer Sensor 163b für den Freiheitsgrad R_y vorgesehen sind, wobei die Aktoren 162a, 162b jeweils translatorisch wirken.

Fig. 16 zeigt eine schematische Darstellung einer beispielhaften für den Betrieb im EUV ausgelegten Projektionsbelichtungsanlage, in welcher die vorliegende Erfindung realisierbar ist.

Gemäß Fig. 16 weist eine Beleuchtungseinrichtung in einer für EUV ausgelegten Projektionsbelichtungsanlage 600 einen Feldfacettenspiegel 603 und einen Pupillenfacettenspiegel 604 auf. Auf den Feldfacettenspiegel 603 wird das Licht einer Lichtquelleneinheit, welche eine Plasmalichtquelle 601 und einen Kollektorspiegel 602 umfasst, gelenkt. Im Lichtweg nach dem Pupillenfacettenspiegel 604 sind ein erster Teleskopspiegel 605 und ein zweiter Teleskopspiegel 606 angeordnet. Im Lichtweg nachfolgend ist ein Umlenkspiegel 607 angeordnet, der die auf ihn treffende Strahlung auf ein Objektfeld in der Objektebene eines sechs Spiegel 651-656 umfassenden Projektionsobjektivs lenkt. Am Ort des Objektfeldes ist eine reflektive strukturtragende Maske 621 auf einem Maskentisch 620 angeordnet, die mit Hilfe des Projektionsobjektivs in eine Bildebene abgebildet wird, in welcher sich ein mit einer lichtempfindlichen Schicht (Photoresist) beschichtetes Substrat 661 auf einem Wafertisch 660 befindet.

Wenn die Erfindung auch anhand spezieller Ausführungsformen beschrieben wurde, erschließen sich für den Fachmann zahlreiche Variationen und alternative Ausführungsformen, z.B. durch Kombination und/oder Austausch von Merkmalen einzelner Ausführungsformen. Dementsprechend versteht es sich für den Fachmann, dass derartige Variationen und alternative Ausführungsformen von der vor-

5 liegenden Erfindung mit umfasst sind, und die Reichweite der Erfindung nur im Sinne der beigefügten Patentansprüche und deren Äquivalente beschränkt ist.

Patentansprüche

1. Anordnung zur Positionsmanipulation eines Elementes, insbesondere in einem optischen System, in wenigstens einem Freiheitsgrad, mit:

- 5 • wenigstens einem Aktor (22, 52, 72, 102a, 102b, 122a, 122b, 142a, 142b, 162a, 162b) je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation zur Ausübung stellbarer Kräfte auf das Element (21, 51, 71, 101, 121, 141, 161);
- 10 • wenigstens einem Positionssensor (23, 53, 73, 103, 163a, 163b) je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation zur Erzeugung jeweils eines für die Position des Elementes charakteristischen Sensorsignals; und
- 15 • wenigstens einem Positionsregler (27, 57, 77, 107), welcher in einem Positionsregelkreis eine von dem wenigstens einen Aktor zur Positionierung des Elementes auf das Element ausgeübte Kraft in Abhängigkeit von dem wenigstens einen Sensorsignal regelt;
- 20 • wobei wenigstens ein Aktor und wenigstens ein Positionssensor auf einem gemeinsamen Modulrahmen (24, 54, 74, 104, 124, 144, 164) montiert sind; und
- 25 • wobei dieser Modulrahmen an einen Referenzrahmen (25, 55, 75, 105, 125, 145) mechanisch derart angebunden ist, dass für die Resonanzfrequenzen (ω_{MR}) dieser Anbindung die Bedingung $0.5 \cdot \omega_B \leq \omega_{MR} \leq 2\omega_B$ erfüllt ist, wobei ω_B die Bandbreite des Positionsregelkreises bezeichnet.

2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass diese genau einen Aktor (22, 52, 72) für jeden Freiheitsgrad der Positionsmanipulation aufweist.

30 3. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass diese wenigstens zwei Aktoren (122a, 122b, 142a, 142b) je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation aufweist, wobei die von diesen Aktoren auf das Element (121,

141) ausgeübten Kräfte voneinander unabhängig stellbar sind.

4. Anordnung nach Anspruch 1 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass diese aufweist:

- 5
- wenigstens zwei Aktoren (122a, 122b, 142a, 142b) je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation; und
 - wenigstens einen Positionsregler (127, 147), welcher in einem Positionsregelkreis in Abhängigkeit von dem wenigstens einen Sensorsignal von den Aktoren (122a, 122b, 142a, 142b) ausgeübte Kräfte
- 10 te voneinander unabhängig regelt, wobei wenigstens einer der Aktoren eine Kraft auf das Element ausgeübt;
- wobei wenigstens einem dieser Aktoren (122b) ein weiteres Element (121x) mit einer Reaktionsmasse (m_D) derart zugeordnet ist, dass die mit der von dem betreffenden Aktor auf das zu positionierende Element ausgeübten Kraft einhergehende Reaktionskraft auf diese Reaktionsmasse wirkt.
- 15

5. Anordnung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die mit der von wenigstens einem der Aktoren (122a, 122b, 142a, 142b) auf das zu positionierende Element oder den Modulrahmen ausgeübten Kraft einhergehende Reaktionskraft durch einen anderen Aktor der wenigstens zwei Aktoren kompensierbar ist.
- 20

6. Anordnung nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass die wenigstens zwei Aktoren (122a, 122b, 142a, 142b) und der Positionssensor (123, 143) auf einem gemeinsamen Modulrahmen (124, 144) montiert sind.
- 25

7. Anordnung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die wenigstens eine Reaktionsmasse (m_D) mechanisch an diesen Modulrahmen (124, 144) angebunden ist.
- 30

8. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass diese ferner eine Beschleunigungsvorsteuerung (58, 78, 128,

148) aufweist, welche die auf das zu positionierende Element (51, 71, 121, 141) ausgeübte Kraft basierend auf einer Beschleunigung des Referenzrahmens (55, 75, 125, 145) modifiziert.

- 5 9. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass diese einen Beschleunigungssensor (59, 79, 129, 149) zur Messung der Beschleunigung des Referenzrahmens (55, 75, 125, 145) aufweist.
- 10 10. Anordnung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass dieser Beschleunigungssensor (59, 79, 129, 149) auf dem Modulrahmen (54, 74, 124, 144) montiert ist.
- 15 11. Anordnung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass dieser Beschleunigungssensor auf dem Referenzrahmen (55, 75, 125, 145) montiert ist.
- 20 12. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass diese ferner einen Deformationskompensationsregler (79a, 149a) aufweist, welcher eine Deformation der mechanischen Anbindung des Modulrahmens (74, 144) an den Referenzrahmen (75, 145) wenigstens teilweise kompensiert.
- 25 13. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass diese zur Positionsmanipulation des Elementes (161) in einer Mehrzahl von Freiheitsgraden ausgelegt ist, wobei die Anordnung wenigstens einen Aktor (162a, 162b) je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation zur Ausübung stellbarer Kräfte auf das Element (161) und wenigstens einen Positionssensor (163a, 163b) je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation zur
- 30 Erzeugung eines für die Position des Elementes (161) charakteristischen Sensorsignals aufweist.
14. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,

zeichnet, dass diese zur Positionsmanipulation einer Mehrzahl von Elementen (121a, 121b,...) in wenigstens einem Freiheitsgrad ausgelegt ist, wobei die Elemente (121a, 121b,...) gemeinsam auf dem Modulrahmen (124) montiert sind.

5

15. Anordnung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass diese für eine Mehrzahl von Elementen (121a, 121b,...) einen gemeinsamen zusätzlichen Aktor je Freiheitsgrad der Positionsmanipulation zur Kompensation von Reaktionskräften aufweist.

10

16. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Modulrahmen (24, 54, 74, 104, 124, 144) eine Masse besitzt, welche nicht mehr als das 10-fache der Masse (m_E) des zu positionierenden Elementes (21, 51, 71, 101, 121, 141, 161) beträgt, wobei die Masse des Modulrahmens vorzugsweise im Bereich vom 2-fachen bis zum 6-fachen der Masse des zu positionierenden Elementes liegt.

15

17. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das zu positionierende Element (21, 51, 71, 101, 121, 141, 161) ein Spiegel ist.

20

18. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das zu positionierende Element (21, 51, 71, 101, 121, 141, 161) eine Spiegelfacette eines Facettenspiegels ist, wobei dieser Facettenspiegel eine Mehrzahl von Spiegelfacetten aufweist.

25

19. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das System ein optisches System einer Projektionsbelichtungsanlage ist.

30

20. Projektionsbelichtungsanlage mit einer Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

21. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass diese für einen Betrieb bei einer Arbeitswellenlänge von weniger als 15 nm ausgelegt ist.

Fig. 1

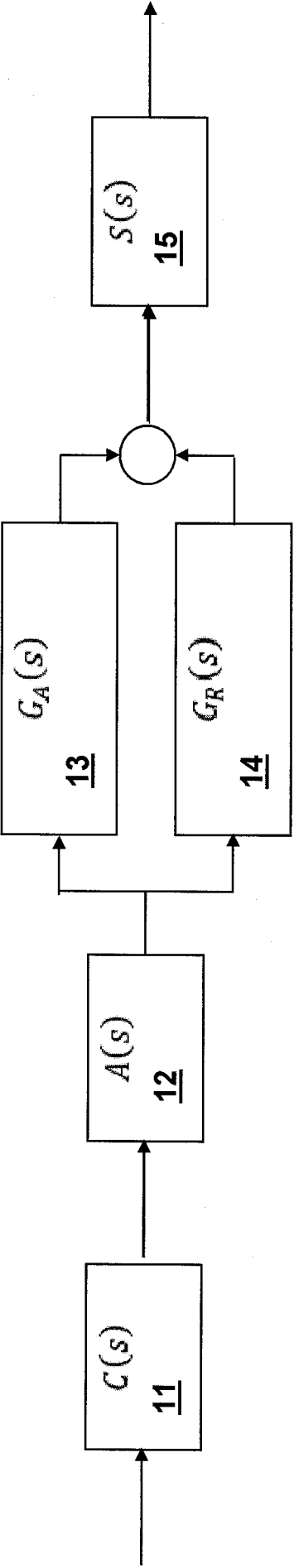


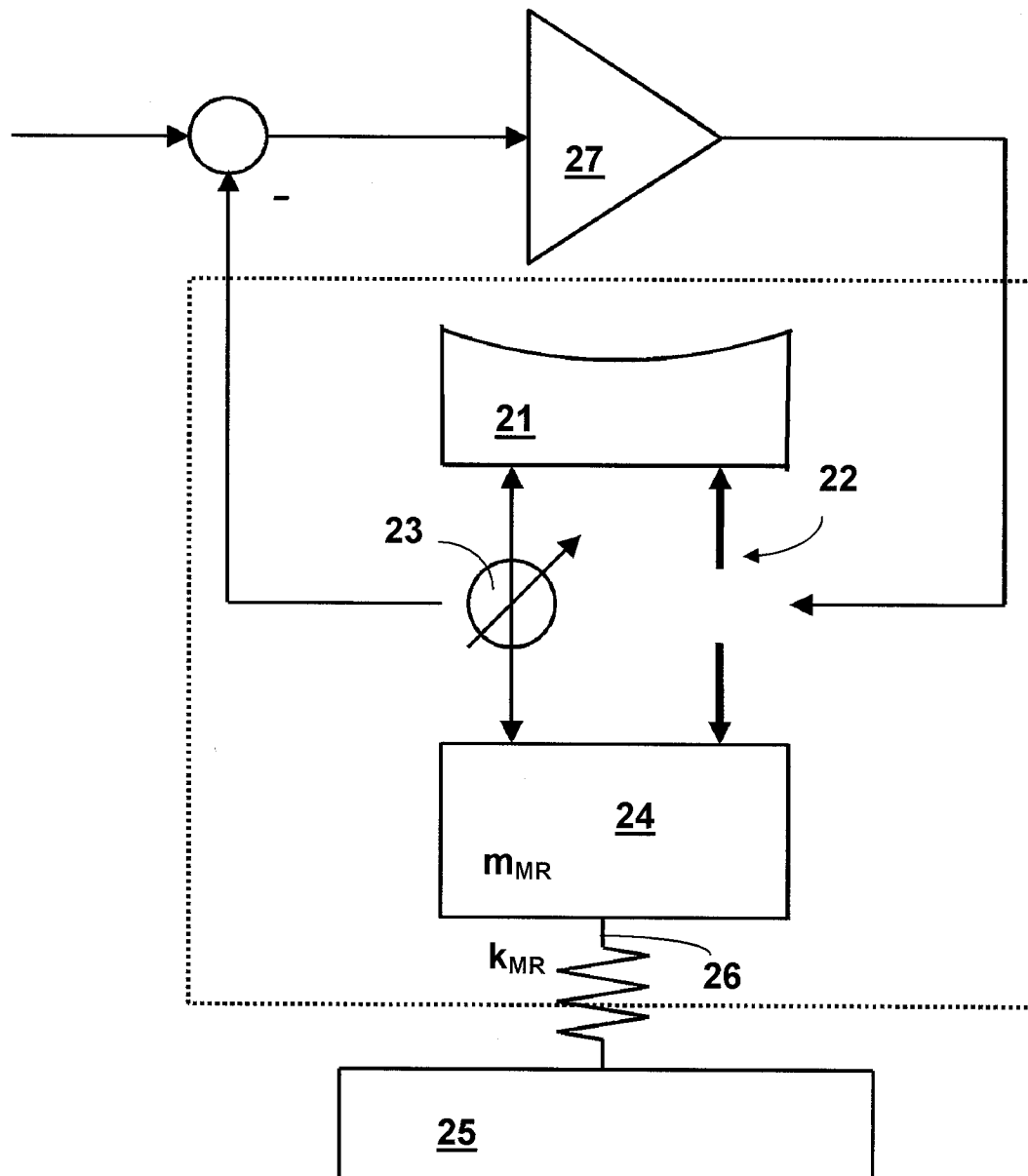
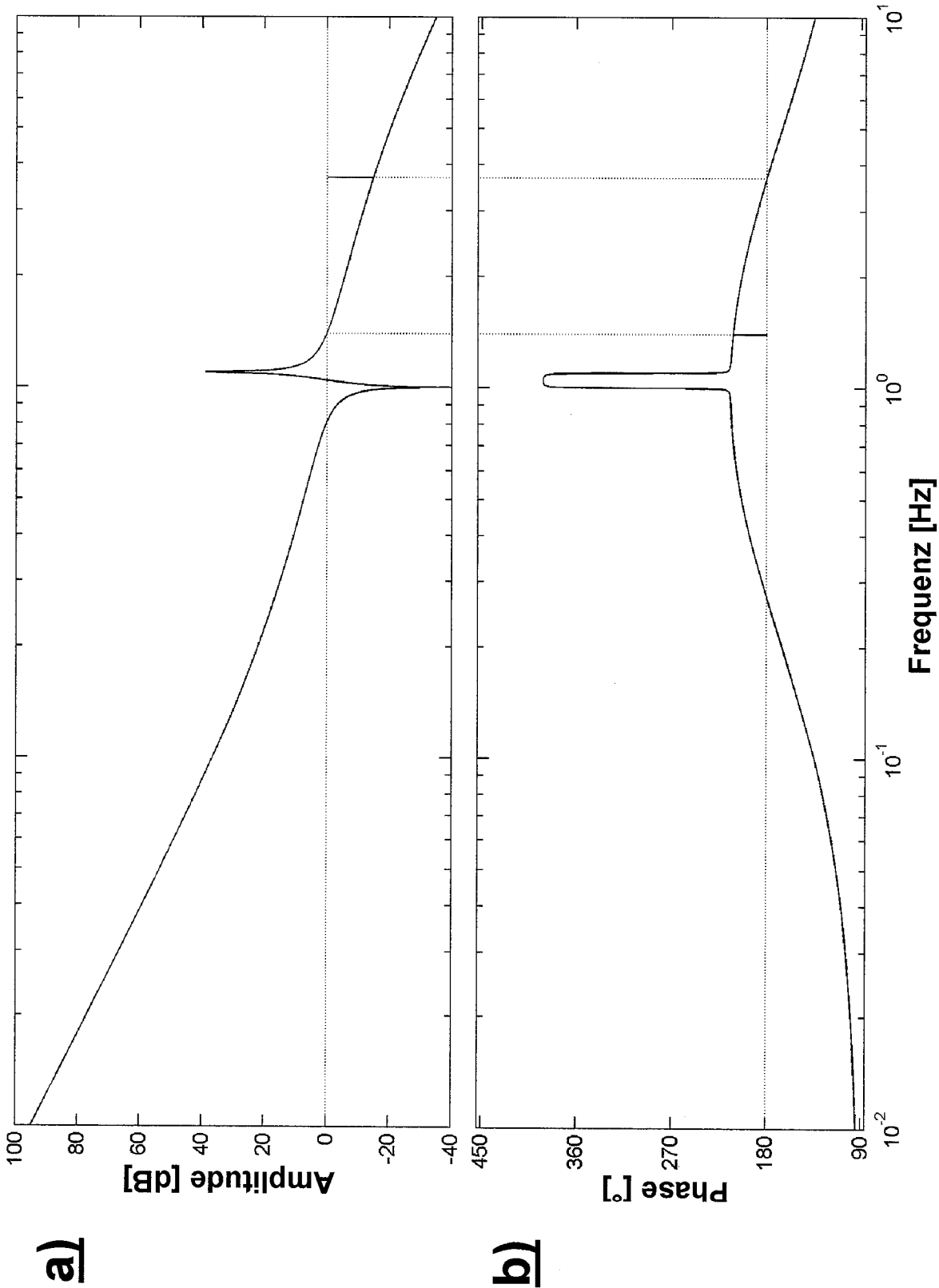
Fig. 2

Fig. 3



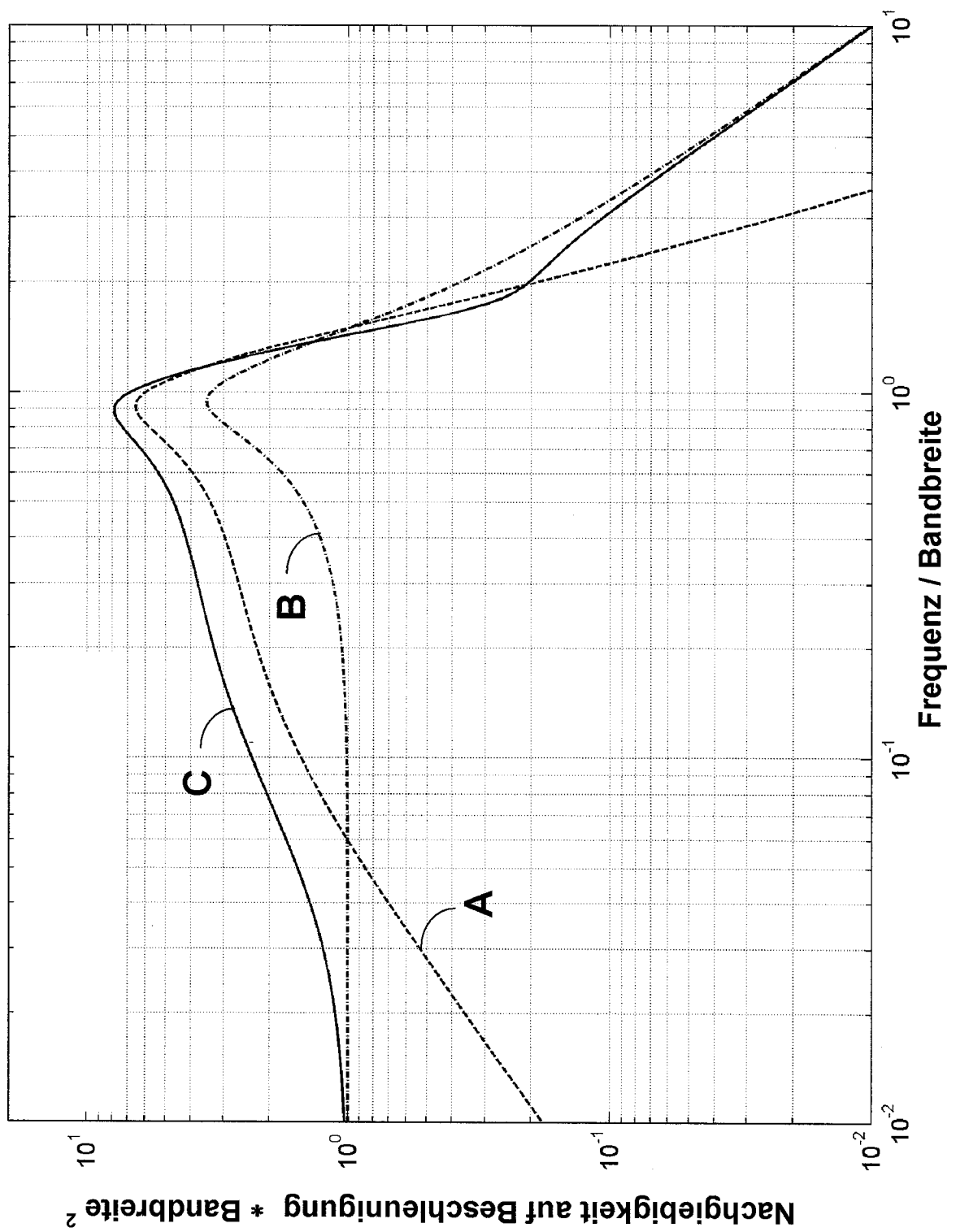
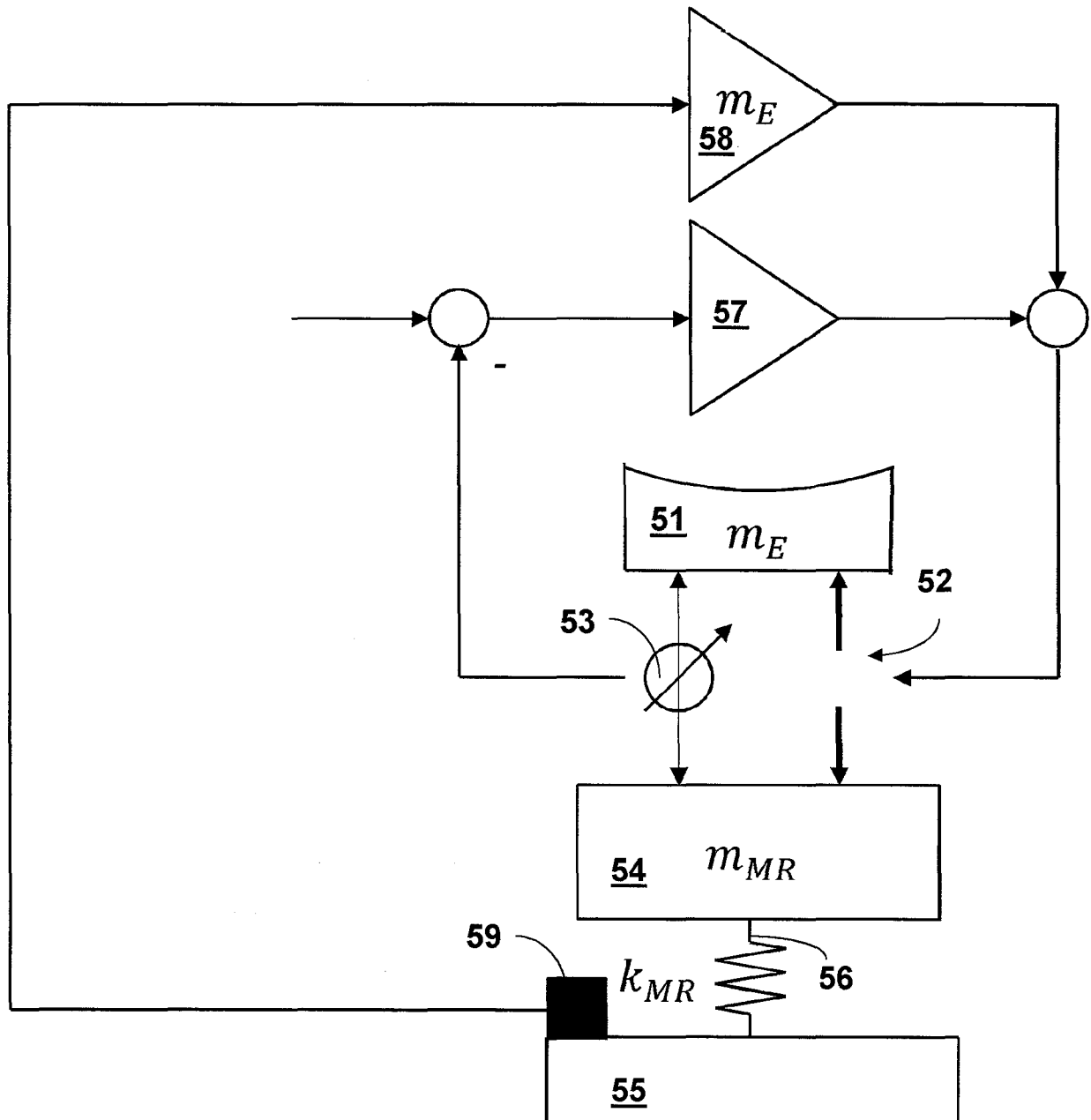
**Fig. 4**

Fig. 5

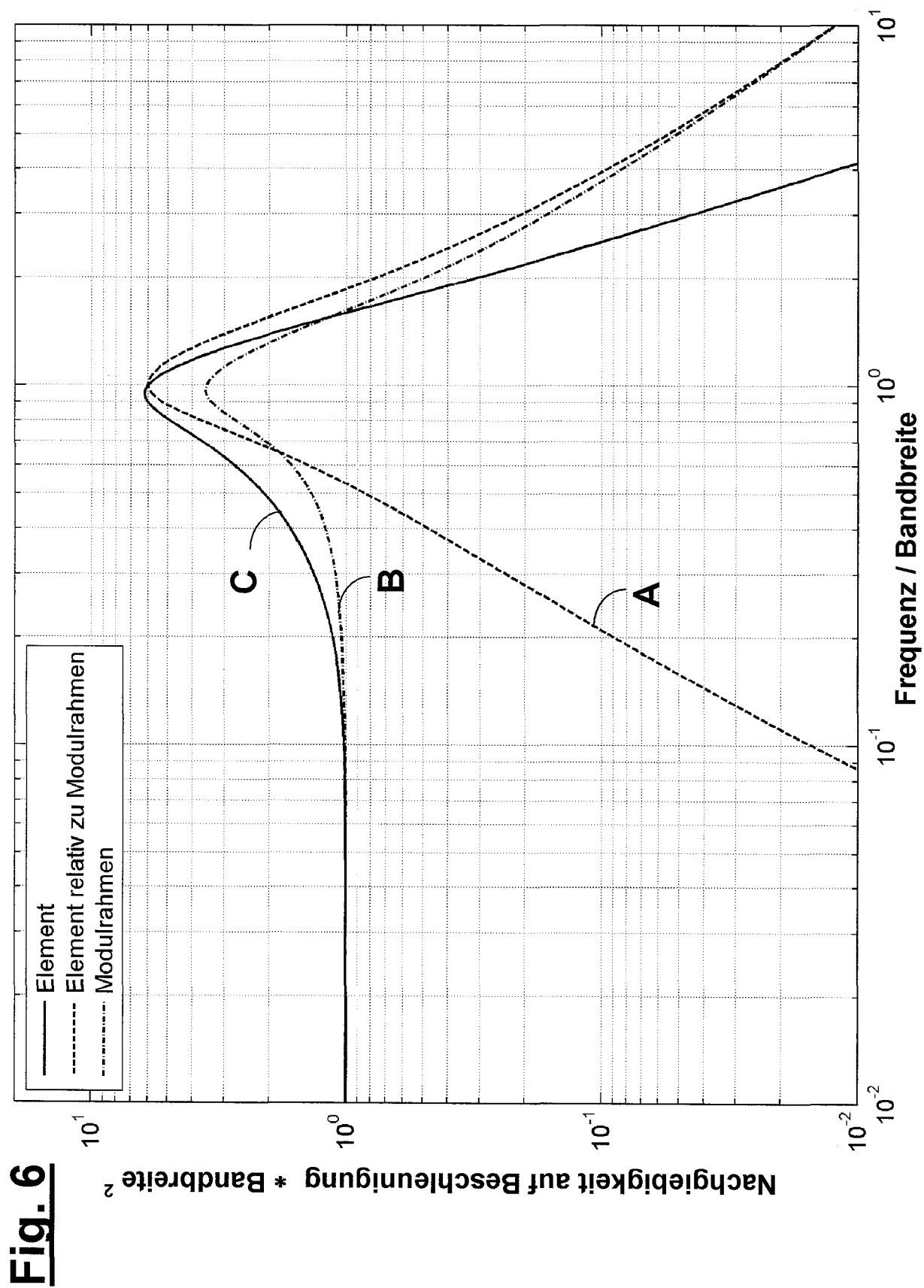


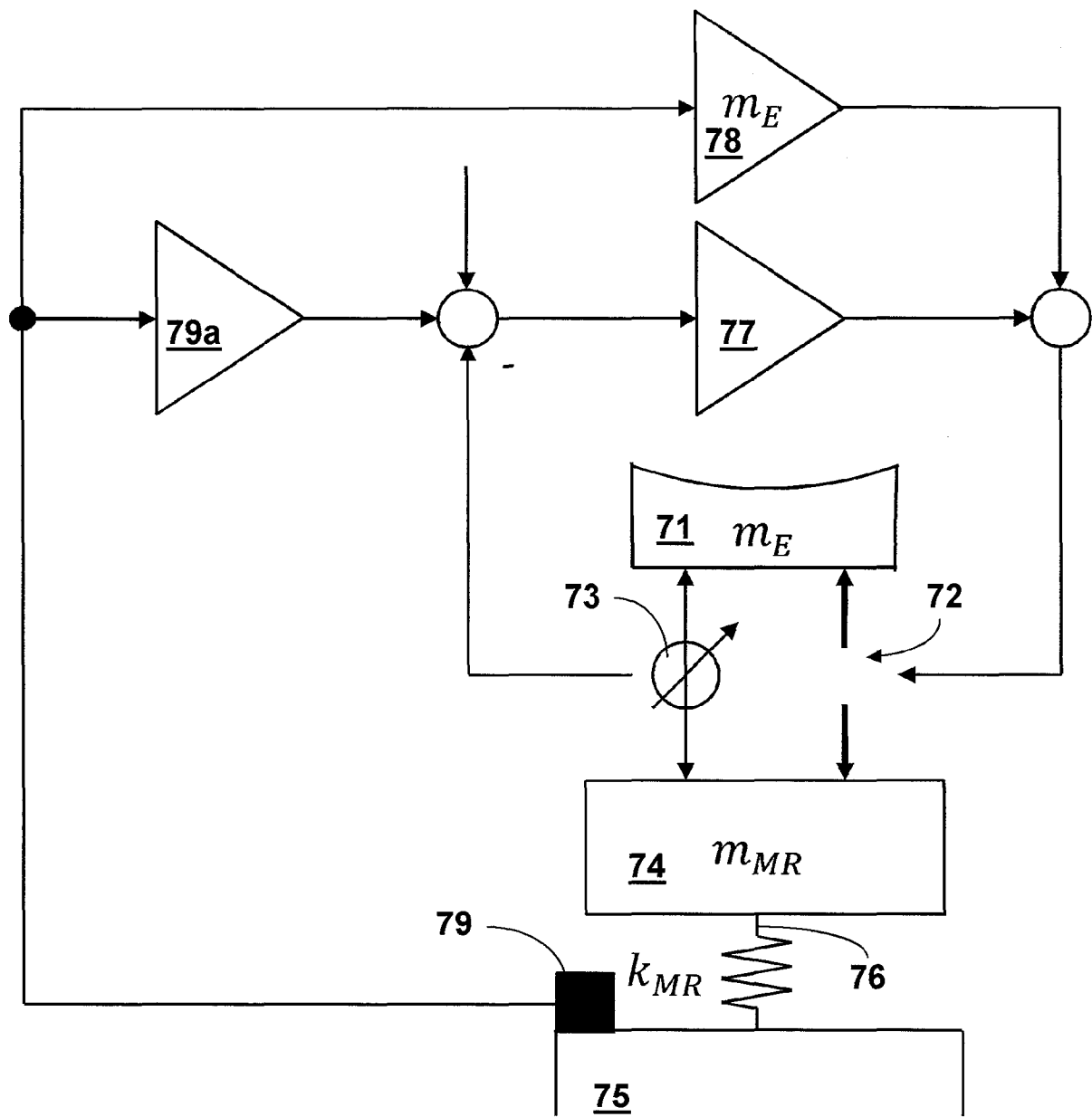
Fig. 7

Fig. 8

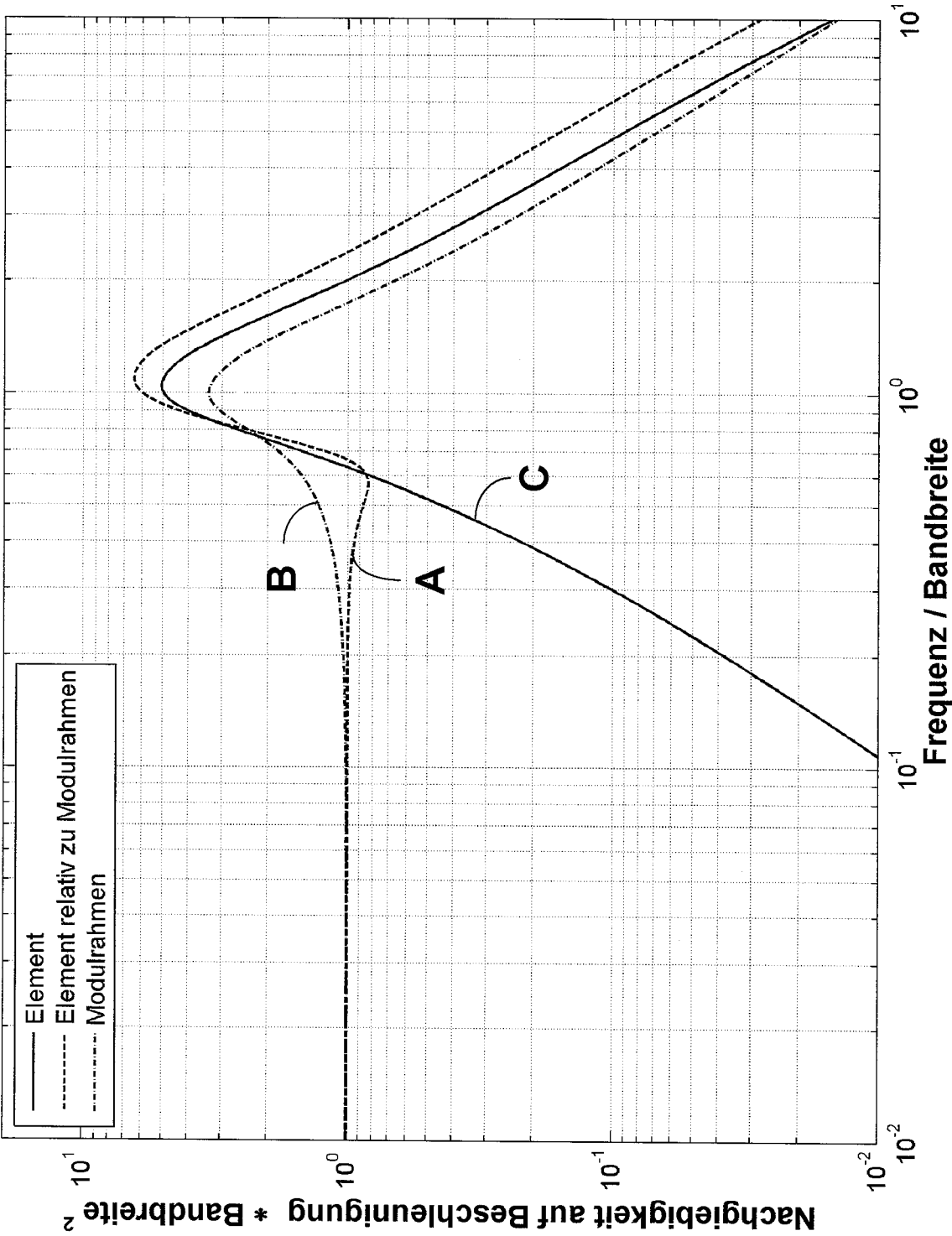


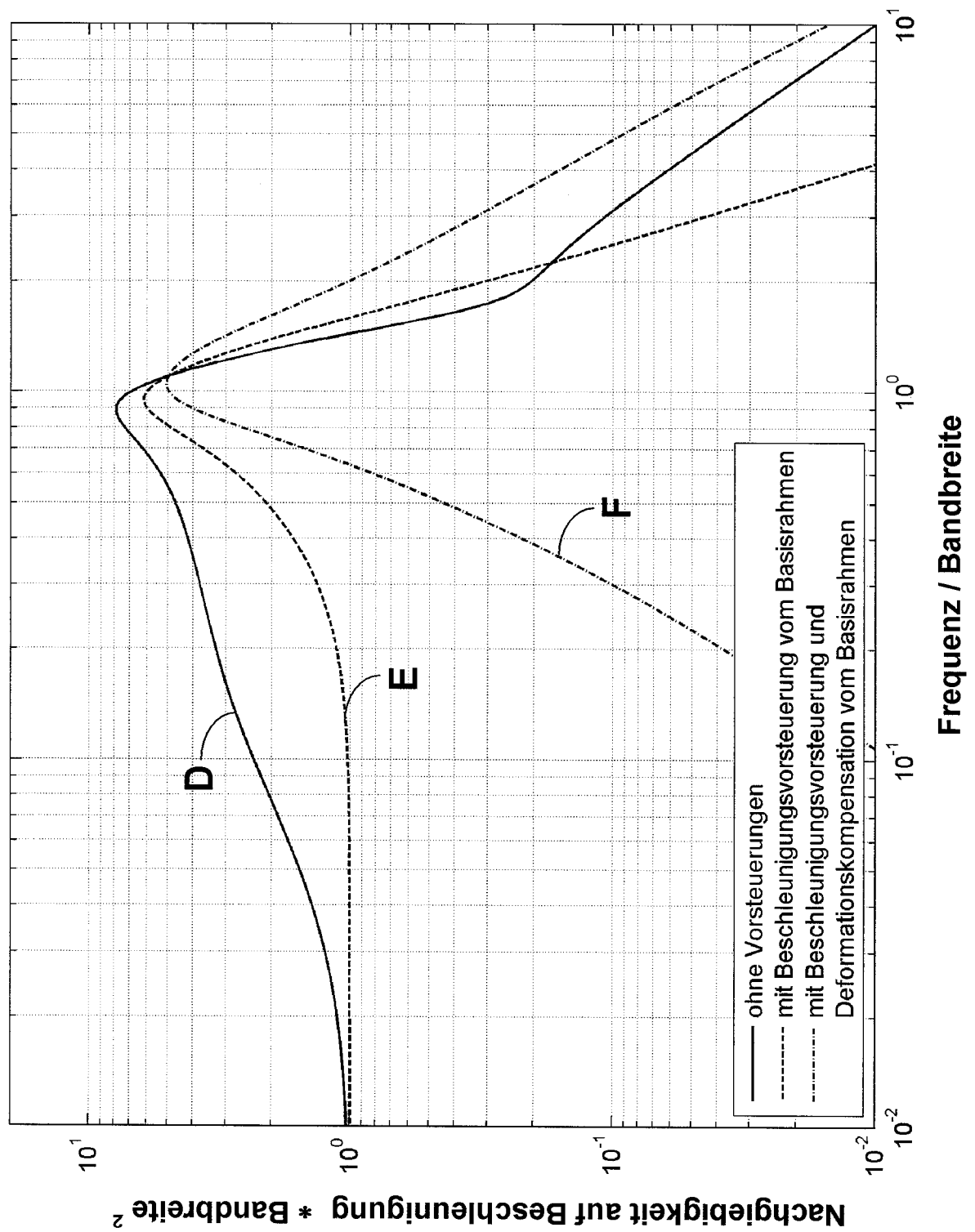
Fig. 9

Fig. 10

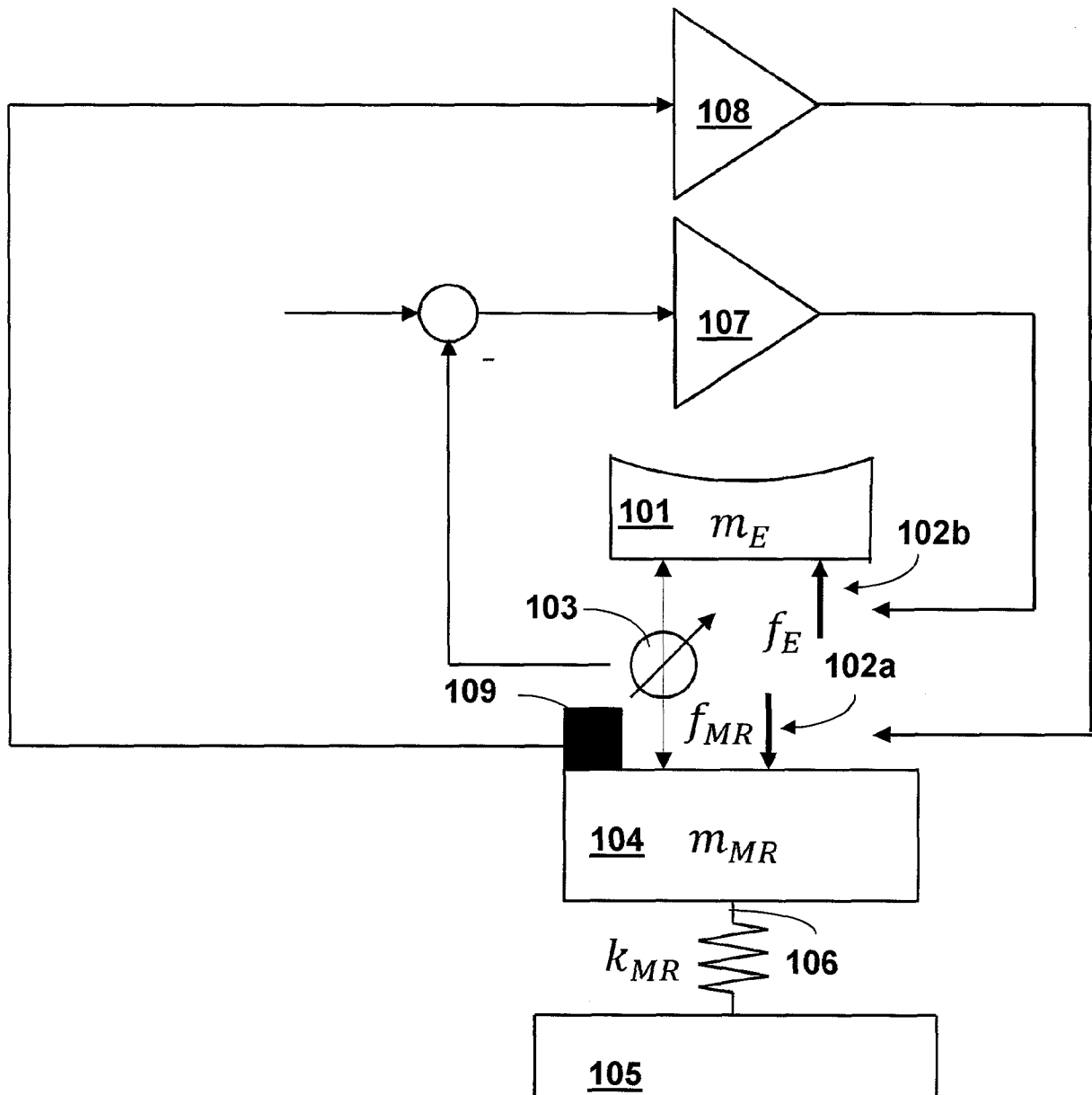


Fig. 11

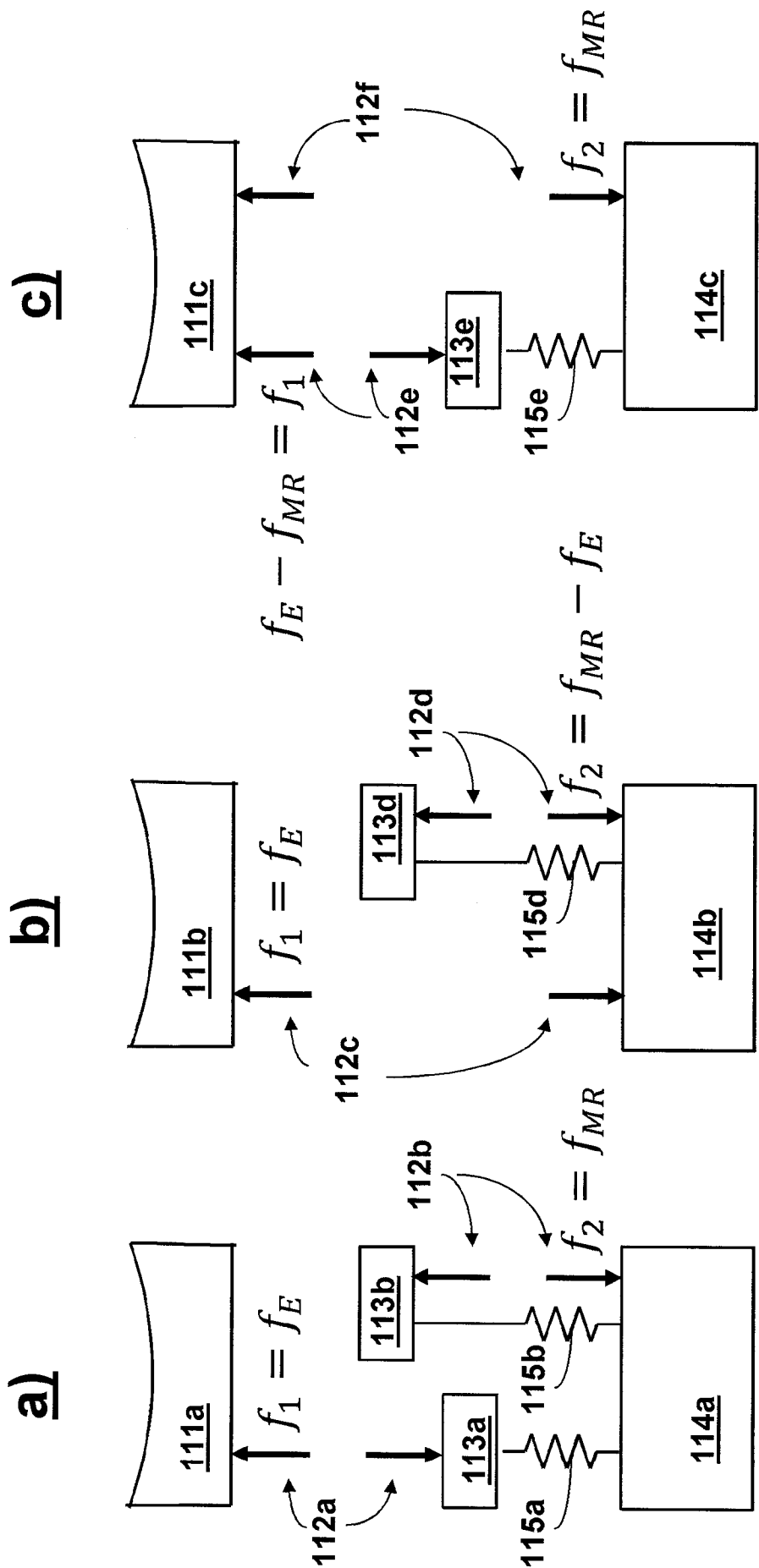


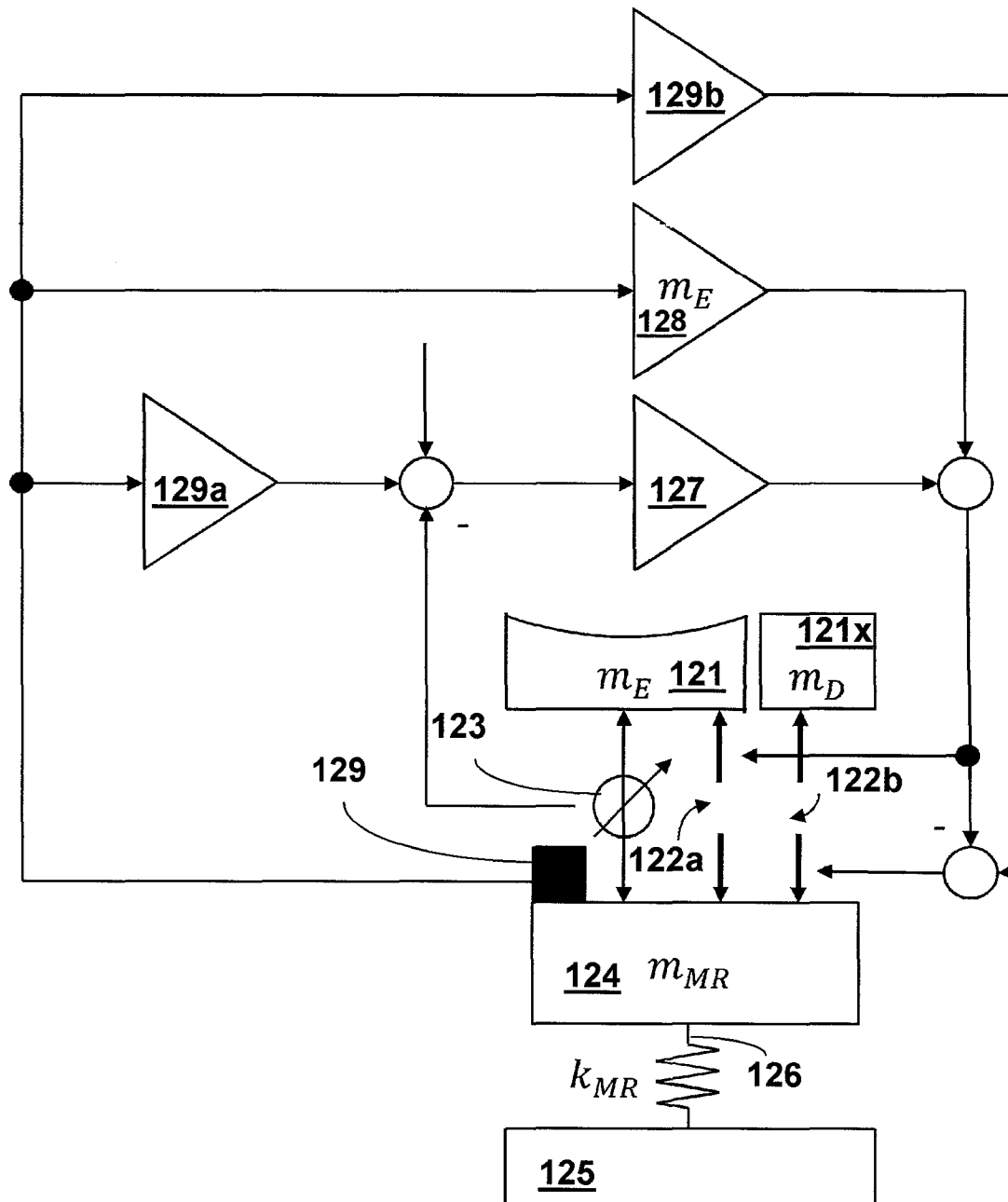
Fig. 12

Fig. 13

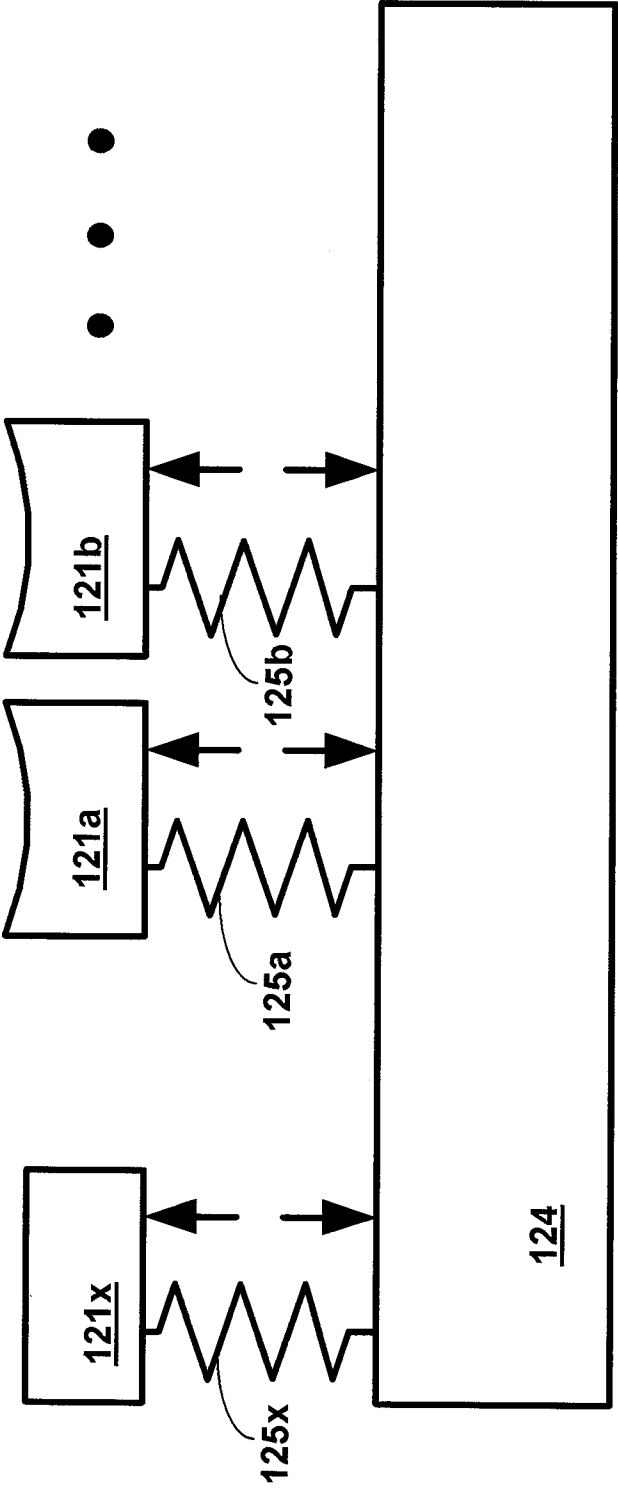


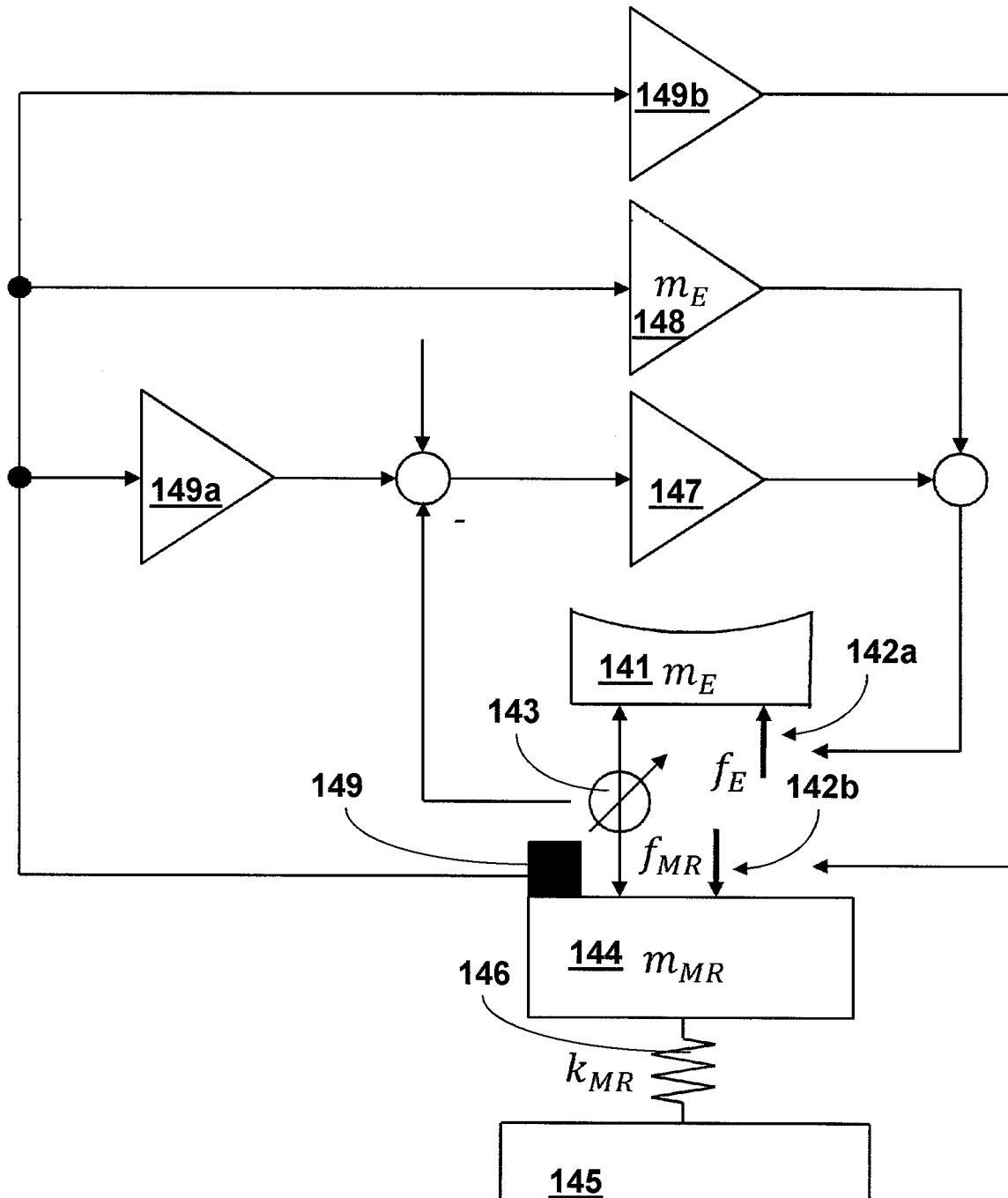
Fig. 14

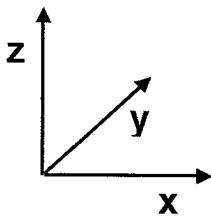
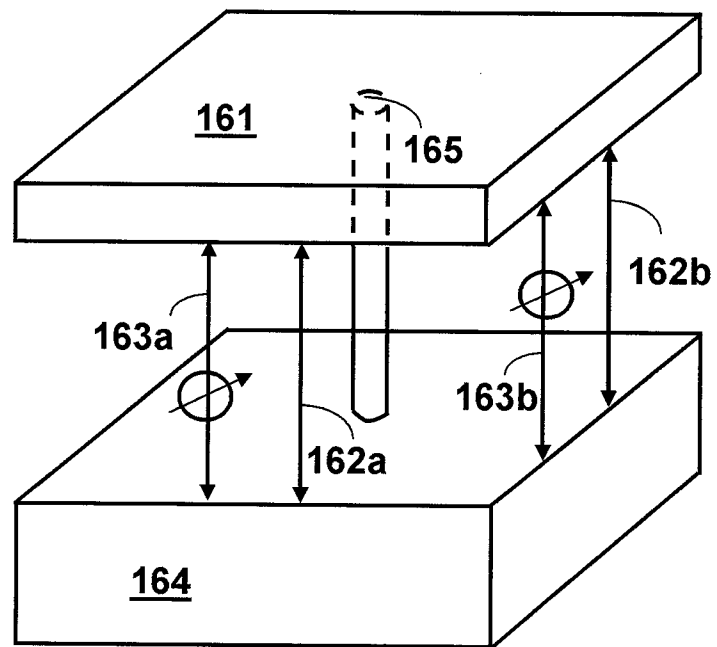
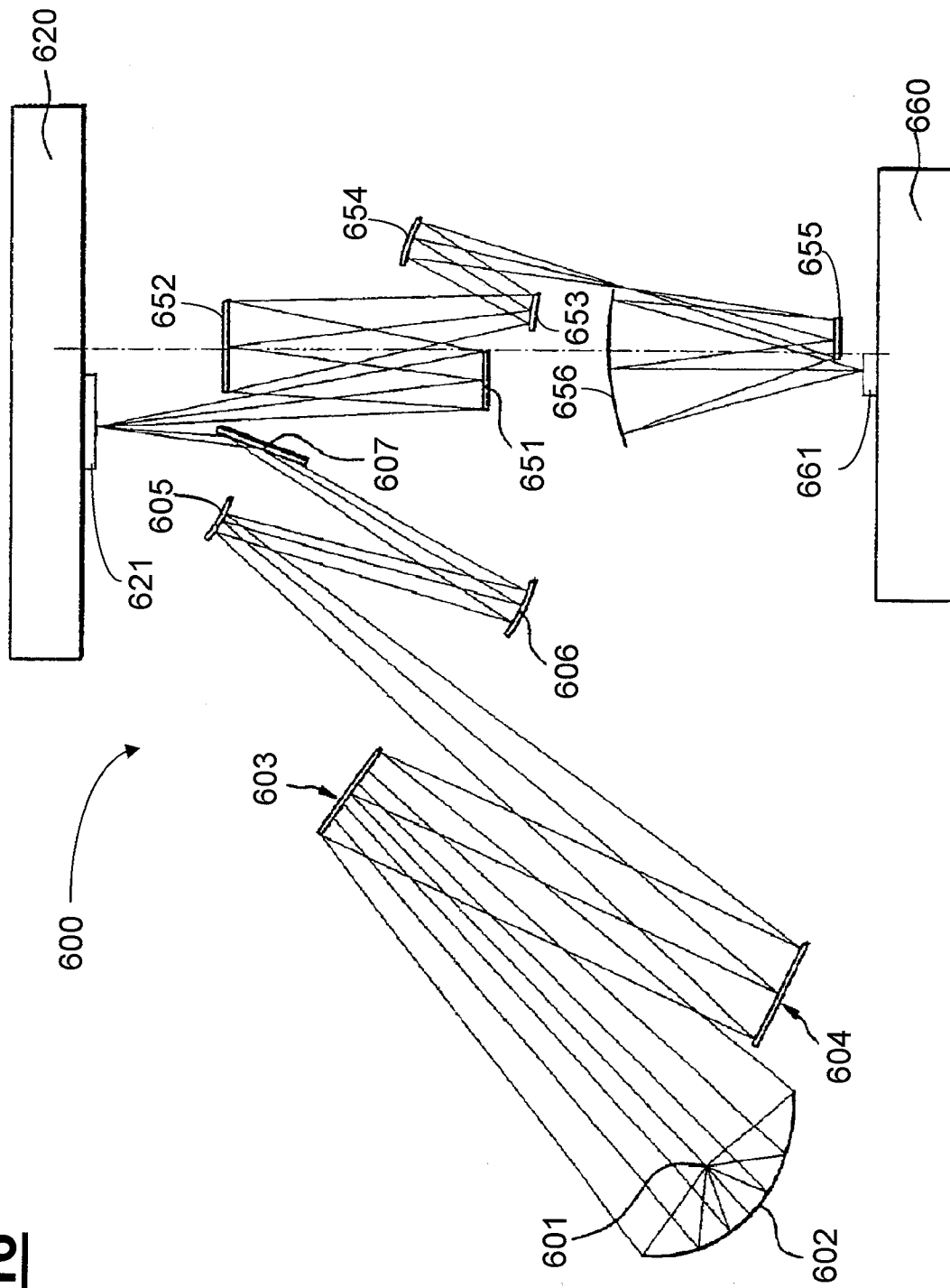
Fig. 15

Fig. 16



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2016/051027

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G03F7/20 G02B7/02
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G03F G02B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 1 513 018 A1 (ASML NETHERLANDS BV [NL]) 9 March 2005 (2005-03-09) paragraphs [0022], [0023], [0049]; claim 8; figure 2a -----	1-21
A	US 2010/321662 A1 (BUTLER HANS [NL]) 23 December 2010 (2010-12-23) paragraph [0070]; figure 10 -----	1-21
A	US 2003/117600 A1 (TANIUCHI TAICHI [JP] ET AL) 26 June 2003 (2003-06-26) paragraphs [0125], [0126]; figure 3 -----	1-21



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

19 May 2016

Date of mailing of the international search report

31/05/2016

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Eisner, Klaus

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2016/051027

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)		Publication date
EP 1513018	A1	09-03-2005	CN	1591194 A	09-03-2005
			CN	101614968 A	30-12-2009
			EP	1513018 A1	09-03-2005
			JP	4408775 B2	03-02-2010
			JP	4903848 B2	28-03-2012
			JP	2005086207 A	31-03-2005
			JP	2010004086 A	07-01-2010
			KR	20060021427 A	08-03-2006
			KR	20070059037 A	11-06-2007
			SG	109613 A1	30-03-2005
			TW	I245971 B	21-12-2005
			US	2005083500 A1	21-04-2005

US 2010321662	A1	23-12-2010	CN	101971101 A	09-02-2011
			JP	5237434 B2	17-07-2013
			JP	2011514685 A	06-05-2011
			NL	1036568 A1	21-09-2009
			TW	200944969 A	01-11-2009
			US	2010321662 A1	23-12-2010
			WO	2009115205 A1	24-09-2009

US 2003117600	A1	26-06-2003	NONE		

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. G03F7/20 G02B7/02
 ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
 G03F G02B

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, INSPEC, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	EP 1 513 018 A1 (ASML NETHERLANDS BV [NL]) 9. März 2005 (2005-03-09) Absätze [0022], [0023], [0049]; Anspruch 8; Abbildung 2a -----	1-21
A	US 2010/321662 A1 (BUTLER HANS [NL]) 23. Dezember 2010 (2010-12-23) Absatz [0070]; Abbildung 10 -----	1-21
A	US 2003/117600 A1 (TANIUCHI TAICHI [JP] ET AL) 26. Juni 2003 (2003-06-26) Absätze [0125], [0126]; Abbildung 3 -----	1-21



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert,
aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach
dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft er-
scheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer
anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden
soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie
ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung,
eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach
dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum
oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der
Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der
Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden
Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung
kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf
erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung
kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet
werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren
Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und
diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

19. Mai 2016

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

31/05/2016

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Eisner, Klaus

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2016/051027

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 1513018	A1	09-03-2005	CN 1591194 A 09-03-2005
			CN 101614968 A 30-12-2009
			EP 1513018 A1 09-03-2005
			JP 4408775 B2 03-02-2010
			JP 4903848 B2 28-03-2012
			JP 2005086207 A 31-03-2005
			JP 2010004086 A 07-01-2010
			KR 20060021427 A 08-03-2006
			KR 20070059037 A 11-06-2007
			SG 109613 A1 30-03-2005
			TW I245971 B 21-12-2005
			US 2005083500 A1 21-04-2005

US 2010321662	A1	23-12-2010	CN 101971101 A 09-02-2011
			JP 5237434 B2 17-07-2013
			JP 2011514685 A 06-05-2011
			NL 1036568 A1 21-09-2009
			TW 200944969 A 01-11-2009
			US 2010321662 A1 23-12-2010
			WO 2009115205 A1 24-09-2009

US 2003117600	A1	26-06-2003	KEINE
