

(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
2. Juni 2016 (02.06.2016)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2016/083345 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

H01L 41/04 (2006.01) **G05D 3/20** (2006.01)
G01Q 10/06 (2010.01) **G12B 5/00** (2006.01)
G03F 7/20 (2006.01) **H02N 2/00** (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2015/077449

(22) Internationales Anmeldedatum:
24. November 2015 (24.11.2015)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2014 224 220.7
27. November 2014 (27.11.2014) DE

(71) Anmelder: **CARL ZEISS SMT GMBH** [DE/DE];
Rudolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder: **KEMPTER, Christian**; Salzbrunnen 1, 89426
Wittislingen (DE). **KORTEN, Ulrich**; Haselbühl 36,
89075 Ulm (DE). **ANIC, Jürgen**; Gartenstrasse 23, 88483
Burgrieden (DE).

(74) Anwalt: **RAU, SCHNECK & HÜBNER**
PATENTANWÄLTE RECHTSANWÄLTE
PARTGMBB; Königstrasse 2, 90402 Nürnberg (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)

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: PIEZOELECTRIC POSITIONING DEVICE AND POSITIONING METHOD BY MEANS OF SUCH A
PIEZOELECTRIC POSITIONING DEVICE

(54) Bezeichnung : PIEZOELEKTRISCHE POSITIONIER-VORRICHTUNG UND POSITIONIER-VERFAHREN MITTELS
EINER DERARTIGEN PIEZOELEKTRISCHEN POSITIONIER-VORRICHTUNG

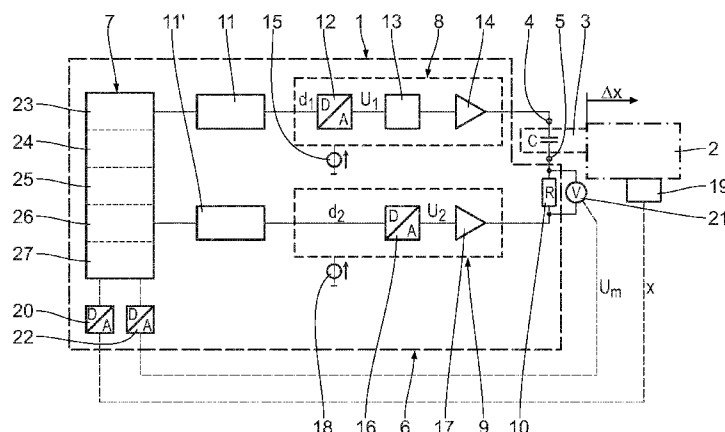


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to a piezoelectric positioning device (1) comprising of at least one piezoelectric actuator (3) having a first connection contact (4) and a second connection contact (5). In order to activate the at least one piezoelectric actuator (3), a control unit (6) is provided, which comprises digital-to-analog converters (12, 13) connected to the connection contacts (4, 5). A fine converter (16) has a comparatively smaller voltage range with respect to a coarse converter (12) and lower voltage levels such that a high degree of positioning accuracy can be achieved.

(57) Zusammenfassung: Eine piezoelektrische Positionier-Vorrichtung

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(1) umfasst mindestens einen piezoelektrischen Aktor (3) mit einem ersten Anschlusskontakt (4) und einem zweiten Anschlusskontakt (5). Zur Ansteuerung des mindestens einen piezoelektrischen Aktors (3) dient eine Steuereinrichtung (6), die mit den Anschlusskontakten (4, 5) verbundene Digital-Analog-Wandler (12, 6) umfasst. Ein Fein-Wandler (16) weist gegenüber einem Grob-Wandler (12) einen vergleichsweise kleineren Spannungsbereich und kleinere Spannungsstufen auf, so dass eine hohe Positioniergenauigkeit erzielbar ist.

**Piezelektrische Positionier-Vorrichtung und Positionier-Verfahren
mittels einer derartigen piezelektrischen Positionier-Vorrichtung**

Die vorliegende Patentanmeldung nimmt die Priorität der deutschen Patentanmeldung DE 10 2014 224 220.7 in Anspruch, deren Inhalt durch Bezugnahme herein aufgenommen wird.

Die Erfindung betrifft eine piezelektrische Positionier-Vorrichtung und ein Positionier-Verfahren mittels einer derartigen piezelektrischen Positionier-Vorrichtung.

Piezelektrische Aktoren sind bekannt und werden zur hochgenauen Positionierung von kinematischen Systemen eingesetzt. Die Ansteuerung piezelektrischer Aktoren erfolgt über einen Digital-Analog-Wandler, so dass die Positioniergenauigkeit der piezelektrischen Aktoren von den Quantisierungsstufen bzw. Spannungsstufen der analogen Ausgangsspannung des Digital-Analog-Wandlers abhängt. Anwenderseitig besteht ein stetiger Bedarf, die Positioniergenauigkeit von piezelektrischen Aktoren zu erhöhen.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, eine piezelektrische Positionier-Vorrichtung mit mindestens einem piezelektrischen Aktor zu schaffen, die auf einfache und zuverlässige Weise eine hohe Positioniergenauigkeit ermöglicht.

Diese Aufgabe wird durch eine piezelektrische Positionier-Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Zur Ansteuerung des mindestens einen piezelektrischen Aktors weist die Steuereinrichtung zwei Digital-Analog-Wandler auf. Der erste Digital-Analog-Wandler, der nachfolgend auch als Grob-Wandler bezeichnet ist, weist einen ersten Spannungs-

- bereich ΔU_1 auf, wohingegen der zweite Digital-Analog-Wandler, der nachfolgend auch als Fein-Wandler bezeichnet ist, einen kleineren zweiten Spannungsbereich ΔU_2 aufweist. Der zweite Spannungsbereich ΔU_2 überdeckt mindestens eine erste Spannungsstufe Δu_1 des Grob-Wandlers, so
- 5 dass die Positioniergenauigkeit des mindestens einen piezoelektrischen Aktors durch die zweiten Spannungsstufen Δu_2 des Fein-Wandlers bestimmt wird. Da die zweiten Spannungsstufen Δu_2 des Fein-Wandlers wesentlich kleiner als die ersten Spannungsstufen Δu_1 des Grob-Wandlers sind, kann auf einfache und zuverlässige Weise die Positioniergenauigkeit
- 10 der piezoelektrischen Positionier-Vorrichtung erhöht werden. Dadurch, dass der mindestens eine piezoelektrische Aktor potentialfrei betreibbar ist, können die Digital-Analog-Wandler in einfacher Weise mit den jeweiligen Anschlusskontakten verbunden werden. Vorzugweise ist der piezoelektrische Aktor als Piezo-Stapel ausgebildet.
- 15 Eine Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 2 gewährleistet auf einfache Weise eine hohe Positioniergenauigkeit. Der Grob-Wandler weist eine maximale Spannungsungenauigkeit Δu_d in den ersten Spannungsstufen Δu_1 auf, die als differenzielle Nichtlinearität bezeichnet ist und die Positioniergenauigkeit beeinträchtigt. Dadurch, dass der zweite Spannungsbereich
- 20 ΔU_2 mindestens eine Summe einer ersten Spannungsstufe Δu_1 und der maximalen Spannungsungenauigkeit Δu_d , insbesondere das Zweifache der maximalen Spannungsungenauigkeit Δu_d , abdeckt, kann der Fein-Wandler auch eine auftretende Spannungsungenauigkeit Δu_d zumindest teilweise
- 25 kompensieren. Vorzugsweise deckt der zweite Spannungsbereich ΔU_2 höchstens vierundsechzig erste Spannungsstufen Δu_1 , und insbesondere höchstens zweiunddreißig erste Spannungsstufen Δu_1 ab, so dass die zweiten Spannungsstufen Δu_2 zur Erzielung einer hohen Positioniergenauigkeit möglichst klein sind. Der zweite Spannungsbereich ΔU_2 bestimmt sich aus

der differentiellen Nichtlinearität und insbesondere aus dem Rauschen des Grob-Wandlers. Das Rauschen orientiert sich in der Regel an der Auflösung bzw. den ersten Spannungsstufen ΔU_1 des Grob-Wandlers. Da bei der Positionsregelung die Position im stationären bzw. stabilen Zustand hochgenau gehalten werden soll, müssen Umschaltvorgänge des Grob-Wandlers im stabilen Zustand weitestmöglich vermieden werden, damit die Positionsregelung nicht gestört wird. Hierzu wird der zweite Spannungsbereich ΔU_2 des Fein-Wandlers so groß gewählt, wie es für die in der jeweiligen Anwendung geforderte Auflösung und das Rauschen zulässig ist. Dementsprechend wird der zweite Spannungsbereich ΔU_2 unter der Bedingung, dass ein Nachstellen des Grob-Wandlers im stationären Zustand zuverlässig vermieden wird, so klein wie möglich gewählt.

Eine Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 3 gewährleistet eine hohe Positioniergenauigkeit. Der jeweilige Spannungsverstärker kann optimal an den zugehörigen Digital-Analog-Wandler angepasst werden.

Eine Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 4 gewährleistet eine hohe Positioniergenauigkeit. Der ohmsche Widerstand ist in Serie zu dem Fein-Wandler bzw. dem zugehörigen zweiten Spannungsverstärker geschaltet und dämpft das Rauschen des Grob-Wandlers und des Fein-Wandlers. Das Rauschen des Grob-Wandlers wird vorzugsweise durch einen Tiefpass-Filter gedämpft, so dass sich die Dimensionierung des ohmschen Serien-Widerstands am Rauschen des ersten Spannungsverstärkers auf der Analogseite, am Rauschen des Fein-Wandlers, an einer etwaig gewünschten Auflösung für eine Strommessung über den Serien-Widerstand zum Zwecke einer Ladungsregelung und an einer geforderten Bandbreite für die an dem piezoelektrischen Aktor anliegende Spannung, welche sich aus einer Bandbreitenanforderung der Regelung hinsichtlich des Ausregels von Stö-

rungen ergibt, orientiert. Das Rauschen des zweiten Spannungsverstärkers kann gegenüber dem Rauschen des Fein-Wandlers in der Regel vernachlässigt werden und hat dementsprechend keine Bedeutung für die Dimensionierung des Serien-Widerstands. Der Serien-Widerstand kann zudem als

5 Shunt bzw. Mess-Widerstand genutzt werden, um den in den mindestens einen piezoelektrischen Aktor fließenden Strom zu messen und einer digitalen Regeleinheit zur Ladungsregelung zur Verfügung zu stellen.

Eine Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 5 gewährleistet eine hohe Positioniergenauigkeit. Der Tiefpass-Filter dämpft das Rauschen und die Dynamik des Grob-Wandlers, wohingegen die Dynamik des Fein-Wandlers nicht beeinträchtigt wird. Hierdurch weist die Positionier-Vorrichtung eine hohe Dynamik und eine hohe Positioniergenauigkeit auf. Die Bestimmung der Grenzfrequenz des Tiefpass-Filters ergibt sich aus der geforderten maximalen Verfahrensgeschwindigkeit, welche eine maximale Spannungsänderung am piezoelektrischen Aktor bedingt. Vorzugsweise ist in einer Berechnungseinheit zur Berechnung eines ersten Spannungswerts für den ersten Digital-Analog-Wandler und eines zweiten Spannungswert für den zweiten Digital-Analog-Wandler ein Kompensationstiefpass-Filter vorgesehen, so dass die tiefpassgedämpfte Dynamik der ersten Wandler-

10 Verstärker-Schaltung durch die zweite Wandler-Verstärker-Schaltung ausgeglichen wird. Die Grenzfrequenz dieses Kompensationstiefpass-Filters ergibt sich entsprechend aus der geforderten maximalen Verfahrensgeschwindigkeit.

25 Eine Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 6 ermöglicht eine hochgenaue Positionsregelung. Der Positions-Messsensor stellt der Steuereinrichtung eine Ist-Position des mindestens einen piezoelektrischen Aktors und/oder des zu regelnden kinematischen Systems zur Verfügung.

Eine Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 7 gewährleistet eine gewünschte Positioniergenauigkeit mit hoher Zuverlässigkeit. Die Positions-Regeleinheit ermöglicht die Regelung der gemessenen Ist-Position auf eine vorgegebene Soll-Position. Hierzu ist die Positions-Regeleinheit insbesondere derart ausgebildet, dass keine stationäre Regelabweichung auftritt. Insbesondere weist die Positions-Regeleinheit einen Regler mit einem integrierenden Anteil auf. Der Regler ist beispielsweise als PID-Regler ausgebildet. Vorzugsweise weist die Positions-Regeleinheit einen Sollwert-Filter auf, der eine Soll-Position unter Berücksichtigung der physikalischen Grenzen für eine Beschleunigung und/oder Geschwindigkeit des mindestens einen piezoelektrischen Aktors vorgibt. Der Sollwert-Filter hat insbesondere die Funktion eines Bahngenerators.

Eine Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 8 gewährleistet eine hohe Positioniergenauigkeit in Verbindung mit einer hohen Dynamik. Die Positionsvorsteuereinheit stellt eine Vorsteuer-Stellgröße bereit, die die Digital-Analog-Wandler im Wesentlichen verzögerungsfrei in eine jeweilige Ausgangsspannung umsetzen. Hierdurch weist die Positions-Regelung eine hohe Dynamik auf. Die Positionsvorsteuereinheit wirkt mit der Positions-Regeleinheit zusammen, so dass die Vorsteuer-Stellgröße und eine Regel-Stellgröße zu einer Gesamt-Stellgröße addiert werden.

Eine Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 9 gewährleistet auf einfache und zuverlässige Weise eine hohe stationäre Genauigkeit der Positions-Regeleinheit. Die Detektionseinheit erzeugt ein Steuersignal, wenn ein vordefinierter Regelabweichungs-Grenzwert betragsmäßig unterschritten wird. Mit dem Steuersignal ist somit erkennbar, wenn die Positions-Regeleinheit bzw. die Positionsregelung in einen stationären bzw. stabilen

Zustand gelangt. In Abhängigkeit des Steuersignals können beispielsweise Parameter der Positions-Regeleinheit und/oder einer Berechnungseinheit zur Ansteuerung des Grob- und des Fein-Wandlers verändert werden, um im stationären Zustand der Positionsregelung eine unerwünschte Veränderung der ersten Wandler-Ausgangsspannung U_1 zu vermeiden. Vorzugsweise wird das Steuersignal erzeugt, wenn die Positions-Regelabweichung den vordefinierten Regelabweichungs-Grenzwert für eine Mindestzeitdauer unterschreitet. Wird ein Sollwert-Begrenzer und/oder ein Sollwert-Filter eingesetzt, so wird das Steuersignal vorzugsweise dann erzeugt, wenn zusätzlich die gefilterte Soll-Position der vorgegebenen Soll-Position oder der durch den Sollwert-Begrenzer begrenzten maximalen Soll-Position entspricht.

Eine Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 10 gewährleistet auf einfache und zuverlässige Weise eine hohe Positioniergenauigkeit. Die Berechnungseinheit berechnet aus einem Spannungssollwert einen ersten Spannungswert für den Grob-Wandler und einen zweiten Spannungswert für den Fein-Wandler, die von dem Grob-Wandler bzw. dem Fein-Wandler als analoge Wandler-Ausgangsspannungen bereitgestellt werden müssen. Vorzugsweise wird zunächst der erste Spannungswert für den Grob-Wandler berechnet, so dass der erforderliche zweite Spannungswert des Fein-Wandlers zur Umsetzung des Spannungssollwerts im Wesentlichen mittig in dem zweiten Spannungsbereich ΔU_2 liegt. Hierdurch hat der Fein-Wandler bei einer Veränderung des Spannungssollwerts in positiver und negativer Richtung einen gleichermaßen großen Spannungsbereich zur Verfügung, um die Veränderung des Spannungssollwerts über den zweiten Spannungswert umzusetzen. Hierdurch wird gewährleistet, dass der erste Spannungswert des Grob-Wandlers im Wesentlichen nur dann verändert wird, wenn die Veränderung des Spannungssollwerts nicht mehr über den

zweiten Spannungswert bzw. den Fein-Wandler umgesetzt werden kann. Vorzugsweise berechnet die Berechnungseinheit in einem aktuellen Zeitschritt einen erforderlichen ersten Spannungswert und vergleicht diesen mit einem ersten Spannungswert, der in einem früheren Zeitschritt berechnet wurde. Überschreitet ein Differenzbetrag des Spannungssollwerts und des ersten Spannungswert zum früheren Zeitschritt einen Grenzwert, so wird der frühere erste Spannungswert durch den aktuellen ersten Spannungswert ersetzt. Der Grenzwert ist beispielsweise größer als Null, jedoch höchstens $\Delta U_2/2$.

10

Eine Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 11 gewährleistet eine hohe Positioniergenauigkeit in einem stationären Zustand der Positionsregelung. Dadurch, dass der Grenzwert in einem stationären Zustand der Positionsregelung verändert bzw. erhöht wird, kann erzwungen werden, dass während der Positionsregelung an einer festen Position Änderungen in der Wandler-Ausgangsspannung des Grob-Wandlers äußerst unwahrscheinlich werden. Hierdurch können unerwünschte Änderungen in der Ausgangsspannung des Grob-Wandlers in einem stationären Zustand der Positionsregelung vermieden werden. Im dynamischen Zustand der Positionsregelung wird der Grenzwert beispielsweise auf $\Delta U_2/4$ gesetzt, so dass vor Erreichen bzw. Erkennen des stationären Zustands ein Nachjustieren des Grob-Wandlers erzwungen bzw. forciert wird. Wird ein stationärer Zustand erkannt, so wird der Grenzwert beispielsweise auf $\Delta U_2/2$ gesetzt, wodurch Änderungen in der Ausgangsspannung des Grob-Wandlers zum Ausregeln von Störungen unwahrscheinlich werden.

25

Eine Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 12 gewährleistet eine hohe Positioniergenauigkeit. Dadurch, dass an dem ohmschen Widerstand bzw. Serien-Widerstand eine Mess-Spannung ermittelt wird, kann mit dieser

Mess-Spannung eine Spannungsregelung oder eine Ladungsregelung für den mindestens einen piezoelektrischen Aktor aufgebaut werden. Die Spannungsregelung oder die Ladungsregelung stellt einen inneren Regelkreis bereit, der von der Positionsregelung als äußeren Regelkreis überlagert wird.

Eine Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 13 gewährleistet eine hohe Positioniergenauigkeit. Durch die Ladungs-Regeleinheit können Hystereeffekte des mindestens einen piezoelektrischen Aktors vermieden bzw. kompensiert werden. Durch die Ladungs-Regeleinheit, die einen inneren Regelkreis bereitstellt, wird ein Ist-Ladungszustand des mindestens einen piezoelektrischen Aktors exakt einstellt, wobei der Soll-Ladungszustand insbesondere von der Positions-Regeleinheit vorgegeben wird, die einen äußeren Positions-Regelkreis bildet.

Die piezoelektrische Positionier-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 kann in vorteilhafter Weise für eine Projektionsbelichtungsanlage angewendet werden. Hierdurch wird insbesondere das Positionieren mindestens eines Bauteils der Projektionsbelichtungsanlage, wie beispielsweise einer Linse, eines Spiegels und/oder einer zu verbiegenden Platte, mit einer hohen Genauigkeit ermöglicht.

Der Erfindung liegt ferner die Aufgabe zugrunde, ein Positionier-Verfahren zu schaffen, das auf einfache und zuverlässige Weise eine hohe Positioniergenauigkeit ermöglicht.

Diese Aufgabe wird durch ein Positionier-Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 15 gelöst. Die Vorteile des erfindungsgemäßen Positionier-Verfahrens entsprechen den bereits beschriebenen Vorteilen der erfin-

dungsgemäßen piezoelektrischen Positionier-Vorrichtung. Das Positionier-Verfahren kann insbesondere auch mit den Merkmalen der Ansprüche 1 bis 13 weitergebildet werden. Vorzugsweise wird das Positionier-Verfahren bei einer Projektionsbelichtungsanlage gemäß Anspruch 14 eingesetzt.

5

Weitere Merkmale, Vorteile und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels. Es zeigen:

- 10 Fig. 1 eine schematische Darstellung des Aufbaus einer piezoelektrischen Positionier-Vorrichtung mit einem piezoelektrischen Aktor, der mit einem ersten Digital-Analog-Wandler und einem zweiten Digital-Analog-Wandler angesteuert wird,
- 15 Fig. 2 eine schematische Darstellung der Kennlinien der Digital-Analog-Wandler,
- Fig. 3 einen Signalflussplan einer Positionsregelung für den piezoelektrischen Aktor mit einer Berechnungseinheit zur Berechnung von Spannungswerten für die Digital-Analog-Wandler, und
- 20 Fig. 4 einen Signalflussplan der Berechnungseinheit zur Berechnung eines ersten Spannungswerts für den ersten Digital-Analog-Wandler und eines zweiten Spannungswerts für den zweiten Digital-Analog-Wandler.
- 25

- 10 -

Eine piezoelektrische Positionier-Vorrichtung 1 weist zur Positionierung eines kinematischen Systems 2 einen piezoelektrischen Aktor 3 auf. Der piezoelektrische Aktor 3 wirkt - elektrisch gesehen - als Kondensator mit einer Kapazität C und verändert in Abhängigkeit eines Ist-
5 Ladungszustandes eine Längsabmessung. Die Veränderung der Längsabmessung wird mit Δx bezeichnet. Der piezoelektrische Aktor 3 ist bekannt und üblich und beispielsweise als Piezo-Stapel ausgebildet.

Der piezoelektrische Aktor 3 ist über Anschlusskontakte 4, 5 mit einer
10 Steuereinrichtung 6 verbunden. Die Steuereinrichtung 6 weist einen digitalen Signalprozessor 7 auf. Eine erste Wandler-Verstärker-Schaltung 8 ist in Signalverbindung mit dem digitalen Signalprozessor 7, jedoch von diesem mittels eines ersten Isolationselements 11 galvanisch getrennt. Die erste
15 Wandler-Verstärker-Schaltung 8 ist mit dem ersten Anschlusskontakt 4 verbunden. Eine zweite Wandler-Verstärker-Schaltung 9 ist über einen ohmschen Serien-Widerstand 10 mit dem zweiten Anschlusskontakt 5 verbunden. Der Serien-Widerstand 10 hat den Widerstandswert R. Die zweite
20 Wandler-Verstärker-Schaltung 9 ist in Signalverbindung mit dem digitalen Signalprozessor 7, jedoch von diesem mittels eines zweiten Isolationselements 11' galvanisch getrennt.

Die erste Wandler-Verstärker-Schaltung 8 weist einen ersten Digital-Analog-Wandler 12 auf, der über einen Tiefpass-Filter 13 mit einem ersten Spannungsverstärker 14 verbunden ist. Der erste Digital-Analog-Wandler
25 12 weist einen ersten Spannungsbereich ΔU_1 auf und stellt in ersten Spannungsstufen Δu_1 eine erste analoge Wandler-Ausgangsspannung U_1 bereit. Die erste Wandler-Verstärker-Schaltung 8 ist an eine erste Spannungsquelle 15 angeschlossen, die eine erste Verschiebespannung bereitstellt. Durch die erste Verschiebespannung wird ein Bezugspotential der ersten Wand-

ler-Verstärker-Schaltung 8 gegenüber dem Referenzpotential (GROUND GND) verschoben. Dies erfordert die galvanische Trennung durch das Isolationselement 11' zwischen dem digitalen Signalprozessor 7 und der ersten Wandler-Verstärker-Schaltung 8.

5

Die zweite Wandler-Verstärker-Schaltung 9 weist einen zweiten Digital-Analog-Wandler 16 auf, der mit einem zweiten Spannungsverstärker 17 verbunden ist. Der zweite Digital-Analog-Wandler 16 weist einen zweiten Spannungsbereich ΔU_2 auf und stellt in zweiten Spannungsstufen Δu_2 eine zweite analoge Wandler-Ausgangsspannung U_2 bereit. Die zweite Wandler-Verstärker-Schaltung 9 ist an eine zweite Spannungsquelle 18 angeschlossen, die eine zweite Verschiebespannung bereitstellt. Durch die zweite Verschiebespannung wird ein Bezugspotential der zweiten Wandler-Verstärker-Schaltung 9 gegenüber dem Referenzpotential verschoben. Dies erfordert die galvanische Trennung durch das Isolationselement 11' zwischen dem digitalen Signalprozessor 7 und der zweiten Wandler-Verstärker-Schaltung 9. Beträgt die zweite Verschiebespannung 0 V, so ist das zweite Isolationselement 11' nicht erforderlich. Jedoch kann eine galvanische Trennung durch das Isolationselement 11' aus Sicherheitsgründen sinnvoll sein, da auf diese Weise der digitale Signalprozessor 7 im Fehlerfall von möglicherweise Hochspannung führenden Bauteilen der zweiten Wandler-Verstärker-Schaltung 9 elektrisch getrennt ist. Entsprechendes gilt für die erste Verschiebespannung und das erste Isolationselement 11.

25 Vorzugsweise wird die zweite Wandler-Verstärker-Schaltung 9 symmetrisch zu dem Referenzpotential betrieben, so dass eine galvanische Trennung durch das zweite Isolationselement 11' entfallen kann. Hierzu wird die zweite Verschiebespannung auf 0 V gelegt. Dies ist einerseits vorteilhaft, da eine Strommessung über den ohmschen Serien-Widerstand 10 üb-

- licherweise über einen Digital-Analog-Wandler mit differenziellen Eingang oder einen entsprechenden Vorverstärker erfolgt, wobei das Gleichtaktsignal des differenziellen Eingangs bzw. differenziellen Vorverstärkers üblicherweise auf ± 5 V gegenüber dem Referenzpotential begrenzt ist.
- 5 Andererseits ist es aus Sicherheitsgründen vorteilhaft, das Spannungspotential eines Anschlusskontakts 4, 5 in der Nähe des Referenzpotentials zu belassen. Falls einer der Anschlusskontakte 4, 5 beispielsweise bei einer Inbetriebnahmemessung versehentlich Kontakt mit dem Referenzpotential bzw. der Gehäusemasse der piezoelektrischen Positionier-Vorrichtung 1
- 10 bekommt, führt dies nicht zu einer Depolarisation oder Zerstörung des piezoelektrischen Aktors 3.

- Beträgt der Arbeitsbereich des piezoelektrischen Aktors 3 beispielsweise -20 V bis 120 V und der erste Spannungsbereich ΔU_1 0 V bis 135 V und
- 15 der zweite Spannungsbereich ΔU_2 -2,5 V bis 2,5 V, so wird die erste Verschiebespannung auf -17,5 V und die zweite Verschiebespannung auf 0 V gelegt. Hierdurch ist gewährleistet, dass im Fehlerfall - unabhängig davon, welcher Anschlusskontakt 4, 5 das Referenzpotential bzw. die Gehäusemasse berührt - maximal -17,5 V bis 117,5 V über dem piezoelektrischen
- 20 Aktor 3 anliegen, also die im Fehlerfall anliegende Spannung in dem Arbeitsbereich des piezoelektrischen Aktors 3 liegt.

- Der erste Digital-Analog-Wandler 12 weist n bit auf, so dass ein erster digitaler Eingang 2^n Eingangswerte d_1 annehmen kann. Die ersten Span-
- 25 nungsstufen Δu_1 werden durch den ersten Spannungsbereich ΔU_1 und die 2^n digitalen Eingangswerte d_1 festgelegt. Entsprechend weist der zweite Digital-Analog-Wandler 16 m bit auf, so dass ein zweiter digitaler Eingang 2^m Eingangswerte d_2 annehmen kann. Die zweiten Spannungsstufen Δu_2 werden durch den zweiten Spannungsbereich ΔU_2 und die 2^m Eingangs-

werte d_2 festgelegt. Der erste Digital-Analog-Wandler 12 dient zur Bereitstellung der Wandler-Ausgangsspannung U_1 in einem großen Spannungsbereich ΔU_1 und in großen Spannungsstufen Δu_1 , wohingegen der zweite Digital-Analog-Wandler 16 zur Bereitstellung der zweiten Wandler-Ausgangsspannung U_2 in einem kleineren Spannungsbereich ΔU_2 und in kleineren Spannungsstufen Δu_2 dient. Dementsprechend ist der erste Digital-Analog-Wandler 12 nachfolgend auch als Grob-Wandler 12 bezeichnet, wohingegen der zweite Digital-Analog-Wandler 16 nachfolgend auch als Fein-Wandler 16 bezeichnet ist. Es gilt dementsprechend:

10

$$\Delta U_1 > \Delta U_2 \text{ und } \Delta u_1 > \Delta u_2.$$

Der zweite Spannungsbereich ΔU_2 deckt darüber hinaus mindestens eine erste Spannungsstufe Δu_1 ab, so dass gilt:

15

$$\Delta U_2 \geq \Delta u_1.$$

Diese Beziehungen sind in Fig. 2 veranschaulicht.

Die ersten Spannungsstufen Δu_1 weisen in der Praxis eine Spannungsungenauigkeit auf. Eine maximale Spannungsungenauigkeit Δu_d ist in Fig. 2 beispielhaft veranschaulicht. Die maximale Spannungsungenauigkeit Δu_d kann im ungünstigsten Fall bei einer Spannungsstufe Δu_1 in einer negativen Richtung und in einer nachfolgenden Spannungsstufe Δu_1 in einer positiven Richtung auftreten. Dies ist in Fig. 2 beispielhaft für die Spannungsstufen Δu_1 und $2 \cdot \Delta u_1$ veranschaulicht. Auftretende Spannungsungenauigkeiten sind bei Digital-Analog-Wandlern auch als differenzielle Nichtlinearitäten bekannt. Vorzugsweise gilt für den zweiten Spannungsbereich ΔU_2 dementsprechend:

$$\Delta U_2 \geq \Delta u_1 + \Delta u_d, \text{ insbesondere } \Delta U_2 \geq \Delta u_1 + 2 \cdot \Delta u_d.$$

- 5 Die Positioniergenauigkeit des piezoelektrischen Aktors 3 ist abhängig von den zweiten Spannungsstufen Δu_2 , also der Auflösung des Fein-Wandlers 16. Die Positioniergenauigkeit ist dementsprechend umso höher, je kleiner die zweiten Spannungsstufen Δu_2 sind. Vorzugsweise gilt für den zweiten Spannungsbereich ΔU_2 :

10

$$\Delta U_2 \leq 64 \cdot \Delta u_1, \text{ insbesondere } \Delta U_2 \leq 32 \cdot \Delta u_1.$$

Hierdurch werden bei einer gegebenen bit-Anzahl m möglichst kleine zweite Spannungsstufen Δu_2 gewährleistet.

15

- Zur Messung einer zu regelnden Ist-Position x weist die Positionier-Vorrichtung 1 einen Positions-Messsensor 19 auf. Der Positions-Messsensor 19 misst beispielsweise die Ist-Position x eines zu positionierenden Bauteils des kinematischen Systems 2. Darüber hinaus kann der
- 20 Positions-Messsensor 19 beispielsweise die Ist-Position x bzw. den Verstell-Weg des piezoelektrischen Aktors 3 messen. Der Positions-Messsensor 19 ist in Signalverbindung mit der Steuereinrichtung 6 und stellt dem digitalen Signalprozessor 7 über einen ersten Analog-Digital-Wandler 20 digitale Messwerte x_m der Ist-Position x bereit.

25

Der Serien-Widerstand 10 wird als Shunt bzw. Mess-Widerstand genutzt, um den zu dem piezoelektrischen Aktor 3 geflossenen Strom zu ermitteln. Hierzu weist die Positionier-Vorrichtung 1 einen Spannungs-Messsensor 21 auf, der eine an dem Serien-Widerstand 10 abfallende Spannung U_m

misst. Der Spannungs-Messsensor 21 ist in Signalverbindung mit der Steuereinrichtung 6 und stellt dem digitalen Signalprozessor 7 über einen zweiten Analog-Digital-Wandler 22 digitale Messwerte u_m der Spannung U_m zur Verfügung.

5

Mittels der Steuereinrichtung 6 erfolgt eine Positionsregelung der Ist-Position x und eine Ladungsregelung eines Ist-Ladungszustands Q des piezoelektrischen Aktors 3. Die Ladungsregelung bildet einen inneren Regelkreis, wohingegen die Positionsregelung einen diesen überlagernden äußeren Regelkreis bildet. Zur Positions- und Ladungsregelung bildet der digitale Signalprozessor 7 eine Positions-Regeleinheit 23, eine Positions-Vorsteuereinheit 24, eine Ladungs-Regeleinheit 25, eine Berechnungseinheit 26 und eine Detektionseinheit 27 aus.

- 15 Eine Soll-Position X_s wird in der Positions-Regeleinheit 23 zunächst einem Sollwert-Begrenzer 28 und eine etwaig begrenzte Soll-Position X_s' einem Sollwert-Filter 29 zugeführt. Der Sollwert-Filter 29 hat die Funktion eines Bahngenerators und berücksichtigt insbesondere physikalische Grenzen des piezoelektrischen Aktors 3. Der Sollwert-Filter 29 stellt ausgangsseitig
- 20 eine berechnete zweite Soll-Position x_s bereit. Mittels eines ersten Addierers 31 wird von der Soll-Position x_s die gemessene und digitalisierte Ist-Position x_m subtrahiert und eine Positions-Regelabweichung e_x berechnet. Etwaige Totzeiten des kinematischen Systems 2 und/oder der Positionier-Vorrichtung 1 können über ein Totzeit-Element 30 vor dem Addierer 31
- 25 berücksichtigt werden. Die Positions-Regelabweichung e_x wird einem Vor-Filter 32 und einem nachgeordneten Positions-Regler 33 zugeführt. Der Positions-Regler 33 stellt ausgangsseitig eine Regel-Stellgröße u_R bereit. Die Positions-Regeleinheit 23 wirkt mit der Positions-Vorsteuereinheit 24 zusammen. Hierzu wird die Soll-Position x_s als eine Vorsteuer-Stellgröße

mit der Regel-Stellgröße u_R mittels eines zweiten Addierers 34 zu einer Gesamt-Stellgröße u_p addiert.

Die Stellgröße u_p stellt einen Soll-Ladungszustand Q_s für die Ladungs-Regeleinheit 25 bereit. Der Ladungs-Regeleinheit 25 wird zudem die digitalisierte Mess-Spannung u_m zugeführt, die in einem Umrechnungselement 35 mit dem Widerstandswert R in einen Strom i_m umgerechnet wird, der in einem Vor-Filter 36 gefiltert und anschließend mittels eines Integrators 37 aufintegriert wird. Der Integrator 37 stellt ausgangsseitig einen Ist-Ladungszustand Q des piezoelektrischen Aktors 3 bereit. Von dem Soll-Ladungszustand Q_s wird der Ist-Ladungszustand Q mittels eines dritten Addierers 38 subtrahiert, so dass der dritte Addierer 38 ausgangsseitig eine Ladungs-Regelabweichung e_Q ausgibt. Die Ladungs-Regelabweichung e_Q wird in einem zweiten Umrechnungselement 39 in einen Spannungssollwert U_s umgerechnet, der von den Digital-Analog-Wandlern 12, 16 als Summe der analogen Wandler-Ausgangsspannungen U_1 und U_2 ausgegeben werden soll.

Der Spannungssollwert U_s wird der Berechnungseinheit 26 zugeführt, die die digitalen Eingangswerte d_1 und d_2 für die Digital-Analog-Wandler 12 und 16 berechnet. Der Berechnungseinheit 26 wird zudem ein Steuersignal S zugeführt, das von der Detektionseinheit 27 generiert wird. Hierzu wird der Detektionseinheit 27 die Soll-Positionen X_s , X_s' und x_s und die Positions-Regelabweichung e_x zugeführt. Die Detektionseinheit 27 ist derart ausgebildet, dass ein Steuersignal S erzeugt wird, wenn $X_s = x_s$ bzw. $X_s' = x_s$ gilt und die Positions-Regelabweichung e_x betragsmäßig einen vordefinierten Regelabweichungs-Grenzwert für eine Mindestzeitdauer unterschreitet. In diesem Fall erkennt die Detektions-einheit 27 einen stabilen bzw. stationären Zustand der Positionsregelung. Für das Steuersignal S gilt

beispielsweise bei Erkennen eines stationären Zustands $S = 1$, anderenfalls $S = 0$.

Die Berechnungseinheit 26 ist in Fig. 4 im Detail veranschaulicht. Um die
5 Zeitschritte zu verdeutlichen, ist der aktuelle Zeitschritt als $[k]$ und der
vorherige Zeitschritt mit $[k - 1]$ gekennzeichnet. Aus dem Spannungssoll-
wert $U_S[k]$ wird mittels eines Umrechnungselements 39 ein erforderlicher
erster Spannungswert $U_{1S}[k]$ für den Grob-Wandler 12 berechnet. Der erste
Spannungswert $U_{1S}[k]$ berücksichtigt die Parameter des Grob-Wandlers 12,
10 wie beispielsweise den ersten Spannungsbereich ΔU_1 und die ersten Span-
nungsstufen Δu_1 bzw. die Auflösung. Dieser erste Spannungswert $U_{1S}[k]$
wird einem ersten Auswahlelement 40 zugeführt. Dem Auswahlelement 40
wird zudem ein Ausgangsspannungswert $U_A[k - 1]$ des Auswahlelements
40 zugeführt, der in einem Speicherelement 41 gespeichert ist.
15

Das Auswahlelement 40 wählt in Abhängigkeit eines Schaltsignals $S_A[k]$
zwischen $U_{1S}[k]$ und $U_A[k - 1]$ aus. Ist $S_A[k] = 1$, so wählt das Auswahl-
element 40 als aktuellen Ausgangsspannungswert $U_A[k]$ den ersten Span-
nungswert $U_{1S}[k]$ aus, anderenfalls, also bei $S_A[k] = 0$, den früheren Aus-
gangsspannungswert $U_A[k - 1]$. Der Ausgangsspannungswert $U_A[k]$ gibt
20 die von dem Grob-Wandler 12 auszugebende analoge erste Wandler-Aus-
gangsspannung U_1 vor, wobei in dem Berechnungselement 42 der entspre-
chende digitale Eingangswert d_1 für den Grob-Wandler 12 berechnet wird.

25 Der Ausgangsspannungswert $U_A[k]$ wird weiterhin einem Kompensations-
tiefpass-Filter 50 zugeführt. Der Kompensationstiefpass-Filter 50 sorgt da-
für, dass die aufgrund des Tiefpass-Filters 13 tiefpassgedämpfte Dynamik
der ersten Wandler-Verstärker-Schaltung 8 durch die zweite Wandler-Ver-
stärker-Schaltung 9 ausgeglichen wird. Dies bedeutet, dass im Kleinsignal-

- verhalten für die Spannung am piezoelektrischen Aktor 3 die gesamte Dynamik zum Ausregeln von Störungen zur Verfügung steht. Die Grenzfrequenz des Tiefpass-Filters 13 und damit auch die Grenzfrequenz des Kompensationstiefpass-Filters 50 bestimmt sich aus der geforderten maximalen
- 5 Verfahrgeschwindigkeit des piezoelektrischen Aktors 3.

- Mittels eines vierten Addierers 43 wird von dem Spannungssollwert $U_s[k]$ der tiefpassgefilterte Ausgangsspannungswert $U_A[k]$ für den Grob-Wandler 12 subtrahiert, so dass der Addierer 43 einen zweiten Spannungswert
- 10 $U_{2s}[k]$ ausgibt, der von dem Fein-Wandler 16 als zweite analoge Wandler-Ausgangsspannung U_2 ausgegeben werden soll. In einem Berechnungselement 44 wird dieser zweite Spannungswert $U_{2s}[k]$ in den digitalen Eingangswert d_2 für den Fein-Wandler 16 umgerechnet.
- 15 Zur Berechnung des Schaltsignals $S_A[k]$ wird mittels eines fünften Addierers 45 von dem Spannungssollwert $U_s[k]$ der Ausgangsspannungswert $U_A[k - 1]$ aus dem vorherigen Zeitschritt subtrahiert, der in einem Speicherelement 46 gespeichert ist. Der Addierer 45 gibt eine Spannungsdifferenz aus, zu der mittels eines Betragsbildners 47 ein Differenzbetrag $\Delta U[k]$
- 20 gebildet wird. Der Differenzbetrag $\Delta U[k]$ wird einem Vergleichler 48 zugeführt, der diesen mit einem Grenzwert $L[k]$ vergleicht. Überschreitet der Differenzbetrag $\Delta U[k]$ den Grenzwert $L[k]$ wird das Schaltsignal $S_A[k] = 1$ ausgegeben, das in dem Auswahlelement 40 zur Auswahl des ersten Spannungswerts $U_{1s}[k]$ führt. Andernfalls wird das Schaltsignal $S_A[k] = 0$
- 25 ausgegeben, das in dem Auswahlelement 40 zur Auswahl des früheren Ausgangsspannungswerts $U_A[k-1]$ führt.

Ein zweites Auswahlelement 49 wählt in Abhängigkeit des von der Detektionseinheit 27 bereitgestellten Steuersignals $S[k]$ zwischen einem ersten

Grenzwert L_U und einem zweiten Grenzwert L_S aus und stellt in Abhängigkeit der Auswahl den aktuellen Grenzwert $L[k]$ bereit. Der erste Grenzwert L_U wird ausgewählt, wenn das Steuersignal $S[k]$ einen unstabilen bzw. dynamischen Zustand der Positionsregelung charakterisiert, wohingegen der
5 zweite Grenzwert L_S ausgewählt wird, wenn das Steuersignal $S[k]$ einen stabilen bzw. stationären Zustand der Positionsregelung charakterisiert. Es gilt:

$$L_U < L_S.$$

10

Hierdurch wird gewährleistet, dass in einem stabilen Zustand der Positionsregelung eine Änderung der ersten Wandler-Ausgangsspannung U_1 unwahrscheinlich wird.

15 Die piezoelektrische Positionier-Vorrichtung 1 ist beispielsweise Teil einer Projektionsbelichtungsanlage, wobei mittels der piezoelektrischen Positionier-Vorrichtung 1 mindestens ein Bauteil der Projektionsbelichtungsanlage, wie beispielsweise ein Spiegel, eine Linse und/oder eine zu verbiegende Platte, hochgenau positionierbar ist.

20

Die Funktionsweise der Positions-Vorrichtung 1 ist wie folgt:

Zur Einstellung einer gewünschten Soll-Position X_S wird mittels des Sollwert-Begrenzers 28 und dem Sollwert-Filter 29 ein geeigneter Bahnverlauf
25 und die zugehörige Soll-Position x_S berechnet. Aus der Soll-Position x_S und der digitalisierten Ist-Position x_m , die mittels des Positions-Messensors 19 ermittelt wurde, wird die Positions-Regelabweichung e_x bestimmt und über den Vor-Filter 32 dem Positions-Regler 33 zugeführt, der die Regel-Stellgröße u_R ausgibt. Der Positions-Regler 33 ist beispiels-

weise als PID-Regler ausgeführt. Zusätzlich wird über die Positions-Vorsteuereinheit 24 die Soll-Position x_s aufaddiert und der resultierende Soll-Ladungszustand Q_s des piezoelektrischen Aktors 3 der Ladungs-Regeleinheit 25 zugeführt.

5

Die Ladungs-Regeleinheit 25 berechnet eine Ladungs-Regelabweichung e_Q und gibt ausgangsseitig den erforderlichen Spannungssollwert U_s aus, der durch die Digital-Analog-Wandler 12 und 16 in die analogen Wandler-Ausgangsspannungen U_1 und U_2 umgesetzt werden muss. Zur Berechnung
10 der Ladungs-Regelabweichung e_Q wird die digitalisierte Mess-Spannung u_m in einen Strom i_m umgerechnet und zu dem Ist-Ladungszustand Q aufintegriert.

Mittels der Berechnungseinheit 46 werden in der bereits beschriebenen
15 Weise aus dem Spannungssollwert U_s die digitalen Eingangswerte d_1 und d_2 für die Digital-Analog-Wandler 12, 16 berechnet. Hierbei befindet sich die Positionsregelung zunächst in einem dynamischen Zustand, so dass die Detektionseinheit 27 ein entsprechendes Steuersignal S an die Berechnungseinheit 26 übermittelt und diese den ersten Grenzwert L_U für den
20 Vergleich 48 verwendet.

Die Digital-Analog-Wandler 12, 16 stellen entsprechend den Eingangswerten d_1 und d_2 und ihren Kennlinien die gewünschten analogen Wandler-Ausgangsspannungen U_1 und U_2 bereit. Die Wandler-Ausgangsspannung
25 U_1 wird mittels des Tiefpass-Filters 13 gefiltert und anschließend in einer gewünschten Weise mittels des Spannungsverstärkers 14 verstärkt an den piezoelektrischen Aktor 3 angelegt. Durch den Tiefpass-Filter 13 und den Serien-Widerstand 10 wird ein Rauschsignal des Grob-Wandlers 12 gedämpft. Demgegenüber wird die Wandler-Ausgangsspannung U_2 ohne

Tiefpass-Filter mittels des zweiten Spannungsverstärkers 17 verstärkt und an den piezoelektrischen Aktor 3 angelegt, da die zweiten Spannungsstufen Δu_2 deutlich kleiner sind als die ersten Spannungsstufen Δu_1 . Die Positioniergenauigkeit des piezoelektrischen Aktors 3 wird somit durch die zweiten Spannungsstufen Δu_2 bestimmt.

Der piezoelektrische Aktor 3 verändert in Folge der eingestellten Wandler-Ausgangsspannungen U_1 und U_2 seine Längenausdehnung um Δx und stellt somit die gewünschte Ist-Position x ein. Ist ein im Wesentlichen stationärer Zustand der Positionsregelung erreicht, so detektiert die Detektionseinheit 27 diesen und stellt der Berechnungseinheit 26 ein entsprechendes Steuerungssignal S bereit. Die Berechnungseinheit 26 verwendet für den Vergleich der Ist-Position mit dem Sollwert L_s , wodurch der Grob-Wandler 12 seine eingestellte Wandler-Ausgangsspannung U_1 erst dann wieder verändert, wenn eine Änderung im Spannungssollwert U_s nicht über den Fein-Wandler 16 eingestellt werden kann.

Der erste Grenzwert L_U beträgt beispielsweise $\Delta U_2/4$, wodurch im dynamischen Zustand der Positionsregelung Änderungen des Grob-Wandlers 12 forciert werden. Demgegenüber beträgt der zweite Grenzwert L_s beispielsweise $\Delta U_2/2$, wodurch der zweite Spannungsbereich ΔU_2 des Fein-Wandlers 16 optimal ausgeschöpft wird.

Die erfindungsgemäße Positionier-Vorrichtung und das erfindungsgemäße zweistufige Digital-Analog-Wandler-Konzept mit einem Grob- und einem Fein-Wandler ermöglicht somit eine hochgenaue Positionsregelung von piezoelektrischen Aktoren, insbesondere von Piezo-Stapeln, unter Verwendung einer Spannungs- oder Ladungsansteuerung. Vorzugsweise wird der gesamte Stell-Bereich bzw. Verfah-Bereich über die Längenausdehnung

eines einzigen Piezo-Stapels ermöglicht. Dadurch, dass Piezo-Stapel unmittelbar und direkt auf Spannungs- bzw. Ladungsänderungen reagieren, wird auch eine hochdynamische Positionsregelung ermöglicht. Vorzugsweise besteht der mindestens eine piezoelektrische Aktor bzw. der mindestens eine Piezo-Stapel aus einer Keramik, die nicht leitend ist. Hierdurch kann der piezoelektrische Aktor insbesondere potentialfrei betrieben werden. Durch die Messung an dem Serien-Widerstand können auch Systemfehler, wie beispielsweise Kabelbrüche und/oder Kurzschlüsse, diagnostiziert werden. Durch die Aufteilung in einen Grob-Wandler und einen Fein-Wandler können differenzielle Nichtlinearitäten gezielt vermieden werden, da kleine Positions-Regelabweichungen immer mit dem Fein-Wandler ausgeregelt werden können und die Wandler-Ausgangsspannung des Grob-Wandlers nur bei vergleichsweise großen Positionsänderungen verändert wird. Das Ansteuerkonzept für den Grob-Wandler und den Fein-Wandler ist grundsätzlich so, dass ein veränderter Spannungssollwert nach Möglichkeit über den Fein-Wandler eingestellt werden soll, so dass keine Veränderung des Grob-Wandlers erforderlich ist. Wenn dies nicht möglich ist, wird sowohl der Grob-Wandler als auch der Fein-Wandler verändert und so eingestellt, dass sich der Fein-Wandler möglichst nahe in seiner Mittelstellung bzw. mittig in seinem Spannungsbereich befindet. Dies wird durch die Berechnungseinheit gewährleistet. Die Anzahl der Sollwertänderungen des Grob-Wandlers wird durch die Berechnungseinheit minimiert, so dass die differenzielle Nichtlinearität des Grob-Wandlers nur punktuell als einmalige Störgröße im Positions-Regelkreis wirkt und problemlos von dem Positions-Regelkreis kompensiert werden kann. Durch die Verknüpfung der Berechnungseinheit mit der Detektionseinheit wird zudem gewährleistet, dass eine Veränderung des Grob-Wandlers nicht in einem stationären Zustand der Positionsregelung auftritt, wenn also die eingestellte Ist-Position exakt gehalten werden soll. Durch die Kombination der Sollwert-

Verteilung auf den Grob-Wandler und den Fein-Wandler mit dem Bahn-generator der Positionsregelung wird der Grob-Wandler so justiert bzw. nachjustiert, dass mit dem Fein-Wandler ein möglichst gleicher Spannungsbereich in positiver Richtung und negativer Richtung zur Verfügung steht.

- 5 Hierdurch können für das hochgenaue Halten der Ist-Position erforderlichen Spannungsänderungen allein vom Fein-Wandler aufgebracht werden.

- Durch die Wahl der Versorgungsspannungen kann die erfindungsgemäße Positionier-Vorrichtung einfach an den Spannungsbereich des piezoelektrischen Aktors angepasst werden und dieser zuverlässig vor Überspannungen geschützt werden. Durch die digitale Ladungsregelung können Hystereseeffekte des piezoelektrischen Aktors im Wesentlichen vermieden werden. Bei Verwendung von Piezo-Stapeln aus Niedervolt-Keramiken ist ein stromsparender und hochintegrierter Aufbau der Positionier-Vorrichtung
- 10 möglich. Die Bauteilanzahl ist vergleichsweise gering, so dass eine Beeinträchtigung durch Rauschen, thermische Drift, Bauteil-Varianzen, niedrig ist.

- Insgesamt ermöglicht die erfindungsgemäße Positionier-Vorrichtung auf
- 20 einfache und zuverlässige Weise eine hochgenaue und hochdynamische Positionsregelung. Die erfindungsgemäße Positionier-Vorrichtung eignet sich prinzipiell zur Positionierung von beliebigen kinematischen Systemen bzw. deren Bauteilen.

Patentansprüche

1. Piezoelektrische Positionier-Vorrichtung, umfassend:
 - mindestens einen piezoelektrischen Aktor (3) mit jeweils einem
5 ersten Anschlusskontakt (4) und einem zweiten Anschlusskontakt (5),
 - eine Steuereinrichtung (6) zur Ansteuerung des mindestens einen piezoelektrischen Aktors (3), mit
 - einem ersten Digital-Analog-Wandler (12), der mit dem ersten
10 Anschlusskontakt (4) verbunden ist und in einem ersten Spannungsbereich ΔU_1 in ersten Spannungsstufen Δu_1 eine erste analoge Wandler-Ausgangsspannung U_1 bereitstellt,
 - einem zweiten Digital-Analog-Wandler (16), der mit dem
15 zweiten Anschlusskontakt (5) verbunden ist und in einem zweiten Spannungsbereich ΔU_2 in zweiten Spannungsstufen Δu_2 eine zweite analoge Wandler-Ausgangsspannung U_2 bereitstellt,
wobei gilt: $\Delta U_1 > \Delta U_2 \geq \Delta u_1 > \Delta u_2$.
- 20 2. Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die ersten Spannungsstufen Δu_1 eine maximale Spannungsungenauigkeit Δu_d aufweisen, wobei gilt: $\Delta U_2 \geq \Delta u_1 + \Delta u_d$, insbesondere $\Delta U_2 \geq \Delta u_1 + 2 \cdot \Delta u_d$, und/oder $\Delta U_2 \leq 64 \cdot \Delta u_1$, insbesondere $\Delta U_2 \leq 32 \cdot \Delta u_1$.
25
3. Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet,**

dass dem ersten Digital-Analog-Wandler (12) ein erster Spannungsverstärker (14) und dem zweiten Digital-Analog-Wandler (16) ein zweiter Spannungsverstärker (17) nachgeordnet ist.

- 5 4. Positionier-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet,**
dass zwischen den zweiten Digital-Analog-Wandler (16), insbesondere zwischen den zweiten Spannungsverstärker (17), und den zweiten Anschlusskontakt (5) ein ohmscher Widerstand (10) geschaltet ist.
- 10
5. Positionier-Vorrichtung nach Anspruche 3 oder 4, **dadurch gekennzeichnet,**
dass zwischen den ersten Digital-Analog-Wandler (12) und den ersten Spannungsverstärker (14) ein Tiefpass-Filter (13) geschaltet ist.
- 15
6. Positionier-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **gekennzeichnet**
durch einen Positions-Messsensor (19) zur Messung einer mittels des mindestens einen piezoelektrischen Aktors (3) zu regelnden Ist-
20 Position (x).
7. Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet,**
dass die Steuereinrichtung (6) eine Positions-Regeleinheit (23) zur Regelung der Ist-Position (x) aufweist, wobei die Positions-Regeleinheit
25 (23) insbesondere einen Sollwert-Filter (29) umfasst.
8. Positionier-Vorrichtung nach einem Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet,**

dass die Steuereinrichtung (6) eine Positions-Vorsteuereinheit (24) umfasst, die mit der Positions-Regeleinheit (23) zusammenwirkt.

9. Positionier-Vorrichtung nach einem Ansprüche 6 bis 8, **dadurch gekennzeichnet,**
- 5 **dass** die Steuereinrichtung (6) eine Detektionseinheit (27) umfasst, die derart ausgebildet ist, dass ein Steuersignal (S) erzeugt wird, wenn eine Positions-Regelabweichung (e_x) einen vordefinierten Regelabweichungs-Grenzwert betragsmäßig unterschreitet.
- 10
10. Positionier-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet,**
- 15 **dass** die Steuereinrichtung (6) eine Berechnungseinheit (26) zur Berechnung eines ersten Eingangswerts (d_1) für den ersten Digital-Analog-Wandler (12) und eines zweiten Eingangswert (d_2) für den zweiten Digital-Analog-Wandler (16) aus einem Spannungssollwert (U_S) aufweist, wobei die Berechnungseinheit (26) insbesondere derart ausgebildet ist, dass ein in einem aktuellen Zeitschritt (k) berechneter erster Spannungswert (U_{1S}) einen in einem früheren Zeitschritt (k-1) berechneten ersten Spannungswert (U_A) ersetzt, wenn ein Differenzbetrag (ΔU) des Spannungssollwerts (U_S) und des ersten Spannungswerts (U_A) in dem früheren Zeitschritt (k-1) einen Grenzwert (L) überschreitet.
- 20
- 25 11. Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet,**
- dass** die Berechnungseinheit (26) derart ausgebildet ist, dass der Grenzwert (L) in Abhängigkeit des Steuersignals (S) verändert wird.

12. Positionier-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 11, **gekennzeichnet durch** einen Spannungs-Messsensor (21) zur Ermittlung einer Mess-Spannung (u_m), die einer an dem ohmschen Widerstand (10) abfallenden Spannung (U_m) entspricht.
- 5
13. Positionier-Vorrichtung nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuereinrichtung (6) eine Ladungs-Regeleinheit (25) zur Regelung eines Ist-Ladungszustands (Q) des mindestens einen piezoelektrischen Aktors (3) aufweist, die derart ausgebildet ist, dass aus der
- 10 Mess-Spannung (u_m) der Ist-Ladungszustand (Q) ermittelt und mit einem Soll-Ladungszustand (Q_s) verglichen wird, wobei der Soll-Ladungszustand (Q_s) insbesondere von der Positions-Regeleinheit (23) vorgegeben wird.
- 15 14. Projektionsbelichtungsanlage mit mindestens einer piezoelektrischen Positionier-Vorrichtung () nach einem der Ansprüche 1 bis 13.
15. Positionier-Verfahren mit folgenden Schritten:
- Bereitstellen einer piezoelektrischen Positionier-Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 13, und
 - Betätigen der piezoelektrischen Positionier-Vorrichtung (1) durch Anlegen der ersten analogen Wandler-Ausgangsspannung (U_1) und der zweiten analogen Wandler-Ausgangsspannung (U_2) an den mindestens einen piezoelektrischen Aktor (3).
- 20
- 25

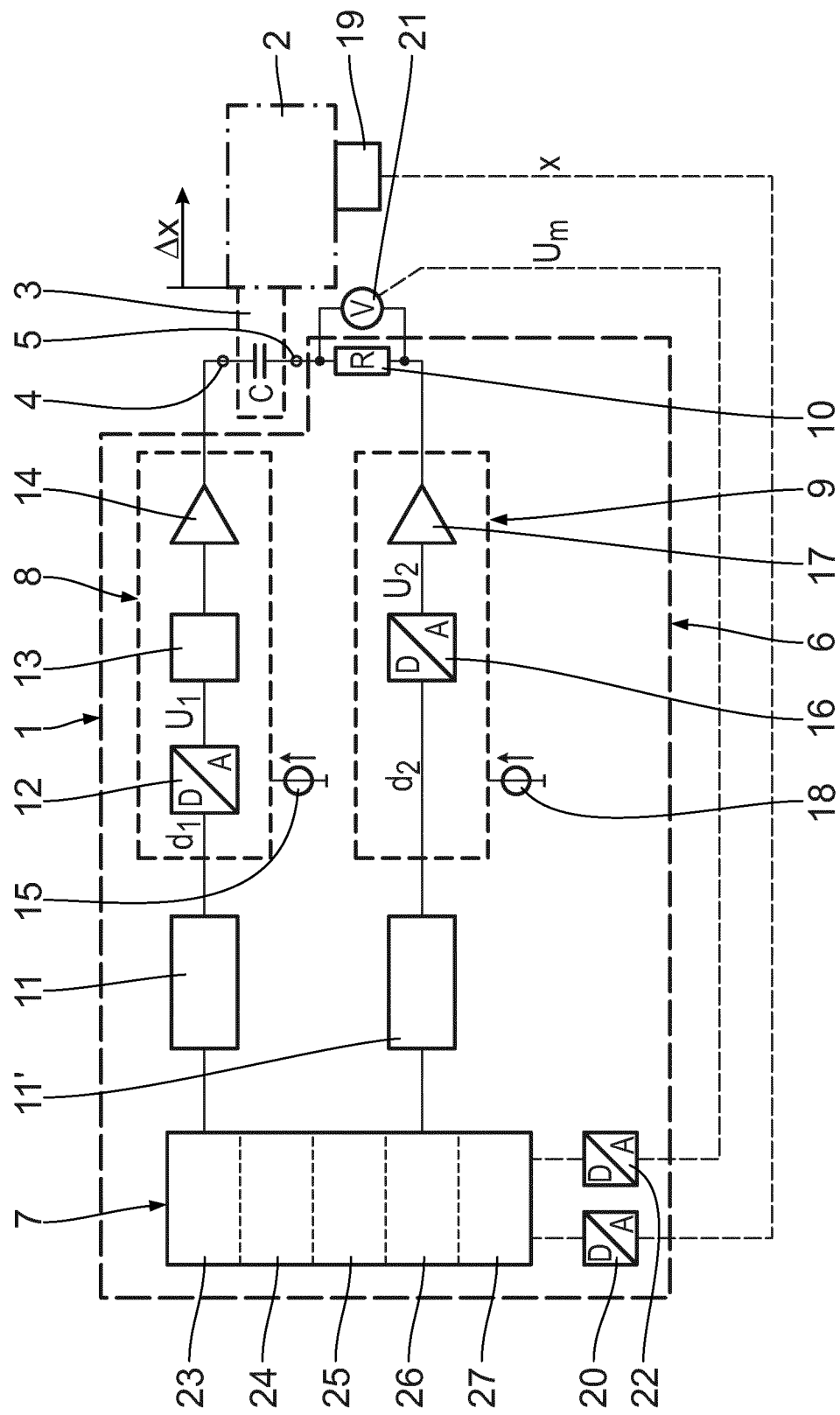


Fig. 1

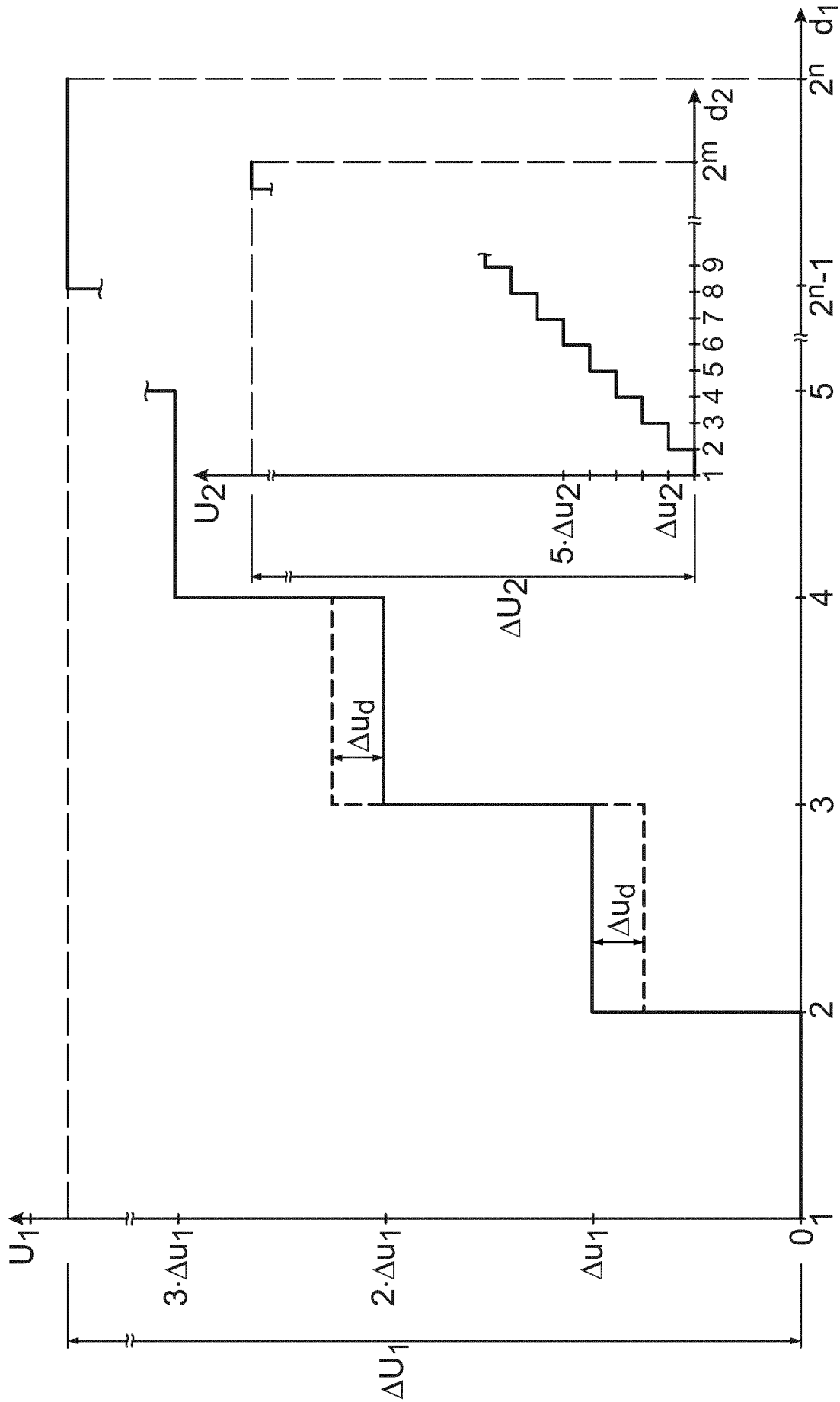


Fig. 2

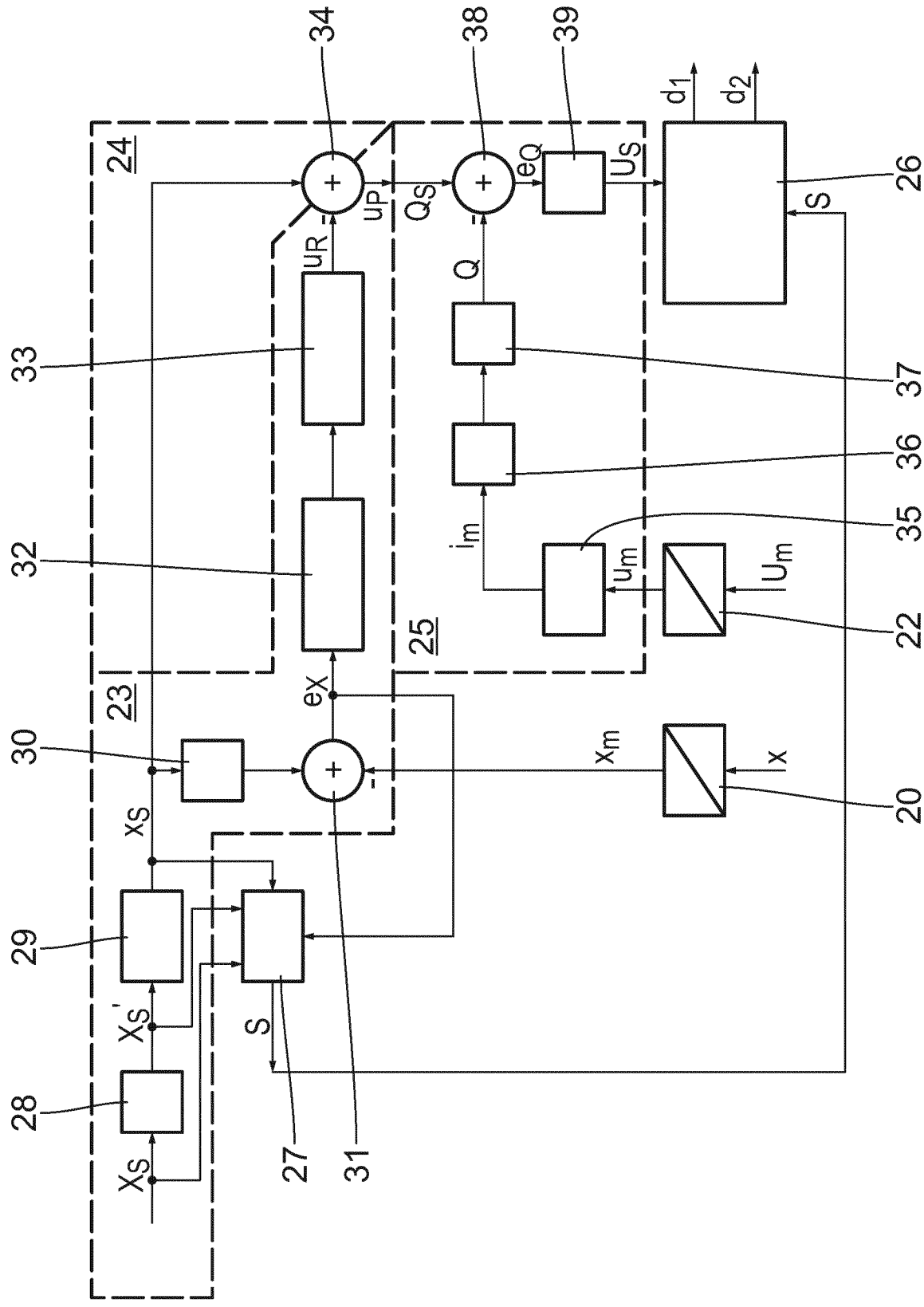


Fig. 3

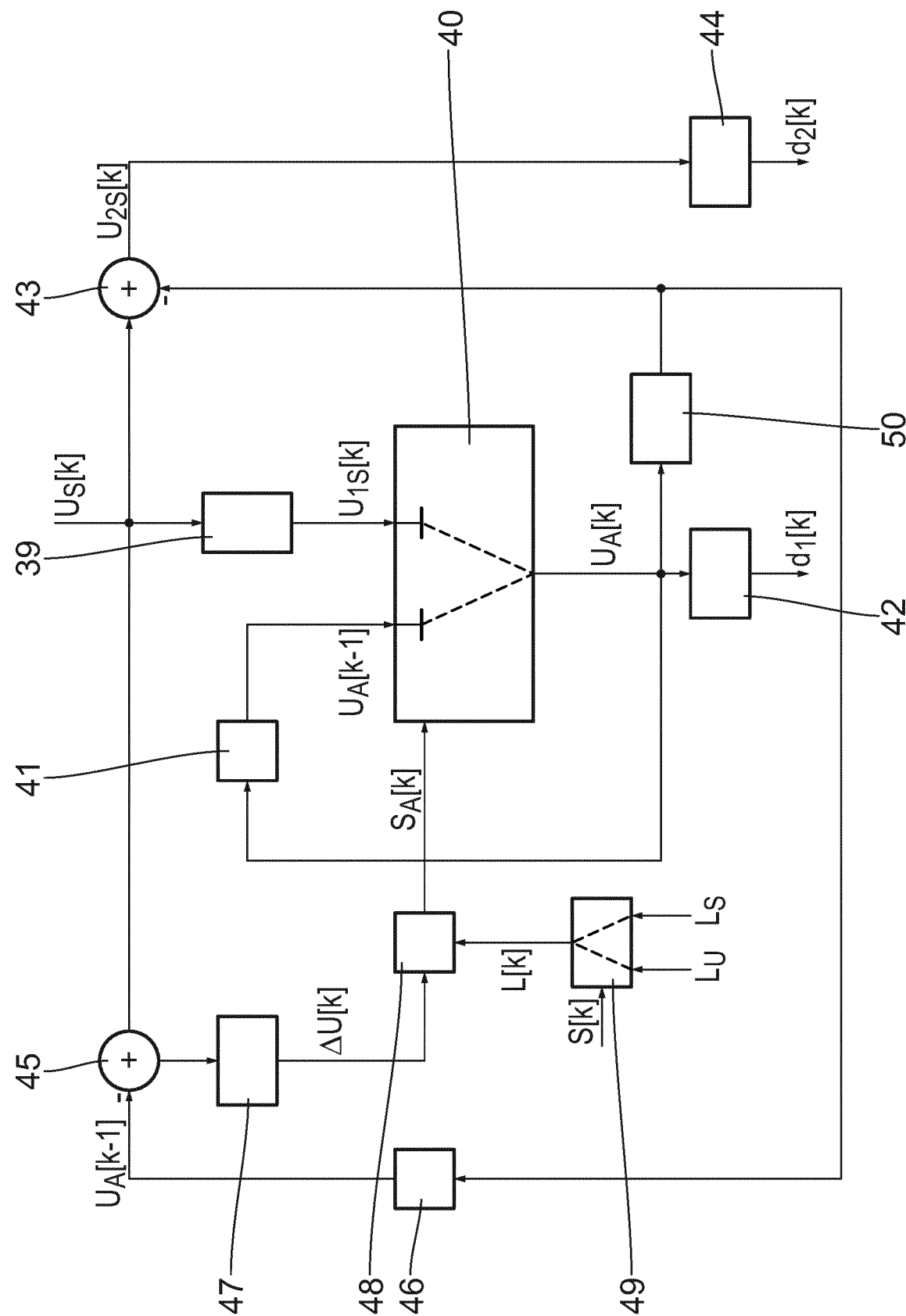


Fig. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/077449

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. H01L41/04 G01Q10/06 G03F7/20 G05D3/20 G12B5/00 H02N2/00 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) H01L G01Q G03F G05D G12B H02N 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, WPI Data, INSPEC, COMPENDEX		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP H02 141694 A (NTN TOYO BEARING CO LTD) 31 May 1990 (1990-05-31) abstract; figure 5 -----	1-15
Y	JP S63 78582 A (HITACHI LTD) 8 April 1988 (1988-04-08) abstract; figures 1-3 -----	1-15
Y	US 6 215 224 B1 (KATAOKA KENICHI [JP] ET AL) 10 April 2001 (2001-04-10) column 1, line 6 - line 10 column 5, line 5 - line 14; figure 1 -----	1-4, 10-14
Y	DE 199 23 462 C1 (PHYSIK INSTR PI GMBH & CO [DE]) 16 November 2000 (2000-11-16) page 2, line 41 - line 42; figures 1,2 -----	1-15
☐ 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 26 January 2016		Date of mailing of the international search report 03/02/2016
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 Gröger, Andreas

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2015/077449

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
JP H02141694	A	31-05-1990	NONE
JP S6378582	A	08-04-1988	NONE
US 6215224	B1	10-04-2001	JP 3768665 B2 19-04-2006 JP H11178373 A 02-07-1999 US 6215224 B1 10-04-2001
DE 19923462	C1	16-11-2000	NONE

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. H01L41/04 G01Q10/06 G03F7/20 G05D3/20 G12B5/00 H02N2/00 ADD. Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC																	
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) H01L G01Q G03F G05D G12B H02N 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, WPI Data, INSPEC, COMPENDEX																	
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN <table border="1"> <thead> <tr> <th>Kategorie*</th> <th>Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile</th> <th>Betr. Anspruch Nr.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>JP H02 141694 A (NTN TOYO BEARING CO LTD) 31. Mai 1990 (1990-05-31) Zusammenfassung; Abbildung 5 -----</td> <td>1-15</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>JP S63 78582 A (HITACHI LTD) 8. April 1988 (1988-04-08) Zusammenfassung; Abbildungen 1-3 -----</td> <td>1-15</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>US 6 215 224 B1 (KATAOKA KENICHI [JP] ET AL) 10. April 2001 (2001-04-10) Spalte 1, Zeile 6 - Zeile 10 Spalte 5, Zeile 5 - Zeile 14; Abbildung 1 -----</td> <td>1-4, 10-14</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>DE 199 23 462 C1 (PHYSIK INSTR PI GMBH & CO [DE]) 16. November 2000 (2000-11-16) Seite 2, Zeile 41 - Zeile 42; Abbildungen 1,2 -----</td> <td>1-15</td> </tr> </tbody> </table>			Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.	X	JP H02 141694 A (NTN TOYO BEARING CO LTD) 31. Mai 1990 (1990-05-31) Zusammenfassung; Abbildung 5 -----	1-15	Y	JP S63 78582 A (HITACHI LTD) 8. April 1988 (1988-04-08) Zusammenfassung; Abbildungen 1-3 -----	1-15	Y	US 6 215 224 B1 (KATAOKA KENICHI [JP] ET AL) 10. April 2001 (2001-04-10) Spalte 1, Zeile 6 - Zeile 10 Spalte 5, Zeile 5 - Zeile 14; Abbildung 1 -----	1-4, 10-14	Y	DE 199 23 462 C1 (PHYSIK INSTR PI GMBH & CO [DE]) 16. November 2000 (2000-11-16) Seite 2, Zeile 41 - Zeile 42; Abbildungen 1,2 -----	1-15
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.															
X	JP H02 141694 A (NTN TOYO BEARING CO LTD) 31. Mai 1990 (1990-05-31) Zusammenfassung; Abbildung 5 -----	1-15															
Y	JP S63 78582 A (HITACHI LTD) 8. April 1988 (1988-04-08) Zusammenfassung; Abbildungen 1-3 -----	1-15															
Y	US 6 215 224 B1 (KATAOKA KENICHI [JP] ET AL) 10. April 2001 (2001-04-10) Spalte 1, Zeile 6 - Zeile 10 Spalte 5, Zeile 5 - Zeile 14; Abbildung 1 -----	1-4, 10-14															
Y	DE 199 23 462 C1 (PHYSIK INSTR PI GMBH & CO [DE]) 16. November 2000 (2000-11-16) Seite 2, Zeile 41 - Zeile 42; Abbildungen 1,2 -----	1-15															
☐ 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 erscheinen 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 26. Januar 2016		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts 03/02/2016															
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 Gröger, Andreas															

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2015/077449

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
JP H02141694 A	31-05-1990	KEINE	
JP S6378582 A	08-04-1988	KEINE	
US 6215224 B1	10-04-2001	JP 3768665 B2	19-04-2006
		JP H11178373 A	02-07-1999
		US 6215224 B1	10-04-2001
DE 19923462 C1	16-11-2000	KEINE	