



(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2016 107 443.8**  
(22) Anmeldetag: **21.04.2016**  
(43) Offenlegungstag: **26.10.2017**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **06.05.2021**

(51) Int Cl.: **G01B 11/24 (2006.01)**  
**G01B 11/26 (2006.01)**

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

(73) Patentinhaber:  
**Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, dieses vertreten durch den Präsidenten der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, DE**

(74) Vertreter:  
**Gramm, Lins & Partner Patent- und Rechtsanwälte PartGmbB, 38122 Braunschweig, DE**

(72) Erfinder:  
**Ehret, Gerd, Dr., 39576 Stendal, DE; Schulz, Michael, Dr., 38550 Isenbüttel, DE**

(56) Ermittelte(r) Stand der Technik:

**DE 10 2010 007 106 A1**

**Berutto, M. [et al.]: Realization and Metrological Characterization of a Compact High-Resolution Pendulum Tiltmeter. In: IEEE Sensors Journal, Vol. 5, 2005, No. 1, S. 26-31. DOI: 10.1109/JSEN.2004.839891**

**Ehret, G. [et al.] Optical measurement of absolute flatness with the deflectometric measurement systems at PTB. In: Journal of Physics Conference Series 425 (2013), 152016**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur topographischen Oberflächenmessung und Oberflächenmessgerät zur topographischen Oberflächenmessung**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur topographischen Oberflächenmessung, insbesondere zum Vermessen von nahezu planen und/oder gekrümmten Oberflächen (12), mit den Schritten:

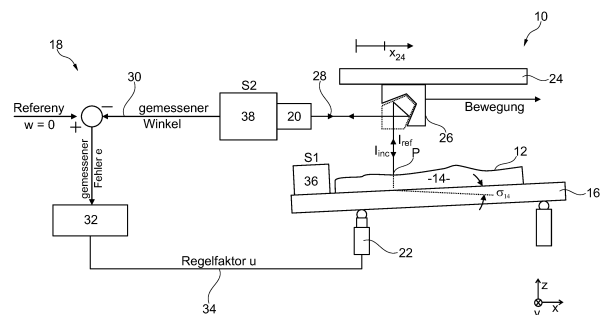
(a) Richten eines Lichtstrahls (28) eines Ausrichtsensors (20) auf einen Auftreffpunkt (P) einer zu vermessenden Oberfläche (12) eines Prüflings (14),

(b) geführtes Bewegen zumindest eines Teils der Ausrichtvorrichtung (18), so dass sich der Lichtstrahl (28) relativ zum Prüfling (14) über die zu vermessenden Oberfläche bewegt,

(c) Regeln einer Neigung ( $\sigma_{14}$ ) des Prüflings (14), so dass eine lokale Oberfläche (12) des Prüflings (14) im Auftreffpunkt (P) unter einem vorgegebenen Winkel (a) zur Ausrichtvorrichtung (18) orientiert ist, und

(d) Messen der Neigung ( $\sigma_{14}$ ) des Prüflings (14) während des Bewegens, dadurch gekennzeichnet, dass

(e) die Neigung ( $\sigma_{14}$ ) des Prüflings (14) mittels zumindest eines Tiltmeters (36) gemessen wird.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur topographischen Oberflächenmessung, insbesondere zum Vermessen von nahezu planen und/oder gekrümmten Oberflächen, mit den Schritten (a) Richten eines Lichtstrahls einer Ausrichtvorrichtung, insbesondere eines Ausrichtsensors der Ausrichtvorrichtung, auf einen Auftreffpunkt einer zu vermessenden Oberfläche eines Prüflings, (b) geführtes Bewegen zumindest eines Teils der Ausrichtvorrichtung, sodass sich der Lichtstrahl relativ zum Prüfling über die zu vermessende Oberfläche bewegt, (c) Regeln einer Neigung des Prüflings, sodass eine lokale Oberfläche des Prüflings im Auftreffpunkt unter einem vorgegebenen Winkel zur Ausrichtvorrichtung orientiert ist, und (d) Messen der Neigung des Prüflings während des Bewegens.

**[0002]** Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung ein Oberflächenmessgerät zur topographischen Oberflächenmessung, insbesondere von nahezu planen oder auch gekrümmten Flächen mit (i) einer Prüfling-Aufnahme zum Aufnehmen eines Prüflings, (ii) einer Ausrichtvorrichtung, die einen Ausrichtsensor, insbesondere einen Ausrichtautokollimator, zum Erfassen einer Neigung des Prüflings und einen Aktuator, der angeordnet ist zum Verändern einer Neigung des Prüflings, sodass der Prüfling relativ zum Ausrichtsensor ausrichtbar ist, umfasst, (iii) einer Linearführung zum Bewegen zumindest eines Teils des Oberflächenmessgeräts, sodass der Lichtstrahl über eine Oberfläche des Prüflings bewegbar ist, (iv) einer Regelung, die eingerichtet ist zum automatischen Regeln einer Neigung des Prüflings, sodass eine lokale Oberfläche des Prüflings in einem Auftreffpunkt des Lichtstrahls unter einem vorgegebenen Winkel zur Ausrichtvorrichtung orientiert ist und einem Neigungsmesser zum Messen der Neigung.

**[0003]** Ein derartiges Verfahren ist aus der US 2007 / 0 193 814 A1 bekannt. Bei dem dort beschriebenen Verfahren wird, beispielsweise mittels eines Piezoeffektors, die Prüfling-Aufnahme so bewegt, dass die Oberfläche der Probe im Auftreffpunkt stets senkrecht zu einem Laserstrahl verläuft, der auf den Prüfling ausgesandt wird. Die resultierende Neigung der Prüfling-Aufnahme wird mittels eines zweiten Autokollimators bestimmt. Nachteilig an diesem Vorgehen ist die begrenzte Samplingrate des Autokollimators und der hohe Preis einer derartigen Messvorrichtung.

**[0004]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine hochgenaue Vermessung der topographischen Oberfläche einfacher, genauer und kostengünstiger zu ermöglichen.

**[0005]** Die Erfindung löst das Problem durch ein gattungsgemäßes Verfahren, bei der die Neigung des Prüflings mittels eines Tiltmeters gemessen wird. Ge-

mäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein gattungsgemäßes Oberflächenmessgerät, bei dem der Neigungsmesser ein Tiltmeter aufweist.

**[0006]** Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass die hochgenaue Messung mit deutlich einfachem und damit kostengünstigerem Messgerät möglich ist, ohne dass die Messgenauigkeit reduziert wird.

**[0007]** Ein weiterer Vorteil ist, dass die Messung schneller erfolgen kann. Der Grund dafür ist, dass Tiltmeter in der Regel eine höhere Messgeschwindigkeit erlauben als messende Autokollimatoren.

**[0008]** Vorzugsweise umfasst das Verfahren den Schritt des Bestimmens der Oberflächentopographie aus der Neigung des Prüflings.

**[0009]** Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter einem Tiltmeter insbesondere ein Neigungsmesser verstanden, dessen Messunsicherheit zumindest 1 nrad und/oder 0,2 milliarcsec beträgt. Insbesondere ist das Tiltmeter ausgebildet zum Messen seiner Neigung zur Vertikalen und/oder zur Horizontalen.

**[0010]** Günstig ist es, wenn ein Tiltmeter verwendet wird, das eine Empfindlichkeit von zumindest 5 arcsec pro Volt, vorzugsweise zumindest 10 arcsec pro Volt, aufweist. Derartige hochauflösende Tiltmeter erlauben eine gleichzeitig hohe Messgenauigkeit und eine hohe Messgeschwindigkeit.

**[0011]** Vorzugsweise ruht das Tiltmeter relativ zum Prüfling und/oder relativ zur Prüfling-Aufnahme. Das hat den Vorteil, dass ein Einfluss der Erdkrümmung auf das Messergebnis ausgeschlossen werden kann. Ein weiterer Vorteil ist, dass keine Messunsicherheit durch das Verschieben des Tiltmeters relativ zum Prüfling und/oder der Prüfling-Aufnahme entstehen kann.

**[0012]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform erfolgt das Regeln der Neigung des Prüflings so, dass die Oberfläche im Auftreffpunkt parallel zu einer Referenzrichtung verläuft. Die Referenzrichtung entspricht einer Richtung, in die die Referenzrichtung einen Lichtstrahl aussendet, der auf den Prüfling umgelenkt wird. Es ist möglich, nicht aber notwendig, dass die Referenzrichtung horizontal verläuft. Alternativ kann die Referenzrichtung auch vertikal oder winklig dazu verlaufen. Eine horizontal verlaufende Referenzrichtung hat den Vorteil, dass eine Ausrichtung der Linearführung besonders einfach möglich ist.

**[0013]** Es ist möglich, nicht aber notwendig, dass genau ein Tiltmeter zur Messung der Neigung des Prüflings verwendet wird.

**[0014]** Vorzugsweise umfasst das Messen der Neigung die Schritte eines Aufnehmens von ersten Neigungsmesswerten mit dem Tiltmeter an einer ersten Stelle, eines Aufnehmens von zweiten Neigungsmesswerten mit einem zweiten Tiltmeter, das an einer von der ersten Stelle (S1) beabstandeten zweiten Stelle angeordnet ist, und eines Berechnens der Neigung aus den ersten Neigungsmesswerten und den zweiten Neigungsmesswerten. Das zweite Tiltmeter kann an einem anderen Element des Oberflächenmessgeräts als das erste Tiltmeter befestigt sein, insbesondere kann das zweite Tiltmeter am Ausrichtsensor, der die Referenzrichtung vorgibt, angeordnet sein. Auf diese Weise kann eine etwaige Verkippung des Ausrichtsensors zum Prüfling erfasst und korrigiert werden. Diese Verkippung kann z.B. durch Gebäudebewegungen verursacht werden.

**[0015]** Vorzugsweise umfasst der Teil der Ausrichtvorrichtung, die geführt wird, ein Pentaprisma.

**[0016]** Besonders bevorzugt wird das erfindungsgemäße Verfahren an einer EUV-Optik durchgeführt, also einer Optik, die für die Verwendung im extrem ultravioletten Strahlungsspektrum ausgebildet ist. Insbesondere ist die EUV-Optik eine Optik, die bei einer Wellenlänge von 11,5 bis 15,5 Nanometer, insbesondere 13,5 Nanometer, einsetzbar ist. An eine derartige Optik werden sehr hohe Anforderungen hinsichtlich der Ebenheit bzw. Formtreue gestellt. Alternativ wird das erfindungsgemäße Verfahren bevorzugt an einer Synchrotron-Optik oder einer XFEL-Optik durchgeführt, also einer Optik, die zur Verwendung in einem Röntgenlicht-Freie-Elektronen-Laser ausgebildet ist. Beispielsweise ist die Optik ein Spiegel.

**[0017]** Alternativ wird das erfindungsgemäße Verfahren vorzugsweise an einem Flugzeugbauteil durchgeführt.

**[0018]** Günstig ist es, wenn der Ausrichtsensor als Nullinstrument ausgebildet ist. Hierunter wird insbesondere verstanden, dass der Ausrichtsensor so ausgebildet ist, dass er hinsichtlich einer Abweichung von einer vorgegebenen Lage diese erfasst, ohne dass der Winkel, um den die Prüfling-Aufnahme von dem vorgegebenen Winkel abweicht, bekannt sein muss.

**[0019]** Ein erfindungsgemäßes Oberflächenmessgerät besitzt vorzugsweise ein zweites Tiltmeter, das vom ersten Tiltmeter beabstandet angeordnet ist. Beispielsweise ist das Tiltmeter relativ zum Ausrichtsensor befestigt. So kann eine Durchbiegung der Prüfling-Aufnahme erkannt und gegebenenfalls kompensiert werden. Günstig ist es, wenn ein Abstand zwischen dem ersten Tiltmeter und dem zweiten Tiltmeter zumindest der halben maximalen Ausdehnung des Prüflings entspricht.

**[0020]** Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigt

**Fig. 1** eine schematische Ansicht eines erfindungsgemäßen Oberflächenmessgeräts zum Durchführen eines erfindungsgemäßen Verfahrens.

**[0021]** **Fig. 1** zeigt ein erfindungsgemäßes Oberflächenmessgerät **10** zur topographischen Oberflächenmessung einer Oberfläche **12**, eines Prüflings **14**. Das Oberflächenmessgerät **10** besitzt eine Prüfling-Aufnahme **16**, auf der der Prüfling **14** angeordnet ist, sowie eine Ausricht-Vorrichtung **18**. Die Ausricht-Vorrichtung **18** besitzt einen Ausrichtsensor **20**, der beispielsweise durch einen Autokollimator gebildet sein kann, und einen Aktuator **22**, der im vorliegenden Fall durch einen Piezo-Aktuator gebildet ist. Wird der Aktuator **22** betätigt oder verändert, so ändert sich eine Neigung  $\sigma_{16}$  der Prüfling-Aufnahme **16** und damit eine Neigung  $\sigma_{14}$  des Prüflings zur Horizontalen.

**[0022]** Das Oberflächenmessgerät **10** weist eine Linearführung **24** auf, mittels der eine Umlenkvorrichtung **26**, beispielsweise eine Doppelspiegeleinheit oder ein Pentaprisma, linear bewegbar befestigt ist. Ein vom Ausrichtsensor **20** ausgehender Lichtstrahl **28** wird von der Umlenkvorrichtung **26** auf die Oberfläche **12** des Prüflings **14** reflektiert. Der reflektierte Lichtstrahl gelangt in den Ausrichtsensor **20** zurück. Haben die beiden Lichtstrahlen, nämlich der vom Ausrichtsensor **20** ausgehende Lichtstrahl und der reflektierte Lichtstrahl, einen Versatz zueinander, so gibt der Ausrichtsensor **20** ein Signal über eine Messleitung **30** ab, das diese Tatsache kodiert. Die Messleitung **30** ist mit einer Regelung **32** verbunden. Statt der Messleitung **30** kann auch ein Funksignal verwendet werden.

**[0023]** Erfasst die Regelung **32**, dass die beiden oben genannten Lichtstrahlen nicht übereinanderliegen, so gibt sie über eine zweite Messleitung **34** ein Ansteuersignal an den Aktuator **22** ab, der daraufhin die Neigung  $\sigma_{16}$  so verändert, dass die Abweichung der beiden Lichtstrahlen minimiert wird. In anderen Worten regelt die Regelung **32** den Aktuator **22** so, dass der Lichtstrahl **28** hinter der Umlenkvorrichtung **26** stets senkrecht in einem Auftreffpunkt **P** auf die Oberfläche **12** auftrifft. Dadurch ist die Oberfläche **12** in der Umgebung des Auftreffpunkts **P** unter einem vorgegebenen Winkel  $\alpha$  orientiert, wobei hier  $\alpha=0^\circ$  relativ zur Vertikalen gilt und der Lichtstrahl von dem Auftreffpunkt **P** ebenfalls  $0^\circ$  zur Vertikalen verläuft.

**[0024]** Die Neigung  $\sigma$  wird von einem Tiltmeter **36** erfasst. Beispielsweise ist das Tiltmeter **36** ausgebildet zum Erfassen einer Abweichung der Neigung  $\sigma_{16}$  relativ zur Vertikalen oder zur Horizontalen, das ist aber nicht notwendig. Vorzugweise hat das Tiltmeter **36** eine Messunsicherheit von höchstens 300 nrad.

Günstig ist es zudem, wenn das Tiltmeter eine Empfindlichkeit hat, die zumindest 10 arcsec pro Volt beträgt. Besonders günstig ist es, wenn die Empfindlichkeit zumindest 25 arcsec pro Volt beträgt.

**[0025]** Das Tiltmeter **36** erfasst die Neigung  $\sigma_{36}$ , beispielsweise relativ zur Vertikalen oder zur Horizontalen, in regelmäßigen Zeitabschnitten. Aus den so gemessenen Neigungen  $\sigma_{36}$  wird die Neigung  $\sigma_{16}$  der Prüfling-Aufnahme **16** und daraus die Neigung  $\sigma_{12}$  (p) der Oberfläche **12** im Auftreffpunkt **P** berechnet. Simultan dazu wird die Position  $X_{24}$  der Umlenkvorrichtung **26** entlang der Linearführung **24** gemessen. Aus der Position  $X_{24}$  und der jeweiligen Neigung  $\sigma_{12}$  (p) wird die Oberflächentopographieänderung  $\Delta z(x)$  berechnet.

**[0026]** Als Tiltmeter **36** können beispielsweise Drei-Platten-Kondensatoren verwendet werden. Alternativ oder zusätzlich kann das Tiltmeter **36** als Lasergyroskop ausgebildet sein, in diesem Fall wird der Einfluss der Erdrotation herausgerechnet.

**[0027]** Im vorliegenden Fall besitzt das Oberflächenmessgerät **10** neben dem ersten Tiltmeter **36** am Ort S1 ein zweites Tiltmeter **38** am Ort S2, das mit dem Ausrichtsensor verbunden ist. Ändert sich die Neigung im Ort S1 anders als im Ort S2, so deutet das auf eine Durchbiegung der Prüfling-Aufnahme **16** hin, die korrigiert wird.

#### Bezugszeichenliste

<b>10</b>	Oberflächenmessgerät
<b>12</b>	Oberfläche
<b>14</b>	Prüfling
<b>16</b>	Prüfling-Aufnahme
<b>18</b>	Ausrichtvorrichtung
<b>20</b>	Ausrichtsensor
<b>22</b>	Aktuator
<b>24</b>	Linearführung
<b>26</b>	Umlenkvorrichtung/Pentaprisma, Doppelspiegeleinheit
<b>28</b>	Lichtstrahl
<b>30</b>	Messleitung
<b>32</b>	Regelung
<b>34</b>	Messleitung
<b>36</b>	Tiltmeter
<b>38</b>	zweites Tiltmeter
<b>P</b>	Auftreffpunkt
$\sigma$	Neigung

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur topographischen Oberflächenmessung, insbesondere zum Vermessen von nahezu planen und/oder gekrümmten Oberflächen (12), mit den Schritten:

- (a) Richten eines Lichtstrahls (28) eines Ausrichtsensors (20) auf einen Auftreffpunkt (P) einer zu vermessenden Oberfläche (12) eines Prüflings (14),
- (b) geführtes Bewegen zumindest eines Teils der Ausrichtvorrichtung (18), so dass sich der Lichtstrahl (28) relativ zum Prüfling (14) über die zu vermessende Oberfläche bewegt,
- (c) Regeln einer Neigung ( $\sigma_{14}$ ) des Prüflings (14), so dass eine lokale Oberfläche (12) des Prüflings (14) im Auftreffpunkt (P) unter einem vorgegebenen Winkel (a) zur Ausrichtvorrichtung (18) orientiert ist, und
- (d) Messen der Neigung ( $\sigma_{14}$ ) des Prüflings (14) während des Bewegens, **dadurch gekennzeichnet**, dass
- (e) die Neigung ( $\sigma_{14}$ ) des Prüflings (14) mittels zumindest eines Tiltmeters (36) gemessen wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Regeln der Neigung ( $\sigma_{14}$ ) des Prüflings (14) so erfolgt, dass die Oberfläche (12) im Auftreffpunkt (P) parallel zu einer Referenzrichtung verläuft, die horizontal oder vertikal verläuft.

3. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Messen der Neigung die folgenden Schritte umfasst:

- Aufnehmen von ersten Neigungsmesswerten mit dem Tiltmeter an einer ersten Stelle (S1),
- Aufnehmen von zweiten Neigungsmesswerten mit einem zweiten Tiltmeter, das an einer von der ersten Stelle (S1) beabstandeten zweiten Stelle (S2) angeordnet ist, und
- Berechnen der Neigung aus den ersten Neigungsmesswerten und den zweiten Neigungsmesswerten.

4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass es an einer EUV-Optik durchgeführt wird.

5. Oberflächenmessgerät (10) zur topographischen Oberflächenmessung, insbesondere von nahezu planen oder auch gekrümmten Flächen, mit

- (i) einer Prüfling-Aufnahme (16) zum Aufnehmen eines Prüflings (14),
- (ii) einer Ausrichtvorrichtung (18), die
  - einen Ausrichtsensor (20) zum Erfassen einer Neigung ( $\sigma_{14}$ ) des Prüflings (14) und
  - einen Aktuator (22), der angeordnet ist zum Verändern der Neigung ( $\sigma_{14}$ ) des Prüflings (14), so dass der Prüfling (14) relativ zum Ausrichtsensor (20) ausrichtbar ist, umfasst,
  - (iii) einer Linearführung (24) zum Bewegen zumindest eines Teils der Ausrichtvorrichtung (18), so dass

der Lichtstrahl (28) über eine Oberfläche (12) des Prüflings (14) bewegbar ist,

(iv) einer Regelung, die eingerichtet ist zum automatischen Regeln der Neigung ( $\sigma_{14}$ ) des Prüflings (14), so dass eine lokale Oberfläche (12) des Prüflings (14) in einem Auftreffpunkt (P) des Lichtstrahls (28) unter einem vorgegebenen Winkel ( $\alpha$ ) zur Ausrichtvorrichtung (18) orientiert ist, und

(v) einem Neigungsmesser, der zum Messen der Neigung ( $\sigma_{14}$ ) ausgebildet ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass

(vi) der Neigungsmesser ein Tiltmeter (36) aufweist.

6. Oberflächenmessgerät nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Regelung eingerichtet ist zum automatischen Regeln der Neigung ( $\sigma_{14}$ ) des Prüflings (14), so dass die lokale Oberfläche (12) des Prüflings (14) in dem Auftreffpunkt (P) des Lichtstrahls (28) horizontal verläuft.

7. Oberflächenmessgerät nach Anspruch 5 oder 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Ausrichtsensor (20) als Nullinstrument ausgebildet ist.

8. Oberflächenmessgerät nach einem der Ansprüche 5 bis 7, **gekennzeichnet durch** ein zweites Tiltmeter (38), das vom ersten Tiltmeter (36) beabstandet angeordnet ist.

9. Oberflächenmessgerät nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Abstand zwischen dem ersten Tiltmeter (36) und dem zweiten Tiltmeter (38) zumindest der halben maximalen Ausdehnung des Prüflings (14) entspricht.

10. Oberflächenmessgerät nach Anspruch 8 oder 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass das zweite Tiltmeter (38) an einem anderen Element des Oberflächenmessgerätes (10), insbesondere am Ausrichtsensor (20), angeordnet ist.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

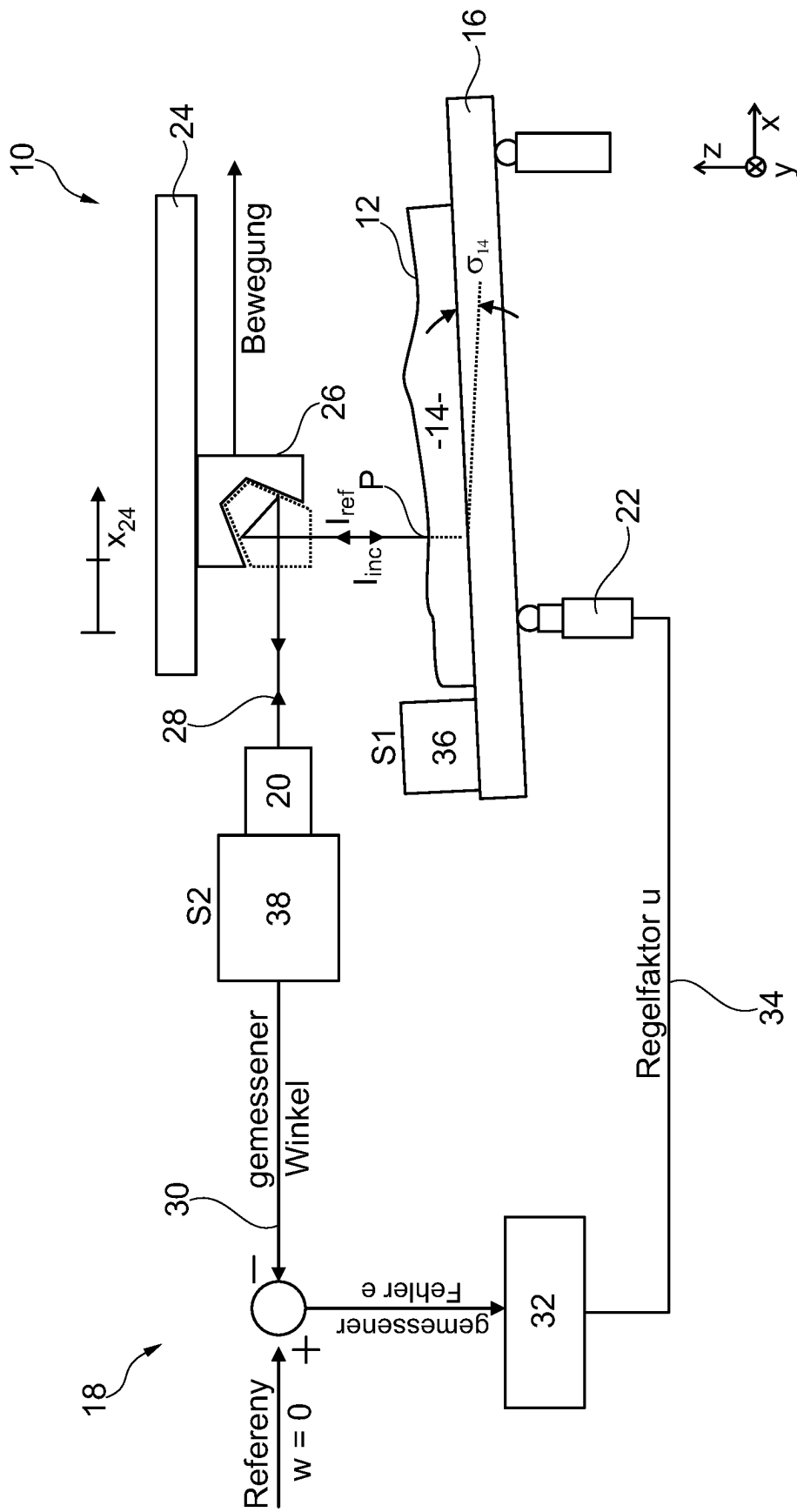


Fig. 1

Fig. 1