



(10) **DE 10 2015 114 386 B3** 2016.11.17

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2015 114 386.0**

(22) Anmeldetag: **28.08.2015**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **17.11.2016**

(51) Int Cl.: **G01L 5/16 (2006.01)**

**G01N 3/20 (2006.01)**

**G01L 5/18 (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, vertr. durch das  
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,  
dieses vertreten durch den Präsidenten der  
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116  
Braunschweig, DE**

(72) Erfinder:

**Wagner, Michael, Dipl.-Ing., 38124 Braunschweig,  
DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**DE 195 33 135 A1**

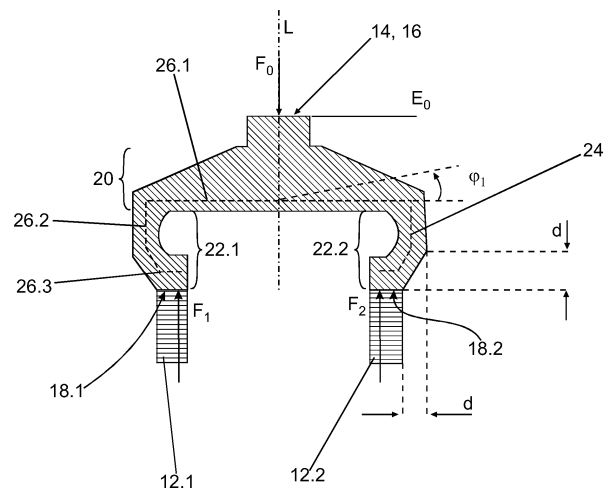
**DE 10 2011 112 935 A1**

(74) Vertreter:

**Gramm, Lins & Partner Patent- und  
Rechtsanwälte PartGmbB, 38122 Braunschweig,  
DE**

(54) Bezeichnung: **Lastverteilerelement**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Lastverteilerelement (10), das ausgebildet ist zum Übertragen einer Prüfkraft ( $F_0$ ) auf zumindest zwei Kraftmessgeräte (12.1, 12.2), mit einer Kraftaufnahmefläche (16) zum Aufnehmen der Prüfkraft ( $F_0$ ), einer ersten Kraftabgabefläche (18.1) zum Übertragen eines Teils der Prüfkraft ( $F_0$ ) auf ein erstes Kraftmessgerät (12.1) und zumindest einer zweiten Kraftabgabefläche (18.2) zum Übertragen eines Teils der Prüfkraft ( $F_0$ ) auf ein zweites Kraftmessgerät (12.2). Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass das Lastverteilerelement (10) einen Schulterabschnitt (20), der sich von der Kraftaufnahmefläche (16) weg erstreckt, einen ersten Armabschnitt (22.1), der sich an den Schulterabschnitt (20) anschließt und an dem die erste Kraftabgabefläche (18.1) ausgebildet ist, und zumindest einen zweiten Armabschnitt (22.2), der sich an dem Schulterabschnitt (20) anschließt und an dem die zweite Kraftabgabefläche (18.2) ausgebildet ist, aufweist, und dass der erste Armabschnitt (22.1) und der zweite Armabschnitt (22.2) zumindest abschnittsweise aufeinander zu verlaufen, sodass ein erster Biegewinkel ( $\alpha_1$ ) zwischen der Kraftaufnahmefläche (16) und der ersten Kraftabgabefläche (18.1) und ein zweiter Biegewinkel ( $\alpha_2$ ) zwischen der Kraftaufnahmefläche (16) und der zweiten Kraftabgabefläche (18.2) in erster Näherung nicht von der Prüfkraft ( $F_0$ ) abhängen.



### Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Lastverteilerelement, das ausgebildet ist zum Übertragen einer Prüfkraft auf zumindest zwei Kraftmessgeräte, mit (a) einer Kraftaufnahmefläche zum Aufnehmen der Prüfkraft, (b) einer ersten Kraftabgabefläche zum Übertragen eines ersten Teils der Prüfkraft auf ein erstes Kraftmessgerät und (c) zumindest einer zweiten Kraftabgabefläche zum Übertragen eines zweiten Teils der Prüfkraft auf ein zweites Kraftmessgerät.

**[0002]** Um große Kräfte zu messen, werden häufig parallel geschaltete Kraftmessgeräte verwendet. Sogenannte Build-Up-Systeme haben den Vorteil, dass Kräfte gemessen werden können, die außerhalb des Messbereichs der einzelnen Kraftmessgeräte liegen. Die rückführbare Kalibrierung von großen Kräften ist deutlich schwieriger als die Kalibrierung kleinerer Kräfte.

**[0003]** Ein gattungsgemäßes Lastverteilerelement ist aus der DE 10 2011 112 935 A1 bekannt, wo es als Balken ausgeführt ist. Bekannte Systeme mit Lastverteilerelementen haben den Nachteil, dass parasitäre Kräfte entstehen. Eine parasitäre Kraft wirkt senkrecht zu der Messrichtung des jeweiligen Kraftmessgeräts. Die Messrichtung ist diejenige Richtung, in der eine Kraft auf das Kraftmessgerät wirken muss, sodass die Kraft korrekt gemessen wird. Der Grund für das Entstehen der parasitären Kräfte ist die Verformung des Lastverteilerelements, die unvermeidlich ist.

**[0004]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zu Grunde, die Kraftmessung, insbesondere von großen Kräften, zu verbessern.

**[0005]** Die Erfindung löst das Problem durch ein gattungsgemäßes Lastverteilerelement, das einen Schulterabschnitt, der sich von der Kraftaufnahmefläche weg erstreckt, einen ersten Armabschnitt, der sich an den Schulterabschnitt anschließt und an dem die erste Kraftabgabefläche ausgebildet ist, und zumindest einen zweiten Armabschnitt, der sich an den Schulterabschnitt anschließt und an dem die zweite Kraftabgabefläche ausgebildet ist, aufweist, wobei der erste Armabschnitt und der zweite Armabschnitt zumindest abschnittsweise aufeinander zu verlaufen, sodass ein erster Biegewinkel zwischen der Kraftaufnahmefläche und der ersten Kraftabgabefläche und ein zweiter Biegewinkel zwischen der Kraftaufnahmefläche und der zweiten Kraftabgabefläche in erster Näherung nicht von der Prüfkraft abhängen.

**[0006]** Der Erfindung liegt die Erkenntnis zu Grunde, dass eine mechanische Verformung des Lastverteilerelements zwar unvermeidlich ist, dass aber die Form des Lastverteilerelements so gewählt werden kann, dass sich beim Aufbringen der Prüfkraft entstehende Deformationen so gegeneinander aufheben, dass der Biegewinkel zwischen Kraftaufnahmefläche und Kraftabgabeflächen sich nicht verändert.

**[0007]** Es ist ein weiterer Vorteil, dass das Lastverteilerelement weniger massiv gewählt werden kann. Anders als bei bekannten Lastverteilerelementen ist eine Deformation des erfindungsgemäßen Lastverteilerelements nicht per se nachteilig, da sich die resultierenden Deformationen gegeneinander aufheben. Es kann daher bei einer vorgegebenen Prüfkraft eine größere Verformung toleriert werden, ohne dass es zu einer Vergrößerung der Messunsicherheit führt.

**[0008]** Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter dem Lastverteilerelement insbesondere eine Vorrichtung verstanden, die nicht nur prinzipiell dazu geeignet, sondern dazu ausgebildet ist, eine Prüfkraft aufzunehmen und auf zumindest zwei Kraftmessgeräte zu übertragen. Insbesondere sind die beiden Kraftabgabeflächen so ausgebildet, dass ein Winkel zwischen einer ersten Ausgleichsebene durch die erste Kraftabgabefläche und eine zweite Ausgleichsebene durch die zweite Kraftabgabefläche höchstens  $5^\circ$  beträgt. Vorteilhaft ist zudem, wenn ein Abstand der beiden genannten Ebenen im geometrischen Mittelpunkt der ersten Kraftabgabefläche höchstens 5 mm beträgt.

**[0009]** Das Lastverteilerelement ist insbesondere so ausgebildet, dass eine Prüfkraft von 10 kN, insbesondere von 1 MN, besonders bevorzugt von 10 MN, dazu führt, dass der Biegewinkel sich um höchstens  $10^{-2^\circ}$ , insbesondere  $10^{-3^\circ}$ , ändert.

**[0010]** Unter dem Merkmal, dass die Biegewinkel in erster Näherung nicht von der Prüfkraft abhängen, wird verstanden, dass eine Potenzreihenentwicklung der Funktion, die die Abhängigkeit des Biegewinkels von der Prüfkraft beschreibt, in hinreichend guter Näherung keinen linearen Anteil aufweist. Insbesondere ist bei Verwendung von SI-Einheiten der Vorfaktor des linearen Terms kleiner als der Vorfaktor des quadratischen Terms.

**[0011]** Unter dem Armabschnitt wird insbesondere ein gedachter Abschnitt des Lastverteilerelements verstanden. Es ist möglich, nicht aber notwendig, dass der Armabschnitt an einem Arm ausgebildet ist. Insbesondere ist es möglich und stellt eine bevorzugte Ausführungsform dar, dass das Lastverteilerelement zumindest im Bereich des Schulterabschnitts und/oder der Armabschnitte drehsymmetrisch bezüglich einer Rotationsachse ist.

**[0012]** Insbesondere ist das Lastverteilerelement so aufgebaut, dass ein Schulter-Biegewinkel, der die Biegung der Schulter bei einer vorgegebenen Prüfkraft beschreibt, zumindest fünf Mal, insbesondere zehn Mal größer ist als der erste Biegewinkel und/oder der zweite Biegewinkel.

**[0013]** Die Armabschnitte sind insbesondere so ausgebildet, dass eine gedachte Biegung des Schulterabschnitts, die zu einer gedachten Schwenkbewegung der Armabschnitte um einen virtuellen Schwenkpunkt zwischen Schulterabschnitt und Armabschnitt führt, durch eine zweite gedachte Biegung kompensiert wird, die die Armabschnitte relativ zum Schulterabschnitt durchführt. In anderen Worten führt die Prüfkraft zu der ersten gedachten Biegung des Schulterabschnitts um den virtuellen Schwenkpunkt. Diese gedachte Biegung führt zu einer Schwenkbewegung der Armabschnitte um den virtuellen Schwenkpunkt. Die Reaktionskraft auf die Prüfkraft, die an den Kraftabgabeflächen angreift, bewirkt eine zweite gedachte Biegung der Armabschnitte relativ zum Schulterabschnitt um den virtuellen Schwenkpunkt.

**[0014]** Das Lastverteilerelement ist so ausgebildet, dass sich die beiden Schwenkbewegungen an den Kraftabgabeflächen kompensieren, so dass die Kraftabgabeflächen beim Aufbringen der Prüfkraft lediglich eine Translationsbewegung relativ zur Kraftaufnahmefläche durchführen, sich der Biegewinkel aber nicht oder zumindest deutlich schwächer ändert als dies der Fall wäre, wenn keine Armabschnitte vorhanden wären.

**[0015]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist das Lastverteilerelement im Querschnitt klammerförmig, insbesondere C-förmig. Diese Struktur führt zu dem oben genannten Effekt der sich kompensierenden Schwenkbewegungen.

**[0016]** Günstig ist es, wenn die Kraftabgabeflächen eben sind. Hierunter wird insbesondere verstanden, dass eine Abweichung zwischen der Kraftabgabefläche und einer Ausgleichsebene durch die jeweilige Kraftabgabefläche im quadratischen Mittel kleiner ist als 50 µm.

**[0017]** Vorzugsweise sind die Biegewinkel kleiner als 2°. Selbstverständlich hängt der Biegewinkel von der Prüfkraft ab. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst das Lastverteilerelement daher einen Kalibrierschein, in dem die maximal zulässige Prüfkraft und der dabei auftretende maximale Biegewinkel beschrieben sind. Der Biegewinkel ist dann für die angegebene Maximalkraft kleiner als 10<sup>-2</sup>°.

**[0018]** Günstig ist es, wenn die Armabschnitte gleiche Querschnitte haben. Das erleichtert die Abschätzung der Messunsicherheit.

**[0019]** Das Lastverteilerelement kann zwei, drei, vier oder mehr Armabschnitte aufweisen. Günstig sind zwei Armabschnitte.

**[0020]** Günstig ist es, wenn der erste Armabschnitt und der zweite Armabschnitt so aufgebaut sind, dass sich die resultierenden Biegewinkel untereinander um maximal 10% unabhängig von der Prüfkraft unterhalb der Maximal-Prüfkraft unterscheiden. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass das Ergebnis möglichst wenig davon abhängt, welcher Armabschnitt mit welchem Kraftmessgerät verbunden ist.

**[0021]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform kann eine neutrale Faser des Lastverteilerelements beschrieben werden als drei Strecken aufweisend, nämlich eine erste Strecke entlang des Schulterabschnitts, die eine erste Länge  $l_1$  hat, eine zweite Strecke, die unter einem Winkel von zumindest 75° zur ersten Strecke verläuft und eine zweite Länge  $l_2$  hat, und eine dritte Strecke, die unter einem Winkel von höchstens 12° zur ersten Strecke verläuft und eine dritte Länge  $l_3$  hat, wobei die dritte Strecke  $l_3$  bis zum geometrischen Mittelpunkt der Kraftabgabefläche verläuft, wobei die Längen  $l_1$ ,  $l_2$  und  $l_3$  so gewählt sind, dass sie die Gleichung

$$l_3 = k \left( -2l_2 + l_1 \pm \sqrt{4l_2^2 - 4l_1l_2 + (3-n)l_1^2} \right)$$

erfüllen. In dieser Gleichung ist  $n$  eine natürliche Zahl und stellt die Zahl der Armabschnitte dar.  $k$  ist ein Parameter, der vorzugsweise möglichst dicht bei 1 liegt. Abweichungen vom Wert  $k = 1$  sind zwar nicht erwünscht, aber tolerabel.

**[0022]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform sind der Schulterabschnitt und die Armabschnitte so ausgebildet, dass sie in hinreichend guter Näherung die gleiche Biegesteifigkeit besitzen. Hierunter wird insbesondere verstanden, dass sich die die Biegesteifigkeiten des Schulterabschnitts und der Armabschnitte um höchstens 10% voneinander unterscheiden.

**[0023]** Erfindungsgemäß ist zudem eine Kraftmessvorrichtung mit (a) einer Kraftaufnahme zum Aufnehmen einer zu messenden Prüfkraft, zumindest zwei Kraftmessgeräte, die zum Messen jeweils einer Teil-Kraft der Prüfkraft angeordnet sind, und einem erfindungsgemäßen Lastverteilerelement, das mit der Kraftaufnahme und den zumindest zwei Kraftmessgeräten zum Übertragen der Prüfkraft auf die Kraftmessgeräte verbunden ist.

**[0024]** Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

**[0025]** Fig. 1 ein erfindungsgemäßes Lastverteilerelement im Querschnitt,

**[0026]** Fig. 2 die neutrale Faser des Druckelements als Schemadarstellung,

**[0027]** Fig. 3a eine Skizze zur Verdeutlichung der mechanischen Effekte an der ersten Strecke der neutralen Faser,

**[0028]** Fig. 3b eine Abstraktion der zweiten und der dritten Strecke der neutralen Faser,

**[0029]** Fig. 3c eine Abstraktion der dritten Strecke der neutralen Faser und

**[0030]** Fig. 3d eine schematische Ansicht der Verformung der neutralen Faser beim Anlegen einer Prüfkraft.

**[0031]** Fig. 4 zeigt einen Querschnitt durch ein rotationssymmetrisches Lastverteilerelement gemäß einer Ausführungsform der Erfindung zur Erläuterung bevorzugter Abmessungen,

**[0032]** Fig. 5 ist eine perspektivische Ansicht eines Querschnitts durch ein erfindungsgemäßes Lastverteilerelement und die

**[0033]** Fig. 6a, Fig. 6b, Fig. 6c zeigen Teil-Querschnitte von Lastverteilerelement gemäß weiterer Ausführungsformen der Erfindung.

**[0034]** Fig. 1 zeigt ein erfindungsgemäßes Lastverteilerelement **10**, das ausgebildet ist zum Übertragen einer Prüfkraft  $F_0$  auf ein erstes Kraftmessgerät **12.1** und ein zweites Kraftmessgerät **12.2**. Das Lastverteilerelement **10** besitzt eine Kraftaufnahme **14**, die im vorliegenden Fall durch eine Kraftaufnahmefläche **16** gebildet ist. Beim Betrieb des Lastverteilerelements **10** wird die Prüfkraft  $F_0$  auf die Kraftaufnahmefläche **16** aufgebracht. Die Kraftaufnahmefläche **16** erstreckt sich entlang einer Ebene  $E_0$ .

**[0035]** Das Kraftverteilerelement **10** umfasst eine erste Kraftabgabefläche **18.1**, die eine erste Teil-Kraft  $F_1$  auf das erste Kraftmessgerät **12.1** überträgt. Das Lastverteilerelement **10** besitzt zudem eine zweite Kraftabgabefläche **18.2** zum Übertragen einer zweiten Teil-Kraft  $F_2$  auf das zweite Kraftmessgerät **12.2**.

**[0036]** Das Lastverteilerelement **10** weist einen Schulterabschnitt **20** auf, an dem die Kraftaufnahmefläche **16** ausgebildet ist. Das Lastverteilerelement **10** besitzt zudem einen ersten Armabschnitt **22.1**, der ein Stück mit dem Schulterabschnitt **20** verbunden ist und an dem die erste Kraftabgabefläche **18** ausgebildet ist. Zudem umfasst das Kraftverteilerelement **10** einen zweiten Armabschnitt **22.2**, der sich ebenfalls an den Schulterabschnitt **20** anschließt und mit diesem einen Stück verbunden ist und an dem die zweite Kraftabgabefläche **18.2** ausgebildet ist. Der erste Armabschnitt **22.1** und der zweite Armabschnitt **22.2** laufen an ihren freien Enden aufeinander zu.

**[0037]** Fig. 2 zeigt zudem eine neutrale Faser **24**. Es ist zu erkennen, dass die neutrale Faser **24** als drei Strecken aufweisend beschrieben werden kann, nämlich aus einer ersten Strecke **26.1**, die entlang des Schulterabschnitts **20** verläuft, einer zweiten Strecke **26.2**, die im vorliegenden Fall rechtwinklig zum ersten Abschnitt **26.1** verläuft, und einer dritten Strecke **26.3**, die im vorliegenden Fall parallel zur ersten Strecke **26.1** verläuft.

**[0038]** Das in **Fig. 1** gezeigte Lastverteilerelement **10** ist spiegelsymmetrisch aufgebaut, was eine bevorzugte Ausführungsform darstellt. Allgemein ist es günstig, wenn das Lastverteilerelement **10** eine Drehsymmetrie um eine Längsachse L aufweist. In anderen Worten führt eine Drehung um einen Symmetriewinkel  $\varphi$  um die Längsachse L dazu, dass das Lastverteilerelement **10** auf sich selbst abgebildet wird.

**[0039]** **Fig. 2** zeigt im linken Teilbild die neutrale Faser **24** und die beiden Teil-Kräfte  $F_1$  und  $F_2$ , für die  $F_1 + F_2 = F_0$  gilt.

**[0040]** Das mittlere Teilbild von **Fig. 2** zeigt die Strecken **26.1**, **26.2** und **26.3**, die für die folgende Berechnung maßgeblich sind. Aufgrund der Symmetrie des Lastverteilerelements **10** gilt die folgende Berechnung auch für alle anderen Armabschnitte.

**[0041]** Im rechten Teilbild sind Koordinaten  $x_1$ ,  $x_2$  und  $x_3$  gezeigt, die in der folgenden Berechnung verwendet werden. Gezeigt sind zudem die Längen  $l_i$  der Strecken **26.i**, die als relative Strecken angegeben sind, d. h., dass  $l_i = 1$  das Ende der Strecke bedeutet. Die Länge  $l_0$  ist eine Normierungslänge und beträgt im vorliegenden Fall  $l_0 = 1$  m.

**[0042]** Im Folgenden wird berechnet, wie die einzelnen Streckenlängen ausgebildet sein müssen.

**[0043]** Zunächst wird das reale Lastverteilerelement abstrahiert. Es wird am Mittenschnitt gerechnet (vgl. **Fig. 1**). Dieser Schnitt wird als Balkensystem idealisiert angenommen, damit die Beschreibung nach der Theorie des schubstarren, linear elastischen Biegebalkens nach Bernoulli angewendet werden kann.

**[0044]** Innerhalb dieses Balkensystems wird die neutrale Faser **24** des Biegeverlaufs, also die Biegelinie, die frei von Dehnungen ist, skizziert. Als Konsequenz kann am Modell dehnstarr gerechnet werden, was wiederum eine bedeutende Vereinfachung der Rechnung mit sich bringt. Die neutrale Faser **24** liegt immer in der Mitte des Querschnitts, sofern dieser symmetrisch zu den Biegeachsen ist, was hier, zur einfacheren Darstellung des Prinzips der Lösung, angenommen wird.

**[0045]** Letztlich wird die Symmetrie des Bauteils ausgenutzt und es entsteht ein einfaches, einseitig fest eingespanntes Kragbalkenmodell. Durch diese Vereinbarungen liegt keine Beschränkung der Allgemeinheit vor.

**[0046]** Grundsätzlich wird am freien Ende des Modells, an der Stelle, an der in **Fig. 2**, linkes Teilbild Kraft  $F_1$  angreift, ein elastisches Rückstellmoment wirken, das aus der Biegung des unteren Bereichs des Modells resultiert, welches in der Realität die Gestalt einer Scheibe mit einem zentrischen Loch aufweist. Dieses Rückstellmoment wirkt im Sinne der angestrebten Lösung. Wird es vernachlässigt, bedeutet das, die gefundene Lösung ist unterkritisch. In anderen Worten, gelingt die Lösung ohne dieses Moment, dann gelingt sie per se auch mit. Letzteres ist aber rechnerisch bedeutend aufwändiger.

**[0047]** Für den Bereich (1) (siehe **Fig. 2**, rechtes Teilbild) ergibt sich nach **Fig. 3a** der folgende Zusammenhang für den Verlauf des Biegemomentes (da die Annahme eines dehnstarreren Systems gilt, werden die Normalkraftverläufe nicht betrachtet, die Querkräfte tragen zur weiteren Rechnung nicht bei)

$$M(x_1) = F_0 \cdot x_1 + M_0 \quad (1)$$

**[0048]** Analog dazu ergeben sich für die Verläufe in den Bereichen (2) und (3) (siehe **Fig. 2**, rechtes Teilbild) die Zusammenhänge

$$M(x_2) = F_1 \cdot l_3 \quad (2)$$

bzw.

$$M(x_3) = F_1 \cdot (l_3 - x_3) \quad (3)$$

**[0049]** Gemäß der Theorie des schubstarren Bernoullischen Biegebalkens gilt, dass die Funktion des Biege winkels dem unbestimmten Integral der Momentenlinie entspricht. Die bei der Anwendung dieser Integrationsmethode entstehenden, unbekanntenen Konstanten in den Verläufen der Biegung sind durch kinematische Rand- und Übergangsbedingungen determiniert. Das ist in den **Fig. 3b** und **Fig. 3c** dargestellt.

**[0050]** Beim Übergang einer dynamischen Größe wie dem Biegemoment zu einer geometrischen Größe wie dem Biegewinkel ist als konstanter Term vor dem Integral der Kehrwert der Biegesteifigkeit zu berücksichtigen, welcher sich aus dem Produkt des Elastizitätsmoduls und des Flächenträgheitsmomentes bezüglich der betrachteten Biegeachse ergibt. Die betrachtete Biegeachse steht senkrecht zur Zeichenebene und schneidet den Flächenschwerpunkt des Schnittufers. Zur Vereinfachung der Rechnung soll gelten, dass alle Querschnitte von gleicher Gestalt und Dimension und bezüglich der Biegeachse symmetrisch sind. Unter Berücksichtigung dieser Vereinbarungen ergeben sich die Biegewinkellinien zu

$$\begin{aligned}\varphi_1(x_1) &= -\frac{1}{EI} \int F_0 \cdot x_1 + M_0 dx_1 \\ \varphi_1(x_1) &= -\frac{1}{EI} \left( \frac{1}{2} F_0 x_1^2 + M_0 \cdot x_1 + C_1 \right)\end{aligned}\quad (4)$$

für den ersten Bereich, sowie für den zweiten Bereich zu

$$\begin{aligned}\varphi_2(x_2) &= -\frac{1}{EI} \int F_i \cdot l_3 dx_2 \\ \varphi_2(x_2) &= -\frac{1}{EI} (F_i \cdot l_3 \cdot x_2 + C_2)\end{aligned}\quad (5)$$

und analog für den dritten Bereich zu

$$\begin{aligned}\varphi_3(x_3) &= -\frac{1}{EI} \int F_i \cdot (l_3 - x_3) dx_3 \\ \varphi_3(x_3) &= -\frac{1}{EI} \left[ F_i \cdot (l_3 x_3 - \frac{1}{2} x_3^2) + C_3 \right]\end{aligned}\quad (6)$$

**[0051]** Aus der linearen Elastizitätstheorie resultiert die Bedingung, dass die Verformungen stetig sind. Das bedeutet, dass keine Knicke auftreten, so dass ein Biegewinkel  $\varphi_1(x_1)$  dann gegen einen zweiten Biegewinkel  $\varphi_2(x_2)$  geht, wenn die Orte  $x_1$  und  $x_2$  zueinander streben, also  $\varphi_1(x_1) = \varphi_2(x_2)|_{x_2 - x_1 = 0}$ . Für die Biegewinkel gelten damit die folgend aufgeführten Randbedingungen.

$$\begin{aligned}\varphi_1(x_1 = 0) &= 0 \\ \varphi_1(x_1 = l_1) &= \varphi_2(x_2 = 0) \\ \varphi_2(x_2 = l_2) &= \varphi_3(x_3 = 0)\end{aligned}\quad (7)$$

**[0052]** Werden die Bedingungen aus Gl. (7) auf die Gln. (4) bis (6) angewendet, resultiert für die Integrationskonstanten  $C_{i|i} = \{1, 2, 3\}$

$$\begin{aligned}C_1 &= 0 \\ C_2 &= \frac{1}{2} F_0 l_1^2 - M_0 l_1 \\ C_3 &= \frac{1}{2} F_0 l_1^2 + F_i l_2 l_3 - M_0 l_1\end{aligned}\quad (8)$$

**[0053]** Ferner wird für die Lasten  $F_i$  und  $M_0$  vereinbart

$$\begin{aligned}F_i &= \frac{1}{n} F_0 \\ M_0 &= \frac{1}{n} F_0 (l_1 - l_3)\end{aligned}\quad (9)$$

**[0054]** Die Bedingung für die Kraft  $F_i$  resultiert aus der Anzahl  $n$  der Kraftaufnehmer im Build-Up System, das Moment  $M_0$  ergibt sich aus der Geometrie (siehe **Fig. 3d**). Mit Kenntnis der Integrationskonstanten lassen sich die Biegewinkel schreiben als

$$\begin{aligned}\varphi_1(x_1) &= -\frac{1}{EI} \left[ -\frac{1}{n} F_0 (l_1 - l_3) x_1 + \frac{1}{2} F_0 \cdot x_1^2 \right] \\ \varphi_2(x_2) &= -\frac{1}{EI} \left[ \frac{1}{n} F_0 l_3 x_2 + \frac{1}{2} F_0 l_1^2 - \frac{1}{n} F_0 (l_1^2 - l_1 l_3) \right] \\ \varphi_3(x_3) &= -\frac{1}{EI} \left[ \frac{1}{n} F_0 (l_3 x_3 - \frac{1}{2} x_3^2) + \frac{1}{n} F_0 l_2 l_3 + \frac{1}{2} F_0 l_1^2 - \frac{1}{n} F_0 (l_1^2 - l_1 l_3) \right]\end{aligned}\quad (10)$$

**[0055]** **Fig. 3d** stellt die Kinematik des Rechenmodells dar. Es lässt sich ablesen, dass

$$\varphi_1(x_1) - [\varphi_2(x_2) + \varphi_3(x_3)] = 0 \text{ mit } x_i = l_i \quad (11)$$

**[0056]** Diese Bedingung ist gleichbedeutend mit

$$\Phi_1(x_1) - [\Phi_2(x_2) + \Phi_3(x_3)] = 0 \text{ mit } x_i = l_i \quad (12)$$

wobei gilt, dass

$$\Phi_i = \frac{EI}{F_0} \cdot \varphi_i(l_i) \quad (13)$$

[0057] Hieraus ergibt sich eine Funktion dreier Veränderlicher, nämlich der Geometrieparameter  $l_i$ , zu

$$\frac{1}{n} l_1 l_3 + \frac{2}{n} l_2 l_3 + \frac{n-2}{2n} l_1^2 + \frac{1}{2n} l_3^2 = 0 \quad (14)$$

[0058] Wird für die Länge des Bereichs (1)  $l_1 = 1$  gewählt und  $n = 1$  angenommen, folgt die Beziehung zwischen  $l_2$  und  $l_3$  zu

$$l_3 = -2l_2 + 1 \pm \sqrt{4l_2^2 - 4l_2 + \frac{3}{2}} \quad (15)$$

[0059] Für alle  $l_2 > 1$  gilt  $l_2^2 > l_2$ , damit existiert eine reale Lösung für  $l_3$ .

[0060] Fig. 3d zeigt, dass die Prüfkraft  $F_0$  zu einer ersten gedachten Schwenkbewegung des ersten Armabschnitts **22.1** um einen virtuellen Schwenkpunkt S führt, der dazu führen würde, dass die dritte Strecke **26.3** im vorliegenden Fall gegen den Uhrzeigersinn schwenkt. Es entsteht am Ende der ersten Strecke **26.1** ein Schulter-Biegewinkel  $\varphi_1$ .

[0061] Zudem führt die Reaktionskraft in Form der ersten Teil-Kraft  $F_1$  zu einer gedachten zweiten Biegung der dritten Strecke **26.3** relativ zum Schulterabschnitt **20** und damit zur ersten Strecke **26.1**. Diese zweite Biegung lässt sich durch die Biegewinkel  $\varphi_2$  der zweiten Strecke **26.2** relativ zur ersten Strecke **26.1** und durch einen Biegewinkel  $\varphi_3$  für die Biegung der dritten Strecke **26.3** relativ zur zweiten Strecke **26.2** beschreiben.

[0062] Es resultiert ein erster Biegewinkel  $\alpha_1$  zwischen einer Ebene  $E_{18.1}$  der ersten Kraftabgabefläche **18.1** und der Ebene  $E_0$ , in der die Kraftaufnahmefläche **16** verläuft. Werden die Längen  $l_i$  gemäß Formel 14 gewählt, so gilt  $\alpha_1 = 0$ . Selbstverständlich gilt dieses Ergebnis nur so lange wie die Annahmen erfüllt sind, die dem mathematischen Modell zu Grunde liegen. Für ein reales Lastverteilerelement **10** können entweder eine FEM-Simulation durchgeführt werden oder alternativ wird der Abschnitt **26.3** verlängert gebaut und dann eine Prüfkraft aufgebracht. Es wird dann der Bereich des Armabschnitts als Lastaufnahmefläche **16.1** verwendet, der bei einer vorgegebenen, von null verschiedener Prüfkraft den absolut kleinsten Biegewinkel aufweist.

[0063] Das Lastverteilerelement **10** sowie die Kraftmessgeräte **12.1** und **12.2** sind Teil einer erfindungsgemäßen Kraftmessvorrichtung **28**, mit der Kräfte oberhalb von 10 kN bis zu 10 MN gemessen werden können.

[0064] Günstig ist es, wenn das Lastverteilerelement **10** aus Stahl mit einer Zugfestigkeit von zumindest  $R_m = 800$  Newton pro Quadratmillimeter gebaut ist. Beispielsweise können die Stähle 51CrV4, 34CrNiMo6 oder 42CrMo4 verwendet werden. Eine Dicke  $d$  der Armabschnitte **22.1**, **22.2** beträgt vorzugsweise zumindest 10 Millimeter.

[0065] Fig. 5a zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Lastverteilerelements, das rotationssymmetrisch ausgebildet ist. Die Armabschnitte **22.1**, **22.2** sind gedachte Abschnitte der Seitenwandung des Lastverteilerelements **10**, die die Last von der Kraftaufnahmefläche **16** zu den jeweiligen Kraftabgabeflächen **18.1**, **18.2** leiten.

[0066] Fig. 4 zeigt einen Querschnitt durch das Lastverteilerelement gemäß Fig. 5. Es ist günstig, wenn der Radius  $r_{2i}$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) sind so dimensioniert ist, dass die Kerbspannungen höchstens 70% der Streckgrenze  $R_{p0.2}$  betragen. Günstig ist es zudem, wenn die Länge  $l_{32}$  zumindest so groß ist wie ein Lastknopf des verwendeten Kraftmessgerätes **12** vgl. Fig. 5. Die Länge  $l_{34}$ , die den Abstand zwischen der Längsachse  $L$  und dem radial äußersten Punkt der Unterseite des Lastverteilerelements **10** bezeichnet, der sich entlang einer Ebene erstreckt, ist so klein zu wählen, dass der Lastknopf die Kraftabgabefläche **18** nicht überragt. Das Lastverteilerelement **10** ist so gestaltet, dass im gesamten Lastverteilerelement mit Ausnahme der Kraftaufnahmefläche **16** und der Kraftabgabeflächen **18** eine relative Vergleichsdehnung nach von Mises höchstens 1000 Mikrometer pro Meter beträgt. Vorzugsweise ist das Lastverteilerelement aus einem Werkstoff aufgebaut, dessen Streckgrenze  $R_{p0.2}$  zumindest 500 MPa beträgt. Beispielsweise ist das Lastverteilerelement **10** aus Vergütungsstahl aufgebaut. Vorzugsweise sind die Kraftabgabeflächen und/oder die Kraftaufnahmefläche so ausgestaltet, dass eine hertzsche Pressung 1500 MPa nicht überschreitet.

**[0067]** Fig. 6a zeigt eine alternative Ausführungsform eines Lastverteilungselements **10**, bei dem der Schulterabschnitt an einem ersten plattenförmigen Bauteil **30** ausgebildet ist. Die Armabschnitte, von denen nur der Armabschnitt **22.2** zu sehen ist, sind an einem zweiten plattenförmigen Bauteil **32** ausgebildet. Die beiden plattenförmigen Bauteile **30**, **32** sind miteinander verbunden, beispielsweise stofflüssig und/oder kraftschlüssig. Beispielsweise sind die beiden Bauteile **30**, **32** stoffschlüssig durch eine Schweißnaht miteinander verbunden. Alternativ oder zusätzlich sind die Bauteile **30**, **32** kraftschlüssig durch Verschrauben miteinander verbunden. In Fig. 6a ist lediglich die Hälfte des Querschnitts von der Längsachse L bis zum radial äußeren Rand gezeigt. Es ist zu erkennen, dass das erste plattenförmige Bauteil **32** einen Vorsprung **34** besitzt. Es ist möglich, nicht aber notwendig, dass auch das zweite plattenförmige Bauteil **32** einen Vorsprung **36** aufweist.

**[0068]** Das erste plattenförmige Bauteil **30** ist als kreisrunde Platte mit einer Kante, die durch einen Vorsprung **34** gebildet ist, ausgebildet. Das zweite plattenförmige Bauteil **32** ist durch eine gelochte, kreisrunde Platte mit dem optionalen Vorsprung **36** gebildet.

**[0069]** Fig. 6b zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Lastverteileres **10**, bei dem das erste plattenförmige Bauteil **30** mit dem zweiten plattenförmigen Bauteil **32** formschlüssig verbunden ist.

**[0070]** Fig. 6c zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Lastverteileres **10**, bei dem der Schulterabschnitt **20** am ersten plattenförmigen Bauteil **30** und einem dritten, ringförmigen Bauteil, ausgebildet ist. Es sei darauf hingewiesen, dass es möglich ist, dass das ringförmige Bauteil **38** auch nicht ringförmig ist, solange sichergestellt ist, dass die Kraftübertragung die gleiche ist wie sie bei einem U-förmigen Bauteil wäre. Die Bauteile **30**, **38** sind miteinander verbunden, beispielsweise kraftschlüssig, formschlüssig oder stoffschlüssig. Die Ausführungsformen gemäß der Fig. 6a, Fig. 6b und Fig. 6c haben den Vorteil, vergleichsweise leicht hergestellt werden zu können.

#### Bezugszeichenliste

<b>10</b>	Lastverteileres
<b>12</b>	Kraftmessgerät
<b>14</b>	Kraftaufnahme
<b>16</b>	Kraftaufnahme­fläche
<b>18</b>	Kraftabgabefläche
<b>20</b>	Schulterabschnitt
<b>22.1</b>	erster Armabschnitt
<b>22.2</b>	zweiter Armabschnitt
<b>24</b>	neutrale Faser
<b>26</b>	Strecke
<b>28</b>	Kraftmessvorrichtung
<b>30</b>	erstes plattenförmiges Bauteil
<b>32</b>	zweites plattenförmiges Bauteil
<b>34</b>	Vorsprung
<b>36</b>	Vorsprung
<b>38</b>	ringförmiges Bauteil
<b>d</b>	Dicke
<b>E</b>	Ebene
<b>F<sub>0</sub></b>	Prüfkraft
<b>F<sub>1</sub></b>	erste Teil-Kraft
<b>F<sub>2</sub></b>	zweite Teil-Kraft
<b>L</b>	Längsachse
<b>l</b>	Länge
<b>S</b>	Schwenk­punkt
<b>α<sub>1</sub></b>	erster Biege­winkel
<b>φ<sub>1</sub></b>	Schulter-Biege­winkel
<b>φ<sub>2</sub></b>	Biege­winkel

#### Patentansprüche

1. Lastverteileres (**10**), das ausgebildet ist zum Übertragen einer Prüfkraft ( $F_0$ ) auf zumindest zwei Kraftmessgeräte (**12.1**, **12.2**), mit



(a) einer Kraftaufnahme­fläche (16) zum Aufnehmen der Prüfkraft ( $F_0$ ),  
 (b) einer ersten Kraftabgabefläche (18.1) zum Übertragen eines Teils der Prüfkraft ( $F_0$ ) auf ein erstes Kraftmessgerät (12.1) und  
 (c) zumindest einer zweiten Kraftabgabefläche (18.2) zum Übertragen eines Teils der Prüfkraft ( $F_0$ ) auf ein zweites Kraftmessgerät (12.2),  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
 (d) das Lastverteilerelement (10)  
 – einen Schulterabschnitt (20), der sich von der Kraftaufnahme­fläche (16) weg erstreckt,  
 – einen ersten Armabschnitt (22.1), der sich an den Schulterabschnitt (20) anschließt und an dem die erste Kraftabgabefläche (18.1) ausgebildet ist, und  
 – zumindest einen zweiten Armabschnitt (22.2), der sich an den Schulterabschnitt (20) anschließt und an dem die zweite Kraftabgabefläche (18.2) ausgebildet ist, aufweist, und dass  
 (e) der erste Armabschnitt (22.1) und der zweite Armabschnitt (22.2) zumindest abschnittsweise aufeinander zu verlaufen,  
 sodass ein erster Biege­winkel ( $\alpha_1$ ) zwischen der Kraftaufnahme­fläche (16) und der ersten Kraftabgabefläche (18.1) und ein zweiter Biege­winkel ( $\alpha_2$ ) zwischen der Kraftaufnahme­fläche (16) und der zweiten Kraftabgabefläche (18.2) in erster Näherung nicht von der Prüfkraft ( $F_0$ ) abhängen.

2. Lastverteilerelement (10) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Lastverteilerelement (10) im Querschnitt klammerförmig ausgebildet ist.

3. Lastverteilerelement (10) nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Lastverteilerelement (10) im Querschnitt C-förmig ist.

4. Lastverteilerelement (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kraftabgabeflächen (18.1, 18.2) eben sind.

5. Lastverteilerelement (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Biege­winkel ( $\alpha_1, \alpha_2$ ) bei einer Prüfkraft von 100 kN kleiner als  $10^{-2^\circ}$  sind.

6. Lastverteilerelement (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Armabschnitt (22.1) und der zweite Armabschnitt (22.2) den gleichen Querschnitt haben.

7. Lastverteilerelement nach einem der vorstehenden Ansprüche, dass das Lastverteilerelement (10) einen dritten Armabschnitt aufweist, der sich an den Schulterabschnitt (20) anschließt und an dem eine dritte Kraftabgabefläche ausgebildet ist zum Übertragen eines Teils der Prüfkraft ( $F_0$ ) auf ein drittes Kraftmessgerät.

8. Lastverteilerelement (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass

(a) eine neutrale Faser (24) des Lastverteilerelements (10) beschrieben werden kann als drei Strecken aufweisend, wobei

- eine erste Strecke (26.1) entlang des Schulterabschnitts (20) verläuft und eine erste Länge  $l_1$  hat,
- eine zweite Strecke (26.2) unter einem Winkel von zumindest  $75^\circ$  zur ersten Strecke (26.1) verläuft eine zweite Länge  $l_2$  hat und
- eine dritte Strecke (26.3) unter einem Winkel von höchstens  $15^\circ$  zur ersten Strecke (26.1) verläuft und eine dritte Länge  $l_3$  hat, und dass

(b) die Längen  $l_1, l_2$  und  $l_3$  in Meter gemessen so gewählt sind, dass sie die Gleichung

$$l_3 = k \left( -2l_2 + l_1 \pm \sqrt{4l_2^2 - 4l_1l_2 + (3 - n)l_1^2} \right)$$

erfüllen, wobei  $n \in \mathbb{N}$  die Zahl der Armabschnitte ist und  $k \in [0,9, \dots, 1,1]$  gilt.

9. Lastverteilerelement (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- der Schulterabschnitt (20) an einem ersten plattenförmigen Bauteil (30) ausgebildet ist und/oder
- die Armabschnitte (22.1, 22.2) an einem zweiten plattenförmigen Bauteil (32) ausgebildet sind, das mit dem ersten plattenförmigen Bauteil (30) verbunden ist.

10. Kraftmessvorrichtung (28) mit

- (a) einer Kraftaufnahme (**14**) zum Aufnehmen einer zu messenden Prüfkraft ( $F_0$ ),
- (b) zumindest zwei Kraftmessgeräten (**12.1**, **12.2**), die zum Messen jeweils einer Teil-Kraft ( $F_2$ ) der Prüfkraft ( $F_0$ ) angeordnet sind, und
- (c) einem Lastverteilerelement (**10**) nach einem der vorstehenden Ansprüche, das mit der Kraftaufnahme (**14**) und den zumindest zwei Kraftmessgeräten (**12.1**, **12.2**) zum Übertragen der Prüfkraft ( $F_0$ ) auf die Kraftmessgeräte (**12.1**, **12.2**) verbunden ist.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

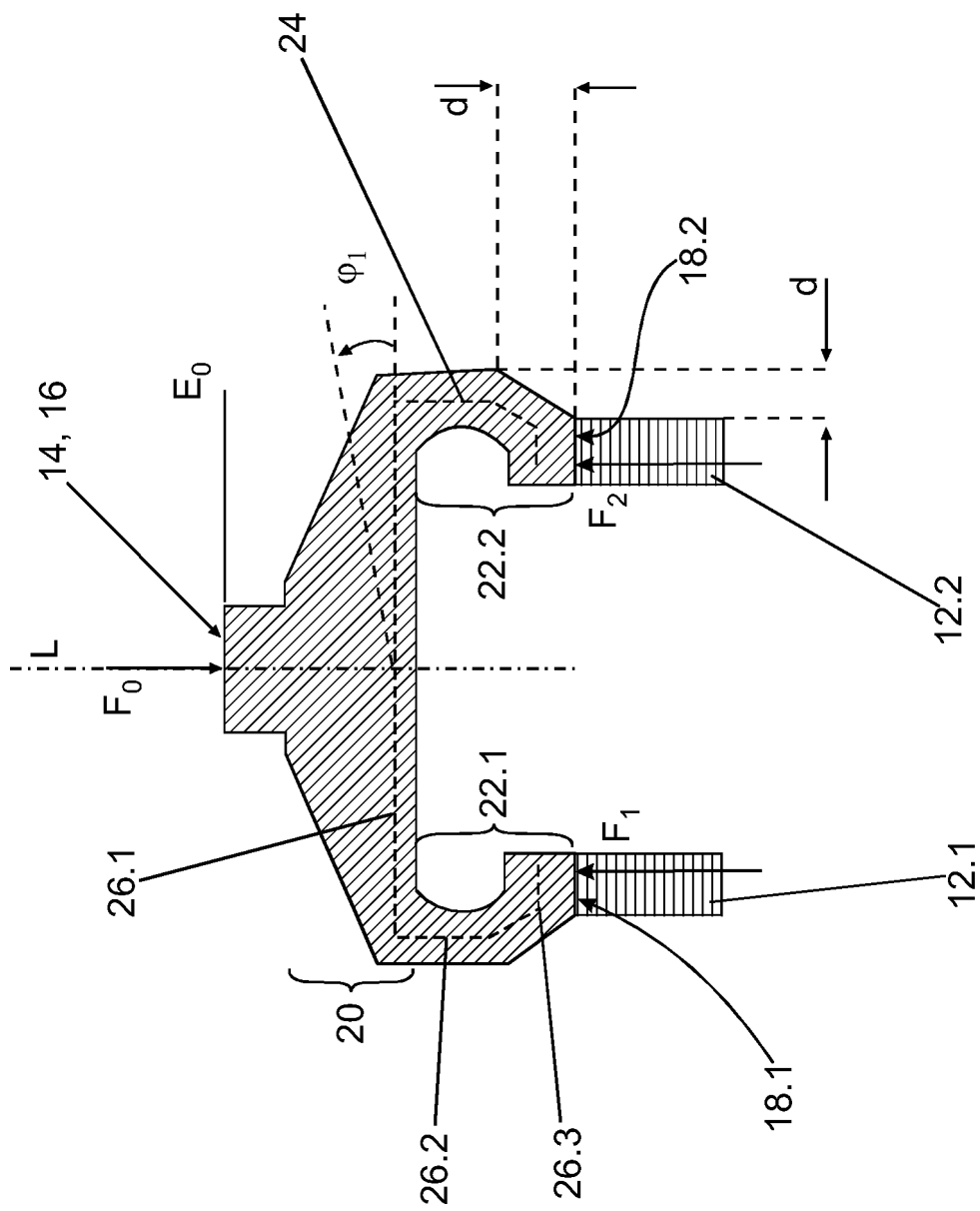


Fig. 1

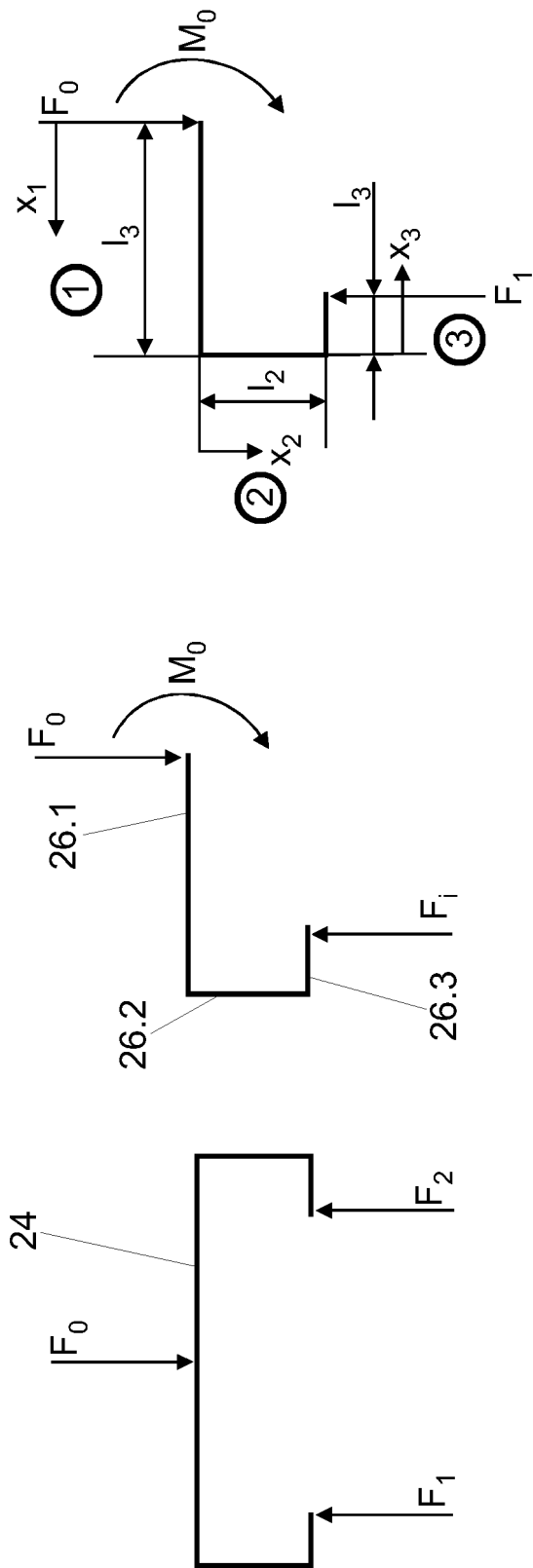


Fig. 2

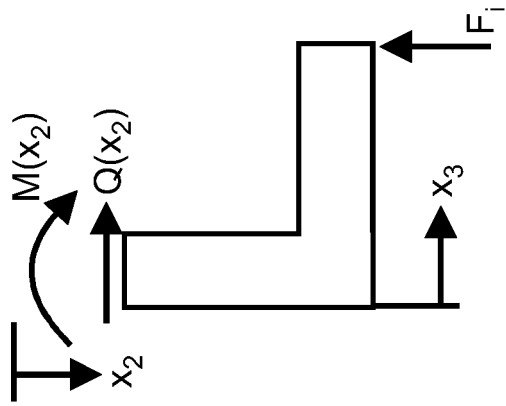


Fig. 3a

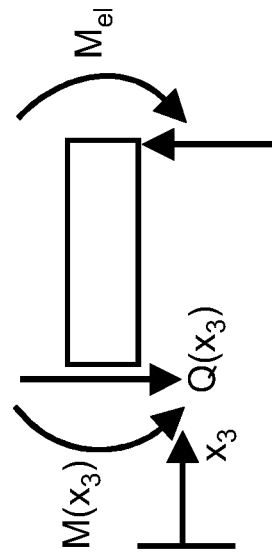


Fig. 3b

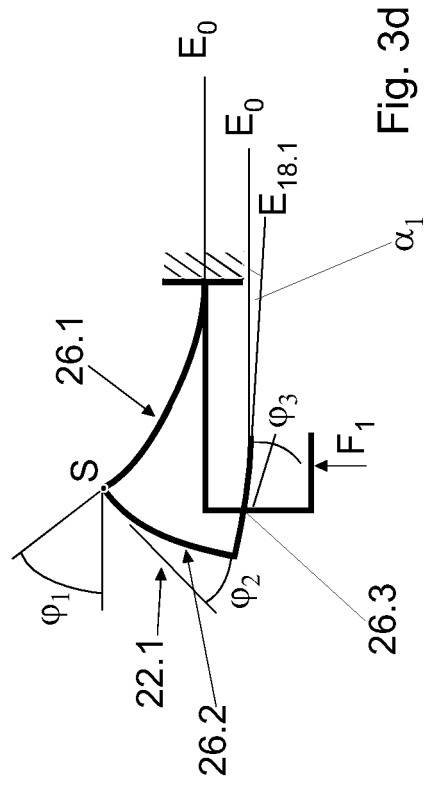


Fig. 3c

Fig. 3d

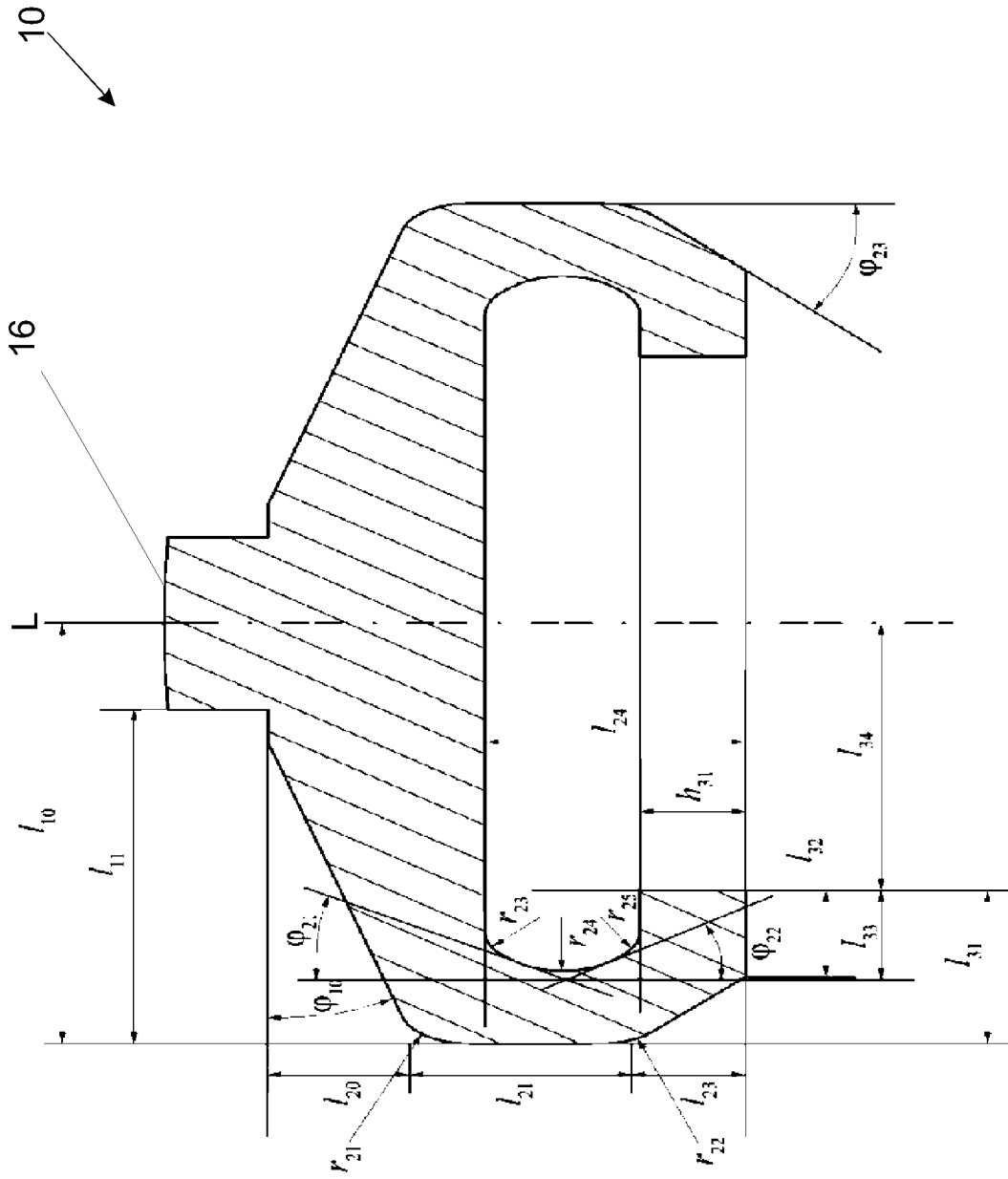


Fig. 4

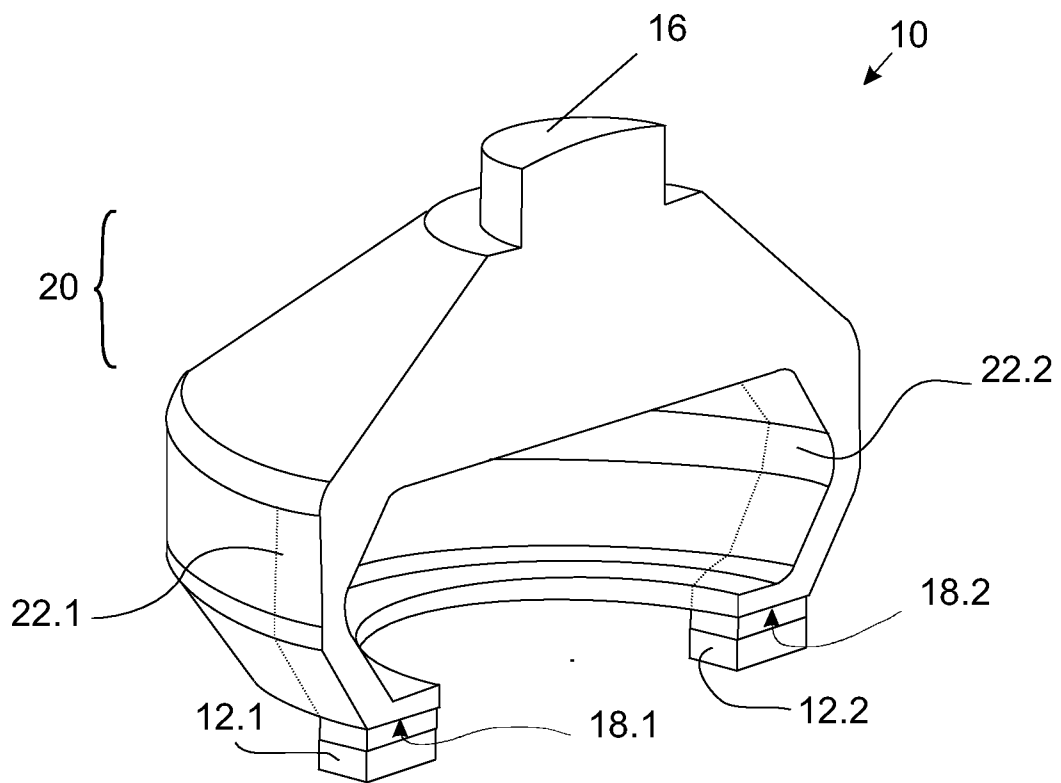


Fig. 5

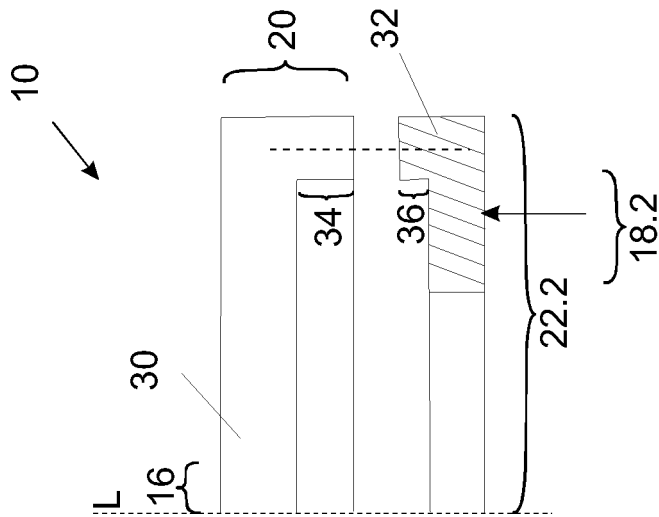


Fig. 6a

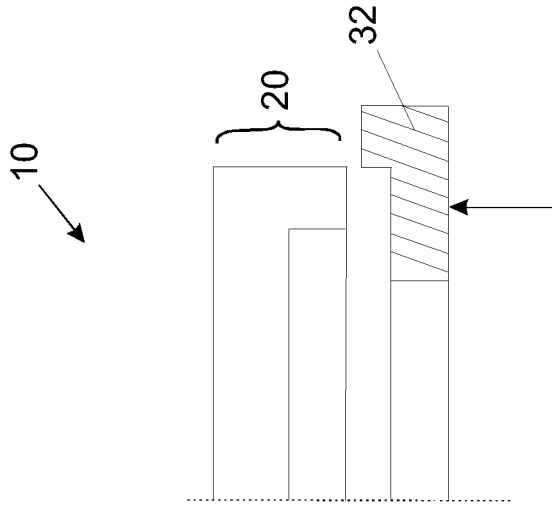


Fig. 6b

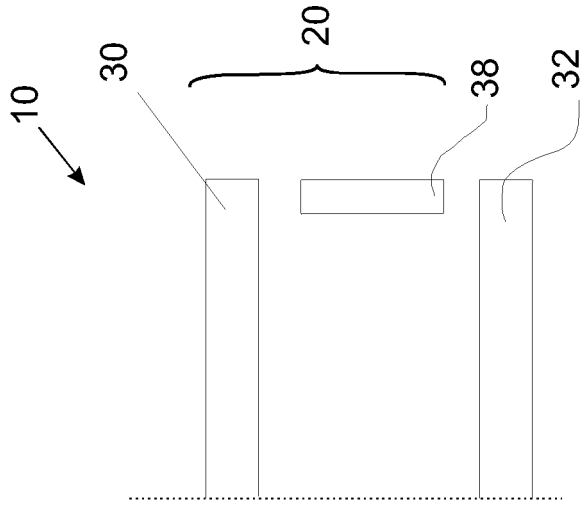


Fig. 6c