(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
29. März 2018 (29.03.2018)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2018/054540 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G01L 27/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/001137

(22) Internationales Anmeldedatum:
25. September 2017 (25.09.2017)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2016 118 048.3
23. September 2016 (23.09.2016) DE

(71) Anmelder: **SPEKTRA SCHWINGUNGSTECHNIK UND AKUSTIK GMBH DRESDEN** [DE/DE]; Heidelberger Str. 12, 01189 Dresden (DE).

(72) Erfinder: **PLATTE, Thomas**; Wittenberger Str. 39, 01309 Dresden (DE). **BRUCKE, Martin**; Jacobistraße 13, 01309 Dresden (DE). **IWANCZIK, Martin**; Gustav-Adolf-Strasse 5, 01219 Dresden (DE).

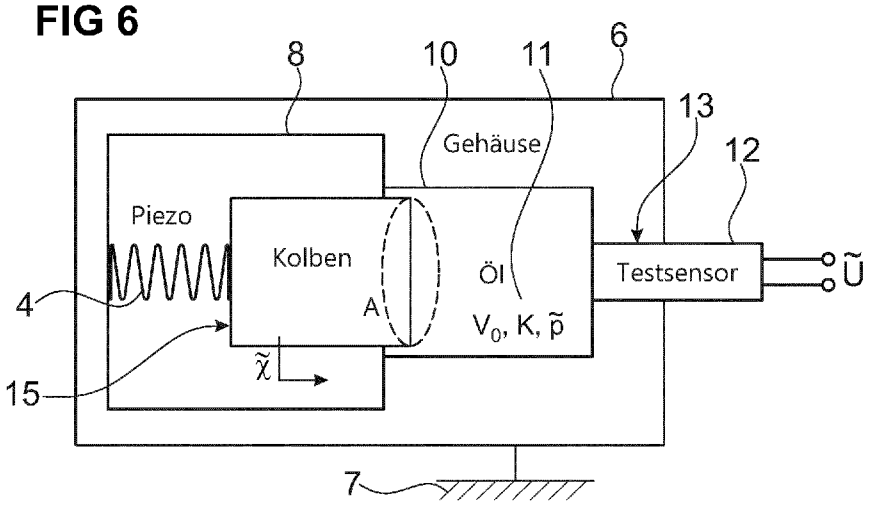
(74) Anwalt: **ADLER, Peter**; Lippert Stachow Patentanwälte Rechtsanwälte Partnerschaft mbB, Krenkelstrasse 3, 01309 Dresden (DE).

(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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, 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,

(54) **Title:** DEVICE AND METHOD FOR DYNAMICALLY CALIBRATING PRESSURE SENSORS

(54) **Bezeichnung:** VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUR DYNAMISCHEN KALIBRIERUNG VON DRUCKSENSOREN

FIG 6



Kolben = Piston
Gehäuse = Housing
Testsensor = Test sensor

(57) **Abstract:** The invention relates to a device and to a method for dynamically calibrating pressure sensors. Pressure acting upon the pressure sensor is compared to a corresponding desired parameter by means of a device according to the pistonphone principle, from which a calibration value *c* is determined. The aim of the invention is to provide a method and solution which enables a primary calibration of the dynamic ratio of a pressure sensor to be carried out. This is achieved by the fact that the device is only statically determined by respectively a housing to actuator connection and actuator to piston connection, and the piston is sealed in the cylinder with respect to the ambient atmosphere by a seal and is moveably arranged in the seal, and the change in pressure corresponding to the actual value is calculated.

(57) **Zusammenfassung:** Der Erfindung die eine Vorrichtung und ein Verfahren zur dynamischen Kalibrierung von Drucksensoren betrifft, wobei mittels einer Vorrichtung nach dem Pistonphon-Prinzip ein den auf einen Drucksensor einwirkender Druck und mit einem entsprechenden Sollparameter verglichen wird, woraus ein Kalibrierwert *c* ermittelt wird, liegt die Aufgabe zugrunde, eine Ver-

WO 2018/054540 A1

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

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).

Veröffentlicht:

— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

— *vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)*

fahrens- und vorrichtungsseitige Lösung anzugeben, welche eine Primärkalibrierung des dynamischen Verhaltens eines Drucksensors ermöglicht. Dies wird dadurch gelöst, dass die nur durch je eine Verbindung Gehäuse-Aktor und Aktor-Kolben statisch bestimmt ist und der Kolben in dem Zylinder gegenüber der Umgebungsatmosphäre durch eine Dichtung abgedichtet und in der Dichtung beweglich angeordnet ist und die dem Istwert entsprechende Druckänderung errechnet wird.

Vorrichtung und Verfahren zur dynamischen Kalibrierung von Drucksensoren

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur dynamischen Kalibrierung von Drucksensoren mit einem Gehäuse, einem mit dem Gehäuse verbundenen Zylinder zur Aufnahme eines Fluids, der mit einem ersten Drucksensor verbindbar ist, einem Aktor und einem mit dem Zylinder zusammenwirkenden Kolben. Dabei ist der Aktor zwischen Gehäuse und einer vom Zylinder abgewandten Seite des Kolbens angeordnet.

Der eingesetzte Aktor wandelt dabei ein Eingangssignal in eine mechanische Bewegung um. Beispielweise kann es sich dabei um einen piezoelektrischen Aktor handeln, der sich bei Anlegen einer Spannung mechanisch verformt. Diese mechanische Verformung kann dann als mechanische Bewegung auf den Kolben übertragen werden.

Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zur dynamischen Kalibrierung von Drucksensoren, bei dem ein den auf einen Drucksensor einwirkenden Druck repräsentierender Istparameter gemessen und mit einem entsprechenden Sollparameter verglichen wird. Aus dem Vergleich wird ein Kalibrierwert c für den Istparameter ermittelt, wobei der Druck mittels eines mit einem Zylinder, der mit einem Fluid gefüllt ist, zusammenwirkenden Kolbens erzeugt wird.

Ein Drucksensor der hier infrage kommenden Art dient der Ermittlung eines Druckes eines Fluids. Er kann beispielsweise eingesetzt werden, um den Öldruck oder den Bremsflüssigkeitsdruck in Kraftfahrzeugen zu ermitteln. Dabei wird bei dem Drucksensor an seinem Ausgang eine dem Druck entsprechende physikalische Ausgangsgröße, beispielsweise ein dem Druck entsprechender Wert einer elektrischen Spannung erzeugt.

Herstellungsbedingt kann das Verhältnis von Druck zu Ausgangsgröße von Drucksensor zu Drucksensor verschieden sein. Das betrifft sowohl statische Verhältnisschwankungen, das unterschiedliche Verhalten bei verschiedenen statischen Drücken, als auch Unterschiede im dynamischen Verhalten, d.h. Unterschiede zwischen verschiedenen Drucksensoren hinsichtlich ihres Frequenzganges bei dynamisch ändernden Drücken.

Um zu einer richtigen Beurteilung der Ausgangsgröße zu gelangen, bedarf es daher einer Kalibrierung des Drucksensors sowohl hinsichtlich seines statischen als auch seines dynamischen Verhaltens. Die nachfolgend beschriebene Erfindung betrifft eine Kalibrierung des dynamischen Verhaltens von Drucksensoren.

Unter Kalibrierung wird ein Verfahren verstanden, bei dem in einem ersten Schritt die Abweichung eines Sensors von einem Normal ermittelt wird, um in einem zweiten Schritt die ermittelte Abweichung bei der anschließenden Benutzung des Sensors zur Korrektur der von ihm ermittelten Werte zu verwenden.

Bekannt ist eine dynamische Kalibrierung von Schwingungssensoren, u.a. durch das Dienstleistungsangebot der Anmelderin. Dabei wird ein zu kalibrierender Schwingungssensor mit schmal- oder breitbandigen Signalen angeregt. Bei der schmalbandigen Anregung werden die Schwingungssensoren mit einem möglichst ungestörten sinusförmigen Signal angeregt. Bei der breitbandigen Anregung werden die Schwingungssensoren in der Regel mit Stößen angeregt.

Bei der Anregung mit sinusförmigen Signalen kann die Antwort, beispielsweise der Spannungsausgang U des Schwingungssensors gemessen werden. Dieser wird mit der bekannten Anregung, d.h. der Beschleunigung a, ins Verhältnis gesetzt und man erhält die Empfindlichkeit des Sensors

$$S = \frac{U}{a} = \left[\frac{V}{m/s^2}\right]$$

Auf Grund des Konstruktionsprinzips des Schwingungssensors ist diese ist jedoch abhängig von der Frequenz. Wird die Frequenz der Anregung variiert, kann der Frequenzgang des Schwingungssensors aufgenommen werden, wie er in Fig. 1 dargestellt ist. Der Frequenzgang hilft zu bewerten, bis zu welcher Frequenz der Schwingungssensor in einer realen Messanwendung verwendet werden kann und ab welcher Frequenz mit Abweichungen der gemessenen Werte zu rechnen ist.

In der Metrologie unterscheidet man zwischen zwei Arten der Kalibrierung, der Sekundär- und Primärkalibrierung.

Die bekannte Ermittlung des Frequenzganges eines Schwingungssensors erfolgt durch eine Primärkalibrierung.

Bei der Primärkalibrierung wird die gesuchte physikalische Größe aus anderen Größen heraus berechnet. Soll beispielsweise die Masse einer Flüssigkeit primär bestimmt werden, so kann deren Dichte ρ gemessen oder als Materialkonstante aus Tabellen ermittelt werden und das Volumen V der Flüssigkeit gemessen werden. Über die Gleichung

$$m = V \cdot \rho$$

kann die Masse m berechnet werden. Die in die Gleichung eingehenden Größen sind dabei im Allgemeinen sehr genau bestimmbar und sorgen dafür, dass die zu ermittelnde Größe sehr genau berechnet werden kann.

Bei einer Sekundärkalibrierung werden lediglich zwei Größen mit einander verglichen. Es handelt sich also um eine Vergleichskalibrierung. Dies bedeutet für das in Fig. 2 dargestellte Beispiel, dass die Verwendung einer Balkenwaage zur Bestimmung der gesuchten Masse m_2 eine Vergleichsmessung ist. Steht der obere Balken 1 horizontal, bedeutet dies bei gleichlangen Hebelarmen, dass die Masse m_2 so groß ist wie die bekannte Masse m_1. Die Masse m2 ist dann bestimmt und kann mit den Toleranzen des Messsystems mit

$$m_2 = m_1$$

angegeben werden.

Für die Ermittlung des Frequenzganges von Drucksensoren ist eine solche Sekundärkalibrierung bekannt.

Hierfür sind dynamische Druckerzeuger bekannt, die stets mit einem Vergleichssensor ausgestattet sind und damit der Sekundärkalibrierung, wie oben beschrieben, dienen. Ein solcher dynamischer Druckerzeuger ist aus mehreren Veröffentlichungen bekannt, wie

- Kuhn; Werthschützky: Analysis of Dynamic Charatkeristics of Pressure Sensors, EMK TU Darmstadt,
- Stefan Sindlinger: Einfluss der Gehäusung auf die Messunsicherheit von mikrogehäusten Drucksensoren mit piezoresistivem Messelement, Dissertation, EMK TU Darmstadt, 2007
- Sven Kuhn: Messunsicherheit elektromechanischer Wirkprinzipien zur Druckmessung und Optimierung von Verfahren zur Fehlerkorrektur, Dissertation, EMK TU Darmstadt, 2001
- Timo Kober: Analyse des Übertragungsverhaltens von Differenzdrucksensoren durch dynamische Druckkalibrierung, Artikel Technisches Messen 2/2010,
- Luca Tomasi: A new micromachined piezoresistive pressure sensor with dual range and self-test functionalities, Dissertation, 2007 oder
- Adam Hurst: An Experimental Frequency Response Characterization of MEMS Piezoresistive Pressure Transducers, Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, 2014

Diese Lösungen können in der Darstellung gemäß Fig. 3 schematisch zusammengefasst werden.

Hierin wird in einem Kontrollvolumen 2 über eine Membran 3 ein Druck *p* erzeugt. An diese Membran 3 ist über einen Kolben 8 ein piezoelektrischer Aktor 4 angeschlossen. Wird an den piezoelektrischen Aktor 4 eine Spannung angelegt, dehnt sich dieser aus. Die Ausdehnung bewirkt eine Verschiebung der Membran 3. Die Membran 3 komprimiert das Öl, mit dem das Kontrollvolumen 2 gefüllt ist, und sorgt für einen Druckanstieg.

Aufgrund der Eigenschaften des piezoelektrischen Aktors 4 können mit diesem Verfahren die oben beschriebenen Entwicklungsziele erfüllt werden. Die Frequenz des erzeugten Drucks *p* kann über die Frequenz der angelegten Aktorspannung variiert werden. Die Amplitude des Drucks *p* kann über die Amplitude der Spannung gesteuert werden.

Wie bereits beschrieben, ist auch in dieser Anordnung ein Vergleichssensor 5 vorgesehen. Der Vergleichssensor 5 hat eine unbekannte Dynamik. Auf Grund seiner Konstruktion wird dem Vergleichssensor 5 jedoch eine sehr gute Dynamik unterstellt. Bezogen auf Fig. 1 bedeutet dies, dass die Abweichung der Empfindlichkeit über alle Frequenzen hin 0% entspricht. Der Bezugswert ist die statisch ermittelte Empfindlichkeit des Vergleichssensors 5.

Neben der Tatsache, dass der bekannte Druckerzeuger für eine Sekundärkalibrierung vorgesehen ist, hat es sich gezeigt, dass die Konstruktion, die vorsieht, dass sich das Gehäuse

in Ruhe befindet, also fest mit einem Fundament verbunden ist, dazu führt, dass das Gehäuse unkontrollierte und starke Schwingungen ausübt, woraus sich der Einsatz für eine Primärkalibrierung, bei der Druck p berechnet werden muss, infolge des großen Störeinflusses auf die Druckberechnung verbietet. Wie in dem mechanischen Ersatzschaltbild gemäß Fig. 4 dargestellt ist, ist das Gehäuse 6 fest mit einem Fundament 7 verbunden. Damit soll erreicht werden, dass nur eine Bewegung des Kolbens 8 möglich ist. Die Bewegung auf Gegenseite des Kolbens 8 und des Gehäuses 6 soll durch das Fundament 7 und die Verbindung des Gehäuses 6 zum Fundament 7, beispielsweise über eine die Traverse 8, unterbunden werden. Das Fundament 7 hat dabei eine Masse, die mindestens eine Größenordnung größer als die Masse des Gehäuses 6 ist.

Wie in Fig. 5 schematisch dargestellt, schwingen praktisch aber auch die Masse des Gehäuses 6 und Traverse 9 mit. Dies geschieht sehr unkontrolliert und eignet sich deshalb nicht für eine Primärkalibrierung.

Für das dynamische Verhalten von Drucksensoren ist kein standardisiertes Primärkalibrierverfahren bekannt. Demnach existiert auch kein dynamisch kalibriertes Drucknormal, welches für eine Sekundärkalibrierung verwendet werden könnte.

Es ist somit Aufgabe der Erfindung, eine verfahrens- und vorrichtungsseitige Lösung anzugeben, welche eine Primärkalibrierung des dynamischen Verhaltens eines Drucksensors ermöglicht.

Die Aufgabe wird durch eine Vorrichtung der eingangs beschriebenen Art gelöst, die nur durch je eine Verbindung Gehäuse-Aktor und Aktor-Kolben statisch bestimmt ist und der Kolben in dem Zylinder gegenüber der Umgebungsatmosphäre durch eine Dichtung abgedichtet und in der Dichtung beweglich angeordnet ist. Dadurch entfällt im Gegensatz zum Stand der Technik, wie er insbesondere in Fig. 4 dargestellt ist, eine Verbindung zu einem Fundament und es entsteht ein freier Zweimassenschwinger. Die Massen des freien Zweimassenschwingers sind über die beiden Elemente Fluid und Aktor miteinander verbunden. Die Steifigkeiten und die Dämpfung der Elemente Fluid und Aktor addieren sich. An beiden Massen wird eine gewollte Bewegung zugelassen. Aufgrund der fehlenden Fundamentierung ist diese Bewegung definiert und einfach messbar. Die Position von Kolben und Gehäuse wird ausschließlich über den Aktor oder das Gehäuse des Aktors statisch bestimmt, im Gegensatz zum Stand der Technik, in dem zur Dichtung eine Metallmembran verwendet wird. Durch diese ist das System statisch überbestimmt, d.h. die Position der Massen Gehäuse und Kolben zueinander wird nicht durch eine Verbindung (Gehäuse des Aktors) sondern über zwei Verbindungen (Gehäuse des Piezoaktors + Metallmembran) definiert.

Vorteil der Verwendung einer Dichtung, insbesondere einer Elastomerdichtung ist, dass geringere Stellkräfte nötig sind, um das Öl zu komprimierten. Deshalb kann der Piezoaktor geringer dimensioniert werden, das System ist generell kompakter und somit die Schwingungen wiederum definierter.

Zur Aufnahme des ersten Drucksensors kann das Gehäuse mit einer Öffnung zwischen Gehäuseaußenseite und Zylinder versehen sein. Dabei kann die Öffnung als Einschrauböffnung ausgebildet sein.

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass bei einem Einsatz zu einer Primärkalibrierung ein eine Bewegung des Kolbens relativ zum Gehäuse erfassendes Messsystem angeordnet ist. Da es sich um einen freien Zweimassenschwinger handelt, muss diese Relativbewegung, vorteilhafter Weise durch eine Ermittlung der Bewegung des Kolbens und des Gehäuses erfasst werden. Die Bewegungen werden zweckmäßigerweise direkt an der Stelle des Kolbens und des Gehäuses gemessen, welche direkt an das Fluid grenzen.

Es ist dabei vorteilhaft, wenn das Messsystem sowohl dynamische als auch statische Bewegungen erfassend ausgebildet ist. Da für die Berechnung sowohl des Drucks als auch des Volumens statische und dynamische Kolbenbewegungen zu messen sind, können durch eine derartige Ausgestaltung mehrere Messsysteme entfallen.

Gemäß einer weiteren Ausgestaltung kann das Messsystem als kalibrierter Schwingungssensor oder als Laservibrometer mit Geschwindigkeits- und Wegdecoder ausgebildet sein.

Hierbei kann der Aktor als Hohlaktor mit einer Strahldurchführung ausgebildet sein, durch die das Laservibrometer auf den Kolben gerichtet ist.

Da mit der Erfindung ein dynamisch primärkalibrierter

Drucksensor zur Verfügung gestellt werden kann, kann dieser dann auch eine exakte Sekundärkalibrierung vornehmen. Hierzu ist vorgesehen, dass bei einem Einsatz bei einer Sekundärkalibrierung der Zylinder zur Aufnahme eines Fluids, mit einem sekundär zu kalibrierenden zweiten Drucksensor verbindbar ist. Bei einer Sekundärkalibrierung mit einem primärkalibrierten Drucksensor als Referenzsensor kann e der Aufwand erheblich reduziert werden.

Dabei kann das Gehäuse mit einer zweiten Öffnung zwischen Gehäuseaußenseite und Zylinder zur Aufnahme des zweiten Drucksensors versehen sein. Diese zweite Öffnung kann ebenfalls wieder als Einschrauböffnung ausgebildet sein.

Für die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann eine einen statischen Vordruck in dem Zylinder erzeugende Linearspindel angeordnet sein.

Alternativ zu der Linearspindel kann auch ein zweiter Zylinder vorgesehen sein, in dem ein gegenüber der Umgebungsatmosphäre abgedichteter und in dem zweiten Zylinder beweglicher Verstellkolben angeordnet ist.

Die erfindungsgemäße Aufgabe wird auch durch ein Verfahren zur dynamischen Kalibrierung von Drucksensoren wie eingangs vorgestellt, gelöst, bei dem die dem Istwert entsprechende Druckänderung Δp mittels des Kompressionswertes K für das Fluid, der wirksamen Druckfläche A_K, des mit Fluid gefüllten Volumens V_0 des Zylinders, der Kolbenverschiebung Δx_K sowie der Verschiebung des Zylinders Δx_Z errechnet wird mit

$$\Delta p = K \frac{A_K(\Delta x_K - \Delta x_Z)}{V_0}.$$

Die Druckänderung kann dann mit dem den Druck repräsentierenden Wert des zu kalibrierenden Drucksensors, der mit dem Druck und damit mit der Druckänderung beaufschlagt wird verglichen werden. Aus diesem Vergleich kann dann ein Kalibrierwert ermittelt werden. Der Drucksensor wird somit direkt mit dem zu detektierenden Wert, d.h. primär, kalibriert und nicht über einen Vergleich.

Der Druck p_n kann für verschiedene Kolbenverschiebungen $x_{K(1)}$ ... $x_{K(n)}$ und Zylinderverschiebungen $x_{Z(1)}$ ... $x_{Z(n)}$ errechnet wird mit

$$(p_n - p_{n-1}) = K \cdot \frac{A_K \cdot ((x_{K(n)} - x_{K(n-1)}) + (x_{Z(n)} - x_{Z(n-1)}))}{V_0}, \; n \in \mathbb{N}.$$

Damit wird es mit dem erfindungsgemäßen Verfahren möglich, eine Kalibrierung mit verschiedenen statischen Drücken auszuführen.

Die Kolbenverschiebung Δx_K und die Zylinderverschiebung Δx_Z können auch dynamisch, d.h. als Funktionen der Zeit $\dot{x}_K = dx_K/dt$ und $\dot{x}_K = dx_Z/dt$ erzeugt werden. Die dynamische Druckfunktion $\dot{p} = dp/dt$ wird dann mit

$$\dot{p} = K \cdot \frac{A_K(\dot{x}_K + \dot{x}_Z)}{V_0}$$

errechnet.

In einer Variante der Erzeugung einer dynamischen

Druckfunktion können $\dot{x}_K$ und $\dot{x}_Z$ als Sinusfunktion mit einer Frequenz f erzeugt werden.

Hierbei ist es auch möglich, dass $\dot{x}_K$ und $\dot{x}_Z$ mit einer variierenden Frequenz, d.h. $\dot{x}_K(f)$ und $\dot{x}_Z(f)$, und der Kalibrierwert c über eine Berechnung eines frequenzabhängigen Druckes $\dot{p}(f)$ als Funktion $c(f)$ erzeugt werden. Damit wird es möglich, einen vollständigen Frequenzgang des Sensors zu bestimmen.

In einer ersten Verfahrensvariante ist vorgesehen, dass dem Druck in dem Zylinder, ein dynamischer Druck, welcher mit dem Aktor erzeugt wird, überlagert wird. Wenn $\dot{x}_K$ und $\dot{x}_Z$ als Sinusfunktion mit einer Frequenz f erzeugt werden, wird in dem Zylinder ein statischer Vordruck erzeugt, der über dem Umgebungsdruck liegt, dem dann der dynamische Druck überlagert wird.

Die für die Druckberechnung mit

$$\dot{p} = K \cdot \frac{A_K(\dot{x}_K + \dot{x}_Z)}{V_0}$$

erforderlichen Werte der Kolbenfläche A_K, Volumen V_0, Kompressionsmodul K und der zeitabhängigen Kolbenbewegung $\dot{x}_K$ und Zylinderbewegung $\dot{x}_Z$ werden wie folgt ermittelt:

a) Eine Berechnung der Fläche A_K erfolgt über eine Durchmessermessung des Kolbens.

b) Das Kompressionsmodul K wird anhand des eingesetzten Fluids, anhand dokumentierter Tabellenwerte

festgelegt.

Die zeitabhängige Kolbenbewegung $\dot{x}_K$ und die Zylinderbewegung $\dot{x}_Z$ werden ermittelt. Das kann durch eine separate Messung ihrer Beschleunigungen $\ddot{x}_K$ und $\ddot{x}_Z$ und dann über die Gleichung

$$\dot{x}_K = \int \ddot{x}_K \text{ und } \dot{x}_Z = \int \ddot{x}_Z$$

geschehen.

c) Die Ermittlung des Volumens V_0, erfolgt unter Verwendung eines nicht notwendigerweise dynamisch kalibrierten Drucksensors. Das Volumen V_0 ist mit einem flüssigen Fluid, vorzugsweise mit Öl gefüllt. Damit werden zwei Messungen des dynamischen Drucksensorausgangssignals $\dot{U}$ im Zylinder durchgeführt. Zwischen diesen Messungen wird das Ausgangsvolumen variiert, der statische Vordruck, repräsentiert durch das statische Ausgangssignal U am Drucksensor, jedoch gleich eingestellt, d.h. auf den gleichen Wert, wie vor der Veränderung des Ausgangsvolumens. Die Schritte können noch detaillierter erläutert werden: Zunächst wird eine erste Messung ausgeführt, wobei die Kolben- und Zylinderbewegung $\dot{x}_{K1}$ bzw. $\dot{x}_{Z1}$ gemessenen und ein dynamische Ausgangsparameter $\dot{U}_1$ bei einer Frequenz f_1 am Drucksensor ermittelt wird. Dann wird das Volumen des Zylinders um ΔV verändert. Anschließend erfolgt

eine zweite Messung des dynamischen Ausgangsparameters $\dot{U}_2$ bei der gleichen Frequenz $f_2 = f_1$, wobei die Kolben- und Zylinderbewegung $\dot{x}_{K2}$ bzw. $\dot{x}_{Z2}$ gemessen werden, welche nötig sind, um denselben dynamischen Ausgangsparameter, d.h. $\dot{U}_1 = \dot{U}_2$ am Drucksensor zu erhalten. Dann kann das Volumen V_0 berechnet werden mit

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\frac{(\dot{x}_{K2}+\dot{x}_{Z2})}{(\dot{x}_{K1}+\dot{x}_{Z1})}-1}$$

In einer zweiten Verfahrensvariante ist vorgesehen, dass die für die Druckberechnung mit

$$\dot{p} = K \cdot \frac{A_K(\dot{x}_K + \dot{x}_Z)}{V_0}$$

erforderlichen Werte der Kolbenfläche A_K, Volumen V_0, Kompressionsmodul K und der zeitabhängigen Kolbenbewegung $\dot{x}_K$ und Zylinderbewegung $\dot{x}_Z$ werden wie folgt ermittelt:

a) Eine Berechnung der Fläche A_K erfolgt über eine Durchmessermessung des Kolbens.

b) Das Kompressionsmodul K wird anhand des eingesetzten Fluids, anhand dokumentierter Tabellenwerte festgelegt.

d) Die zeitabhängige Kolbenbewegung $\dot{x}_K$ und die

Zylinderbewegung $\dot{x}_Z$ werden ermittelt. Das kann durch eine separate Messung ihrer Beschleunigungen $\ddot{x}_K$ und $\ddot{x}_Z$ und dann über die Gleichung:

$$\dot{x}_K = \int \ddot{x}_K \text{ und } \dot{x}_Z = \int \ddot{x}_Z$$

geschehen.

c) Eine Ermittlung des Volumens V_0, erfolgt unter Verwendung eines nicht notwendigerweise dynamisch, jedoch notwendigerweise statisch, kalibrierten Drucksensors. Zum Zwecke der Ermittlung des Volumens V_0 wird das flüssige Fluid durch ein gasförmiges Fluid ersetzt. Damit werden zwei Messungen des statischen Drucks p_1 und p_2 im Zylinder durchgeführt, zwischen denen das Ausgangsvolumen um ΔV variiert wird. Dabei wird zunächst eine erste Messung ausgeführt, woraus der statische Ausgangsparameter U_1 am Drucksensor ermittelt wird. Dann wird das Volumen des Zylinders um ΔV verändert und es erfolgt anschließend eine zweite Messung des statischen Ausgangsparamters U_2. Dann wird das Volumen V_0 berechnet mit

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\frac{p_2}{p_1} - 1} \quad .$$

Eine Gestaltung des Verfahrens sieht vor, dass mittels eines separaten Verstellkolbens mit einer Kolbenfläche A_{VK} der eine Verstellbewegung mit einem Verstellweg Δx_{VK} ausführt, das

Volumen V_0 variiert und berechnet wird mit

$$V_0 = \frac{A_{VK} \cdot \Delta x_{VK}}{\frac{p_2}{p_1} - 1} \quad .$$

In einer dritten Verfahrensvariante kann die aufwändige Ermittlung des Volumens V_0, wie sie in der ersten und zweiten Verfahrensvariante erforderlich ist, entfallen. Hierbei werden die zeitabhängige Kolbenbewegung $\dot{x}_K$ und die Zylinderbewegung $\dot{x}_Z$ erzeugt und mittels eines Messsystems erfasst. Die dynamische Druckfunktion $\dot{p}$ wird errechnet mit

$$\dot{p} = K \cdot \frac{A_K(\dot{x}_K + \dot{x}_Z)}{V_0} = C_1 \cdot (\dot{x}_K + \dot{x}_Z)$$

wobei alle konstanten Größen in C_1, zusammengefasst werden, d.h.

$$C_1 = K \cdot \frac{A_K}{V_0}$$

Ohne eine separate Ermittlung der Einzelgrößen wird C_1 nun insgesamt ermittelt. Dies geschieht durch zwei statische Messungen des Drucks, eines notwendigerweise statisch kalibrierten Drucksensors in Relation zur jeweiligen Kolbenverschiebung Δx_K und Zylinderverschiebung Δx_Z, die ebenfalls gemessen werden. Daraus werden die Druckdifferenz Δp, die Kolbenverschiebung Δx_K und Zylinderverschiebung Δx_Z ermittelt und C_1 wird berechnet mit

$$C_1 = \frac{\Delta p}{\Delta x_K + \Delta x_Z}$$

Die Kolbenverschiebung Δx_K und die Zylinderverschiebung Δx_Z können auch mit $\Delta x_K \gg \Delta x_Z$ gewählt werden, wobei der Unterschied mindestens eine Größenordnung beträgt. Die zeitabhängige Druckfunktion $\dot{p}$ wird dann unter der Verwendung der Gleichungen

$$\dot{p} = K \cdot \frac{A_K \cdot \dot{x}_K}{V_0} = C_1 \cdot (\dot{x}_K)$$

bestimmt, wobei C_1 durch zwei statische Messungen des Drucks, eines notwendigerweise statisch kalibrierten Drucksensors in Relation zur jeweiligen Kolbenverschiebung Δx_K ermittelt und daraus die Druckdifferenz Δp und C_1 berechnet wird mit

$$C_1 = \frac{\Delta p}{\Delta x_K}.$$

Die Erfindung ermöglicht es, einen Drucksensor dynamisch primär zu kalibrieren. Damit sieht die erfindungsgemäße Lösung auch vor, dass ein solcher primär kalibrierter Sensor mit einem nunmehr bekannten Kalibrierwert c als erster Drucksensor für eine Sekundärkalibrierung eines zweiten Drucksensors verwendet wird. Damit wird der vorrichtungs- und verfahrensseitige Aufwand erheblich verringert.

Die Erfindung soll nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert werden. In den zugehörigen Zeichnungen zeigt

Fig. 1 einen Frequenzgang eines Schwingungssensors mit einer Abweichung bezogen auf eine Empfindlichkeit bei 160 Hz,

Fig. 2 eine Darstellung des Funktionsprinzips einer

Sekundärkalibrierung,

Fig. 3 einen piezolektrisch betriebenen Druckgenerator nach dem Stand der Technik,

Fig. 4 ein mechanisches Ersatzschaltbild eines Druckgenerators nach dem Stand der Technik,

Fig. 5 eine schematische Darstellung der Auswirkung einer Fundamentverbindung nach dem Stand der Technik,

Fig. 6 eine schematische Darstellung des Funktionsprinzips der erfindungsgemäßen Lösung,

Fig. 7 einen Aufbau einer erfindungsgemäßen Kalibriervorrichtung gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel,

Fig. 8 einen Druck-Zeit-Verlauf einer dynamischen Druckbeaufschlagung eines zu kalibrierenden Drucksensors,

Fig. 9 einen Aufbau einer erfindungsgemäßen Kalibriervorrichtung gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel und

Fig. 10 einen Aufbau einer erfindungsgemäßen Kalibriervorrichtung gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel.

Fig. 6 zeigt eine Prizipdarstellung einer erfindungsgemäßen Lösung. Die Vorrichtung weist ein Gehäuse 6 und ein mit dem Gehäuse verbundenen Zylinder 10 zur Aufnahme eines Fluids,

insbesondere Öl, wie Hydrauliköl, auf. Der Zylinder 10 ist mit einem ersten Drucksensor 12 verbindbar. Der erste Drucksensor 12 kann über eine erste Öffnung 13, insbesondere eine Schrauböffnung, mit dem Zylinder 10 verbunden werden und steht damit mit dem Fluid 11 in Kontakt. Der erste Drucksensor 12 ist der Sensor, der primär kalibriert werden soll.

Weiterhin ist ein Kolben 8 vorgesehen, der mit dem Zylinder 10 derart zusammenwirkt, dass er in dem Zylinder gegenüber der Umgebungsatmosphäre durch eine Dichtung 14 abgedichtet und in der Dichtung 14 beweglich angeordnet ist. Damit kann der Kolben 8 direkt auf das Fluid 11 drücken und in dem Zylinder 10 einen Druck einstellen. Angetrieben wird der Kolben 8 durch einen piezoelektrischen Aktor 4, der zwischen Gehäuse 6 und einer vom Zylinder 10 abgewandten Seite 15 des Kolbens 8 angeordnet ist.

Die Vorrichtung weist keine Verbindung zu einer größeren Masse, insbesondere zu keinem Fundament auf. Damit ist sie nur durch die Verbindung Gehäuse 6 zu Aktor 4 und Aktor 4 zu Kolben 8 statisch bestimmt.

Der eingesetzte Aktor 4 wandelt ein Eingangssignal in Form einer nicht näher dargestellten in eine mechanische Verformung um, die als mechanische Bewegung auf den Kolben 8 übertragen wird.

Der Aufbau einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, wie er in Fig. 7 dargestellt ist, weist alle Elemente, wie sie in der Prinzipdarstellung gemäß Fig. 6 gezeigt sind, auf. Gleiche

Bezugszeichen weisen auf die gleichen Elemente, wie Gehäuse 6, Kolben 8, Zylinder 10, Fluid 11, erster Drucksensor 12, erste Öffnung 13, Dichtung 14 und zylinderabgewandte Seite 15 des Kolbens 8 hin. Zusätzlich ist eine auf den Aktor wirkende Linearspindel 16 vorgesehen, die einen Vordruck in dem Zylinder 10 einstellen lässt. Diesem wird dann der dynamische Druck, der mit dem Aktor 4 erzeugt wird, überlagert. Es kann damit das in Fig. 8 dargestellte Druckprofil erzeugt werden.

Aufgrund verschiedener Einflüsse ist es wünschenswert, dass das Ölvolumen sehr klein ist, um die Genauigkeit des Aufbaus zu erhöhen. Dies bedeutet jedoch im Umkehrschluss, dass bereits bei einem sehr kleinen Kolbenweg (≈ 0,1 µm) ausreichend hohe Drücke erzeugt werden. Diesen Weg mit ausreichender Genauigkeit zu messen, stellt eine große Herausforderung dar. Die Erfindung sieht deshalb vor, Schwingungssensoren 17, 18 zu benutzen. Diese können sehr genau kalibriert werden. Über gemessene Beschleunigungen können dann die gesuchten Wege berechnet werden.

Ein eine Bewegung des Kolbens relativ zum Gehäuse erfassendes Messsystem besteht daher aus einem ersten Schwingungssensor 17, der mit dem Kolben verbunden ist, und einem zweiten Schwingungssensor 18, der mit dem Gehäuse verbunden ist. Die Bestimmung des Kolbenwegs erfolgt dann mittels der von den Schwingungssensoren 17, 18 ausgegebenen Ausgangssignale. gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren . Die Bestimmung der zeitabhängigen Kolbenbewegung $\dot{x}_K$ wird mittels des beschleunigungsäquivalenten Ausgangssignals des ersten

Schwingungssensors 17 und die Zylinderbewegung $\dot{x}_Z$ mittels des beschleunigungsäquivalenten Ausgangssignals des zweiten Schwingungssensors 18 ermittelt. Das erfolgt durch eine separate Messung ihrer Beschleunigungen $\ddot{x}_K$ und $\ddot{x}_Z$ und dann über die Gleichung:

$$\dot{x}_K = \int \ddot{x}_K \text{ und } \dot{x}_Z = \int \ddot{x}_Z$$

Je nach Empfindlichkeit des Sensors ist die Messung des Wegs erst ab ausreichend hohen Frequenzen möglich. Aufgrund der Bauraumbeschränkungen im Kolben kann nur ein sehr kleiner Sensor verwendet werden.

Die Druckberechnung zur Kalibrierung des ersten Drucksensors 12 erfolgt bei diesem Ausführungsbeispiel wie unter „erste Verfahrensvariante" beschrieben.

Ist der erste Drucksensor 12 primär dynamisch kalibriert, kann er als Referenzsensor für einen zweiten Drucksensor 20 für eine Sekundärkalibrierung verwendet werden.

Der Aufbau einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, wie er in Fig. 9 dargestellt ist, weist alle Elemente, wie sie in der Prinzipdarstellung gemäß Fig. 6 gezeigt sind, auf. Gleiche Bezugszeichen weisen auf die gleichen Elemente, wie Gehäuse 6, Kolben 8, Zylinder 10, Fluid 11, erster Drucksensor 12, erste Öffnung 13, Dichtung 14 und zylinderabgewandte Seite 15 des Kolbens 8 hin. Zusätzlich ist ein auf Zylinder 10 wirkenden Verstellkolben 19 vorgesehen, der einen Vordruck in dem Zylinder 10 einstellen lässt. Diesem wird dann der dynamische Druck, der mit dem Aktor 4 erzeugt wird,

überlagert. Es kann damit das in Fig. 8 dargestellte Druckprofil erzeugt werden.

Die Bestimmung der zeitabhängigen Kolbenbewegung $\dot{x}_K$ wird auch in diesem Ausführungsbeispiel mittels des beschleunigungsäquivalenten Ausgangssignals des ersten Schwingungssensors 17 und die Zylinderbewegung $\dot{x}_Z$ mittels des beschleunigungsäquivalenten Ausgangssignals des zweiten Schwingungssensors 18 ermittelt. Das erfolgt durch eine separate Messung ihrer Beschleunigungen $\ddot{x}_K$ und $\ddot{x}_Z$ und dann über die Gleichung:

$$\dot{x}_K = \int \ddot{x}_K \text{ und } \dot{x}_Z = \int \ddot{x}_Z$$

An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Zylinderbewegung mitunter sehr viel kleiner und für eine gegebenenfalls hinreichende Genauigkeit vernachlässigbar kleiner als die Kolbenbewegung sein kann. In diesem Fall kann auf die Ermittlung der Zylinderbewegung $\dot{x}_Z$ verzichtet werden. In diesem Falle kann auch der zweite Beschleunigungssensor 17 entfallen.

Die Druckberechnung zur Kalibrierung des ersten Drucksensors 12 erfolgt bei dem Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 9 wie unter „zweite Verfahrensvariante" beschrieben.

Der Aufbau einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, wie er in Fig. 10 dargestellt ist, weist alle Elemente, wie sie in der Prinzipdarstellung gemäß Fig. 6 gezeigt sind, auf. Gleiche Bezugszeichen weisen auf die gleichen Elemente, wie Gehäuse 6, Kolben 8, Zylinder 10, Fluid 11, erster Drucksensor 12,

erste Öffnung 13, Dichtung 14 und zylinderabgewandte Seite 15 des Kolbens 8 hin. Zusätzlich ist ein auf Zylinder 10 wirkenden Verstellkolben 19 vorgesehen, der einen Vordruck in dem Zylinder 10 einstellen lässt. Diesem wird dann der dynamische Druck, der mit dem Aktor 4 erzeugt wird, überlagert. Es kann damit das in Fig. 8 dargestellte Druckprofil erzeugt werden.

Das Ziel des Ausführungsbeispieles gemäß Fig. 10 ist es, den Frequenzbereich, der bisher durch die in den Ausführungsbeispielen nach Fig. 7 und Fig. 9 eingesetzten Schwingungssensoren 17 und 18 begrenzt ist, zu erweitern. Insbesondere soll, der Frequenzbereich zu kleinen Frequenzen bis $f = 0\ Hz$ erweitert werden. Da es Kalibriermethoden für die statische Kalibrierung von Drucksensoren gibt, ist mit der Erweiterung des Frequenzbereichs zu $f = 0\ Hz$ ein Anschluss des dynamischen Verfahrens an das statische und somit auch ein Vergleich der ermittelten Werte möglich.

Um dies zu erreichen wurden in der dem Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 10 die Schwingungssensoren 17 und 18 in den Figuren 7 und 9 durch ein Laservibrometer 21 und ein zweites Laservibrometer 24 ersetzt. Diese sind in der Lage, sehr viel kleinere Beschleunigungen zu messen, als der zuvor gezeigten Beschleunigungssensoren 16 und 17.

Um den Laserstrahl 22 des Laservibrometers 21 direkt auf den Kolben treffen zu lassen, ist der Aktor als Hohlaktor 23 ausgebildet. Der Laserstrahl 25 des zweiten Laservibrometers 24 trifft direkt auf das Gehäuse 6.

Weiterhin ist das Laservibrometer 21 in der Lage, auch statische Messungen der Kolbenverschiebung mit einer sehr hohen Genauigkeit durchzuführen. Dies ist ein wesentlicher Vorteil zu den zuvor gezeigten Ausführungsbeispielen. Das gleiche gilt für das zweite Laservibrometer 24.

Die Druckberechnung zur Kalibrierung des ersten Drucksensors 12 erfolgt bei dem Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 10 wie unter „dritte Verfahrensvariante" beschrieben.

Auch hier ist es möglich, bei Vorliegen der dynamischen Primärkalibrierung des ersten Drucksensors 12 einen zweiten Drucksensor 20 dynamisch sekundär zu kalibrieren. Bei einer solchen Sekundärkalibrierung können dann die Laservibrometer 21 und 24 entfallen.

Die Besonderheiten der Erfindung können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Es wird ein Pistonphon (Kolben - Zylinder System) benutzt
- Es wird ein freies Zweimassen-Schwinger-System realisiert.
- Eine Bewegung an Kolben 8 und Gehäuse 6 wird ermöglicht.
- An zwei Messpunkten wird die Verschiebung des Kolbens 8 und des Gehäuses 6 gemessen.
- Es handelt sich um ein statisch bestimmtes System, da Kolben 8 und Gehäuse 6 nur über das Gehäuse 6 bzw. den Aktor 4 selbst verbunden sind. Hierzu wird eine Dichtung 14, insbesondere eine Elastomerdichtung

verwendet.

- Es wird ein Verstellkolben 19 vorgesehen, mit diesem ist es möglich, eine statische Druckerhöhung zu erzeugen. Die statische Druckerhöhung ist zwingend erforderlich um:
    - Druckamplituden größer 1 bar zu erzeugen und
    - definierte Kalibrierbedingungen im Aufbau herzustellen (insbesondere einen definierten Kompressionsmodul K zu erreichen)

Vorrichtung und Verfahren zur dynamischen Kalibrierung von Drucksensoren

Bezugszeichenliste

1 Balken
2 Kontrollvolumen
3 Membran
4 Aktor
5 Vergleichssensor
6 Gehäuse
7 Fundament
8 Kolben
9 Traverse
10 Zylinder
11 Fluid
12 erster Drucksensor
13 erste Öffnung
14 Dichtung
15 zylinderabgewandte Seite des Kolbens
16 Linearspindel
17 erster Schwingungssensor
18 zweiter Schwingungssensor
19 Verstellkolben
20 zweiter Drucksensor
21 Laservibrometer
22 Laserstrahl

23 Hohlaktor

24 zweites Laservibrometer

25 Laserstrahl des zweiten Laservibrometers

Vorrichtung und Verfahren zur dynamischen Kalibrierung von Drucksensoren

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur dynamischen Kalibrierung von Drucksensoren mit einem Gehäuse (6), einem mit dem Gehäuse (6) verbundenen Zylinder (10) zur Aufnahme eines Fluids (11), der mit einem ersten Drucksensor (12) verbindbar ist, einem Aktor (4) und einem mit dem Zylinder (10) zusammenwirkenden Kolben(8), wobei der Aktor (4) zwischen Gehäuse (6) und einer vom Zylinder (10) abgewandten Seite (15) des Kolbens (8) angeordnet ist, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass die Vorrichtung nur durch je eine Verbindung Gehäuse (6) - Aktor (4) und Aktor (4) - Kolben (8) statisch bestimmt ist und der Kolben (8) in dem Zylinder (10) gegenüber der Umgebungsatmosphäre durch eine Dichtung (14) abgedichtet und in der Dichtung (14) beweglich angeordnet ist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass bei einem Einsatz zu einer Primärkalibrierung ein eine Bewegung des Kolbens (8) relativ zum Gehäuse (6) erfassendes Messsystem (16; 17) angeordnet ist.

3. Vorrichtung nach Anspruch 2, d a d u r c h

g e k e n n z e i c h n e t , dass das Messsystem (16; 17) sowohl dynamische als auch statische Bewegungen erfassend ausgebildet ist.

4. Vorrichtung nach Anspruch 2 oder 3, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass das Messsystem als kalibrierter Schwingungssensor (16; 17) oder als Laservibrometer (21, 24) mit Geschwindigkeits- und Wegdecoder ausgebildet ist.

5. Vorrichtung nach Anspruch 4, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass der Aktor (4) als Hohlaktor (23) mit einer Strahldurchführung ausgebildet durch die das Laservibrometer (21) auf den Kolben gerichtet ist.

6. Vorrichtung nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass bei einem Einsatz zu einer Sekundärkalibrierung der Zylinder (10) zur Aufnahme eines Fluids, mit einem sekundär zu kalibrierenden zweiten Drucksensor (20) verbindbar ist.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass eine einen statischen Vordruck in dem Zylinder (10) erzeugende Linearspindel (16) angeordnet ist.

8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass ein zweiter Zylinder vorgesehen ist, in dem ein gegenüber der Umgebungsatmosphäre abgedichteter und in dem zweiten Zylinder beweglicher Verstellkolben (19) angeordnet ist.

9. Verfahren zur dynamischen Kalibrierung von Drucksensoren, bei dem ein den auf einen Drucksensor (12) einwirkenden Druck repräsentierender Istparameter gemessen und mit einem entsprechenden Sollparameter verglichen wird und aus dem Vergleich ein Kalibrierwert c für den Istparameter ermittelt wird, wobei der Druck mittels eines mit einem Zylinder (10), der mit einem Fluid (11) gefüllt ist, zusammenwirkenden Kolbens (8) erzeugt wird, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass die dem Istwert entsprechende Druckänderung Δp mittels des Kompressionswertes K für das Fluid, der wirksamen Druckfläche A_K, des mit Fluid (11) gefüllten Volumens V_0 des Zylinders (10), der Kolbenverschiebung Δx_K sowie der Verschiebung des Zylinders Δx_Z errechnet wird mit

$$\Delta p = K \frac{A_K(\Delta x_K - \Delta x_Z)}{V_0}$$

10. Verfahren nach Anspruch 9, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass der Druck p_n für verschiedene Kolbenverschiebungen $x_{K(1)}$ ... $x_{K(n)}$ und Zylinderverschiebungen $x_{Z(1)}$ ... $x_{Z(n)}$ errechnet wird mit

$$(p_n - p_{n-1}) = K \cdot \frac{A_K \cdot ((x_{K(n)} - x_{K(n-1)}) + (x_{Z(n)} - x_{Z(n-1)}))}{V_0}, \; n \in \mathbb{N}.$$

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass die Kolbenverschiebung Δx_K und die Zylinderverschiebung Δx_Z dynamisch, d.h. als Funktionen der Zeit $\dot{x}_K = dx_K/dt$ und $\dot{x}_Z = dx_Z/dt$ erzeugt werden und die dynamische Druckfunktion $\dot{p} = dp/dt$ errechnet wird mit

$$\dot{p} = K \cdot \frac{A_K(\dot{x}_K + \dot{x}_Z)}{V_0}$$

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass $\dot{x}_K$ und $\dot{x}_Z$ als Sinusfunktion mit einer Frequenz f erzeugt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass $\dot{x}_K$ und $\dot{x}_Z$ mit einer variierenden Frequenz, d.h. $\dot{x}_K(f)$ und $\dot{x}_Z(f)$, und der Kalibrierwert über eine Berechnung eines frequenzabhängigen Druckes $\dot{p}(f)$ als Funktion $c(f)$ erzeugt werden.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 13, dadurch gekennzeichnet,

- dass dem Druck in dem Zylinder (10) ein dynamischer Druck, welcher mit dem Aktor (4) erzeugt wird, überlagert wird,
- dass die Ermittlung der Größen Kolbenfläche A, Volumen V_0, Kompressionsmodul K und der zeitabhängigen Kolbenbewegung $\dot{x}_K$ und Zylinderbewegung $\dot{x}_Z$ erfolgt über
    - eine Berechnung der Fläche A über eine Durchmessermessung des Kolbens (8),
    - eine Festlegung des Kompressionsmoduls K anhand des eingesetzten Fluids (11), anhand

dokumentierter Tabellenwerte,

- eine Ermittlung der zeitabhängigen Kolbenbewegung $\dot{x}_K$ und der Zylinderbewegung $\dot{x}_Z$

- eine Berechnung des Volumens V_0, unter Verwendung eines nicht notwendigerweise dynamisch kalibrierten Drucksensors (12, 20), wobei zwei Messungen des dynamischen Drucksensorausgangssignals $\dot{U}$ im Zylinder (10) durchgeführt werden, zwischen denen das Ausgangsvolumen variiert wird, der statische Vordruck, repräsentiert durch das statische Ausgangssignal U am Drucksensor (12; 20), jedoch gleich eingestellt wird, wobei zunächst eine erste Messung ausgeführt wird, wobei die Kolben- und Zylinderbewegung $\dot{x}_{K1}$ bzw. $\dot{x}_{Z1}$ gemessenen und ein dynamischer Ausgangsparameter $\dot{U}_1$ bei einer Frequenz f_1 am Drucksensor (12; 20) ermittelt wird, dann wird das Volumen des Zylinders um ΔV verändert und anschließend erfolgt eine zweite Messung des dynamischen Ausgangsparameters $\dot{U}_2$ bei der gleichen Frequenz $f_2 = f_1$, wobei die Kolben- und Zylinderbewegung $\dot{x}_{K2}$ bzw. $\dot{x}_{Z2}$ gemessen wird, welche nötig ist, um denselben dynamischen Ausgangsparameter, d.h. $\dot{U}_1 = \dot{U}_2$ am Drucksensor zu erhalten, und dann das Volumen V0 berechnet wird mit

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\frac{(\dot{x}_{K2} + \dot{x}_{Z2})}{(\dot{x}_{K1} + \dot{x}_{Z1})} - 1}$$

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Ermittlung der Größen Kolbenfläche A, Volumen V_0, Kompressionsmodul K und der der zeitabhängigen Kolben- sowie Zylinderbewegung $\dot{x}_K$ und $\dot{x}_Z$ erfolgt über

- eine Berechnung der Fläche A über eine Durchmessermessung des Kolbens (8),
- eine Festlegung des Kompressionsmoduls K anhand des eingesetzten fluids, mittels dokumentierter Tabellenwerte,
- eine Ermittlung der zeitabhängigen Kolbenbewegung $\dot{x}_K$ und der Zylinderbewegung $\dot{x}_Z$,
- eine Berechnung des Volumens V_0, unter Verwendung eines nicht notwendigerweise dynamisch, jedoch notwendigerweise statisch, kalibrierten Drucksensors (12; 20),
  - wobei zum Zwecke der Ermittlung des Volumens V_0 das flüssige Fluid durch ein gasförmiges Fluid ersetzt wird,
  - zwei Messungen des statischen Drucks p_1 und p_2 im Zylinder durchgeführt werden, zwischen denen das Ausgangsvolumen um ΔV variiert wird, wobei zunächst eine erste Messung ausgeführt woraus der statische Ausgangsparameter U_1 am

Drucksensor (12; 20) ermittelt wird, dass das Volumen des Zylinders (10) um ΔV verändert wird und eine zweite Messung des statischen Ausgangsparamters U_2 erfolgt, und das Volumen V_0 berechnet wird mit

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\frac{p_2}{p_1} - 1} \quad .$$

16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass mittels eines separaten Verstellkolbens (19) mit einer Kolbenfläche A_{VK} der eine Verstellbewegung mit einem Verstellweges Δx_{VK} ausführt, das Volumen V_0 variiert und berechnet wird mit

$$V_0 = \frac{A_{VK} \cdot \Delta x_{VK}}{\frac{p_2}{p_1} - 1} \quad .$$

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass

die zeitabhängige Kolbenbwegung $\dot{x}_K$ und die Zylinderbewegung $\dot{x}_Z$ erzeugt und mittels eines Messystems (17, 18) erfasst werden, die dynamische Druckfunktion $\dot{p}$ errechnet wird mit

,

$$\dot{p} = K \cdot \frac{A_K(\dot{x}_K + \dot{x}_Z)}{V_0} = C_1 \cdot (\dot{x}_K + \dot{x}_Z)$$

wobei C_1 durch zwei statische Messungen des Drucks, eines notwendigerweise statisch kalibrierten Drucksensors (12; 20) in Relation zur jeweiligen

Kolbenverschiebung Δx_K und Zylinderverschiebung Δx_Z ermittelt und daraus die Druckdifferenz Δp und die Kolbenverschiebung Δx_K und Zylinderverschiebung Δx_Z ermittelt werden und C_1 berechnet wird mit

$$C_1 = \frac{\Delta p}{\Delta x_K + \Delta x_Z}.$$

18. Verfahren nach einem der einem der Ansprüche 9 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass ein nach primär kalibrierter Sensor (12) mit einem nunmehr bekannten Kalibrierwert c als erster Drucksensor (12) für eine Sekundärkalibrierung eines zweiten Drucksensors (20) verwendet wird.

FIG 1
(Stand der Technik)

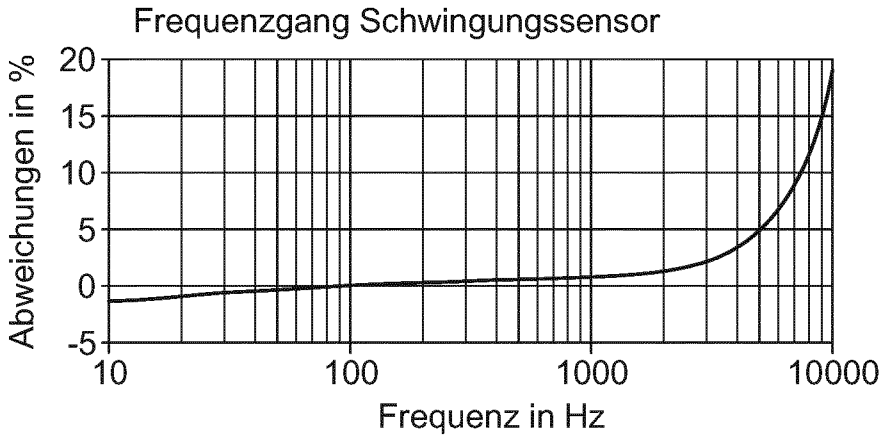


FIG 2
(Stand der Technik)

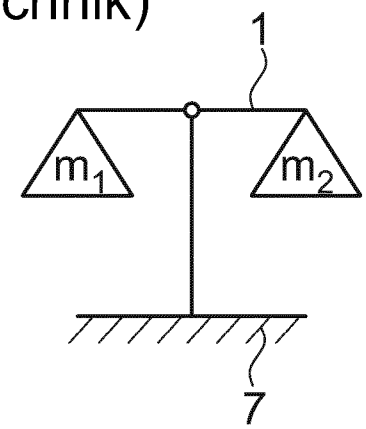


FIG 3
(Stand der Technik)

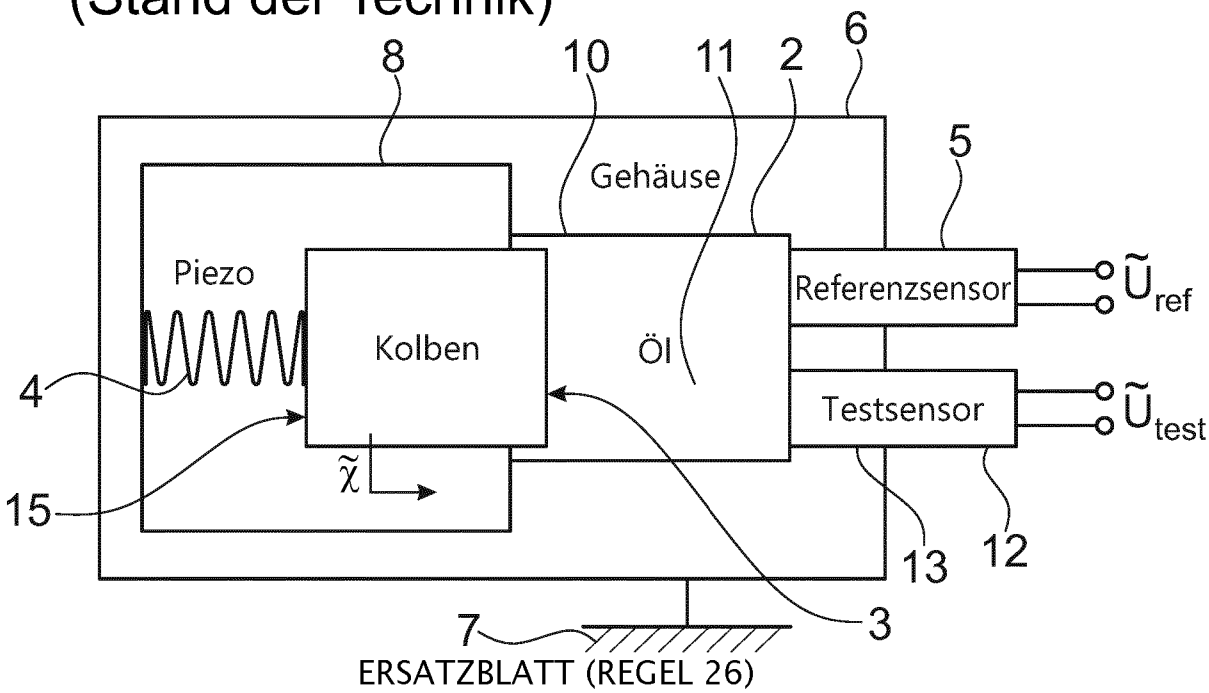


FIG 4
(Stand der Technik)

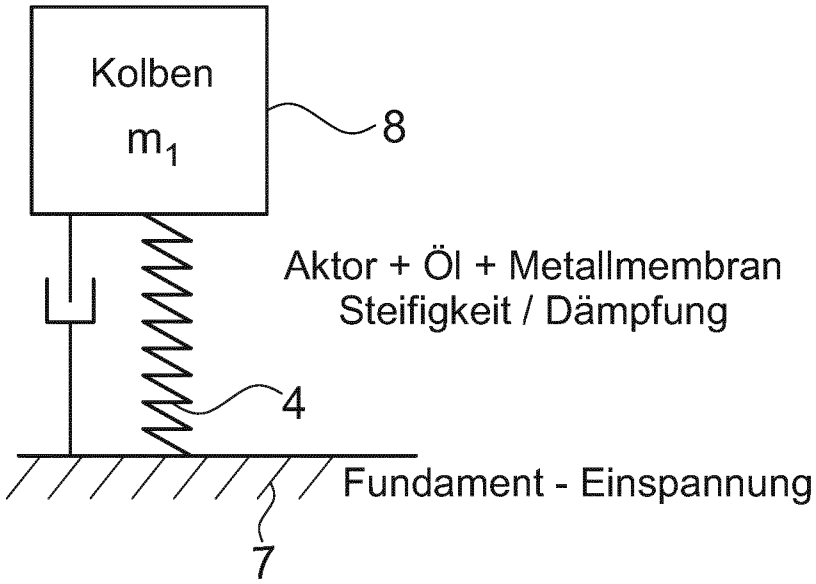


FIG 5
(Stand der Technik)

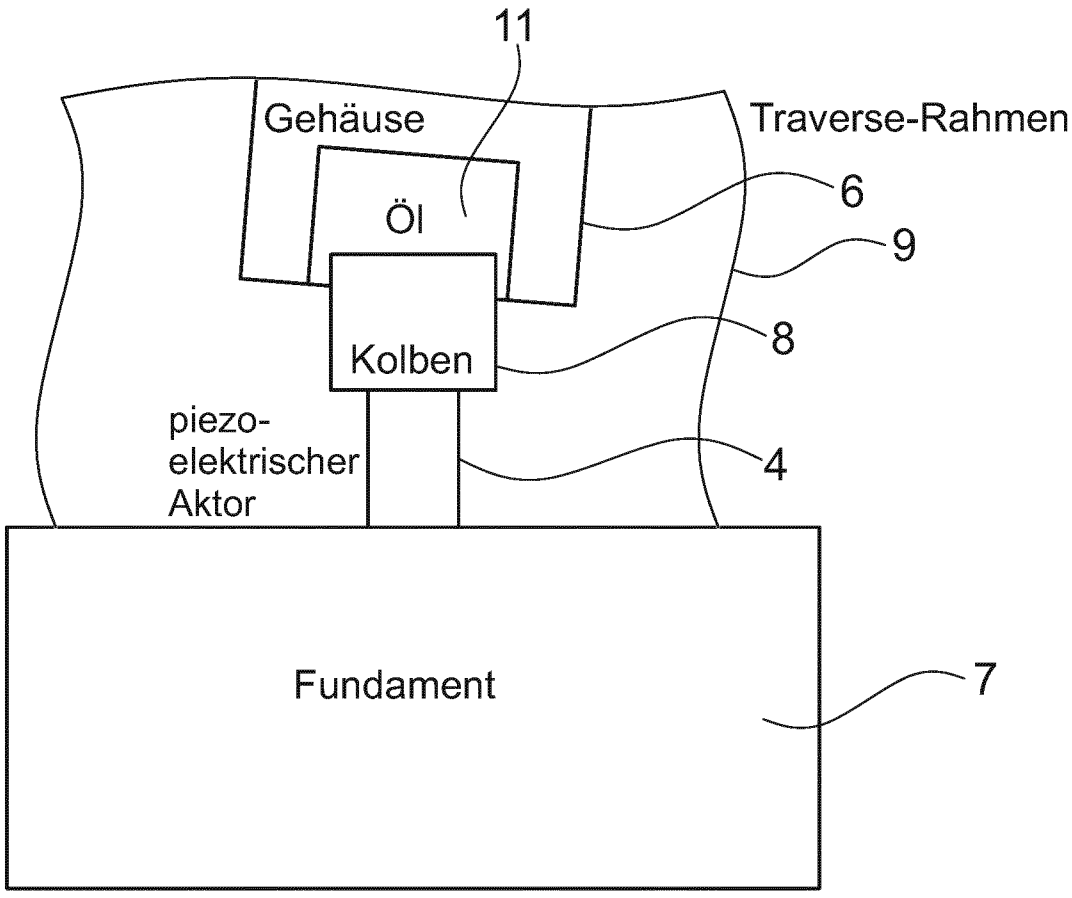


FIG 6

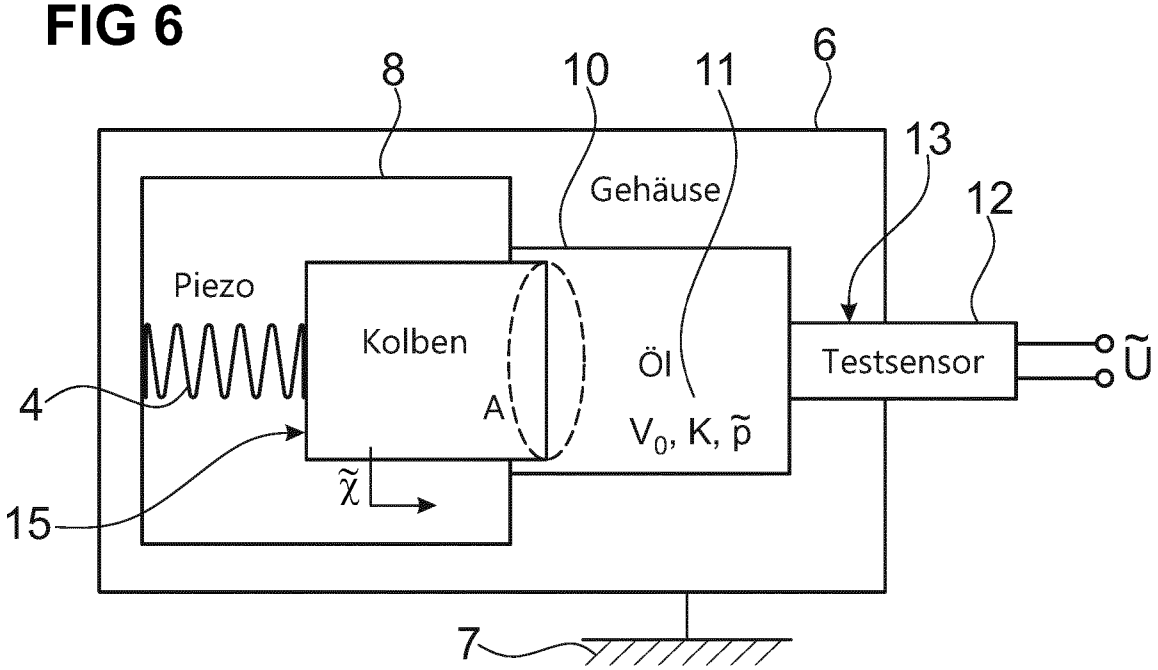

8
10
11
6
13
12
Gehäuse
Piezo
Kolben
Öl
A
V_0, K, $\tilde{p}$
Testsensor
$\tilde{U}$
4
15
$\tilde{\chi}$
7

FIG 7

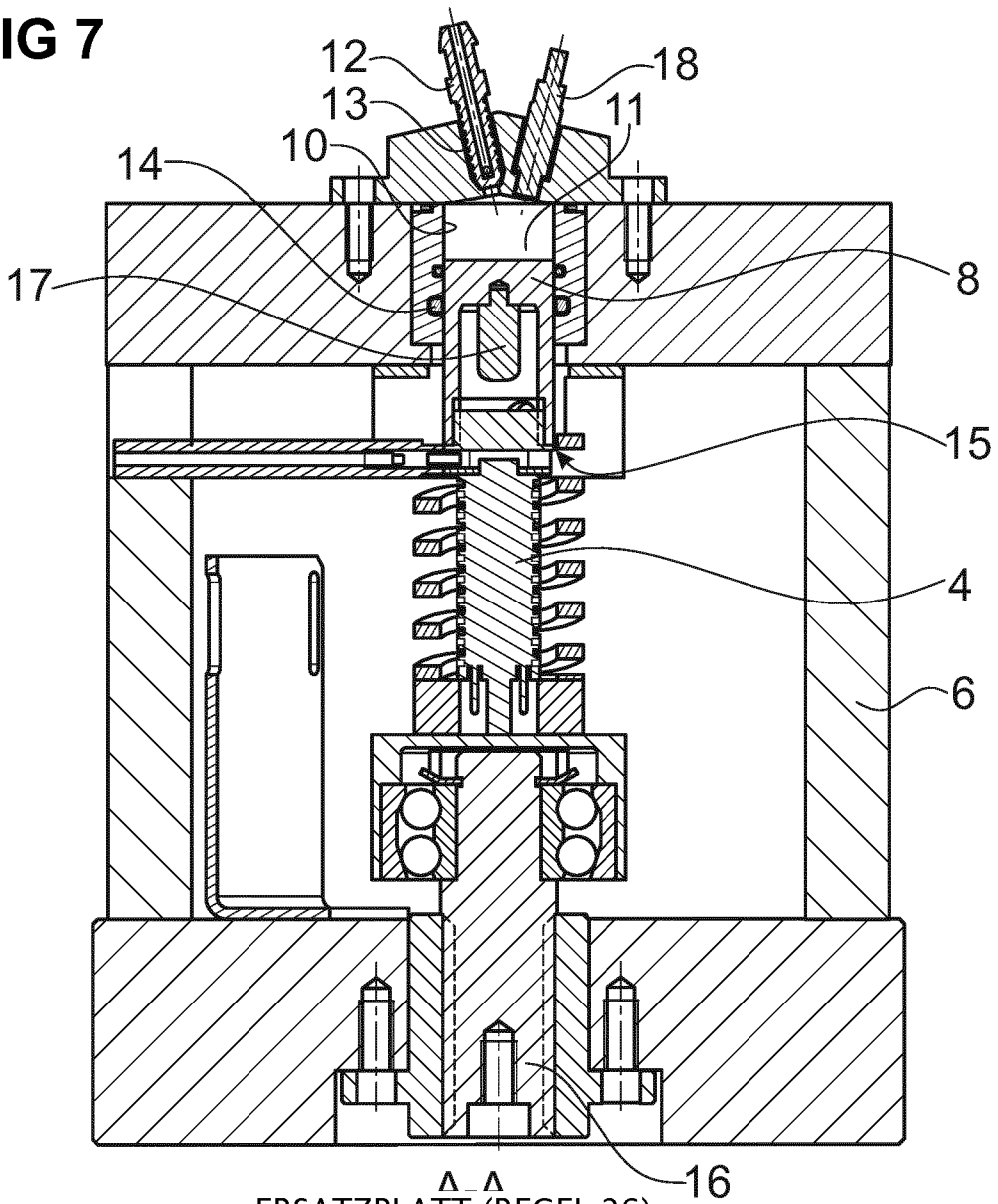

12
18
13
11
10
14
17
8
15
4
6
16

FIG 8

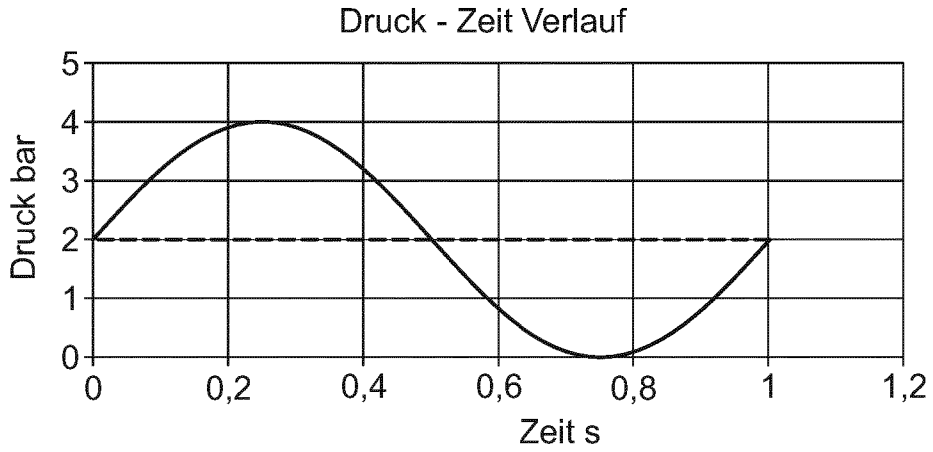

Druck - Zeit Verlauf
Druck bar
5
4
3
2
1
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
Zeit s

FIG 9

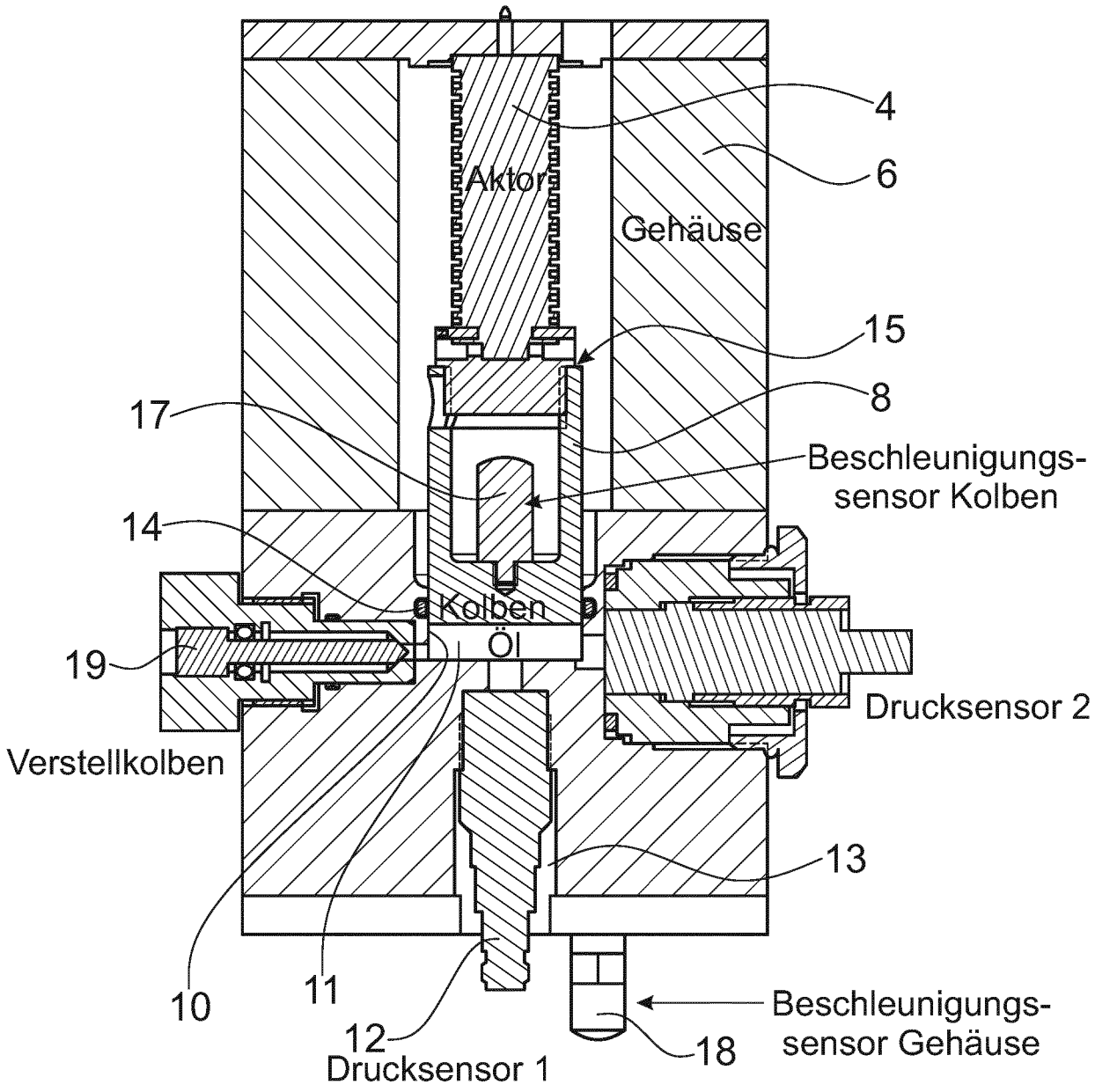
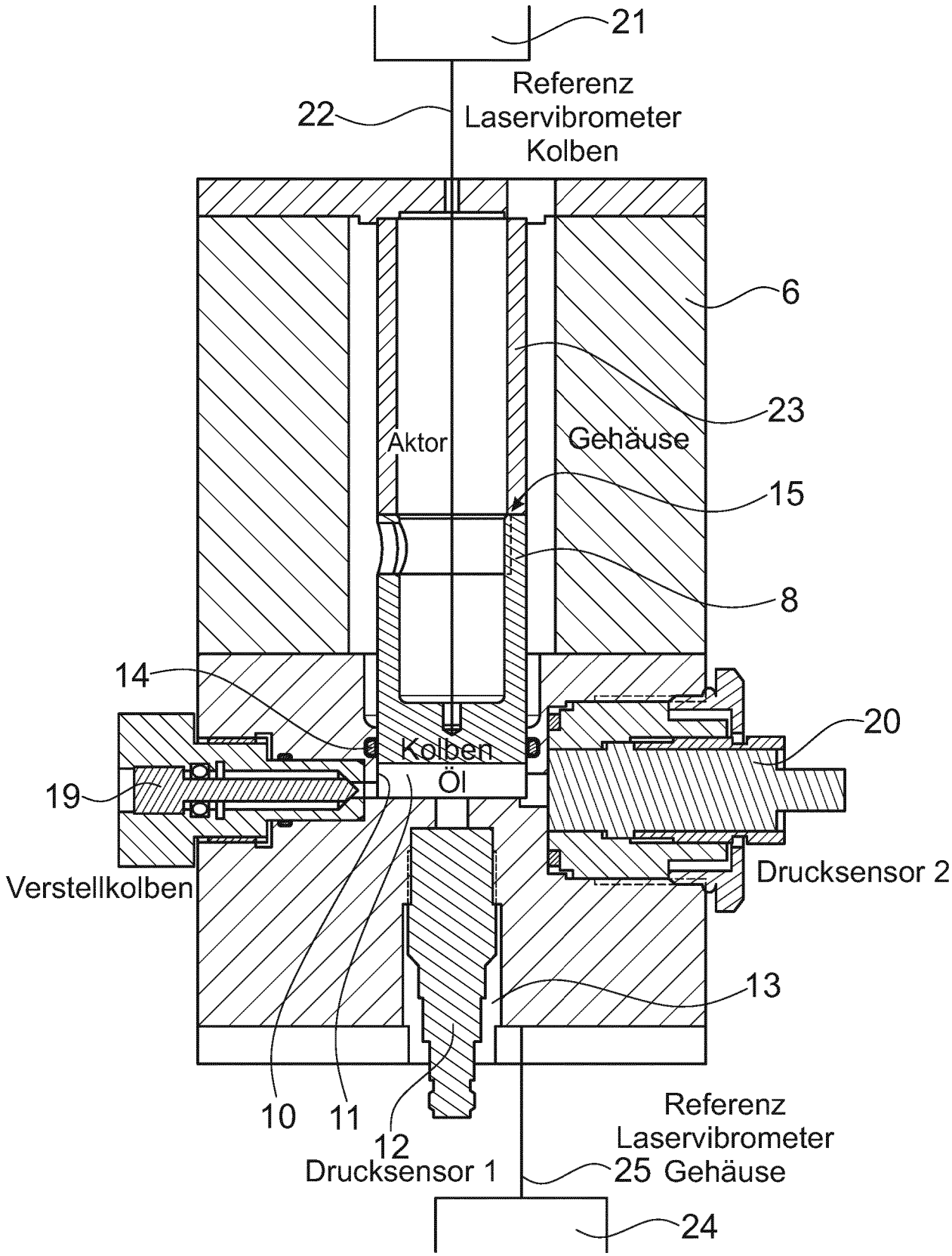

4
6
Aktor
Gehäuse
15
8
17
Beschleunigungs-
sensor Kolben
14
Kolben
Öl
19
Drucksensor 2
Verstellkolben
13
10
11
12
Drucksensor 1
Beschleunigungs-
sensor Gehäuse
18

FIG 10


21
Referenz
Laservibrometer
Kolben
22
6
23
Aktor
Gehäuse
15
8
14
20
Kolben
Öl
19
Verstellkolben
Drucksensor 2
13
10
11
12
Drucksensor 1
Referenz
Laservibrometer
25 Gehäuse
24

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/001137

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01L27/00
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)
G01L

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 3 590 626 A (HUGLI HANS W) 6 July 1971 (1971-07-06)	1-3,9-13
A	abstract column 1 - column 4 figures 1-3	4-8, 14-18

X	DE 10 2009 027624 A1 (HUBER KARL [DE]) 14 January 2010 (2010-01-14) abstract page 1 - page 8 figures 1-7	1,9

X	WO 2013/110255 A1 (POREP GMBH [DE]) 1 August 2013 (2013-08-01) abstract page 1 - page 5 figure 1	1,9

☐ 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	Date of mailing of the international search report
1 March 2018	08/03/2018

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Ridha, Philipp

1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/EP2017/001137

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 3590626 A	06-07-1971	NONE	
DE 102009027624 A1	14-01-2010	NONE	
WO 2013110255 A1	01-08-2013	DE 102012001403 A1	01-08-2013
		WO 2013110255 A1	01-08-2013

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2017/001137

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G01L27/00
ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G01L

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

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 3 590 626 A (HUGLI HANS W) 6. Juli 1971 (1971-07-06)	1-3,9-13
A	Zusammenfassung Spalte 1 - Spalte 4 Abbildungen 1-3	4-8, 14-18

X	DE 10 2009 027624 A1 (HUBER KARL [DE]) 14. Januar 2010 (2010-01-14) Zusammenfassung Seite 1 - Seite 8 Abbildungen 1-7	1,9

X	WO 2013/110255 A1 (POREP GMBH [DE]) 1. August 2013 (2013-08-01) Zusammenfassung Seite 1 - Seite 5 Abbildung 1	1,9

☐ 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	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
1. März 2018	08/03/2018

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde	Bevollmächtigter Bediensteter
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Ridha, Philipp

1

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2017/001137

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 3590626 A	06-07-1971	KEINE	
DE 102009027624 A1	14-01-2010	KEINE	
WO 2013110255 A1	01-08-2013	DE 102012001403 A1	01-08-2013
		WO 2013110255 A1	01-08-2013