

(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
9. Januar 2014 (09.01.2014)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2014/005769 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation: Nicht klassifiziert
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2013/061024
- (22) Internationales Anmeldedatum:
29. Mai 2013 (29.05.2013)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
102012211416.5 2. Juli 2012 (02.07.2012) DE
- (71) Anmelder: **ROBERT BOSCH GMBH** [DE/DE];
Postfach 30 02 20, 70442 Stuttgart (DE).
- (72) Erfinder: **ZINOBER, Sven**; Heimsheimer Str. 29, 71292
Frielzheim (DE). **HAS, Remigius**; Hermann-Hesse-Weg 1,
71120 Grafenau-Daetzingen (DE).
- (74) Gemeinsamer Vertreter: **ROBERT BOSCH GMBH**;
Postfach 30 02 20, 70442 Stuttgart (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, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR,
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, 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, 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, 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).

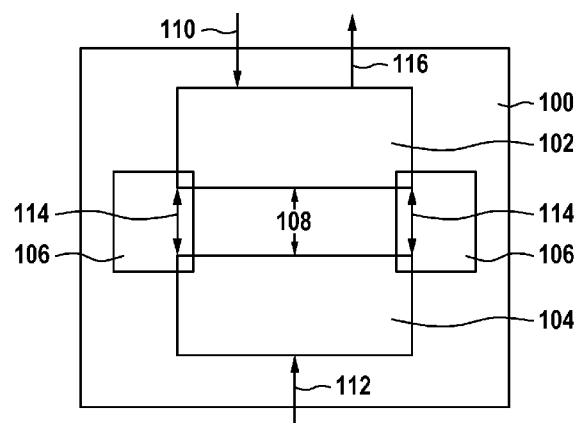
Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz
2 Buchstabe g)

(54) Title: EDDY CURRENT SENSOR AND METHOD FOR MEASURING A FORCE

(54) Bezeichnung : WIRBELSTROMSENSOR UND VERFAHREN ZUM MESSEN EINER KRAFT

Fig. 1



(57) **Abstract:** The invention relates to an eddy current sensor (100), having a sensor coil (102), a sensor surface (104) and a spring element (106). The sensor coil (102) is electrically conductive and designed to provide an alternating electromagnetic field (108). The sensor surface (104) is designed to influence the alternating electromagnetic field (108). The sensor coil (102) and the sensor surface (104) are arranged so as to be movable with respect to one another. The spring element (106) is coupled to the sensor coil (102) and the sensor surface (104) or is formed by the sensor surface (104), and is designed to counteract a relative movement between the sensor surface (104) and the sensor coil (106) by means of a spring force (114).

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2014/005769 A2



Die Erfindung betrifft einen Wirbelstromsensor (100) mit einer Senserspule (102), einer Sensorfläche (104) und einem Federelement (106). Die Senserspule (102) ist elektrisch leitfähig und dazu ausgebildet, ein elektromagnetisches Wechselfeld (108) bereitzustellen. Die Sensorfläche (104) ist dazu ausgebildet, das elektromagnetische Wechselfeld (108) zu beeinflussen. Die Senserspule (102) und die Sensorfläche (104) sind beweglich zueinander angeordnet. Das Federelement (106) ist mit der Senserspule (102) und der Sensorfläche (104) gekoppelt oder wird durch die Sensorfläche (104) gebildet, und ist dazu ausgebildet, einer Relativbewegung zwischen der Sensorfläche (104) und der Senserspule (106) mit einer Federkraft (1 14) entgegenzuwirken.

5 Beschreibung

Titel

Wirbelstromsensor und Verfahren zum Messen einer Kraft

10 Stand der Technik

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf einen Wirbelstromsensor sowie auf ein Verfahren zum Messen einer Kraft.

15 Die DE 10 2010 009 923 A1 beschreibt eine Wirbelstromsonde zur Abtastung einer flächigen Probe in einem Probenvolumen, in das die Probe einführbar ist und/oder eingeführt ist. Die Wirbelstromsonde weist Kerne auf, die auf gegenüberliegenden Seiten des Probenvolumens angeordnet sind. Mindestens einer der beiden Kerne ist zumindest abschnittsweise von einer Spule umwickelt.

20

Offenbarung der Erfindung

Vor diesem Hintergrund wird mit der vorliegenden Erfindung ein Wirbelstromsensor sowie ein Verfahren zum Messen einer Kraft gemäß den
25 Hauptansprüchen vorgestellt. Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den jeweiligen Unteransprüchen und der nachfolgenden Beschreibung.

Zum Messen einer Kraft oder eines Drucks ist ein Gegenpart erforderlich, der einen definierten Widerstand gegen die zu messende Kraft oder den zu
30 messenden Druck erzeugt. Dabei kann eine Auslenkung des Gegenparts erfasst werden und es kann über eine Federkonstante oder einen äquivalenten Stoffwert auf die zu messende Kraft bzw. Kraft pro Fläche (Druck) geschlossen werden. Ebenso kann über die Auslenkung, die Federkonstante und eine Masse des Gegenparts auf eine anliegende Beschleunigung geschlossen werden. Die
35 Auslenkung des Gegenparts kann unmittelbar zum Messen eines Wegs erfasst werden.

Wirbelströme eignen sich zum Messen einer Auslenkung einer Oberfläche gegenüber einem Emitter, beispielsweise einer elektrischen Spule. Die Oberfläche kann gegenüber dem Emitter mittels einer Feder in Position gehalten werden und eine definierte Ruhelage einnehmen, wenn keine Kräfte auf die Oberfläche oder eine Rückseite der Oberfläche wirken. Wenn eine Kraft auf die Oberfläche oder die Rückseite der Oberfläche wirkt, wird die Feder elastisch verformt und eine Auslenkung der Oberfläche ist proportional zu der Kraft.

Ein Wirbelstromsensor weist die folgenden Merkmale auf:

eine elektrisch leitfähige Sensorspule zum Bereitstellen eines elektromagnetischen Wechselfelds;

eine Sensorfläche zum Beeinflussen des elektromagnetischen Wechselfelds, wobei die Sensorspule und die Sensorfläche beweglich zueinander angeordnet sind; und

ein Federelement, das mit der Sensorspule und der Sensorfläche gekoppelt ist oder durch die Sensorfläche gebildet wird und dazu ausgebildet ist, einer Relativbewegung zwischen der Sensorfläche und der Sensorspule mit einer Federkraft entgegenzuwirken.

Unter einem Wirbelstromsensor kann ein Kraftsensor, ein Drucksensor, ein Beschleunigungssensor oder ein Bewegungssensor verstanden werden. Der Wirbelstromsensor ist dazu ausgebildet, mittels dem Wirbelstromprinzip eine Messgröße in einem Messsignal abzubilden. Eine Sensorspule kann ein elektrischer Leiter sein, der in zumindest einer Windung angeordnet ist. Die Sensorspule kann eine Induktivität aufweisen. Die Sensorspule kann als Luftspule ohne Kern ausgeführt sein. Die Sensorspule kann als Flachspule in Form einer Spirale ausgeführt sein. Die Sensorspule kann auch als räumlich gewickelte Spule ausgeführt sein. Die Sensorspule kann von einem Wechselstrom durchflossen werden. Bei Stromfluss kann sich um die Sensorspule ein elektromagnetisches Wechselfeld aufbauen. Eine Sensorfläche kann eine elektrisch leitende Fläche sein, in der das elektromagnetische Wechselfeld der Sensorspule Wirbelströme induzieren kann. Die Wirbelströme

können wiederum ein eigenes elektromagnetisches Wechselfeld bewirken, das dem Wechselfeld der Sensorspule entgegengesetzt ausgerichtet ist, also dem Wechselfeld entgegenwirkt. Die elektromagnetischen Felder beeinflussen sich gegenseitig und stehen zueinander im Gleichgewicht. Die Sensorfläche kann auch ein eigenes Magnetfeld aufweisen. Das Magnetfeld kann ebenfalls das Wechselfeld der Sensorspule beeinflussen. Die Sensorfläche kann eine vorbestimmte Masse aufweisen. Ein Federelement kann biegsam sein und eine Kraft proportional zu einer Auslenkung entgegen der Auslenkung aufbringen. Beispielsweise kann das Federelement eine biegsame Membran sein, an der die Sensorfläche oder die Sensorspule befestigt ist. Das Federelement kann auch eine Biegefeder sein. Das Federelement kann in einem Kraftfluss zwischen der Sensorspule und der Sensorfläche angeordnet sein. Das Federelement kann die Sensorfläche in einem Ruhezustand beabstandet zu der Sensorspule halten. Die Sensorfläche kann im Wesentlichen in Richtung einer Achse durch die Pole der Sensorspule beweglich angeordnet sein. Das Federelement kann beispielsweise eine Tellerfeder sein. Eine Kopplung kann eine Anordnung in einem festen Abstand sein. Beispielsweise kann die Sensorspule von einem Gehäuse in einer vorbestimmten Relativposition zu einer ersten Kante des Federelements gehalten werden. Eine zweite Kante des Federelements kann mit der Sensorfläche verbunden sein. Ein bedeutender Parameter der gegenseitigen Beeinflussung ist ein Abstand zwischen der Sensorspule und der Sensorfläche. Aufgrund der Beeinflussung kann eine Spannung an der Sensorspule einen Phasenversatz zu dem Stromfluss in der Sensorspule aufweisen. Durch die Beeinflussung kann sich eine für den Abstand zwischen der Sensorspule und der Sensorfläche charakteristische Impedanz der Sensorspule einstellen. Wenn sich ein Abstand der Sensorspule zu der Sensorfläche ändert, dann ändert sich auch eine Größe der Beeinflussung und somit die Impedanz der Sensorspule. Diese Änderung kann über die Sensorspule, beispielsweise über eine Impedanzmessung erfasst werden. Über die Änderung kann der Abstand der Sensorspule zu der Sensorfläche ermittelt werden. Durch die Beeinflussung kann sich ferner eine für den Abstand zwischen der Sensorspule und der Sensorfläche charakteristische Resonanzfrequenz eines die Sensorspule umfassenden Sensorschwingkreises einstellen. Ebenso kann sich durch die Beeinflussung eine für den Abstand zwischen der Sensorspule und der Sensorfläche charakteristische Güte des die Sensorspule umfassenden Sensorschwingkreises einstellen. Die Impedanz der Sensorspule, die Resonanzfrequenz des

Sensorschwingkreises oder die Güte des Sensorschwingkreises bzw. eine beliebige Kombination davon kann unter Verwendung einer geeigneten Auswerteeinrichtung oder Messeinrichtung durch bekannte Verfahren bestimmt werden. Aus der Impedanz oder der Resonanzfrequenz oder der Güte jeweils für
5 sich alleine oder in Kombination kann auf den Abstand zwischen der Sensorspule und der Sensorfläche geschlossen werden, beispielsweise unter Verwendung vorbestimmter Referenzwerte.

Die Sensorspule kann feststehend ausgeführt sein und die Sensorfläche kann dazu ausgebildet sein, die Relativbewegung auszuführen. Ebenso kann die
10 Sensorfläche feststehend ausgeführt sein und die Sensorspule kann dazu ausgebildet sein, die Relativbewegung auszuführen. Ebenso können die Sensorfläche und die Sensorspule jeweils beweglich ausgeführt sein und ein Kräftegleichgewicht in einem oder mehreren Federelementen eine Position der
15 Sensorbestandteile bestimmen. Eine entsprechende Bauart des Wirbelstromsensors kann abhängig von einem Einsatzgebiet des Wirbelstromsensors gewählt werden.

Der Wirbelstromsensor kann eine Auswertespule zum Erfassen einer
20 Resonanzfrequenz und zusätzlich oder alternativ einer Güte eines die Sensorspule umfassenden Sensorschwingkreises aufweisen. Die Auswertespule kann in einem Einflussbereich der Sensorspule angeordnet sein. Die Auswertespule kann induktiv mit der Sensorspule gekoppelt sein. Über eine Auswertespule kann die Sensorspule drahtlos überwacht werden. Die
25 Auswertespule kann in einem Bereich außerhalb eines Einflussbereichs der Sensorfläche angeordnet sein. Dann kann die Veränderung des elektromagnetischen Wechselfelds ohne Beeinflussung der Messung erfasst werden. Der Sensorschwingkreis kann neben der Sensorspule eine Parasitärkapazität der Sensorspule umfassen. Zum Erfassen der
30 Resonanzfrequenz und zusätzlich oder alternativ der Güte des Sensorschwingkreises kann ein elektrisches Wechselfeld, beispielsweise ein Wechselstrom, an die Auswertespule angelegt werden. Durch eine induktive Kopplung zwischen der Auswertespule und der Sensorspule kann der die Sensorspule umfassende Sensorschwingkreis zu Schwingungen angeregt
35 werden. Dadurch kann sich ein Wechselstrom durch die Sensorspule ausbilden. Durch eine Änderung der Frequenz des an die Auswertespule angelegten

elektrischen Wechselsignals kann die Resonanzfrequenz des Sensorschwingkreises ermittelt werden. Dadurch kann beispielsweise eine Größe eines durch die Senserspule fließenden Wechselstroms ausgewertet werden. Die Resonanzfrequenz ist abhängig von einem Abstand zwischen der Sensorfläche und der Senserspule. Dabei variieren neben der Gegeninduktivität auch die ohmschen Verluste durch den Plattenabstand, also dem Abstand zwischen der Sensorfläche und der Senserspule. Somit kann unter Kenntnis der Resonanzfrequenz und zusätzlich oder alternativ unter Kenntnis der Güte auf den Abstand zwischen der Sensorfläche und der Senserspule geschlossen werden.

Die Senserspule kann elektrische Anschlüsse zum Erfassen einer Impedanz der Senserspule aufweisen. Die elektrischen Anschlüsse können zum Anlegen eines zur Erfassung der Impedanz geeigneten elektrischen Wechselsignals, beispielsweise eines Wechselstroms, an die Senserspule dienen. An den elektrischen Anschlüssen kann eine Spannung und/oder ein Stromfluss in der Senserspule abgegriffen werden. Eine Einrichtung zum Auswerten kann ein Signal erzeugen, das die Impedanz repräsentiert. Die Impedanz ist abhängig von einem Abstand zwischen der Sensorfläche und der Senserspule. Somit kann unter Kenntnis der Impedanz auf den Abstand zwischen der Sensorfläche und der Senserspule geschlossen werden.

Der Wirbelstromsensor kann eine benachbart zu der Senserspule angeordnete Referenzspule zum Bereitstellen eines Referenzfelds aufweisen. Weiterhin kann der Wirbelstromsensor eine benachbart zu der Sensorfläche angeordnete Referenzfläche zum Beeinflussen des Referenzfelds aufweisen. Die Referenzspule und die Referenzfläche können starr zueinander angeordnet sein. Durch eine Referenzspule und Referenzfläche können Umwelteinflüsse, wie Temperaturgang und elektromagnetische Störfelder kompensiert werden. Durch Referenzelemente kann der Wirbelstromsensor abgeglichen werden.

Der Wirbelstromsensor kann ein Gehäuse aufweisen, das eine Schnittstelle zum Befestigen des Wirbelstromsensors aufweist, wobei das Federelement, die Sensorfläche und alternativ oder ergänzend die Senserspule in dem Gehäuse angeordnet sind. Durch ein Gehäuse kann der Wirbelstromsensor an einem Messpunkt sicher befestigt werden. Das Gehäuse kann die Bestandteile des

Wirbelstromsensors zu einer leicht verwendbaren Einheit zusammenfassen. Das Gehäuse kann beispielsweise ein empfindliches Federelement vor schädlichen Einflüssen schützen.

5 Zwischen der Sensorspule und der Sensorfläche kann ein Gel angeordnet sein. Das Gel kann elektrisch isolierend sein. Das Gel kann beispielsweise einen Druck hydrostatisch weiterleiten. Das Gel kann elektrisch nichtleitend sein. Durch das Gel können Fremdkörper aus einem Zwischenraum zwischen der Sensorspule und der Sensorfläche ferngehalten werden.

10

Die Relativbewegung kann eine Kippbewegung sein. Die Kippbewegung kann beispielsweise über eine Wippe auf die Sensorspule oder die Sensorfläche übertragen werden. Beispielsweise kann die Wippe das Federelement, die Sensorspule oder die Sensorfläche und eine Wirkfläche umfassen. Die Wirkfläche kann beispielsweise von einem Medium beaufschlagbar angeordnet sein, während das Federelement eine Sensorkavität des Wirbelstromsensors von dem Medium abschirmt.

15

Der Wirbelstromsensor kann eine weitere Sensorspule aufweisen, die starr mit der Sensorspule gekoppelt ist. Der Wirbelstromsensor kann eine weitere Sensorfläche aufweisen, die starr mit der Sensorfläche gekoppelt ist. Durch weitere Bauteile, die das elektromagnetische Wechselfeld beeinflussen, kann ein Signal in der Sensorspule verstärkt werden.

20

25 Die Sensorfläche und das Federelement können durch einen flexiblen Bereich eines metallischen Grundkörpers ausgebildet sein, wobei der Grundkörper einstückig und nahtfrei ausgeführt ist und eine Sensorkammer aufweist, wobei der flexible Bereich eine Wand der Sensorkammer ausbildet. Der Grundkörper, das Federelement und die Sensorfläche können nahtlos und einstückig ausgeführt werden, um eine besonders gute Druckfestigkeit und Dauerfestigkeit zu erreichen. Die Sensorkammer kann aus dem Grundkörper beispielsweise ausgebohrt werden.

30

Der Wirbelstromsensor kann eine weitere elektrisch leitfähige Sensorspule zum Bereitstellen eines weiteren elektromagnetischen Wechselfelds aufweisen. Weiterhin kann der Wirbelstromsensor eine weitere Sensorfläche zum

35

Beeinflussen des weiteren elektromagnetischen Wechselfelds aufweisen, wobei die weitere Sensorspule und die weitere Sensorfläche beweglich zueinander angeordnet sind. Der Wirbelstromsensor kann ein weiteres Federelement aufweisen, das mit der weiteren Sensorspule und der weiteren Sensorfläche gekoppelt ist oder durch die weitere Sensorfläche gebildet wird, und dazu ausgebildet ist, einer weiteren Relativbewegung zwischen der weiteren Sensorfläche und der weiteren Sensorspule mit einer weiteren Federkraft entgegenzuwirken. Durch eine weitere Messeinheit in dem gleichen Wirbelstromsensor kann eine Redundanz erzeugt werden, die zu einer erhöhten Messsicherheit führt. Dann kann der Wirbelstromsensor auch bei einem Defekt an einer der Messeinheiten funktionsfähig bleiben.

Ein Verfahren zum Messen einer Kraft umfasst die folgenden Schritte:

Bereitstellen eines elektromagnetischen Wechselfelds mittels einer elektrisch leitfähigen Sensorspule;

Beeinflussen des elektromagnetischen Wechselfelds mittels einer Sensorfläche, wobei die Sensorspule und die Sensorfläche beweglich zueinander angeordnet sind;

Bereitstellen einer Federkraft entgegen einer Relativbewegung zwischen der Sensorspule und der Sensorfläche mittels einem Federelement, das mit der Sensorspule und der Sensorfläche gekoppelt ist;

Erfassen einer Veränderung des elektromagnetischen Wechselfelds; und

Ermitteln der Kraft unter Verwendung der Veränderung.

Im Schritt des Bereitstellens des elektromagnetischen Wechselfelds kann ein Referenzfeld mittels einer Referenzspule bereitgestellt werden. Im Schritt des Beeinflussens kann das Referenzfeld mittels einer Referenzfläche beeinflusst werden, wobei die Referenzspule und die Referenzfläche starr zueinander angeordnet sind. Im Schritt des Erfassens kann eine Veränderung des Referenzfelds erfasst werden. Im Schritt des Ermitteln kann die Kraft ferner unter Verwendung der Veränderung des Referenzfelds ermittelt werden. Durch

eine Referenz, die unbeeinflusst von der Relativbewegung ist, können beispielsweise Montagetoleranzen oder ein Temperaturgang des Wirbelstromsensors kompensiert werden. Ebenso können Störungen des elektromagnetischen Felds beispielsweise von Störquellen von außerhalb kompensiert werden. Dazu kann beispielsweise die Veränderung des Referenzfelds von der Veränderung des elektromagnetischen Wechselfelds subtrahiert werden, um ein kompensiertes Signal zu erhalten.

Die Erfindung wird nachstehend anhand der beigefügten Zeichnungen beispielhaft näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 ein Blockschaltbild eines Wirbelstromsensors gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

Fig. 2 ein Ablaufdiagramm eines Verfahrens zum Messen einer Kraft gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

Fig. 3 ein Diagramm einer Verschiebung der Resonanzfrequenz bei einer Änderung eines elektromagnetischen Wechselfelds gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

Figuren 4a bis 4c schematische Darstellungen eines Wirbelstromsensors gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in unbeaufschlagten Zustand und in beaufschlagtem Zustand;

Figuren 5a bis 5c schematische Darstellungen eines Wirbelstromsensors gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in unbeaufschlagten Zustand und in beaufschlagtem Zustand;

Fig. 6 eine schematische Darstellung eines Wirbelstromsensors mit redundantem Aufbau gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

Fig. 7 eine schematische Darstellung eines Wirbelstromsensors mit redundantem Aufbau gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

Figuren 8a und 8b schematische Darstellungen eines Wirbelstromsensors gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung, der in Oberflächenmikromechanik ausgeführt ist;

5

Figuren 9a und 9b schematische Darstellungen eines Wirbelstromsensors mit einer Auswertespule zum drahtlosen Auswerten des Wirbelstromsensors für eine Frequenzauswertung des Realteils gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in unbeaufschlagten Zustand und in beaufschlagtem Zustand;

10

Fig. 10 eine Darstellung eines Wirbelstromsensors mit einer Verlagerung der Koppelspulen nach außen zur Optimierung der Kopplung ohne Wirbelstromverluste im Koppelpfad;

15

Figuren 11a und 11b schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors als Differenzdrucksensor gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in unbeaufschlagten Zustand und in beaufschlagtem Zustand;

20

Figuren 12a und 12b schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors als Differenzdrucksensor gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit einer Befüllung der Kavität mit einem Fluid, welches nicht leitfähig ist;

25

Figuren 13a und 13b schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors als Differenzdrucksensor gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit einer Befüllung der Kavität mit einem Fluid, welches nicht leitfähig ist;

30

Figuren 14a und 14b schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors als Differenzdrucksensor mit umgekehrter Spulenanordnung gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit einer Befüllung der Kavität mit einem Fluid, welches nicht leitfähig ist;

35

Figuren 15a und 15b schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors als Differenzdrucksensor mit umgekehrter Spulenordnung gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit einer Befüllung der Kavität mit einem Fluid, welches nicht leitfähig ist;

5

Figuren 16a und 16b schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors als Differenzdrucksensor in Vollwippenbauart gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in unbeaufschlagten Zustand und in beaufschlagtem Zustand;

10

Fig. 17 eine Darstellung eines Wirbelstromsensors als Differenzdrucksensor in Halbwippenbauart gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

15

Figuren 18a bis 18c schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors als Differenzdrucksensor mit einem Druckanschluss nur von einer Seite gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

20

Figuren 19a und 19b schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors als Differenzdrucksensor in Brückenbauart gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in unbeaufschlagten Zustand und in beaufschlagtem Zustand;

25

Figuren 20a und 20b schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors als Differenzdrucksensor in Brückenbauart mit einer zweiten Sensorspule gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in unbeaufschlagten Zustand und in beaufschlagtem Zustand;

30

Figuren 21a und 21b schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors als Differenzdrucksensor in Gitterbauart gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in unbeaufschlagten Zustand und in beaufschlagtem Zustand;

35

Figuren 22a bis 22c schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors als Differenzdrucksensor in Wippenbauart gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

Figuren 23a und 23b Varianten eines iBolt (Weight Sensor) mit einem Wirbelstromsensor gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

5

Fig. 24 eine Darstellung eines Drucksensors;

Fig. 25 eine Darstellung einer Brückenschaltung von vier Dehnmessstreifen;

10

Fig. 26 eine Darstellung eines Drucksensors mit einem Wirbelstromsensor gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

Figuren 27a und 27b eine räumliche Darstellung eines redundanten Wirbelstromsensors gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

15

Figuren 28a und 28b Ansichten eines redundanten Wirbelstromsensors gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung; und

20

Figuren 29a und 29b Darstellungen eines Wirbelstromsensors gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

In der nachfolgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden für die in den verschiedenen Figuren dargestellten und ähnlich wirkenden Elemente gleiche oder ähnliche Bezugszeichen verwendet, wobei auf eine wiederholte Beschreibung dieser Elemente verzichtet wird.

25

Fig. 1 zeigt ein Blockschaltbild eines Wirbelstromsensors 100 gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Der Wirbelstromsensor 100 weist eine Sensorspule 102, eine Sensorfläche 104 und ein Federelement 106 auf. Die Sensorspule 102 ist eine elektrisch leitfähige Spule zum Bereitstellen eines elektromagnetischen Wechselfelds 108, wenn die Sensorspule 102 von einem Wechselstrom 110 durchflossen wird. Die Sensorfläche 104 zum Beeinflussen des elektromagnetischen Wechselfelds 108 elektrisch leitfähig oder magnetisch. Die Sensorspule 102 und die Sensorfläche 104 sind beweglich

30

35

zueinander angeordnet. Das Federelement 106 ist mit der Sensorspule 102 und der Sensorfläche 104 gekoppelt. Das Federelement 106 ist dazu ausgebildet, einer Relativbewegung 112 zwischen der Sensorfläche 104 und der Sensorspule 102 mit einer Federkraft 114 entgegenzuwirken. Wenn die Sensorspule 102 und die Sensorfläche 104 eine Relativbewegung 112 zueinander ausführen, ändert sich das elektromagnetische Wechselfeld 108. Durch die Änderung des Wechselfelds 108 ergibt sich eine Änderung 116 im Stromfluss 110 und/oder einer Spannung an der Sensorspule 102. Die Änderung 116 kann ausgewertet werden, um die Relativbewegung 112 messen zu können.

Mit anderen Worten zeigt Fig. 1 einen Wirbelstromsensor 100 zur Detektion von Kraft, Druck oder Beschleunigung beispielsweise in MEMS-Ausführung, also in Mikrosystemtechnik.

Das Grundprinzip des Wirbelstrommessverfahrens basiert auf der Induktionswirkung von Wirbelströmen, die in leitfähigen Prüfobjekten induziert werden. Hierbei wird eine Spule 102 mit Wechselstrom 110 gespeist, worauf sich ein Magnetfeld 108 um die Spule 102 ausbildet. Befindet sich ein elektrisch leitender Gegenstand 104 in diesem Magnetfeld 108, entstehen darin gemäß dem faradayschen Induktionsgesetz Wirbelströme. Die Wirbelströme sind ihrerseits von einem Magnetfeld 108 umgeben. Das Eigenfeld dieser Wirbelströme wirkt entsprechend der lenzschen Regel dem Feld 108 der Spule 102 entgegen, was eine Änderung 116 der Spulenimpedanz nach sich zieht. Diese abstandsabhängige Impedanzänderung 116 lässt sich durch Amplitudenänderung der Sensorspule 102 als messbare Größe messen. Das Verfahren ist bei allen elektrisch leitenden Materialien 104 einsetzbar. Da Wirbelströme Isolatoren ungehindert durchdringen, können sogar Metalle hinter einer isolierenden Schicht als Messobjekt 104 dienen.

Bei dem hier vorgestellten Ansatz wird eine Wirbelstromspule 102 (Wirbelstromprinzip) mit einem Gegenpart 104 eines mikromechanischen oder makroskopischen Sensors 100 zur Bestimmung einer Kraft, einem Druck oder einer Beschleunigung kombiniert. Je nach Ausführungsform kann das Sensorsignal 116 auch kontaktlos über z. B. induktive Kopplung ausgelesen werden. Die Wirbelstromspule 102 kann dabei z. B. im Leiterplatten-Design gefertigt werden. Anschließend können entweder die Spule 102 und die Sensor-

Fläche 104 in einen fixen Abstand zueinander positioniert werden, oder die Leiterplatte kann direkt auf den Sensor 100 aufgebracht werden.

Die Wirbelstromspule 102 kann direkt in einer Lage des MEMS Sensorelements 100 integriert werden. Vorteil dieser Variante ist ein sehr exakter Abstand von der Spule 102 zur beweglichen Sensorfläche 104. Hierbei ist eine Vielzahl von Sensorvarianten möglich, beispielsweise ein Beschleunigungssensor, ein Kraftsensor, ein Absolutdrucksensor, ein Differenzdrucksensor, ... Als Auswertesignal 116 kann nicht nur die Impedanz der Spule 102 betrachtet werden, sondern es besteht ferner die Möglichkeit, die Resonanzfrequenz des Schwingkreises zu bestimmen.

Durch den hier vorgestellten Ansatz kann ein Wirbelstromsensor 100 mit einem sehr simplen Aufbau realisiert werden. Die Spule 102 und die veränderte Position der leitfähigen Fläche 104, welche die Wirbelstromverluste induziert, müssen elektrisch nicht kontaktiert sein. Dadurch sind solche Sensoren 100 zu einem äußerst attraktiven Preis realisierbar. Mit den Wirbelstromsensoren 100 können sowohl sehr schnelle als auch sehr hoch auflösende Ausführungen realisiert werden. Im Vergleich zu Hall-Sensoren können z. B. deutlich größere Messbereiche, über 60 mm erreicht werden. Das Messsignal 116 des Wirbelstromsensors 100 ist unempfindlich gegen Schmutz, Staub, Feuchte, Öl. Ferner ist der Wirbelstromsensor 100 auch relativ störsicher im elektromagnetischen Umfeld. Im Vergleich zu kapazitiven Auswerteverfahren ist die Querempfindlichkeit gegenüber Feuchte gering. Ein Wirbelstromsensor 100 gemäß dem hier vorgestellten Ansatz zeigt charakteristische Merkmale wie eine Impedanzänderung (oder Frequenzverschiebung) bei einer Beschleunigung bzw. Druck- und Krafteinwirkung auf das Sensorelement 104.

Durch das hier vorgestellte neue Sensorkonzept auf Basis des Wirbelstromprinzips können Sensoren 100 für fast alle Applikationsbereiche bereitgestellt werden. Prinzipiell können kapazitive, resistive und viele hallbasierte Sensoren ersetzt werden. Im Hauptfokus stehen jedoch die Drucksensor-Anwendungen.

Fig. 2 zeigt ein Ablaufdiagramm eines Verfahrens 200 zum Messen einer Kraft gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Das Verfahren

weist einen Schritt des Bereitstellens 202, einen Schritt des Beeinflussens 204, einen weiteren Schritt des Bereitstellens 206, einen Schritt des Erfassens 208 und einen Schritt des Ermitteln 210 auf. Das Verfahren 200 kann unter Verwendung eines Wirbelstromsensors, wie er in Fig. 1 beschrieben ist, ausgeführt werden. Im Schritt 202 des Bereitstellens wird ein elektromagnetisches Wechselfeld 108 mittels einer elektrisch leitfähigen Sensorspule bereitgestellt. Im Schritt 204 des Beeinflussens wird das elektromagnetische Wechselfeld 108 mittels einer Sensorfläche beeinflusst. Die Sensorspule und die Sensorfläche sind beweglich zueinander angeordnet. Im weiteren Schritt 206 des Bereitstellens wird eine Federkraft 114 entgegen einer Relativbewegung zwischen der Sensorspule und der Sensorfläche mittels einem Federelement bereitgestellt, das mit der Sensorspule und der Sensorfläche gekoppelt ist. Im Schritt 208 des Erfassens wird eine Veränderung 116 des elektromagnetischen Wechselfelds 108 erfasst. Im Schritt 210 des Ermitteln wird die Kraft unter Verwendung der Veränderung 116 ermittelt.

Fig. 3 zeigt ein Diagramm einer Verschiebung einer Resonanzfrequenz bei einer Änderung eines elektromagnetischen Wechselfelds gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Auf der Abszisse ist eine ansteigende Frequenz angetragen. Auf der Ordinate ist ein ansteigender Realteil eines Signals angetragen. In dem Diagramm sind ein erster Amplitudenverlauf 300 und ein zweiter Amplitudenverlauf 302 dargestellt. Die Amplitudenverläufe 300, 302 repräsentieren je einen realen Anteil eines Signalwerts während je eines Frequenzdurchlaufs in einem nebenstehend abgebildeten Reihenschwingkreis aus einer Kapazität C, einer Induktivität $L_{(p)}$ und einem Widerstand R. Die Induktivität $L_{(p)}$ entspricht dabei der Sensorspule aus dem Wirbelstromsensor gemäß dem hier vorgestellten Ansatz. Die Sensorspule verändert ihren Induktivitätswert ansprechend auf eine Lageänderung Δp der Sensorfläche. Bei geänderter Induktivität weist der Schwingkreis eine geänderte Resonanzfrequenz auf. In einem Frequenzbereich oberhalb und unterhalb der Resonanzfrequenz weist die Signalstärke einen starken Anstieg bis zu einem Maximum bei der Resonanzfrequenz auf. In Resonanz ist die Amplitude um ein Vielfaches höher als außerhalb des Frequenzbereichs. Durch ein Bestimmen der Resonanzfrequenz kann auf eine Lage der Sensorfläche, beispielsweise durch einen Druckeinfluss, relativ zu der Sensorspule geschlossen werden.

Die folgenden Figuren zeigen Schnittdarstellungen durch Wirbelstromsensoren gemäß verschiedenen Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung.

Die Figuren 4a und 4b zeigen eine Darstellung eines Wirbelstromsensors 100 gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Wie anhand von Fig. 1 bereits beschrieben, weist der Wirbelstromsensor 100 eine Spule 102, eine Sensorfläche 104, ein Federelement 106 und zusätzlich ein Gehäuse 400 mit einer Druckkammer auf. Die Sensorfläche 104 und das Federelement 106 sind Teil des Gehäuses 400 oder mit dem Gehäuse 400 verbunden.

Fig. 4a zeigt den Wirbelstromsensor 100 in ungespanntem Zustand. Dies resultiert daraus, dass in der Druckkammer im Inneren des Gehäuses 400 kein Überdruck herrscht. Die Sensorfläche 104 ist daher in einer Ausgangslage und das Federelement 106 befindet sich in einer Ausgangsform. Zwischen der Spule 102 und der Sensorfläche 104 besteht ein Ausgangsabstand.

Fig. 4b zeigt den Wirbelstromsensor 100 in einem gespannten Zustand. In der Druckkammer im Inneren des Gehäuses 400 herrscht Überdruck, wodurch sich das Federelement 106 verformt. Die Sensorfläche 104 wird näher an die Spule 102 gedrückt. Durch die Annäherung der Sensorfläche 104 an die Spule 102 verändert sich das elektromagnetische Wechselfeld in der Spule 102.

Fig. 4c zeigt eine Draufsicht auf die Sensorfläche 104. Die Sensorfläche weist eine quadratische Form auf. Wirbelströme 402 sind konzentrisch zu der Sensorfläche ausgerichtet.

In dem Ausführungsbeispiel der Figuren 4a, 4b und 4c ist die Spule 102 als zylinderförmige Luftspule ausgebildet. Wenn die Luftspule von Wechselstrom gespeist wird, bildet sich ein Magnetfeld um die Spule aus. Das emittierte elektromagnetische Wechselfeld weist eine gestreckte Form auf. Das elektromechanische Wechselfeld reicht über die Pole der Spule hinaus und durchdringt die Sensorfläche 104. In der Sensorfläche 104 erzeugt das elektromagnetische Wechselfeld Wirbelströme, die ihrerseits elektromagnetische Felder bewirken, aber dem verursachenden elektromagnetischen Feld entgegengerichtet sind. Dadurch beeinflussen sich die Felder und es stellt sich

ein Gleichgewicht ein. Im Gegensatz zu dem Wirbelstromsensor in Fig. 1 ist eine kraftschlüssige Verbindung zwischen dem Federelement 106 und der Sensorspule 102 nicht dargestellt. Das Federelement 106 und die Sensorfläche 104 sind in einer Ebene angeordnet. Das Federelement 106 umschließt die Sensorfläche 104. Die Sensorfläche 104 ist dicker als das Federelement 106, damit ist die Sensorfläche 104 biegesteifer als das Federelement. Das Federelement 106 ist auf einer Außenseite an einem Gehäuse 400 befestigt. An einer Innenseite ist das Federelement 106 mit der Sensorfläche 104 verbunden. Durch das Federelement 106 ist die Sensorfläche 104 beweglich mittig in dem Gehäuse 400 angeordnet. Das Gehäuse 400 ist an einer Schnittstelle mit einem Messpunkt befestigt. Die Schnittstelle weist eine Dichtfläche auf, die das Gehäuse 400 druckdicht mit dem Messpunkt verbindet. Ein Inneres des Gehäuses 400 ist über eine Öffnung am Messpunkt mit einem zu messenden Volumen verbunden. Eine von der Sensorspule 102 abgewandte Seite der Sensorfläche 104 ist als Rückwand des Inneren des Gehäuses 400 ausgebildet. Durch die Öffnung steht das Innere des Gehäuses 400 unter dem gleichen Druck, wie das Volumen. Der Druck wirkt auf die abgewandte Seite Sensorfläche 104. Der Wirbelstromsensor 100 ist in diesem Ausführungsbeispiel dazu ausgebildet, den Druck in dem Gehäuse 400 zu erfassen.

Der Sensoraufbau ist als Schnittdarstellung dargestellt. Der Sensor 100 besteht aus einer drucksensitiven Membran 106, die beim Anlegen von Druck p verformt wird. Eine Spule 102 (dreidimensional oder flach) wird hierbei in die Nähe einer metallisch leitfähigen Oberfläche 104 positioniert. Die elektrisch leitende Oberfläche 104 bildet Wirbelströme aus, die wiederum ein Feld bilden. Dieses Feld wirkt dem Feld der Spule 102 entgegen, was zu einer Änderung der Spulenimpedanz führt. Die Impedanz lässt sich z. B. als Änderung der Amplitude und der Phasenlage von Strom und Spannung in der Spule 102 messen. Unter Druckeinwirkung verformt sich die Oberfläche 106, und der Abstand zur Spule 102 verändert sich. Das verformende Element 106 kann hierbei ein MEMS-Sensor oder z. B. eine metallisch geformte Form sein. Alternativ kann statt der leitfähigen Oberfläche 104 eine magnetische Schicht aufgebracht werden, die zu einer Veränderung der Permeabilität der Spule 102 führt.

Die Figuren 5a und 5b zeigen schematische Darstellungen eines Wirbelstromsensors 100 gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der

vorliegenden Erfindung. Der Wirbelstromsensor 100 entspricht dabei dem in den Figuren 4a bis 4c gezeigten Wirbelstromsensor. Dabei zeigt die Fig. 5a den Wirbelstromsensor 100, ohne dass er von Druck beaufschlagt ist und die Fig. 5b zeigt den Wirbelstromsensor 100 von Druck beaufschlagt.

5

Fig. 5c zeigt eine Draufsicht auf die flache Sensorspule 102. Die Sensorspule 102 ist als ebene, rechteckige Spirale ausgebildet.

10

In dem in den Figuren 5a, 5b und 5c gezeigten Ausführungsbeispiel weist der Wirbelstromsensor 100 im Gegensatz zu dem in den Figuren 4a bis 4c gezeigten Wirbelstromsensor eine flache Luftspule als Sensorspule 102 auf. Das von der Sensorspule 102 emittierte elektromagnetische Wechselfeld weist eine flache Form auf und durchdringt die Sensorfläche 104 großflächig.

15

20

Fig. 6 zeigt eine schematische Darstellung eines Wirbelstromsensors 100 mit redundantem Aufbau gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Der Wirbelstromsensor 100 ist druckbeaufschlagt dargestellt. Im Wesentlichen entspricht der Wirbelstromsensor 100 dem Wirbelstromsensor in in den Figuren 5a bis 5c gezeigten Sensor. Der Wirbelstromsensor 100 weist eine flache Sensorspule 102, eine Sensorfläche 104 und ein Federelement 106 auf. Die Sensorfläche 104 wird von dem Federelement 106 in einem Gehäuse 400 gehalten. Das Gehäuse 400 ist seitlich erweitert. Dort ist eine Referenzfläche 600 angeordnet. Die Referenzfläche 600 ist starr mit dem Gehäuse 400 verbunden und ist ausgerichtet, wie die Sensorfläche 104. Über der Referenzfläche 600 ist in einer Ebene mit der Sensorspule 102 eine Referenzspule 602 angeordnet. Die Referenzspule 602 ist gleich wie die Sensorspule 102 ausgeführt und weist die Form einer flachen Spule auf. Die Referenzspule 602 emittiert ein Referenzfeld, das die Referenzfläche 600 durchdringt und Wirbelströme hervorruft. Die Referenzelemente entsprechen damit den Sensorelementen des Wirbelstromsensors 100. Die flache Referenzspule 602 ist zur Kompensation der Temperatur bzw. Störeinflüsse redundant zur Sensorspule 102 aufgebaut. Eine Kalibrierung ist beispielsweise möglich, wenn ein definierter Zustand eintritt, z. B. wenn kein Druck anliegt.

25

30

35

Der exakte Abstand zwischen beiden Komponenten 102, 104 ist hierbei von außerordentlicher Wichtigkeit, da eine Veränderung direkt zu einem Sensorsignal

führt. Deshalb wird in Fig. 6 und Fig. 7 ein redundanter Aufbau gezeigt, um eine Kompensation von möglichen Temperatureinflüssen zu ermöglichen.

Fig. 7 zeigt eine schematische Darstellung eines Wirbelstromsensors 100 mit redundantem Aufbau gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Wie auch in Fig. 6 gezeigt weist der Wirbelstromsensor 100 zusätzlich zu der Sensorspule 102, der Sensorfläche 104 und dem Federelement 106 eine Referenzfläche 600 und eine Referenzspule 602 auf. Anders als in Fig. 6 sind die Sensorspule 102 und die Referenzspule 602 in das Gehäuse 400 integriert. Damit zeigt Fig. 7 einen in sich abgeschlossenen Wirbelstromsensor 100. Die Sensorfläche 104 und die Referenzfläche 600 sind in abgeschlossenen Hohlräumen angeordnet und somit vor Verschmutzung geschützt. Durch die Integration weist das Gehäuse 400 des Wirbelstromsensors 100 eine eckige Form auf. Der Abschluss des Hohlraumes kann z. B. durch eine Platine erzeugt werden, die gleichzeitig auch als Träger für die Spule 102 dient und im Standardverfahren für Platinen hergestellt werden kann. Es kann sich somit um eine Platine mit aufstrukturierter Spule 102 handeln.

Die Figuren 8a und 8b zeigen schematische Darstellungen eines Wirbelstromsensors 100 gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung, der in Oberflächenmikromechanik ausgeführt ist. Der Wirbelstromsensor 100 ist wie in Fig. 7 gezeigt mit einem geschlossenen Gehäuse 400 ausgeführt. Fig. 8a zeigt den Wirbelstromsensor 100 in entspanntem Zustand und Fig. 8b zeigt den Wirbelstromsensor 100 in druckbeaufschlagten Zustand.

Anders als in Fig. 7 weist der in den Figuren 8a und 8b gezeigte Wirbelstromsensor 100 keine Referenzelemente auf. Der Wirbelstromsensor 100 ist als Absolutdrucksensor ausgebildet. Die Sensorspule 102 ist hier in eine abschließende Lage beispielsweise aus Oxidmaterial integriert. Die Kontaktierung der Sensorspule 102 erfolgt dabei über ebenfalls in das Oxid integrierte Bondpads, die über Bonddrähte mit der Auswerteschaltung verbunden werden.

Somit kann die Wirbelstromspule 102 direkt in den Sensor 100 integriert werden. Dies kann beispielsweise in Oberflächenmikromechanik realisiert werden. Die

Spule 102 befindet sich dabei in der obersten Lage, die aus in einem Isolatormaterial z. B. Siliziumoxid besteht. Die Spule 102 selbst kann z. B. über einen Sputterprozess abgeschieden werden z. B. aus Alu, Kupfer oder Gold mittels Galvanik (elektrochemische Abscheidung).

5

Die Figuren 9a und 9b zeigen den in den Figuren 8a und 8b gezeigten Wirbelstromsensor 100 mit einer zusätzlichen Auswertespule 900. Fig. 9a zeigt den Wirbelstromsensor 100 in entspanntem Zustand und Fig. 9b zeigt den Wirbelstromsensor 100 in druckbeaufschlagten Zustand.

10

Die in den Figuren 9a und 9b gezeigte Auswertespule 900 ist als flache Spule über der Senserspule 102 angeordnet und ein von der Auswertespule 900 emittiertes Magnetfeld wird von dem elektromagnetischen Wechselfeld der Senserspule beeinflusst. In dem Magnetfeld ergeben sich Änderungen, die Änderungen des elektromagnetischen Wechselfelds widerspiegeln. Über die Auswertespule 900 kann der Wirbelstromsensor drahtlos ausgelesen werden. Die drahtlose Frequenzauswertung erfolgt durch die induktive Kopplung. In einem Schwingkreis mit hoher Güte ist dazu nur die Parasitärkapazität der Spulenwindung 102 vorgesehen. Eine Anpassung der Arbeitsfrequenz mit integrierten Kondensatorstrukturen ist ebenfalls möglich. Über die weitere Spule 900 kann die Resonanzfrequenz des Sensorschwingkreises dieser MEMS-Variante drahtlos ausgelesen werden.

15

20

25

30

Fig. 10 zeigt eine Darstellung eines Wirbelstromsensors 100 mit einer Verlagerung der Koppelspulen 900 nach außen zur Optimierung der Kopplung ohne Wirbelstromverluste im Koppelpfad. Der Wirbelstromsensor 100 entspricht dabei im Wesentlichen der Beschreibung in den Figuren 9a und 9b. Die Senserspule 102 weist einen Fortsatz 1000 in Form einer weitem Spule auf, der konzentrisch um die Senserspule 102 angeordnet ist. Der Fortsatz ist außerhalb des Einflussbereichs der Sensorfläche 104 angeordnet. Wie bei dem Wirbelstromsensor in den Figuren 9a und 9b wird eine Änderung der Resonanzfrequenz des Sensorschwingkreises Wechselfelds mit Hilfe einer Auswertespule 900 ermittelt. Die Auswertespule 900 ist seitlich versetzt zu der Senserspule 102, oberhalb des Fortsatzes 1000 angeordnet.

35

Um die Kopplung der Auswertespule 900 zu optimieren, kann die Koppelspule 1000 nach außen verlagert werden. Hierfür kann die druckabhängige Spulenimpedanz mit der außen liegenden Spule 1000 in Reihe geschaltet werden. Ein redundanter Aufbau, wie er in den Figuren 6 und 7 dargestellt ist, kann ebenfalls genutzt werden.

Die Figuren 11a und 11b zeigen schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors 100 als Differenzdrucksensor gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in unbeaufschlagtem Zustand und in beaufschlagtem Zustand. Der Wirbelstromsensor 100 entspricht der Beschreibung in den Figuren 8a und 8b.

Fig. 11a zeigt den Wirbelstromsensor 100 in entspanntem Zustand.

Fig. 11b zeigt den Wirbelstromsensor 100 in druckbeaufschlagtem Zustand. Dabei ist ein Druck p_1 größer als ein Druck p_2 . Die Sensorfläche 104 ist in Richtung Sensorspule 102 gedrückt.

In den Figuren 11a und 11b ist die abschließende Lage, in der die Sensorspule 102 angeordnet ist, im Unterschied zu den Figuren 8a und 8b durchbrochen. Durch eine Öffnung 1100 in der Lage kann ein Druckaustausch mit einer Umgebung stattfinden. Durch die Öffnung 1100 können auf den gegenüberliegenden Seiten der Sensorfläche 104 unterschiedliche Drücke p_1 und p_2 auf die Sensorfläche 104 wirken. Wenn die Drücke p_1 und p_2 unterschiedliche Werte aufweisen, wirken unterschiedliche Kräfte auf die Sensorfläche 102. Der Federkörper 106 wird mit einer Differenz der Kräfte ausgelenkt. Der veränderte Abstand zwischen der Sensorspule 102 und der Sensorfläche 104 ist proportional zu der Druckdifferenz.

Der Differenzdrucksensor kann ebenfalls durch einen Wirbelstromsensor 100 umgesetzt werden. In der einfachsten Variante kann der obere Bereich der Spulenmembran 102 geöffnet werden, wie in den Figuren 11a und 11b kommt es zu einem Differenzdruck zwischen den beiden Drücken p_1 und p_2 , wird die Membran 106 verbogen und aus der Ruhelage verschoben. In diesem Fall kommt es zu einer Änderung des Abstandes zu der gegenüberliegenden Spule 102.

Durch die frei zugängliche Kavität kann es zu Ablagerungen kommen, die das Sensorsignal beeinflussen könnten. Um dies zu optimieren, kann die Kavität mit einem nicht leitfähigen Gel gefüllt werden, wie in den folgenden Figuren dargestellt ist.

Die Figuren 12a und 12b zeigen schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors 100 als Differenzdrucksensor gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit einer Befüllung der Kavität mit einem Fluid, welches nicht leitfähig ist. Der Wirbelstromsensor 100 weist eine Sensorspule 102, eine Sensorfläche 104 und ein Federelement auf. Fig. 12a zeigt einen Schnitt durch den Wirbelstromsensor 100 in einer zweidimensionalen Darstellung. Fig. 12b zeigt den Schnitt durch den Wirbelstromsensor 100 in einer räumlichen Darstellung.

In den Figuren 12a und 12b weist der Wirbelstromsensor 100 eine flache, viereckige Gestalt auf. Auf einem zentral in dem Wirbelstromsensor 100 angeordneten, starren Träger 1200 ist die Sensorspule 102 angeordnet. Die Sensorspule 102 erstreckt sich über eine Oberseite des Trägers 1200. Gegenüber der Sensorspule 102, auf einer anderen Seite eines Spalts ist an einer biegsamen Kappe 1202 die Sensorfläche 104 angeordnet. Die Kappe übernimmt hier die Funktion des Federelements. Die Sensorfläche 104 ist in einem Einflussbereich eines elektromagnetischen Wechselfelds der Sensorspule 102 angeordnet. Die Kappe 1202 erstreckt sich seitlich über die Sensorfläche 104 hinaus und bildet nach unten einen Rand aus, dessen Unterkante mit einer Unterkante des Trägers 1200 abschließt. Zwischen dem Träger 1200 und der Kappe 1202 befindet sich eine Sensorkavität 1204 von der der Spalt ein Teil ist. Die Sensorkavität 1204 ist großteils mit einem gelartigen Fluid gefüllt, das keinen Einfluss auf das elektromagnetische Wechselfeld ausübt. Wenn ein Druck p_1 auf das Fluid ausgeübt wird, dann drückt das Fluid gegen die Kappe 1202 und ist bestrebt, den Spalt aufzuweiten. Wenn ein Druck p_2 auf eine Rückseite der Kappe 1202 wirkt, dann wirkt er entgegengesetzt zu dem Druck p_1 und ist bestrebt, den Spalt zu verengen.

Die Spule 102 kann hierbei in der obersten Lage oder auch vergraben bzw. versenkt angeordnet werden.

Die Figuren 13a und 13b zeigen schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors 100 als Differenzdrucksensor gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit einer Befüllung der Kavität mit einem Fluid, welches nicht leitfähig ist. Fig. 13a zeigt einen Schnitt durch den Wirbelstromsensor 100 in einer zweidimensionalen Darstellung. Fig. 13b zeigt den Schnitt durch den Wirbelstromsensor 100 in einer räumlichen Darstellung.

Wie in den Figuren 12a und 12b gezeigt ist die Sensorkavität 1204 in dem in den Figuren 13a und 13b gezeigten Ausführungsbeispiel mit einem Fluid gefüllt. Im Unterschied zu dem in den Figuren 12a und 12b gezeigten Wirbelstromsensor ist der Träger hier in zwei Teilstücke 1300, 1302 geteilt und mit dem Rand der Kappe 1202 verbunden. Zwischen den Teilstücken 1300, 1302 ist ein sich verengender Einschnitt 1304 angeordnet durch den der Druck p_1 auf das Fluid wirken kann. Wie der Träger 1200 ist auch die Senserspule 102 zweigeteilt. Die Sensorfläche 104 erstreckt sich näherungsweise über die ganze Fläche der Kappe 1202.

Die Figuren 14a und 14b zeigen schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors 100 als Differenzdrucksensor mit umgekehrter Spulenordnung gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Fig. 14a zeigt einen Schnitt durch den Wirbelstromsensor 100 in einer zweidimensionalen Darstellung. Fig. 14b zeigt den Schnitt durch den Wirbelstromsensor 100 in einer räumlichen Darstellung.

Der Wirbelstromsensor 100 weist in den Figuren 14a und 14b eine Befüllung der Kavität mit einem Fluid auf, welches nicht leitfähig ist. Der Wirbelstromsensor 100 entspricht den in den Figuren 12a und 12b gezeigten Darstellungen. Bei dem hier gezeigten Wirbelstromsensor 100 sind die Senserspule 102 und die Sensorfläche 104 gegenüber den in den Figuren 12a und 12b gezeigten Darstellungen gegeneinander vertauscht.

Die Figuren 15a und 15b zeigen schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors 100 als Differenzdrucksensor mit umgekehrter Spulenordnung gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Fig. 15a zeigt einen Schnitt durch den Wirbelstromsensor 100 in einer

zweidimensionalen Darstellung. Fig. 15b zeigt den Schnitt durch den Wirbelstromsensor 100 in einer räumlichen Darstellung.

Der Wirbelstromsensor 100 weist in den Figuren 15a und 15b eine Befüllung der Kavität mit einem Fluid auf, welches nicht leitfähig ist. Der Wirbelstromsensor entspricht den in den Figuren 13a und 13b gezeigten Darstellungen. Bei dem hier gezeigten Wirbelstromsensor 100 sind die Senserspule 102 und die Sensorfläche 104 gegenüber den in den Figuren 13a und 13b gezeigten Darstellungen gegeneinander vertauscht.

Die Figuren 16a und 16b zeigen schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors 100 als Differenzdrucksensor in Vollwippenbauart gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in unbeaufschlagtem Zustand und in beaufschlagtem Zustand. Der Wirbelstromsensor 100 weist konzentrisch angeordnet eine Senserspule 102, eine Sensorfläche 104 und ein Federelement 106 sowie ein erstes Gehäuseteil 1600 mit rechteckiger Querschnittsfläche auf. Im Zentrum des Sensors ist eine dünne Wirkfläche 1604 angeordnet, die auf einer ersten Seite von einem ersten Druck p_1 und auf einer zweiten Seite von einem zweiten Druck p_2 beaufschlagbar ist. Die Wirkfläche 1604 ist mit der umlaufenden Seitenwand des Gehäuseteils 1600 verbunden. Die Seitenwand des Gehäuseteils 1600 ist als das biegsame Federelement 106 ausgebildet und verschließt eine Sensorkavität 1204 des Gehäuseteils 1600 gegen die Umwelt. In der Sensorkavität 1204 ist auf einer Innenseite der Seitenwand die Sensorfläche 104 angeordnet. Die Sensorfläche 104 ragt in die Sensorkavität 1204 hinein. In diesem Ausführungsbeispiel ist die Senserspule 102 in einer oberen Wand des Gehäuseteils 1600 angeordnet. Wenn die Drücke p_1 und p_2 einen Druckunterschied aufweisen, dann wird die Wirkfläche 1604 ausgelenkt. Da die Wirkfläche 1604 beidseitig befestigt ist, bildet die Wirkfläche 1604 eine Biegekurve aus. Die befestigten Enden der Wirkfläche 1604 weisen unter dem Einfluss des Druckunterschieds einen veränderten Winkel zu dem Gehäuseteil 1600 auf. Durch den Winkel werden die Seitenwände verformt und die Sensorfläche 104 wird verkippt. Wenn die Drücke p_1 und p_2 gleich sind, befindet sich der Wirbelstromsensor 100 in einer Ruhelage. In der Ruhelage weist die Sensorfläche 104 einen Abstand d von einer oberen Wand der Sensorkavität 1204 auf. Wenn die Drücke p_1 und p_2 unterschiedlich sind, dann

verändert sich der Abstand d. Bei verändertem Abstand d ergibt sich auch eine Veränderung in einem elektromagnetischen Wechselfeld der Spule 102.

Mit anderen Worten zeigen die Figuren 16a, 16b und 17 eine Alternative, um einen Differenzdrucksensor 100 zu realisieren. Gezeigt ist ein Vollwippen bzw. Halbwippen Prinzip. Bei den dargestellten Varianten ist die Kavität 1204 verschlossen. Somit kann ausgeschlossen werden, dass sich die Signalintensität, aufgrund leitfähiger Partikel die zwischen die Spule 102 und der beweglichen leitfähigen Struktur 104 ablagern, ändert.

Fig. 17 zeigt eine Darstellung eines Wirbelstromsensors 100 als Differenzdrucksensor in Halbwippenbauart gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Der Wirbelstromsensor 100 entspricht dem Wirbelstromsensor, wie er anhand der Figuren 16a und 16b beschrieben ist. Im Unterschied zu den Figuren 16a und 16b weist ein Gehäuseteil 1602 keine Sensorkavität bzw. Funktion auf. Die Wirkfläche 1604 ist nur an einer Seite mit der Seitenwand des Gehäuseteils 1600 verbunden. Auf der anderen Seite ist die Wirkfläche 1604 mit dem Gehäuseteil 1602 verbunden.

Die gezeigten Feldlinien der Spule 102 verlaufen in zwei symmetrischen Ellipsenanordnungen um die beispielhaft gezeigten drei Leiter der Spule 102, also durch das Spulenzentrum der Spule 102.

Die Figuren 18a bis 18c zeigen schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors 100 als Differenzdrucksensor mit einem Druckanschluss nur von einer Seite gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Der Wirbelstromsensor 100 weist eine Spule 102 (fixed coil), eine Sensorfläche 104 (moving layer) ein Federelement 106 und ein weiteres Federelement 1800 auf. Der Wirbelstromsensor 100 weist eine flache, runde Form auf. Auf einer Unterseite des Wirbelstromsensors 100 ist eine innere Rippe 1802 und konzentrisch dazu eine äußere Rippe 1804 angeordnet. Die Rippen 1802, 1804 sind als Dichtflächen gegen eine nicht abgebildete Oberfläche ausgebildet. Innerhalb der inneren Rippe 1802 ist ein runder erster Arbeitsraum für einen ersten Druck p_1 angeordnet. Zwischen der inneren Rippe 1802 und der äußeren Rippe 1804 ist ein ringförmiger zweiter Arbeitsraum für einen zweiten Druck p_2 angeordnet. Der erste Arbeitsraum ist von dem Federelement 106 und

der Sensorfläche 104 nach oben abgeschlossen. Der zweite Arbeitsraum ist von dem weiteren Federelement 1800 nach oben abgeschlossen. Mittig auf dem weiteren Federelement 1800 ist eine Kappe 1202 angeordnet, in der die Sensorspule 102 angeordnet ist. Die Kappe 1202 ist von der Sensorfläche 104 im Ruhezustand um einen Abstand d beabstandet.

Fig. 18a zeigt eine räumliche Darstellung des Wirbelstromsensors 100.

Fig. 18b zeigt den Wirbelstromsensor 100 in einem drucklosen Zustand. Die Federelemente 106, 1800 sind unverformt. Die Kappe 1202 weist den Abstand d zu der Sensorfläche 104 auf.

Fig. 18c zeigt den Wirbelstromsensor 100 in einem druckbeaufschlagten Zustand. Der Druck p_2 verformt das weitere Federelement 1800, das Federelement 106 wird von dem Druck p_1 verformt. Die Sensorfläche 104 sowie die Sensorspule 102 sind aus einer Ausgangslage verschoben. Dabei ist die Sensorfläche 104 entsprechend einem größeren Druck p_1 weiter verschoben, als die Sensorspule 102. Der Abstand d ist gegenüber der Ausgangslage verringert.

Die Figuren 19a und 19b zeigen schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors 100 als Differenzdrucksensor in Brückenbauart gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in unbeaufschlagten Zustand und in beaufschlagtem Zustand. Der Wirbelstromsensor weist eine Sensorspule 102, eine Sensorfläche 104 und ein Federelement 106 sowie ein weiteres Federelement 1800 auf. In diesem Ausführungsbeispiel ist die Sensorfläche 104 starr ausgeführt. Die Sensorspule 102 ist mit dem Federelement 106 beweglich ausgeführt. Das Federelement 106 ist als eine obere Lage eines zusammengesetzten Federelements ausgeführt. Das weitere Federelement 1800 ist als untere Lage des zusammengesetzten Federelements ausgeführt. Die Sensorspule 102 ist in der oberen Lage 106 angeordnet. Zwischen den Lagen ist die Sensorfläche 104 angeordnet. Die obere Lage 106 ist mit der unteren Lage 1800 durch Brücken 1900 verbunden. Die Brücken 1900 fungieren als Stützelemente und sind in Durchbrüchen durch die Sensorfläche 104 angeordnet. Die Sensorspule 102 ist in einem Ausgangszustand von der Sensorfläche 104 um den Abstand d beabstandet. Die beiden Lagen des Federelements 106 sowie die Sensorfläche 104 sind in einem umlaufenden

Gehäuse 400 abgestützt. Beide Lagen 106 weisen eine gleiche wirksame Fläche auf. Das Gehäuse 400 weist einen verlängerten Rand auf, an dessen Schmalseite die Schnittstelle zu einem Messpunkt angeordnet ist. Eine Innenseite des Rands ist abgeschrägt ausgeführt. Die Position der Spule 102 und der leitfähigen Schicht 104 kann vertauscht werden.

Fig. 19a zeigt den Wirbelstromsensor 100 in dem Ausgangszustand, in dem ein Druck p oberhalb des Federelements 106 gleich einem Druck p unterhalb des Federelements 1800 ist.

Fig. 19b zeigt den Wirbelstromsensor 100 in ausgelenktem Zustand, in dem der Druck p unterhalb des Federelements 1800 größer ist, als der Druck p oberhalb des Federelements 106. Das Federelement 106 ist mit der Sensorspule 102 in Richtung des niedrigeren Drucks p verschoben. Der Abstand d ist größer als im Ausgangszustand.

Die Figuren 20a und 20b zeigen schematische Abbildungen eines Wirbelstromsensors 100 als Differenzdrucksensor in Brückenbauart mit einer zweiten Sensorspule 2000 gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in unbeaufschlagtem Zustand und in beaufschlagtem Zustand. Der Wirbelstromsensor 100 entspricht der Beschreibung in den Figuren 19a und 19b. Zusätzlich weist der Wirbelstromsensor 100 die zweite Sensorspule 200 in dem unteren Federelement 1800 auf. Die Säulenvariante kann ebenfalls auch differenziell ausgelesen werden. Gezeigt ist eine Differenzial-Sensorik, d. h., eine Spule 106 befindet sich oberhalb und die andere Spule 2000 unterhalb der leitfähigen Schicht 102. Dadurch können Störeinflüsse, beispielsweise hervorgerufen durch einen Temperaturgang, kompensiert werden.

Fig. 20a zeigt den Wirbelstromsensor 100 in dem Ausgangszustand, in dem ein Druck p oberhalb der Lage 106 gleich einem Druck p unterhalb der Lage 1800 ist.

Fig. 20b zeigt den Wirbelstromsensor 100 in ausgelenktem Zustand, in dem der Druck p unterhalb des Federelements 1800 größer ist, als der Druck p oberhalb des Federelements 106. Die Federelemente 106, 1800 sind mit den

Sensorspulen 102, 2000 in Richtung des niedrigeren Drucks p verschoben. Der Abstand d ist größer als im Ausgangszustand.

Die Figuren 21a und 21b zeigen schematische Abbildungen eines
Wirbelstromsensors 100 als Differenzdrucksensor in Gitterbauart gemäß einem
Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in unbeaufschlagtem Zustand
und in beaufschlagtem Zustand. Der Wirbelstromsensor 100 ähnelt dem
Wirbelstromsensor aus den Figuren 19a und 19b. Auch hier sind zwei
Federelemente 106 und 1800 über eine Brücke 1900 miteinander verbunden, um
sich gemeinsam zu bewegen. Im Gegensatz zu den Figuren 19a und 19b ist die
Sensorfläche 104 mit der Brücke 1900 gekoppelt beweglich ausgeführt. Die
Sensorfläche 104 wird dabei von Führungsstäben 2100 bzw. Stützsäulen geführt,
die die Sensorkavität 1204 überbrücken und die Sensorspule 102 stützen. Der
Rand des Gehäuses 400 ist hier breiter als in den Figuren 19a bis 20b
ausgeführt, eine Größe der beweglichen Fläche ist kleiner ausgeführt.

Fig. 21a zeigt den Wirbelstromsensor 100 in dem Ausgangszustand, in dem ein
Druck p oberhalb des Federelements 106 gleich einem Druck p unterhalb des
Federelements 1800 ist.

Fig. 21b zeigt den Wirbelstromsensor 100 in ausgelenktem Zustand, in dem der
Druck p oberhalb des Federelements 106 größer ist, als der Druck p unterhalb
des Federelements 1800. Die Federelemente 106, 1800 sind mit der gekoppelten
Sensorfläche 104 in Richtung des niedrigeren Drucks p verschoben. Der Abstand
 d ist größer als im Ausgangszustand.

Die Figuren 22a bis 22c zeigen schematische Abbildungen eines
Wirbelstromsensors 100 als Differenzdrucksensor in Wippenbauart gemäß einem
Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Der Wirbelstromsensor 100
weist eine Sensorspule 102, eine Sensorfläche 104 und ein Federelement 106
auf. Ein Gehäuse 400 des Wirbelstromsensors 100 ist zylindrisch und weist auf
einer Oberseite zwei Öffnungen zu annähernd halbkreisförmigen Kammern auf.
Zwischen den Öffnungen ist ein Steg 2200 angeordnet. Der Steg 2200 trennt die
Kammern. Der Steg 2200 ist an einer Unterseite zu einem schmalen
Scharnierband 2202 verjüngt. Das Scharnierband 2202 ist mit einer Wippe 2204
verbunden. Die Wippe 2204 ist als Boden der Kammern ausgebildet. Die Wippe

2204 ist biegesteif ausgeführt. An einer Unterseite der Wippe 2204 ist die Sensorspule 102 angeordnet. Die Wippe 2204 weist eine runde Scheibenform auf und ist umlaufend durch das Federelement 106 mit dem Gehäuse 400 verbunden. Weiterhin dichtet das Federelement 106 eine unterhalb der Wippe 2204 angeordnete Sensorkavität 1204 gegen beispielsweise Fremdkörper in den Kammern ab. An einer Unterseite der Sensorkavität 1204, gegenüber der Sensorspule 102 ist an dem Gehäuse 400 die Sensorfläche 104 angeordnet. Zwischen der Wippe 2204 und dem Gehäuse 400 verläuft in diesem Ausführungsbeispiel ein Auflagesteg 2206 in Verlängerung des Scharnierbands 2202 als Auflagepunkt. Der Auflagesteg 2206 kann auch weggelassen werden. Die Sensorfläche 104 und die Sensorspule 102 können auch vertauscht angeordnet sein. Auf einer Unterseite des Gehäuses 400 kann gegebenenfalls eine Schaltungsfläche angeordnet sein.

Fig. 22a zeigt eine räumliche Darstellung des Wirbelstromsensors 100. In der Darstellung ist ein Druck p_1 in der ersten Kammer gleich dem Druck p_2 in der zweiten Kammer. Die Wippe 2204 ist im Gleichgewicht und nicht verkippt.

Fig. 22b zeigt eine Draufsicht auf den Wirbelstromsensor 100.

Fig. 22c zeigt eine Schnittdarstellung durch den Wirbelstromsensor 100 quer zu dem Steg 2200. In diesem Ausführungsbeispiel ist an der Wippe 2204 eine erste Sensorspule 102a unterhalb der ersten Kammer angeordnet. Unterhalb der zweiten Kammer ist eine zweite Sensorspule 102b angeordnet. Jeweils gegenüber den Sensorspulen 102 ist eine erste Sensorfläche 104a und eine zweite Sensorfläche 104 b angeordnet. Die Drücke p_1 und p_2 sind wie in Fig. 22a gleich groß dargestellt und die Wippe 2204 ist parallel zu dem Gehäuse 400 ausgerichtet. Wenn die Drücke p_1 und p_2 eine Druckdifferenz aufweisen würden, würde in den Sensorspulen 102a und 102b je eine gegensätzliche Änderung des elektromagnetischen Wechselfelds hervorgerufen. Die Änderungen können beispielsweise über eine Messbrückenschaltung zum Verstärken eines Ausgangssignals verwendet werden. Der Wirbelstromsensor 100 gemäß diesem Ausführungsbeispiel kann ebenfalls redundant auf der rechten Seite ausgelesen werden.

Die Figuren 23a und 23b zeigen einen Gewichtssensor, beispielsweise einen iBolt (Weight Sensor) zum zweidimensionalen Messen von Druck und Spannung, mit einem Wirbelstromsensor 100 gemäß je einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

5

Fig. 23a zeigt den Wirbelstromsensor 100 mit einer Sensorspule 102 in zylindrischer Ausführung.

10

Fig. 23b zeigt den Wirbelstromsensor 100 mit einer Sensorspule 102 in einer Ausführung als Flachspule.

15

In den Figuren 23a und 23b ist ein Scherkraftsensor 2300 gezeigt, der eine Sensorspule 102, eine Sensorfläche 104 und ein Federelement 106 aufweist. Der Scherkraftsensor 2300 weist an einem ersten Ende eines zylindrischen Gehäuses 400 einen ersten Flansch 2302 auf, über den eine Scherkraft F in den Sensor 2300 eingeleitet werden kann. Das Gehäuse 400 ist an einem gegenüberliegenden zweiten Ende mit einem ersten Ende des dazu konzentrisch angeordneten Federelements 106 verbunden. Das Federelement 106 ist innerhalb des Gehäuses 400 angeordnet und weist an einem gegenüberliegenden zweiten Ende einen zweiten Flansch 2304 auf, über den die Scherkraft F ausgeleitet werden kann. Zwischen dem ersten Flansch 2302 und dem zweiten Flansch 2304 ist ein Spalt 2306 ausgebildet, der ohne Scherkrafteinwirkung auf eine gleichbleibende Breite rund um den zweiten Flansch 2304 geöffnet ist. An dem ersten Ende des Federelements 106 ist die Sensorspule 102 angeordnet. Gegenüberliegend der Sensorspule 102 ist auf einem Sockel im Inneren des Federelements 106 die Sensorfläche 104 angeordnet. Die Sensorfläche 104 ist in diesem Ausführungsbeispiel als Magnet ausgebildet. Die sich an der Spule 102 vorbeibewegende Fläche 104 muss nicht magnetisch sein, sondern nur elektrisch leitfähig.

20

25

30

35

Fig. 24 zeigt eine Darstellung eines Drucksensors 2400. Der Drucksensor 2400 ist über einen Gewindezapfen in eine Bohrung in einer Wand 2402 eines Behälters eingeschraubt. Der Gewindezapfen weist eine mittige Bohrung auf, durch die ein Fluid in dem Behälter in eine Sensorkammer 2404 gelangt. Die Sensorkammer 2404 steht damit unter dem gleichen Druck, wie der Behälter. Die Sensorkammer 2404 ist durch eine rückwärtige Membran 2406 abgeschlossen.

Die Membran 2406 ist elastisch. Der Druck im Behälter verformt die Membran 2406. Bei einem Überdruck im Behälter wird die Membran 2406 nach außen gedrückt. Auf einer Rückseite der Membran 2406 sind Dehnmessstreifen 2408 angeordnet. Wenn der Druck die Membran 2406 nach außen drückt, werden die
5 Dehnmessstreifen 2408 gedehnt und ein Innenwiderstand der Dehnmessstreifen 2408 steigt. Dadurch fällt an den Dehnmessstreifen 2408 mehr Spannung ab. Der Spannungsabfall wird von einer Auswerteelektronik 2410 zu einem Signal verarbeitet. Das Signal wird an einem Steckkontakt 2412 bereitgestellt und beispielsweise an ein Steuergerät übermittelt.

10 Mit anderen Worten zeigt Fig. 24 eine schematische Darstellung eines Hochdrucksensors 2400 basierend auf einem metallischen Grundkörper. Auf einer Membranoberfläche befindet sich eine Funktionsschicht mit Schaltungselementen 2408 (Brückenschaltung) zur Signalerfassung. Zum
15 Messen sehr hoher Drücke bis etwa 3000 bar Berstdruck, wie sie z. B. in der Verteilerschiene (Common Rail) der Kraftstoffeinspritzanlage einer Diesel-Brennkraftmaschine auftreten, können Hochdrucksensoren 2400 verwendet werden, bei denen die Wölbung einer dem Druck ausgesetzten metallischen Membran 2406 mittels Dehnungsmessstreifen 2408 erfasst wird und hieraus
20 z. B. in einer Brückenschaltung ein Drucksignal gebildet wird. Auf die Membranoberfläche wird eine Funktionsschicht mit Schaltungselementen 2410 zur Signalerfassung aufgebracht, wozu bevorzugt Verfahren der Halbleitertechnik eingesetzt werden. Das Sensorelement und das Anschlussstück können einteilig aus einem metallischen Grundkörper hergestellt werden. In diesem Fall können
25 die Schaltungselemente 2410 zur Signalerfassung aber aufgrund der Bauteilgröße nicht ohne Weiteres mit Verfahren der Halbleitertechnik auf die Sensormembran 2406 aufgebracht werden. Durch die Größe der Grundkörper werden solche Drucksensoren 2400 unwirtschaftlich für Batch-Prozesse.

30 Fig. 25 zeigt eine Brückenschaltung von vier Dehnmessstreifen 2408, 2500. Die Dehnmessstreifen 2408, 2500 sind entsprechend einer Wheatstone-Brückenschaltung angeordnet. Die Dehnmessstreifen 2408, 2500 sind als dehnbare Widerstände aus beispielsweise NiCrSi aufgebaut. Bei einer Dehnung erhöht sich der Widerstand in den Dehnmessstreifen 2408, 2500. Zwei der
35 Dehnmessstreifen 2408 sind als Bewegungsaufnehmer an der Membran des Drucksensors 2400 aus Fig. 24 angeordnet. Die zwei anderen Dehnmessstreifen

2500 sind als Referenzstreifen 2500 zur Kompensation von thermischen Einflüssen in einem unflexiblen Bereich des Drucksensors 2400 angeordnet.

Fig. 26 zeigt eine Darstellung eines Drucksensors 2600 mit einem
5 Wirbelstromsensor 100 gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Der Drucksensor 2600 entspricht im Wesentlichen dem Drucksensor aus Fig. 24. Die Sensorkammer 2404 ist durch eine rückwärtige Sensorfläche 104 abgeschlossen. Die Sensorfläche 104 ist elastisch und damit als Federelement 106 ausgebildet. Der Druck im Behälter verformt die Sensorfläche 104. Bei einem Überdruck im Behälter wird die Sensorfläche 104 nach außen gedrückt. Hinter der Sensorfläche 104 ist auf einer Platine 2602 eine
10 Sensorspule 102 angeordnet, die dazu ausgebildet ist, durch ein ausgesandtes elektromagnetisches Feld in der metallischen Sensorfläche 104 Wirbelströme zu induzieren. Wenn der Druck die Sensorfläche 104 näher an die Sensorspule 102 drückt, dann verändert eine Gegenwirkung der Wirbelströme das
15 elektromagnetische Feld. Auf der Platine 2602 kann eine Auswerteelektronik angeordnet sein, die über die Änderung des elektromagnetischen Felds ein Signal ermittelt, das eine Änderung des Drucks repräsentiert.

20 Die Membran 104 als Teil des Sensorelements 100 und das Anschlussstück können unabhängig voneinander jeweils aus einem metallischen Grundkörper gefertigt werden. Im Falle des Sensorelements 100 wird in diesem Ausführungsbeispiel im Grundkörper eine Sacköffnung erzeugt, um die Membran in 104 der gegenüberliegenden Oberfläche des Grundkörpers freizulegen. Eine
25 darüber angeordnete Platine 2602 weist zumindest eine Funktionsschicht mit Schaltungselementen 102 zur Signalerfassung auf, zu deren Herstellung Verfahren der Halbleitertechnik eingesetzt werden können. Im Grundkörper des Anschlussstücks wird ein Druckkanal ausgebildet. Außerdem kann das Anschlussstück beispielsweise noch mit einem Gewinde zur Ankopplung an das
30 Messsystem versehen werden. Das Sensorelement 100 wird dann so auf dem Anschlussstück montiert, dass der Druckkanal in die rückwärtige Sacköffnung des Sensorelements 100 mündet, wobei die Verbindung zwischen dem Sensorelement 100 und dem Anschlussstück druckdicht ausgeführt ist.

35 Der Durchmesser derartiger metallischer Membranen ist sehr klein, und ihre maximale Wölbung liegt in der Größenordnung von 10 µm bis 50 µm. Die

Membranen sind für bis zu 10^{10} Lastschaltspiele ausgelegt. Damit sich die Kennlinie des Hochdrucksensors 2600 nicht ändert, wird der Hochdrucksensor 2600 so ausgelegt, dass die beteiligten Materialien im Betrieb nicht über den hookeschen Bereich hinaus belastet werden bzw. sich über ein Haigh Diagramm nachgewiesene Dauerschwingfestigkeiten ergeben. Das Verhältnis von Membrandicke zu Membrandurchmesser ist somit an die Eigenschaften der beteiligten Materialien gebunden und kann daher ein vorgegebenes materialbedingtes Verhältnis nicht überschreiten. Dadurch ergeben sich sehr geringe Auslenkungen der Membran. Da die metallische Membran dem Hochdruck unmittelbar ausgesetzt ist, wird sie strömungsmitteldicht in das druckführende Rohr eingesetzt.

Verschiedene Konzepte zum Aufbau des Hochdrucksensors 2600 mit einem Sensorelement 100 und einem Anschlussstück können umgesetzt werden. Insbesondere wenn der Hochdrucksensor 2600 in einem Druckbereich oberhalb 2200 bar eingesetzt werden soll, ist eine einstückige Ausführung vorteilhaft, da eine mögliche Schwachstelle durch die Montage des Sensorelements 100 auf dem Anschlussstück vermieden wird.

Das Sensorelement 100 kann mit dem Anschlussstück verschweißt werden. Dabei werden weder der Druckkanal im Anschlussstück noch die Sacköffnung des Sensorelements 100 verschlossen, verschmutzt oder ungünstig deformiert. Die Herstellung einer Schweißverbindung mit reproduzierbaren mechanischen Eigenschaften ist anspruchsvoll. Die Druckfestigkeit der Schweißverbindung wird durch die Geometrie der Schweißnaht und deren Kontaktfläche zum Sensorelement 100 und zum Anschlussstück beeinflusst. Kerben oder Vertiefungen in der Schweißverbindung würden bei hohen Druckbelastungen, insbesondere bei Pulsationsbelastungen, Ausgangspunkte für Risse bilden. Der Anwendungsbereich derartiger Hochdrucksensoren 2400 ist daher typischerweise auf Druckbereiche kleiner 2200 bar limitiert.

Das Sensorelement 100 und das Anschlussstück können über eine Klemmverbindung verbunden werden. Dadurch ist der Hochdrucksensor 2600 für den Einsatz bei Drücken größer 10000 bar geeignet. Diese Aufbau- und Verbindungstechnik kann in Kleinstserien für Spezialapplikationen zur Anwendung kommen.

Das Sensorelement 100 und das Anschlussstück können auch einteilig aus einem metallischen Grundkörper hergestellt werden. Die Schaltungselemente zur Signalerfassung können mit Verfahren der Halbleitertechnik auf die Platine 2602 aufgebracht werden.

Die Figuren 27a und 27b zeigen je eine räumliche Darstellung eines Drucksensors 2600 gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

Fig. 27a zeigt eine räumliche Schnittdarstellung durch den Drucksensor 2600, bei der eine erste Schnittebene mittig durch eine erste Bohrung 2700 verläuft.

Fig. 27b zeigt eine räumliche Schnittdarstellung des Drucksensors 2600, bei der eine zweite Schnittebene parallel zu der ersten Schnittebene mittig durch eine zweite Bohrung 2702 verläuft.

Der Drucksensor 2600 in den Figuren 27a und 27b ist als redundanter Sensor mit zwei voneinander unabhängigen Senserspulen 102 und zwei voneinander unabhängigen Referenzspulen 602 ausgebildet. Die Senserspulen 102 und die Referenzspulen 602 sind kreuzweise gegenüberliegend angeordnet. Der Drucksensor 2600 weist einen zylindrischen Grundkörper 2704 auf. In den Grundkörper 2704 sind von einer Unterseite in Flucht mit den Senserspulen 102 die zwei Bohrungen 2700, 2702 eingebracht. Die Bohrungen 2700, 2702 sind parallel zu einer Rotationsachse des Grundkörpers 2704 ausgerichtet. Die Bohrungen 2700, 2702 sind symmetrisch zu der Rotationsachse angeordnet. Die Bohrungen 2700, 2702 sind als Sacklöcher ausgeformt und bilden je eine Sensorkammer. Eine Oberseite des Grundkörpers 2704 ist als geschlossene Fläche ausgeformt und bildet im Bereich der Bohrungen 2700, 2702 je eine Sensorfläche 104 für die Senserspulen 102 aus. Die Oberfläche bildet im Bereich der Referenzspulen 602 je eine Referenzfläche 600 aus. Die Sensorflächen 102 sind elastisch verformbar. Die Referenzflächen 600 sind starr. Die Senserspulen 102 und die Referenzspulen 602 sind in geringem Abstand über der Oberseite des Grundkörpers 2704 angeordnet. Die Senserspulen 102 und die Referenzspulen 602 sind in einem festen Abstand zu dem Grundkörper 2704 angeordnet. Unterhalb der Referenzspulen 602, im Bereich der Referenzflächen

600 ist der Grundkörper 2600 massiv und starr. Der Abstand der Spulen 102, 602 zum Grundkörper 2704 ist fest. Die Spulen 102, 602 sind als Flachspulen ausgebildet und in eine nicht abgebildete Platine integriert. Die Spulen 102, 602 emittieren ein elektrisches Feld 108. Wenn in den Bohrungen 2700, 2702 ein
5 Überdruck 2706 herrscht, dann werden die Sensorflächen 104 nach oben gewölbt und der Abstand zwischen den Sensorflächen 104 und den Sensorspulen verringert sich, wodurch sich eine Induktivität der Sensorspulen 102 ändert. Der Abstand zwischen den Referenzspulen 602 und dem Grundkörper 2704 bleibt dabei konstant und ist nur abhängig von Störgrößen,
10 wie beispielsweise einer Temperatúrausdehnung des Grundkörpers 2704. Ein Signal einer Referenzspule 602 kann von einem Signal einer Sensorspule 102 abgezogen werden, um die Störgrößen aus dem Signal der Sensorspule 102 zu entfernen.

15 Mit anderen Worten zeigen die Figuren 27a und 27b eine schematische Darstellung eines redundanten Hochdrucksensors 2600 basierend auf dem Wirbelstromessverfahren. Hierbei sind zwei Drucköffnungen 2700, 2702 in den metallischen Grundkörper 2704 eingebracht. Darüber befinden sich 4 Spulen 102, 602. Zwei Spulen 102 befinden sich direkt über den Druckzuführungen
20 2700, 2702 und detektieren somit die Druckverformung der metallischen Membranen 104. Die zwei weiteren Spulen 602 dienen zur Abstandsdetektion des metallischen Grundkörpers 2704 und können somit zur Kompensation von Störeinflüssen genutzt werden.

25 Die Figuren 28a und 28b zeigen Ansichten eines Drucksensors 2600 gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Der Drucksensor 2600 entspricht dem Drucksensor 2600 in Fig. 27a und 27b.

30 Fig. 28a zeigt eine Draufsicht auf die Oberseite des Drucksensors 2600. Die Spulen 102, 602 sind gleichmäßig auf einem imaginären Kreis auf der Oberfläche verteilt. Der Kreis ist konzentrisch zu einer Querschnittsfläche des Grundkörpers 2704.

35 Fig. 28b zeigt eine Untersicht auf die Unterseite des Grundkörpers 2704. Die Bohrungen 2700, 2702 sind diametral gegenüberliegend auf dem imaginären Kreis aus Fig. 28a angeordnet und unter den Sensorspulen 102 ausgerichtet.

Die Figuren 27a, 27b und 28a, 28b zeigen damit einen Hochdrucksensor 2600 mit erweiterter Funktionalität basierend auf dem Wirbelstromprinzip. Der Hochdrucksensor 2600 stellt ein redundantes Drucksignal bereit. Der hier vorgestellte Ansatz zeigt die Anwendung des Prinzips auf Hoch- und Höchstdrucksensoren und die damit verbundene starke Vereinfachung des Aufbaus und der Prozessierungsschritte bei der Herstellung sowie einen Weg, um die bisherige aufbaubedingte Drucklimitierung zu überwinden.

Heutige Anforderungen im Hochdruckbereich haben einen Fokus auf „Feature“. Zur Erhöhung der Eigensicherheit und Selbstdiagnosefähigkeit ermöglicht der Drucksensor 2600 redundante Druckmessungen (beispielsweise zur OBD on board Diagnose). Ferner weist der Drucksensor 2600 einen nach unten in den Bereich von 60 bar bis 140 bar bzw. nach oben zu Höchstdruck >3000 bar erweiterten Druckbereichs auf. Der hier vorgestellte Ansatz stellt für den Bereich zwischen 2200 bar und 3000 bar eine kostengünstige Lösung bereit.

Über das Wirbelstromverfahren können diese Anforderungen erfüllt werden. Das Grundprinzip des Wirbelstrommessverfahrens basiert auf der Induktionswirkung von Wirbelströmen, die in leitfähigen Prüfobjekten (metallische Membran) induziert werden. Hierbei wird eine Spule mit Wechselstrom gespeist, worauf sich ein Magnetfeld um die Spule ausbildet. Befindet sich ein elektrisch leitender Gegenstand in diesem Magnetfeld, entstehen darin gemäß dem faradayschen Induktionsgesetz Wirbelströme. Die Wirbelströme sind ihrerseits von einem Magnetfeld umgeben. Das Eigenfeld dieser Wirbelströme wirkt entsprechend der Lenz'schen Regel dem Feld der Spule entgegen, was eine Änderung der Spulenimpedanz nach sich zieht. Diese abstandsabhängige Impedanzänderung lässt sich beispielsweise durch eine Amplitudenänderung der Sensorspule als messbare Größe messen.

Mit wirbelstrombasierten Konzepten kann höchstgenau die Verformung einer Metallmembran 102 ohne zusätzlich darauf aufgebrachter Strukturen erfasst werden, wodurch problemlos auf schweißnahtfreie und deshalb höchstdruckfähige einteilige Druckstutzen 2704 übergegangen werden kann. Zudem lassen sich auf einfache Weise redundante Messstrukturen auslegen, da

die Anzahl der z. B. in Leiterplattentechnologie hergestellten Spulen keinen wesentlichen Kostenfaktor darstellen.

Der vorgestellte Ansatz schafft, einen redundanten Hochdrucksensor 2600 hoher
5 Messempfindlichkeit, der einfach und kostengünstig herstellbar ist und bei dem keine Abdichtungsprobleme auftreten. Das Anschlussstück 2704 kann einteilig aus einem metallischen Grundkörper 2704 hergestellt werden, da der Spulensensor 102 die Verformung kontaktlos auswertet und keine weiteren Strukturen auf dem Grundkörper 2704 prozessiert werden müssen. Dadurch
10 ergeben sich Vorteile in der Aufbau- und Verbindungstechnik. Bei bisherigen Hochdrucksensoren ist der AVT-Ansatz mit Drahtbonds zum Sensorelement und Federkontakten zum Anschlussstecker realisiert. Dies ist notwendig, da Messstrukturen auf der Metallmembran kontaktiert werden müssen. Die Nutzung der kontaktlosen Wirbelstromtechnologie lässt eine vollständige Integration der
15 Auswerteschaltung inklusive Spulen 102, 602 auf der Anschlussseite (Steckerseite) des Sensors 2600 zu, wodurch sich weitere Kostenvorteile bei der Aufbau- und Verbindungstechnik ergeben, da auf Federkontakte und Drahtbonds verzichtet werden kann.

Um temperaturbedingte Abstandsänderungen zwischen Spule 102 und
20 Metallmembran 104 wirksam unterdrücken zu können, ist vorzugsweise eine differenzielle Methode vorteilhaft, bei der ein Messaufnehmer aus zwei Spulen 102, 602 besteht, bei denen eine über einer Membran 104 und die andere über einem massiven Teil 600 des Druckstutzens 2704 angeordnet ist. Es ergibt sich
25 somit bei einem Einzelsensor 100 eine 2-Spulen-Anordnung und bei einem redundant ausgelegten Sensor 100 eine 4-Spulen-Anordnung. Bei einfacher (nicht redundanter) Ausführung können die Spulen 102, 602 nebeneinander oder auch koaxial wie in den folgenden Figuren angeordnet sein.

30 Die Figuren 29a und 29b zeigen Darstellungen eines Drucksensors 2600 gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

Fig. 29a zeigt eine räumliche Ansicht des Drucksensors 2600.

Fig. 28b zeigt eine räumliche Schnittdarstellung des Drucksensors 2600. Eine Schnittebene ist in einer Rotationsachse des Grundkörpers 2600 ausgerichtet und schneidet den Drucksensor 2600 halb.

5 Der Sensor 2600 in den Figuren 29a und 29b weist eine Sensorspule 102 und eine Referenzspule 602 auf. Die Spulen 102, 602 sind konzentrisch zueinander angeordnet, wobei die kleinere Sensorspule 102 innerhalb der größeren Referenzspule 602 angeordnet ist. Die Sensorspule 102 ist in diesem Ausführungsbeispiel als mehrschichtige Flachspule ausgeführt, während die
10 Referenzspule 602 einlagig ausgeführt ist. Die Spulen 102, 602 sind in oder an einer, zur besseren Übersichtlichkeit nicht dargestellten Platine angeordnet. Die Spulen 102, 602 sind dazu ausgebildet, je ein elektrisches Feld 108 auszusenden. Der Wirbelstromsensor 2600 weist einen zylindrischen Grundkörper 2704 auf. In den Grundkörper 2704 ist von einer Unterseite eine
15 mittige Bohrung 2700 eingebracht. Die Bohrung 2700 ist als Sackloch ausgeführt. An einer Oberseite des Grundkörpers 2704 ist über der Bohrung 2700 eine Membran als Sensorfläche 104 angeordnet. Die Sensorfläche 104 ist einstückig mit dem Grundkörper 2704 verbunden. Die Membran 104 besteht aus dem Material des Grundkörpers 2704. Wenn in der Bohrung 2700 ein Überdruck
20 2706 herrscht, dann wölbt sich die Membran 104 nach oben und ein Abstand zu der Sensorspule 102 verringert sich. Dadurch wird das elektrische Feld 108 der Sensorspule 102 verändert. Im Bereich der Referenzspule 602 weist der Grundkörper 2704 eine Referenzfläche 600 auf, die in festem Abstand zu der Referenzspule 602 angeordnet ist. Das elektrische Feld 108 der Referenzspule
25 602 wird nur durch thermische Abstandsänderungen zwischen der Platine und dem Grundkörper 2704 verändert. Weiterhin kann das Referenzfeld 108 durch störende äußere Einflüsse verändert werden. Da thermische Veränderungen und störende Einflüsse das elektrische Feld 108 der Sensorspule 102 ebenso beeinflussen, kann durch ein Verrechnen des Referenzfelds 108 mit dem
30 elektromagnetischen Feld 108 ein aussagekräftigeres Signal erzeugt werden. Damit kann der Drucksensor 2600 in einem größeren Arbeitsbereich eingesetzt werden.

35 Mit anderen Worten zeigen die Figuren 29a und 29b eine schematische Darstellung eines Hochdrucksensors 100 basierend auf dem Wirbelstrommessprinzip. Die Spule 102 in der Mitte (hier beispielhaft mit zwei

Lagen dargestellt), detektiert die Verformung der metallischen Membran 104. Die zweite äußere Spule 602 dient zur Abstandsdetektion des metallischen Grundkörpers 2600 und kann somit auch zur Kompensation von Störeinflüssen genutzt werden.

5

Die beschriebenen und in den Figuren gezeigten Ausführungsbeispiele sind nur beispielhaft gewählt. Unterschiedliche Ausführungsbeispiele können vollständig oder in Bezug auf einzelne Merkmale miteinander kombiniert werden. Auch kann ein Ausführungsbeispiel durch Merkmale eines weiteren Ausführungsbeispiels ergänzt werden. Ferner können erfindungsgemäße Verfahrensschritte wiederholt sowie in einer anderen als in der beschriebenen Reihenfolge ausgeführt werden.

10

5 Ansprüche

1. Wirbelstromsensor (100) mit folgenden Merkmalen:

10 einer elektrisch leitfähigen Senserspule (102) zum Bereitstellen eines elektromagnetischen Wechselfelds (108);

15 einer Sensorfläche (104) zum Beeinflussen des elektromagnetischen Wechselfelds (108), wobei die Senserspule (102) und die Sensorfläche (104) beweglich zueinander angeordnet sind; und

20 einem Federelement (106), das mit der Senserspule (102) und der Sensorfläche (104) gekoppelt ist oder durch die Sensorfläche (104) gebildet wird, und dazu ausgebildet ist, einer Relativbewegung zwischen der Sensorfläche (104) und der Senserspule (102) mit einer Federkraft (114) entgegenzuwirken.

25 2. Wirbelstromsensor (100) gemäß Anspruch 1, bei dem die Senserspule (102) feststehend ausgeführt ist und die Sensorfläche (104) dazu ausgebildet ist, die Relativbewegung auszuführen.

30 3. Wirbelstromsensor (100) gemäß Anspruch 1, bei dem die Sensorfläche (104) feststehend ausgeführt ist und die Senserspule (102) dazu ausgebildet ist, die Relativbewegung auszuführen.

35 4. Wirbelstromsensor (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einer Auswertespule (900) zum Erfassen einer Resonanzfrequenz und/oder einer Güte eines die Senserspule (102) umfassenden Sensorschwingkreises.

5. Wirbelstromsensor (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, bei dem die Senserspule (102) elektrische Anschlüsse zum Erfassen einer Impedanz der Senserspule aufweist.
- 5 6. Wirbelstromsensor (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einer benachbart zu der Senserspule (102) angeordneten Referenzspule (602) zum Bereitstellen eines Referenzfelds, und einer benachbart zu der Sensorfläche (104) angeordneten Referenzfläche (600) zum Beeinflussen des Referenzfelds, wobei die Referenzspule (602) und die Referenzfläche
10 (600) starr zueinander angeordnet sind.
7. Wirbelstromsensor (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einem Gehäuse (400), das eine Schnittstelle zum Befestigen des Wirbelstromsensors (100) aufweist, wobei das Federelement (106), die
15 Sensorfläche (104) und/oder die Senserspule (102) in dem Gehäuse (400) angeordnet sind.
8. Wirbelstromsensor (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, bei dem zwischen der Senserspule (102) und der Sensorfläche (104) ein Gel
20 angeordnet ist.
9. Wirbelstromsensor (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, bei dem die Relativbewegung eine Kippbewegung ist.
- 25 10. Wirbelstromsensor (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einer zweiten Senserspule (2000), die starr mit der Senserspule (102) gekoppelt ist und/oder mit einer zweiten Sensorfläche, die starr mit der Sensorfläche (104) gekoppelt ist.
- 30 11. Wirbelstromsensor (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, bei dem die Sensorfläche (104) und das Federelement (106) durch einen flexiblen Bereich eines metallischen Grundkörpers (2704) ausgebildet sind, wobei der Grundkörper (2704) einstückig und nahtfrei ausgeführt ist und eine Sensorkammer (2700, 2702) aufweist, wobei der flexible Bereich eine Wand
35 der Sensorkammer (2700, 2702) ausbildet.
12. Wirbelstromsensor (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einer weiteren elektrisch leitfähigen Senserspule (102) zum Bereitstellen

eines weiteren elektromagnetischen Wechselfelds, und mit einer weiteren Sensorfläche (104) zum Beeinflussen des weiteren elektromagnetischen Wechselfelds, wobei die weitere Sensorspule (102) und die weitere Sensorfläche (104) beweglich zueinander angeordnet sind, und mit einem weiteren Federelement (106), das mit der weiteren Sensorspule (102) und der weiteren Sensorfläche (104) gekoppelt ist oder durch die weitere Sensorfläche (104) gebildet wird, und dazu ausgebildet ist, einer weiteren Relativbewegung zwischen der weiteren Sensorfläche (104) und der weiteren Sensorspule (102) mit einer weiteren Federkraft entgegenzuwirken.

13. Verfahren (200) zum Messen einer Kraft (F), wobei das Verfahren (200) die folgenden Schritte umfasst:

Bereitstellen (202) eines elektromagnetischen Wechselfelds (108) mittels einer elektrisch leitfähigen Sensorspule (102);

Beeinflussen (204) des elektromagnetischen Wechselfelds (108) mittels einer Sensorfläche (104), wobei die Sensorspule (102) und die Sensorfläche (104) beweglich zueinander angeordnet sind;

Bereitstellen (206) einer Federkraft entgegen einer Relativbewegung zwischen der Sensorspule (102) und der Sensorfläche (104) mittels einem Federelement (106), das mit der Sensorspule (102) und der Sensorfläche (104) gekoppelt ist;

Erfassen (208) einer Veränderung (116) des elektromagnetischen Wechselfelds (108); und

Ermitteln (210) der Kraft (F) unter Verwendung der Veränderung (116).

14. Verfahren (200) gemäß Anspruch 13, bei dem im Schritt (202) des Bereitstellens des elektromagnetischen Wechselfelds (108) ein Referenzfeld mittels einer Referenzspule (602) bereitgestellt wird, und im Schritt (204) des Beeinflussens das Referenzfeld mittels einer Referenzfläche (600) beeinflusst wird, wobei die Referenzspule (602) und die Referenzfläche (600) starr zueinander angeordnet sind, und im Schritt (208) des Erfassens

eine Veränderung des Referenzfelds erfasst wird, und im Schritt (210) des Ermitteln die Kraft (F) ferner unter Verwendung der Veränderung des Referenzfelds ermittelt wird.

1 / 29

Fig. 1

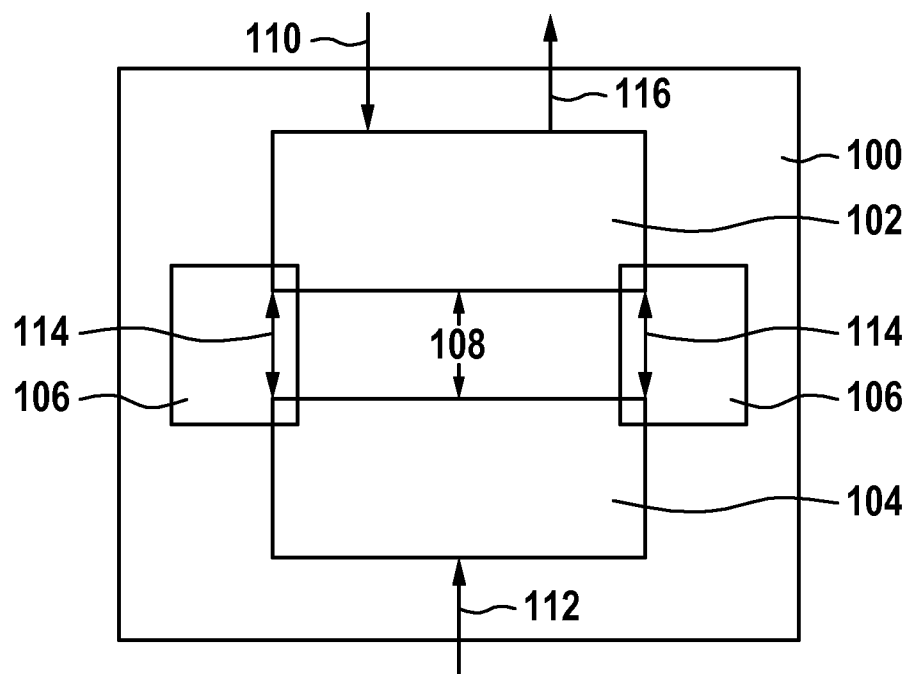
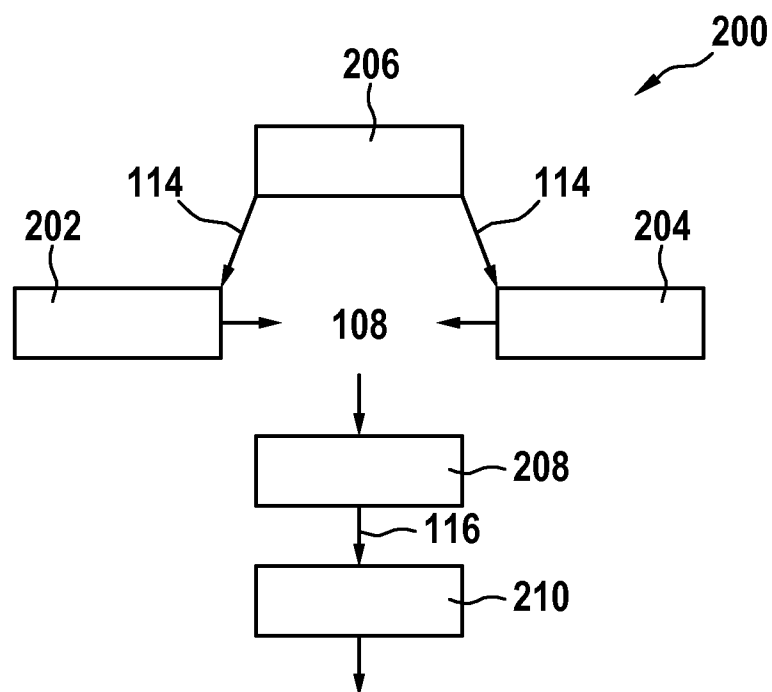
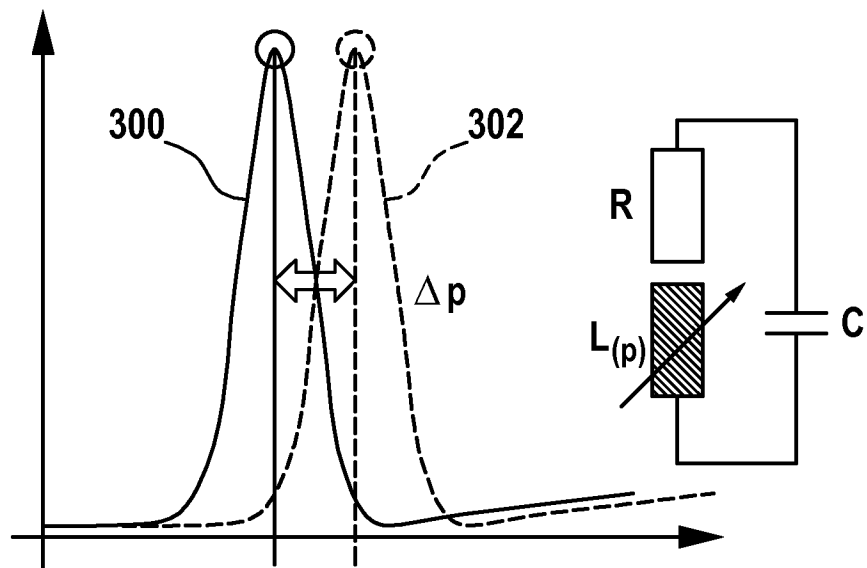


Fig. 2



2 / 29

Fig. 3



3 / 29

Fig. 4a

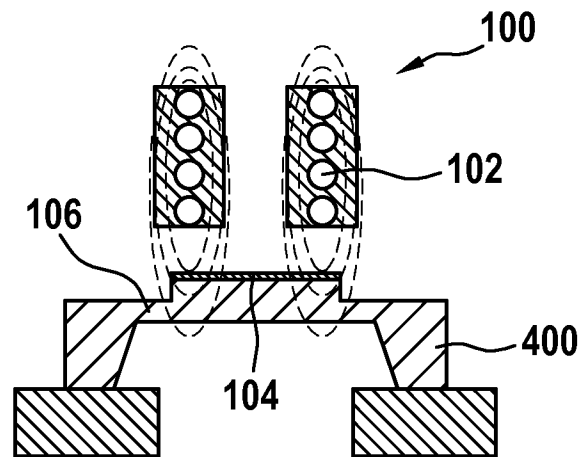


Fig. 4b

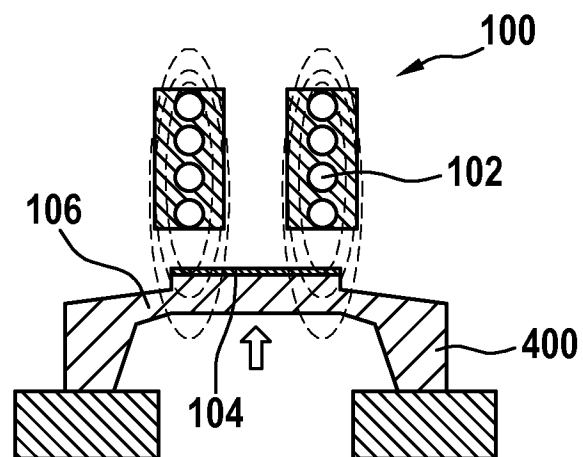
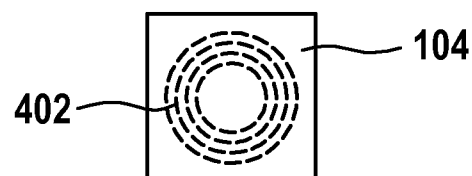


Fig. 4c



4 / 29

Fig. 5a

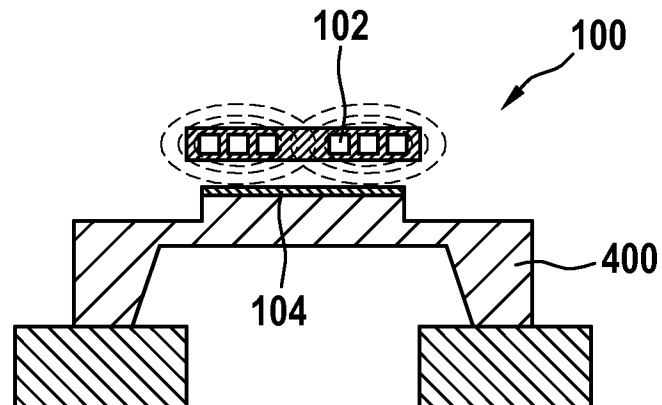


Fig. 5b

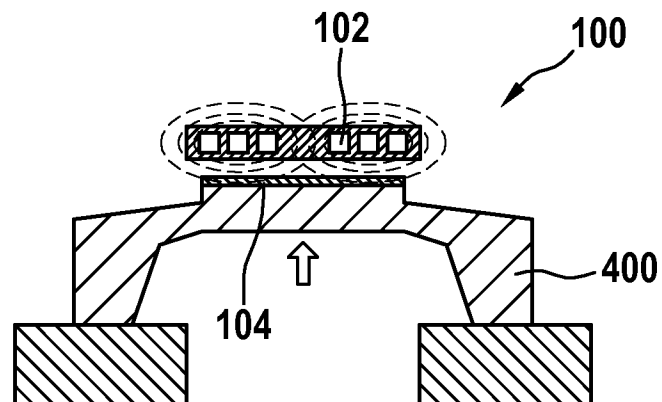
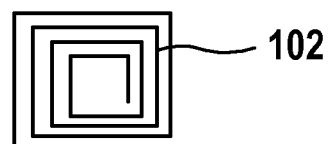


Fig. 5c



5 / 29

Fig. 6

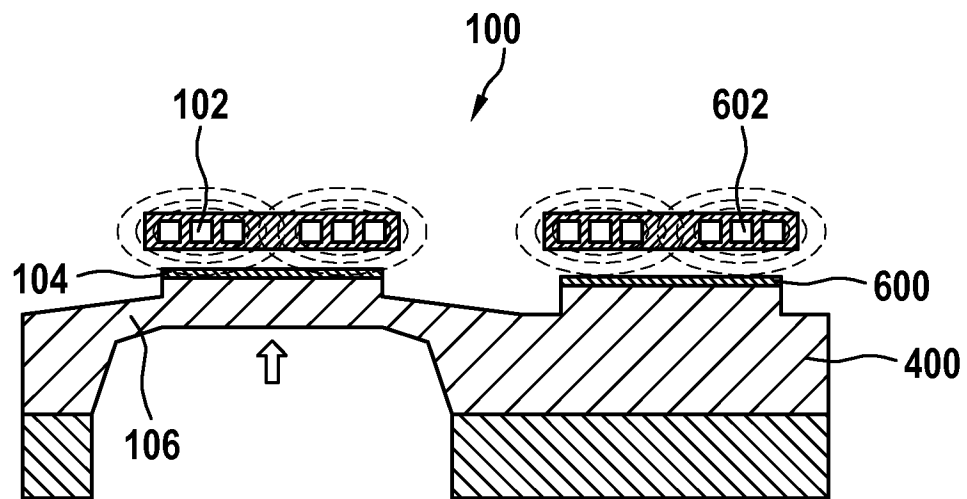
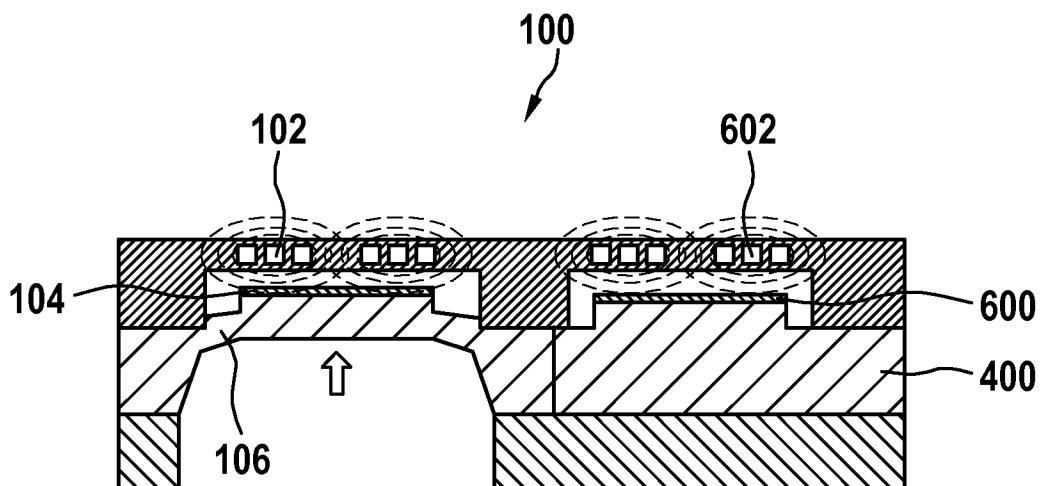


Fig. 7



6 / 29

Fig. 8a

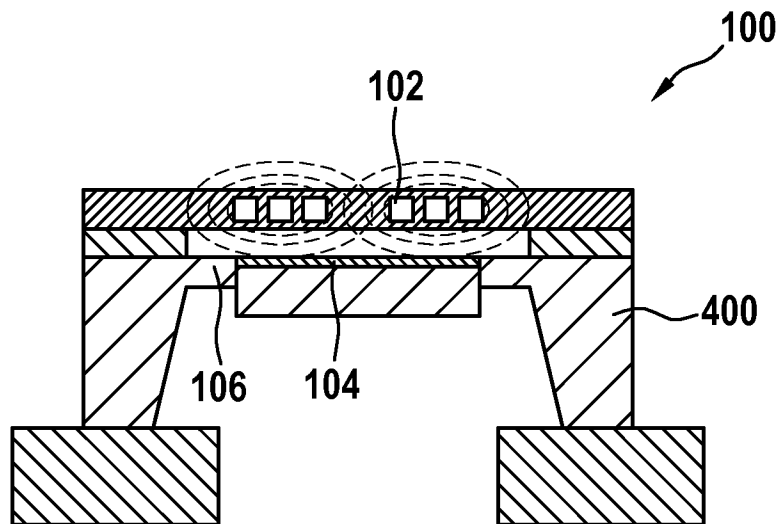
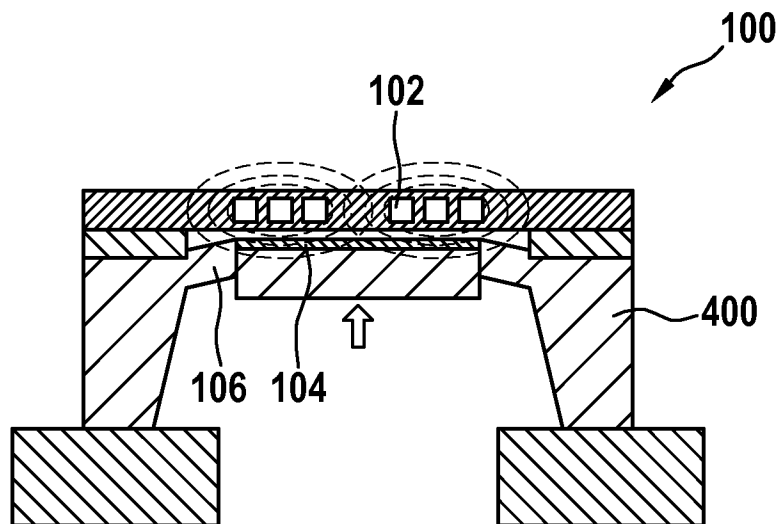


Fig. 8b



7 / 29

Fig. 9a

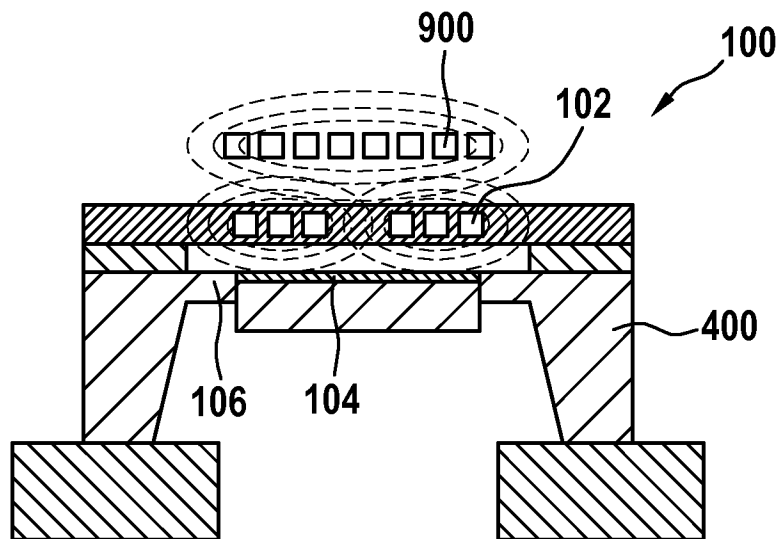
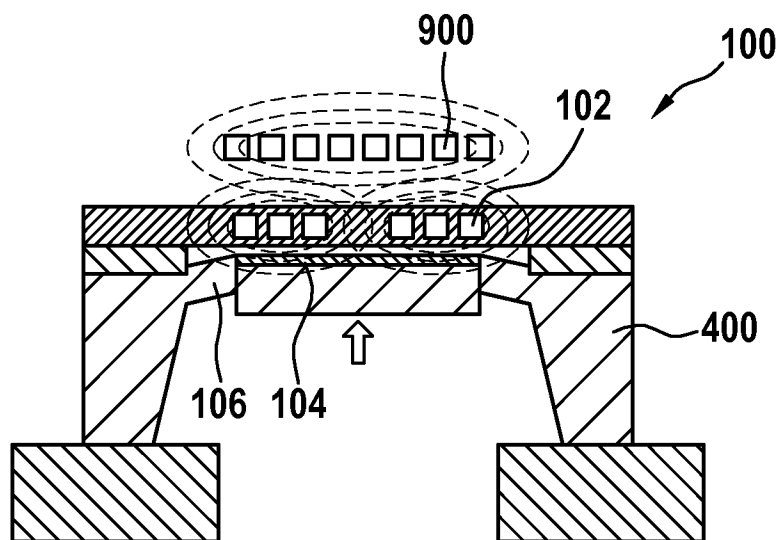
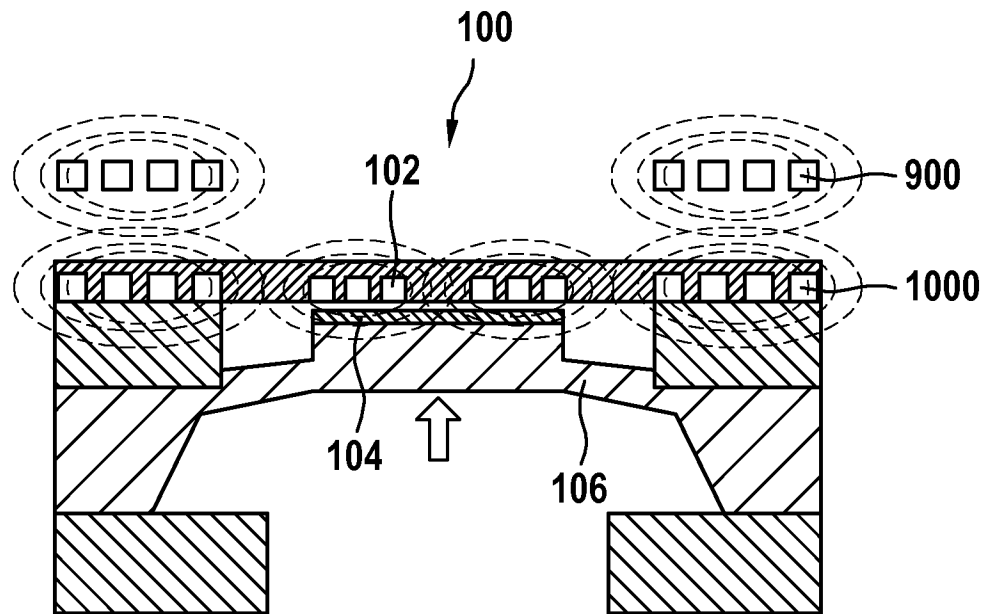


Fig. 9b



8 / 29

Fig. 10



9 / 29

Fig. 11a

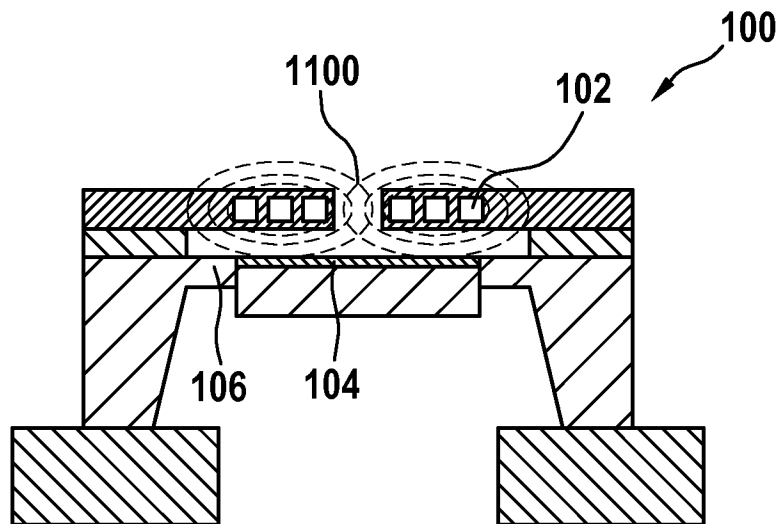
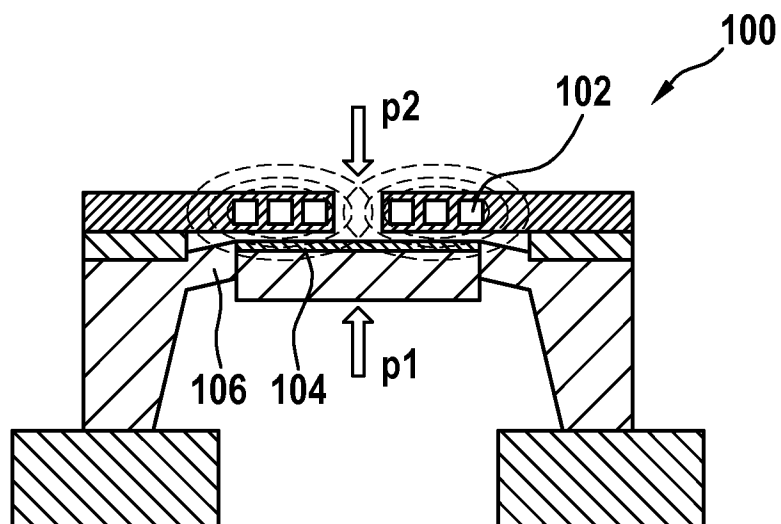


Fig. 11b



10 / 29

Fig. 12a

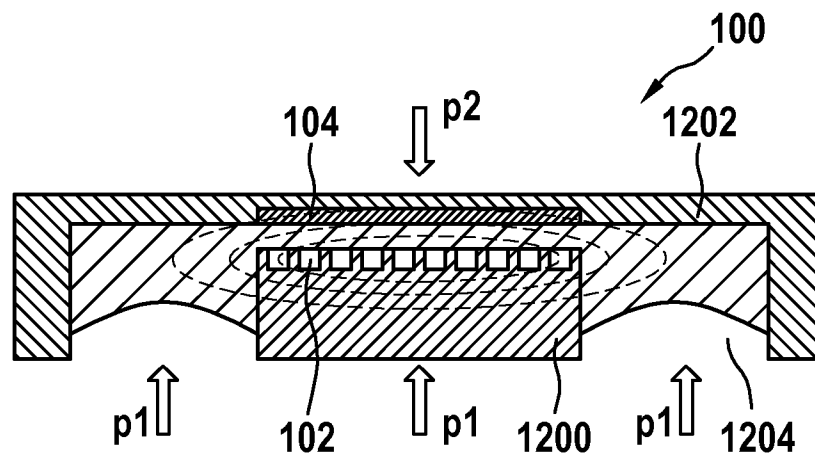
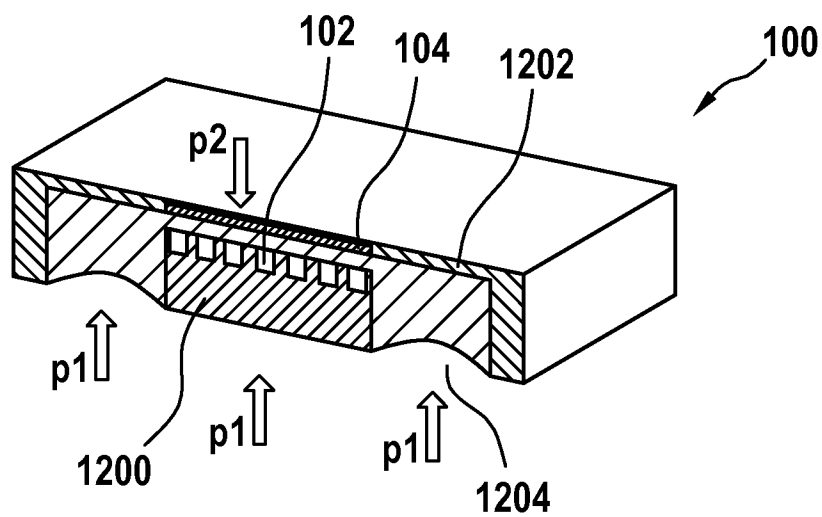


Fig. 12b



11 / 29

Fig. 13a

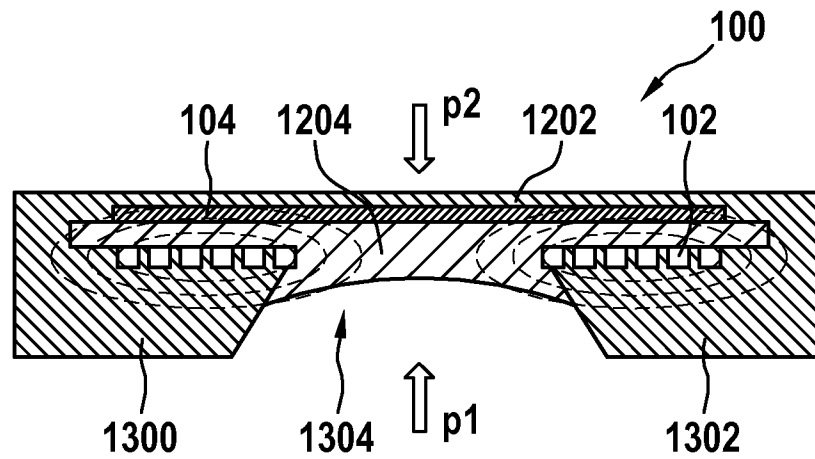
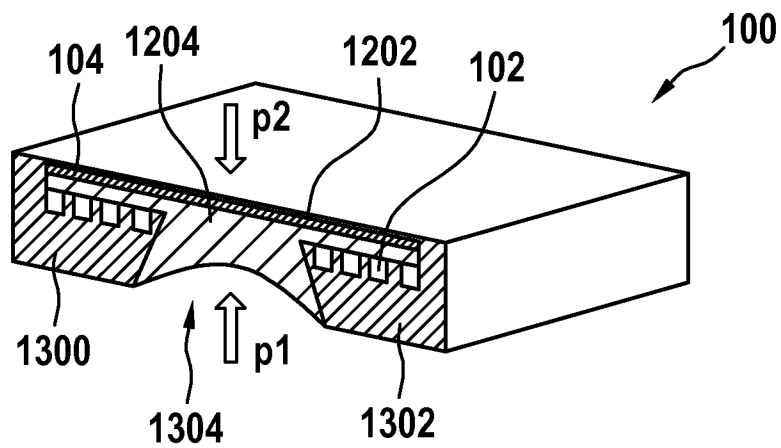


Fig. 13b



12 / 29

Fig. 14a

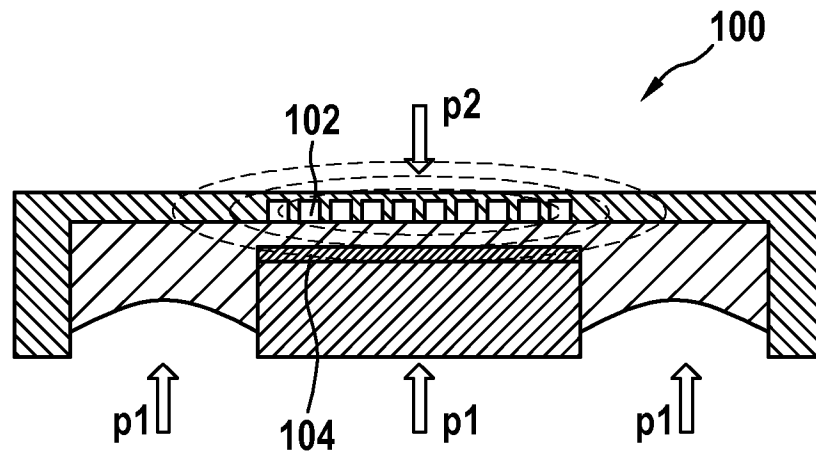
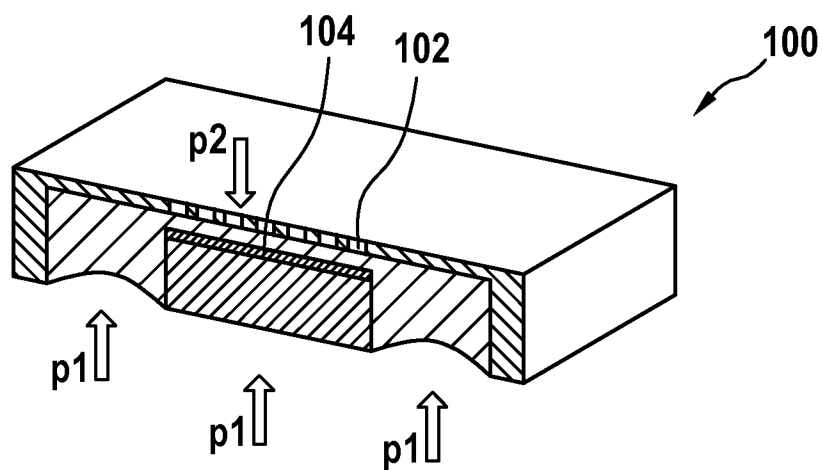


Fig. 14b



13 / 29

Fig. 15a

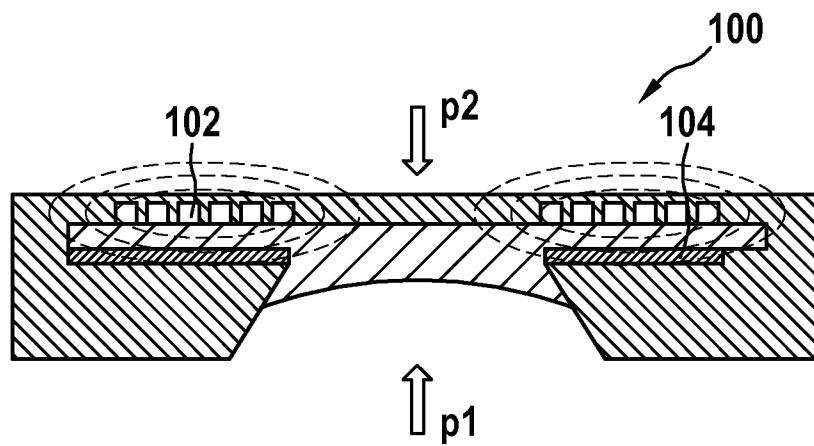
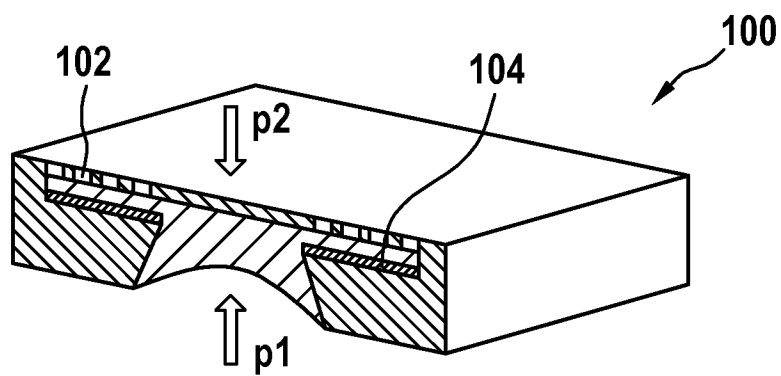


Fig. 15b



14 / 29

Fig. 16a

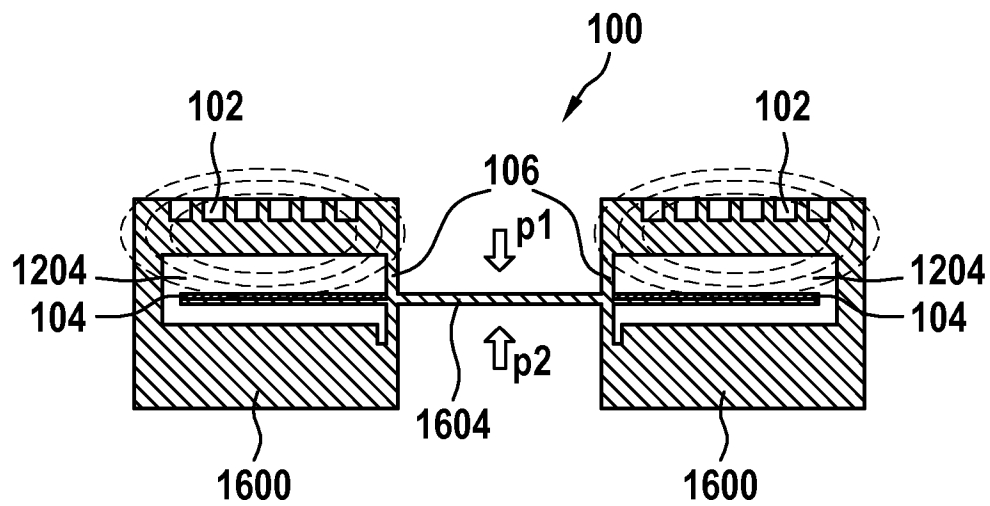
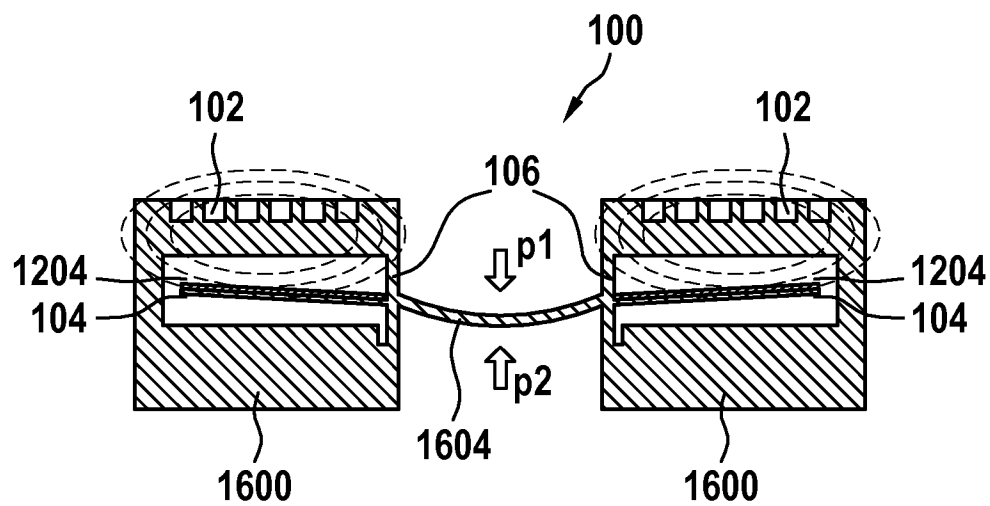


Fig. 16b



15 / 29

Fig. 17

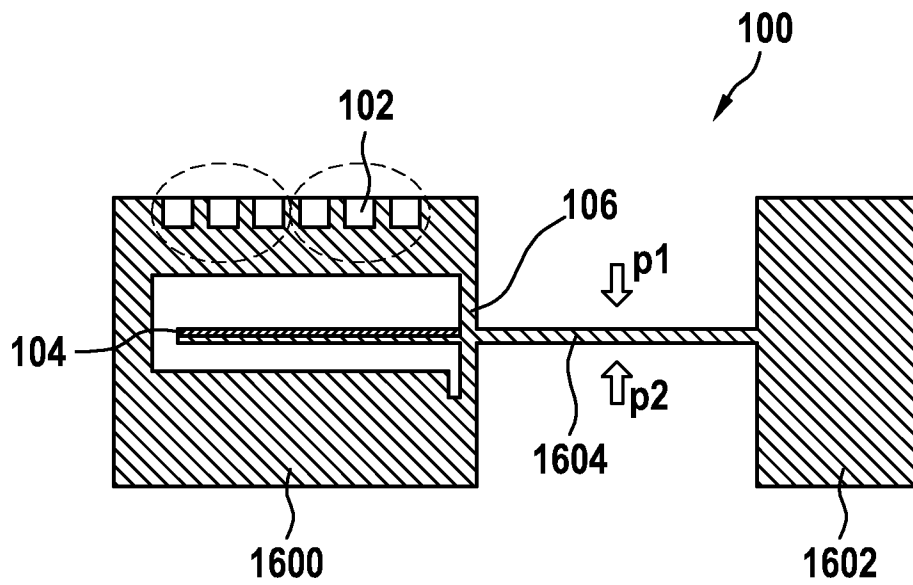


Fig. 18a

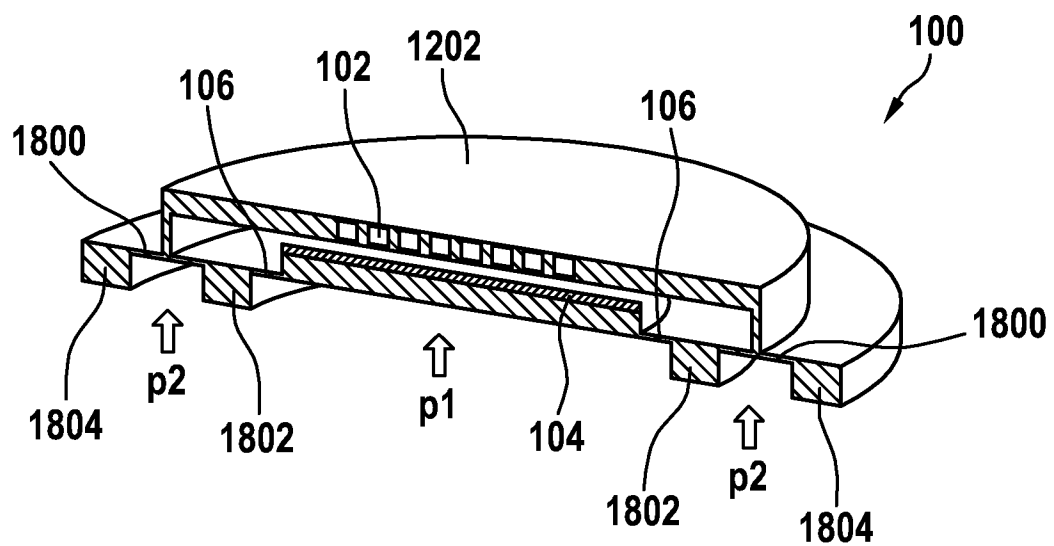


Fig. 18b

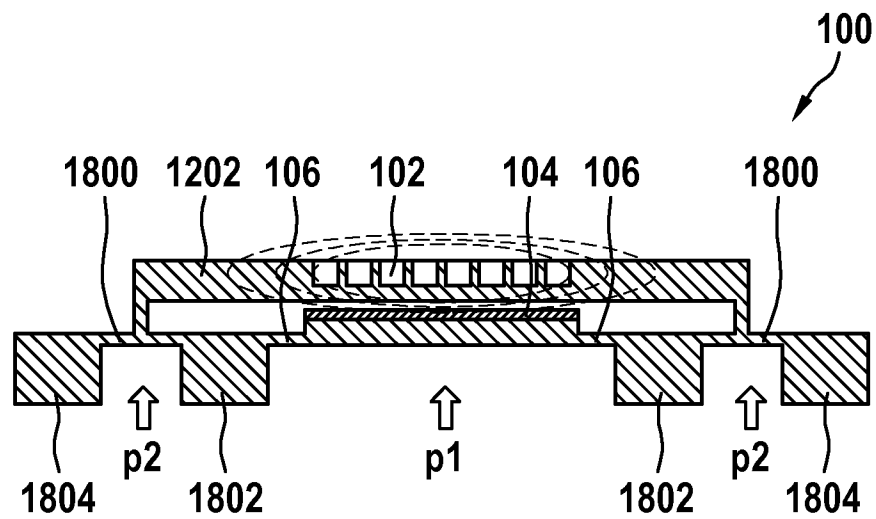
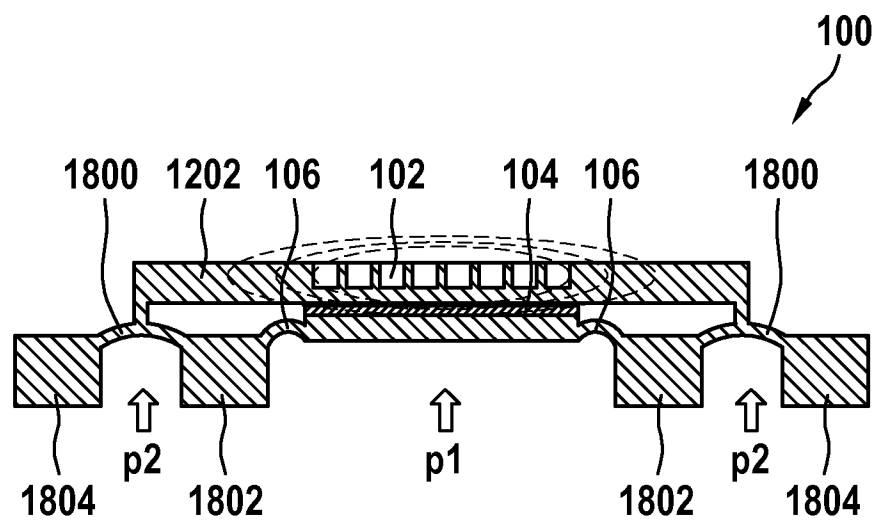


Fig. 18c



17 / 29

Fig. 19a

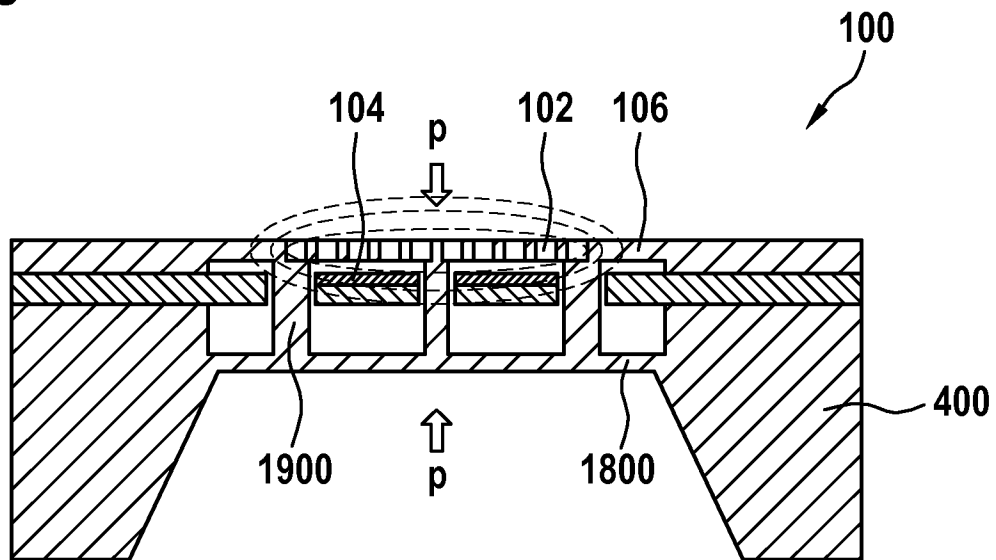
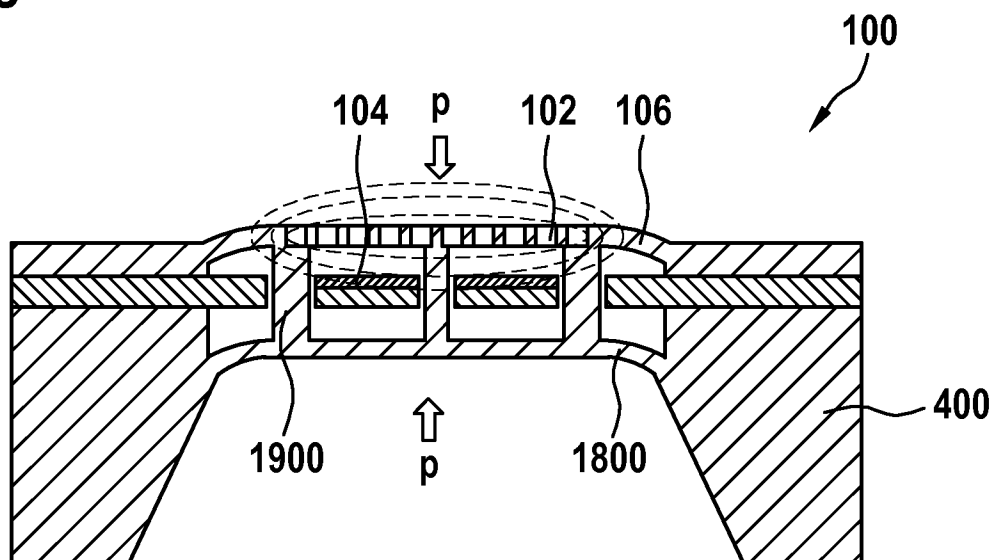


Fig. 19b



18 / 29

Fig. 20a

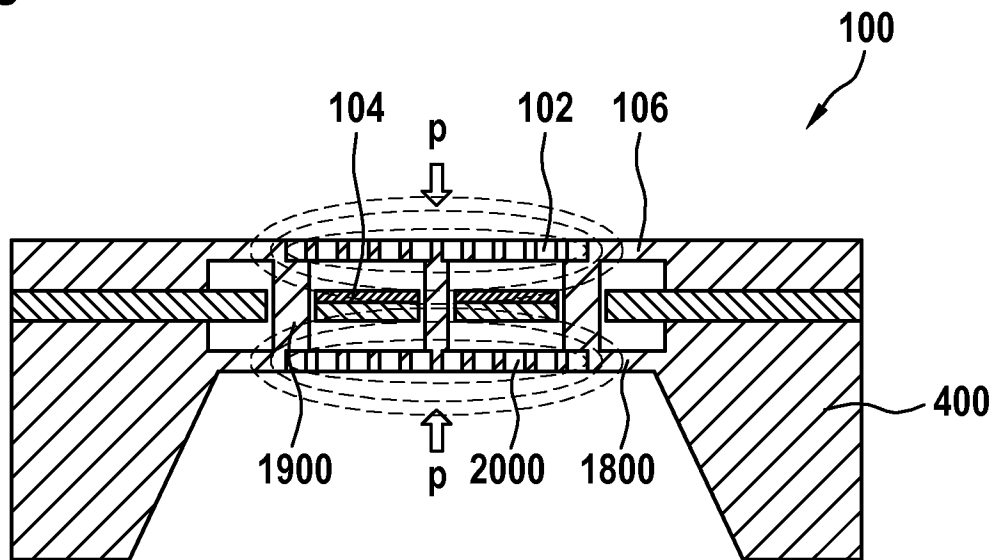
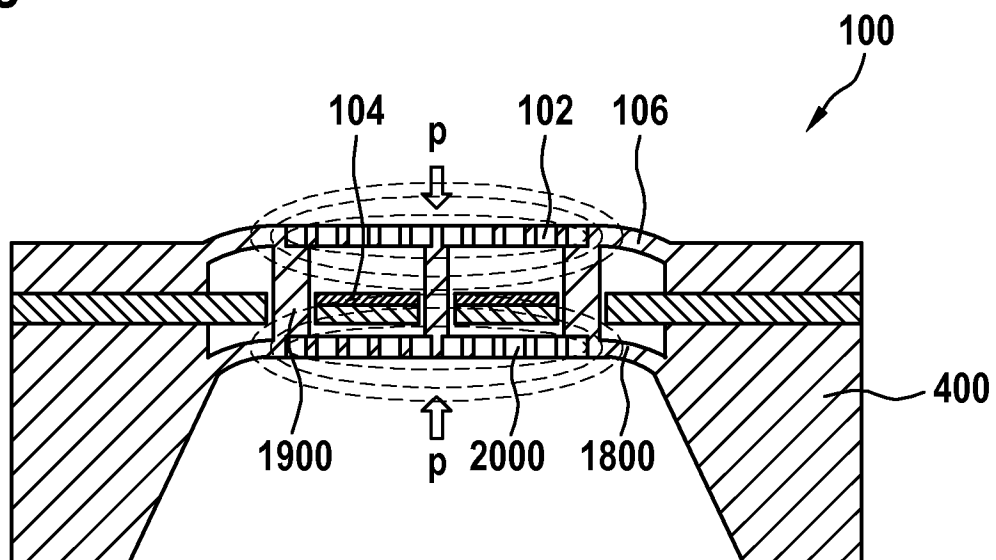
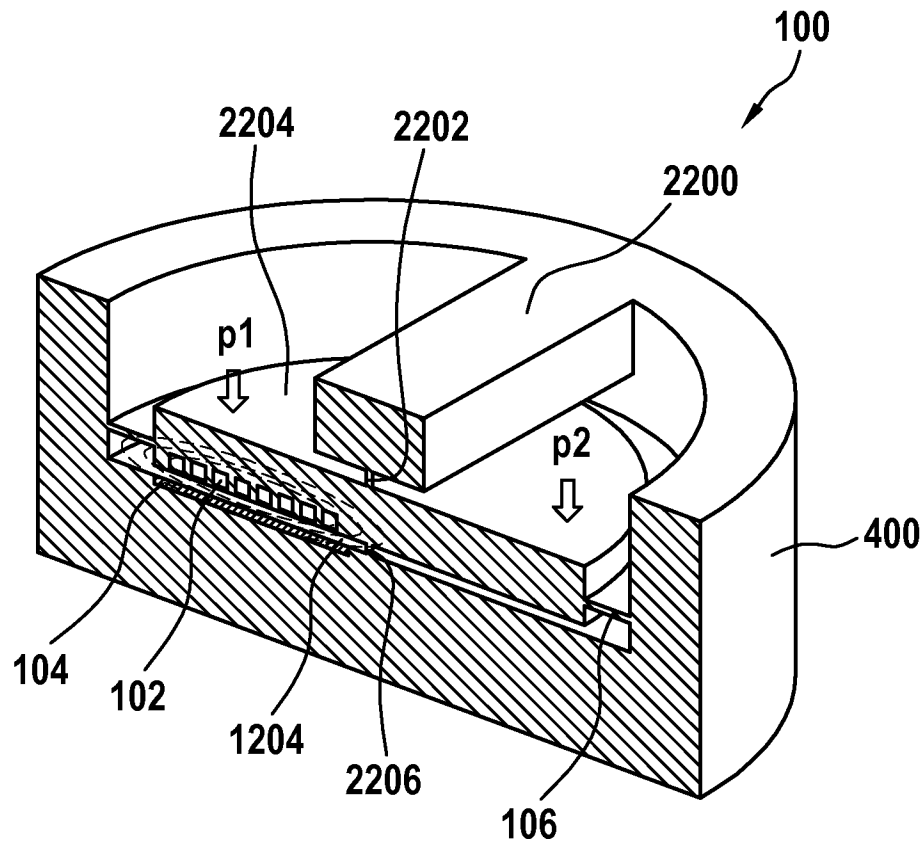


Fig. 20b



20 / 29

Fig. 22a



21 / 29

Fig. 22b

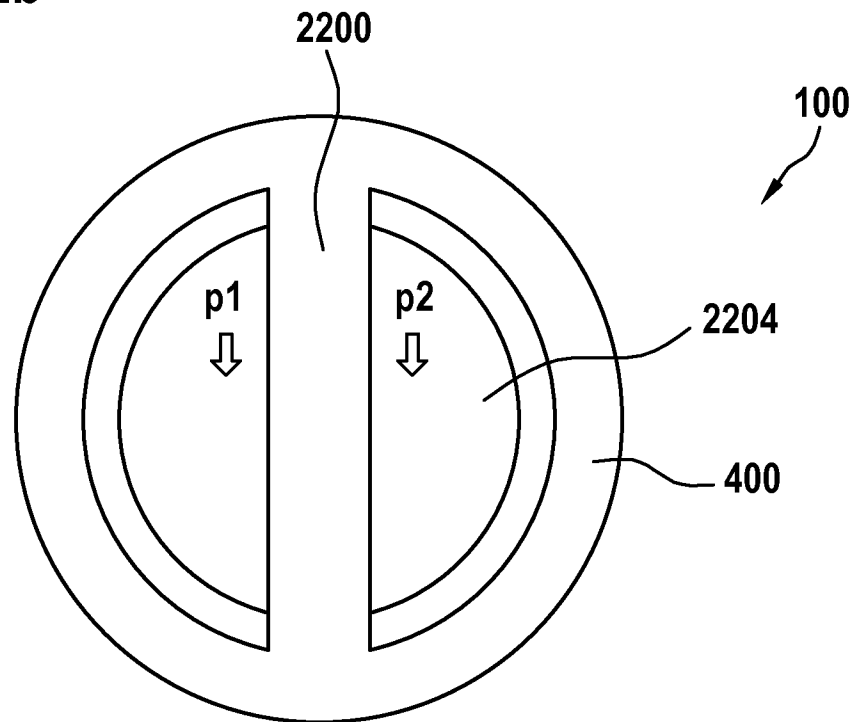
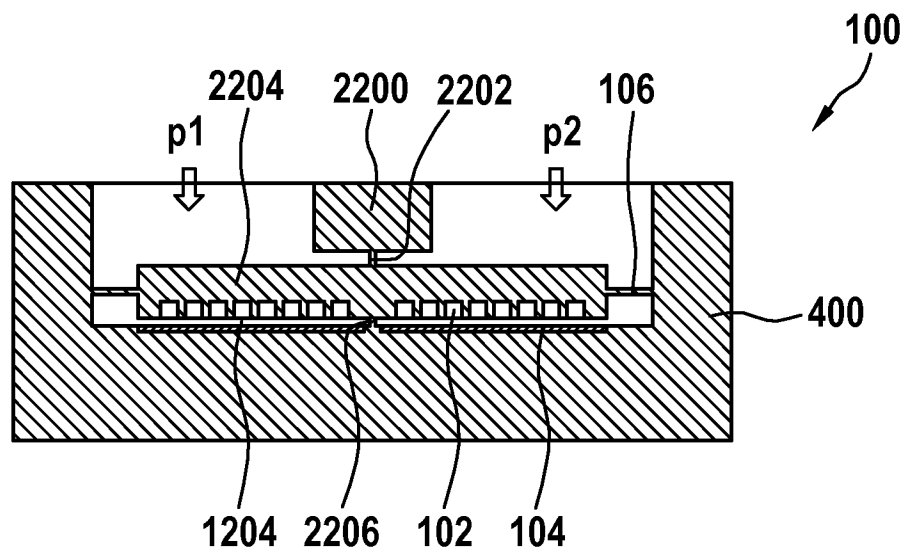


Fig. 22c



22 / 29

Fig. 23a

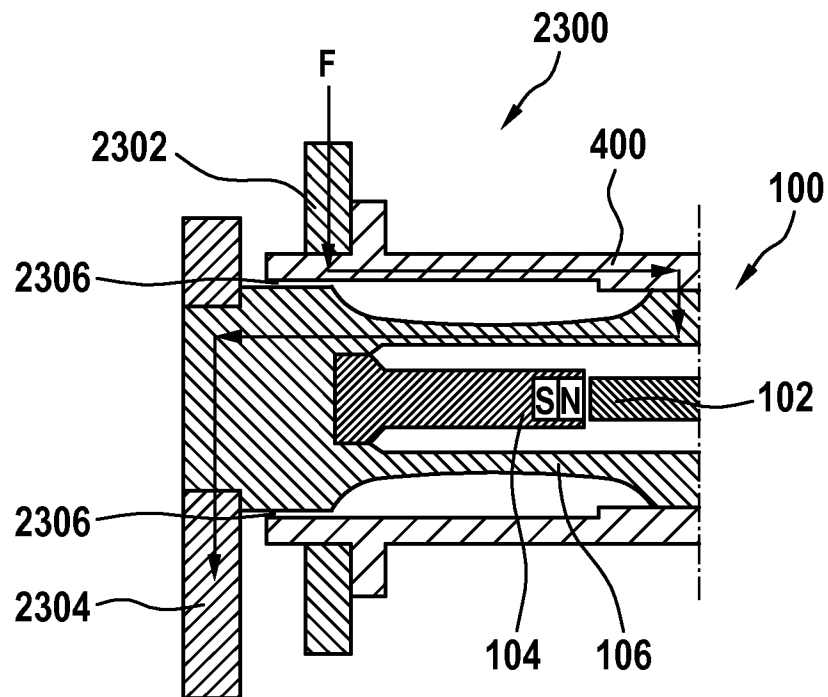
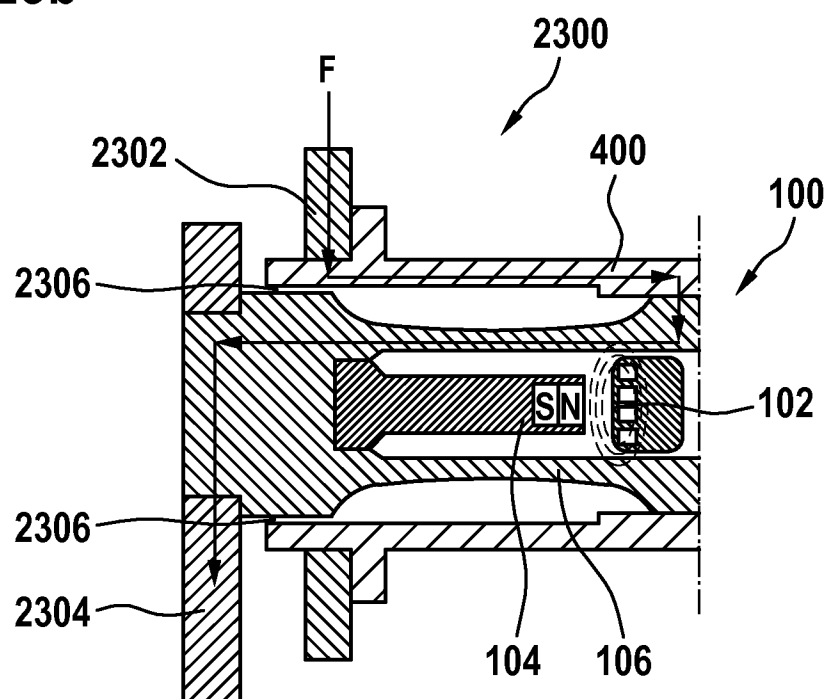


Fig. 23b



23 / 29

Fig. 24

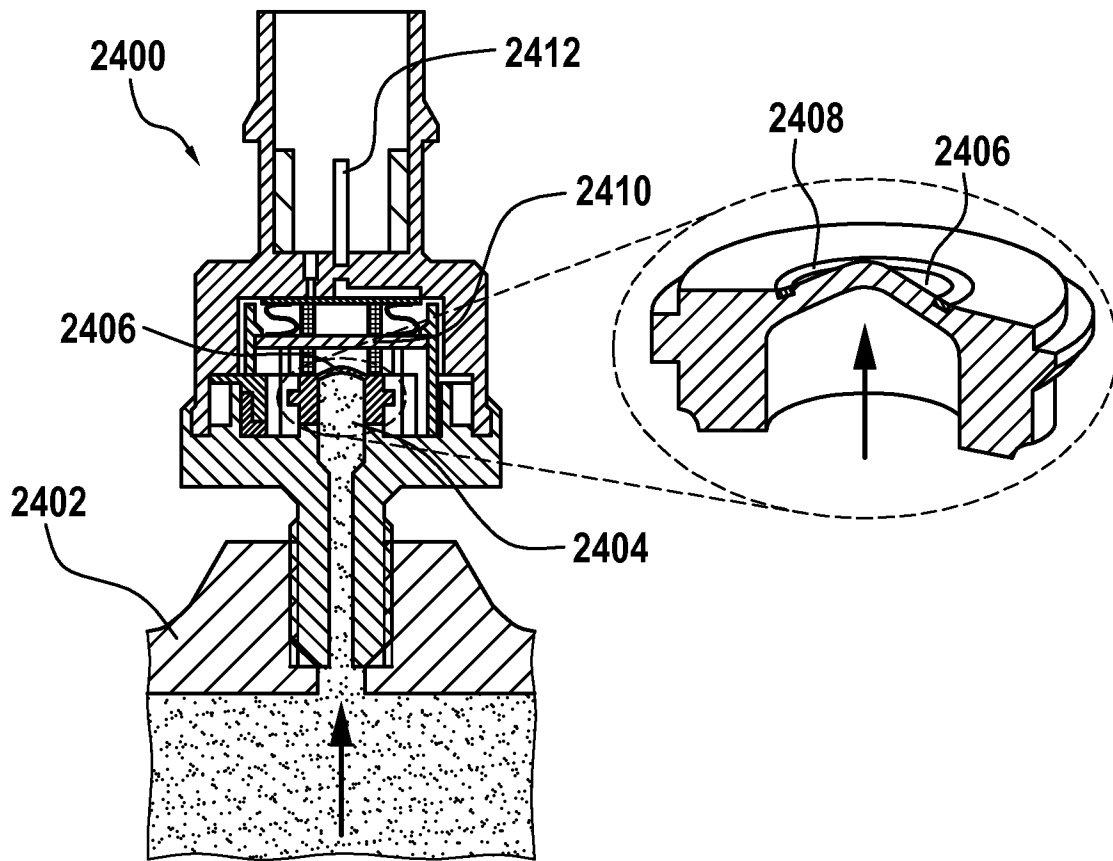
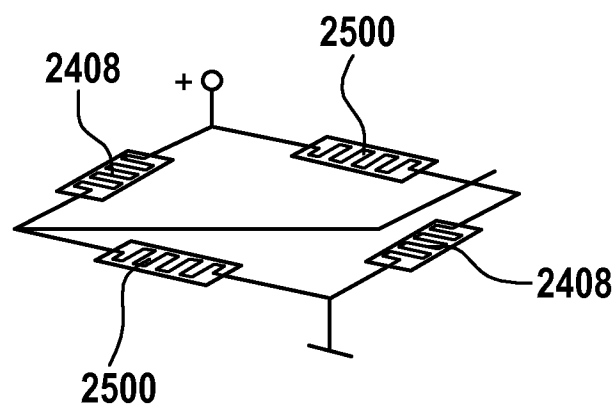


Fig. 25



24 / 29

Fig. 26

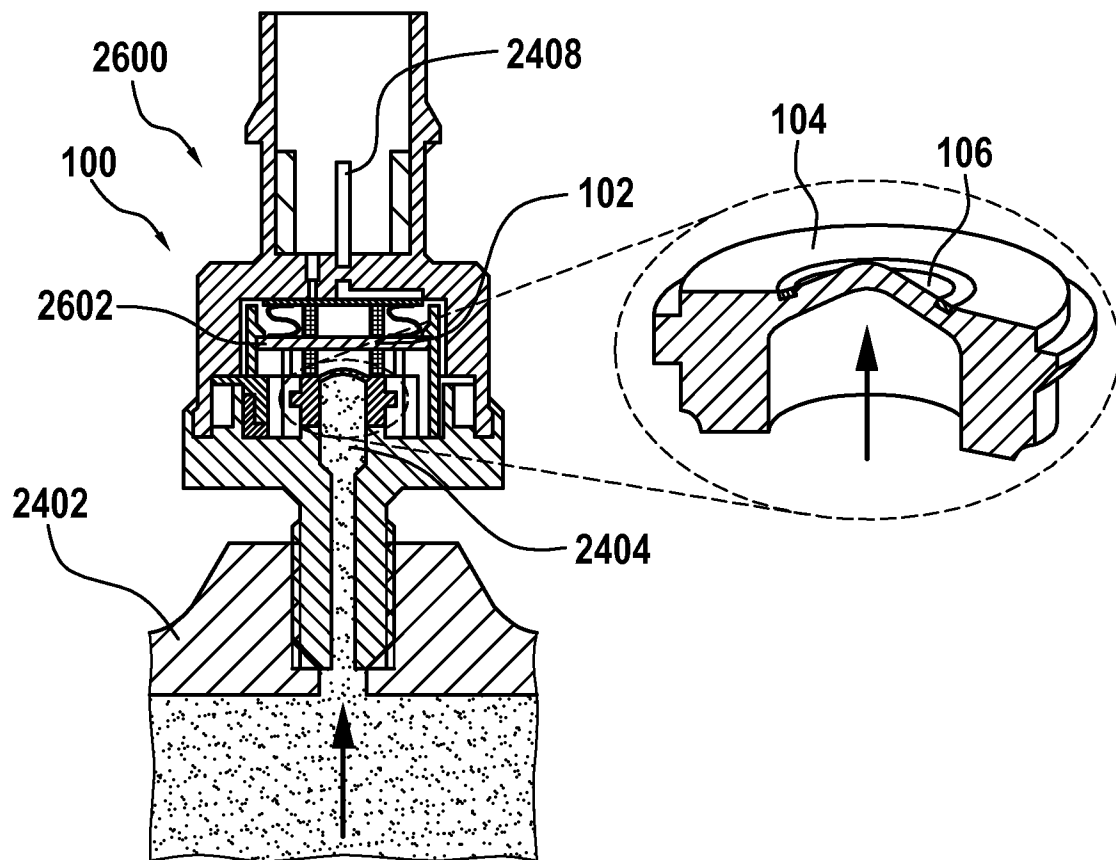


Fig. 27a

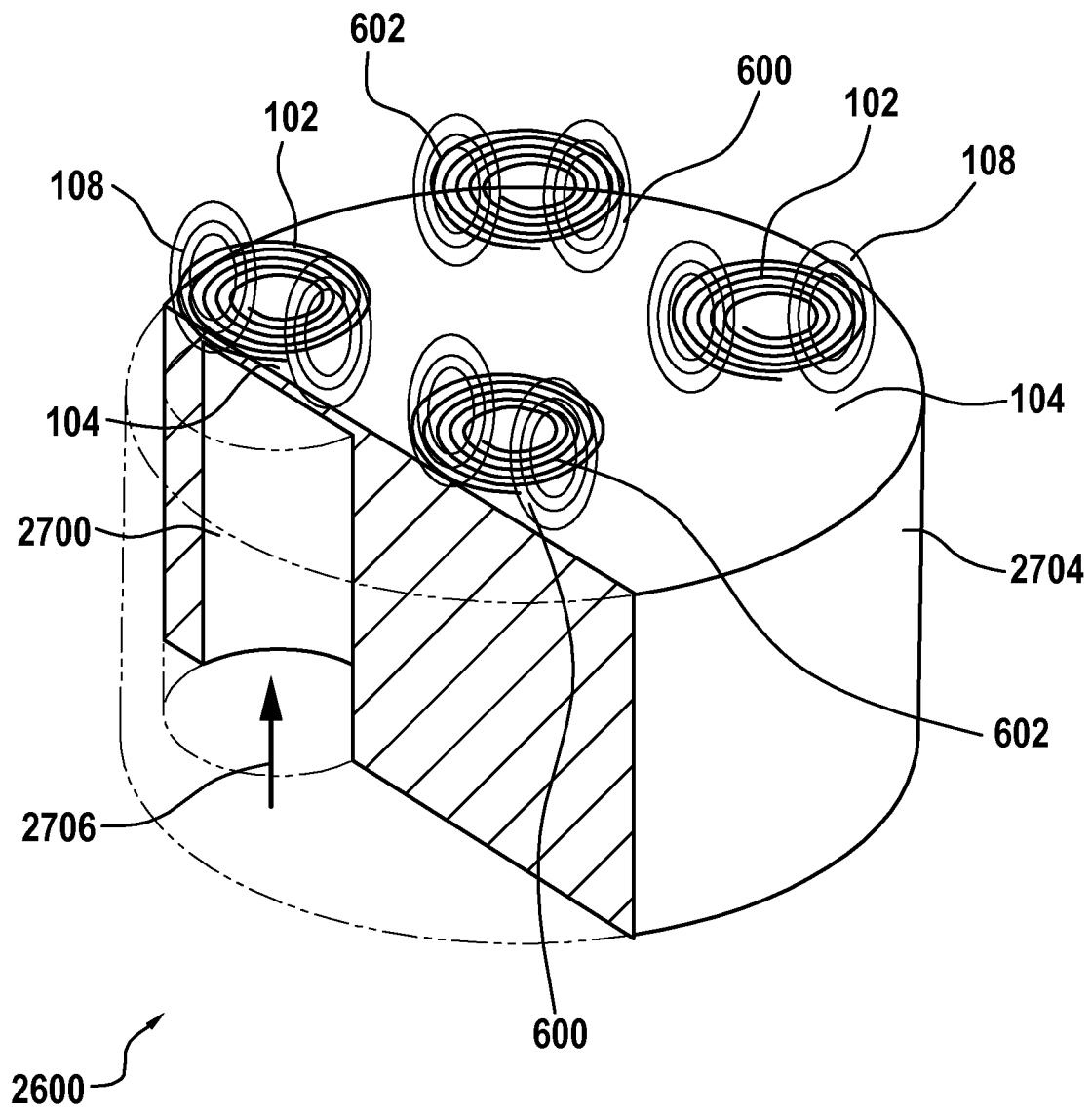
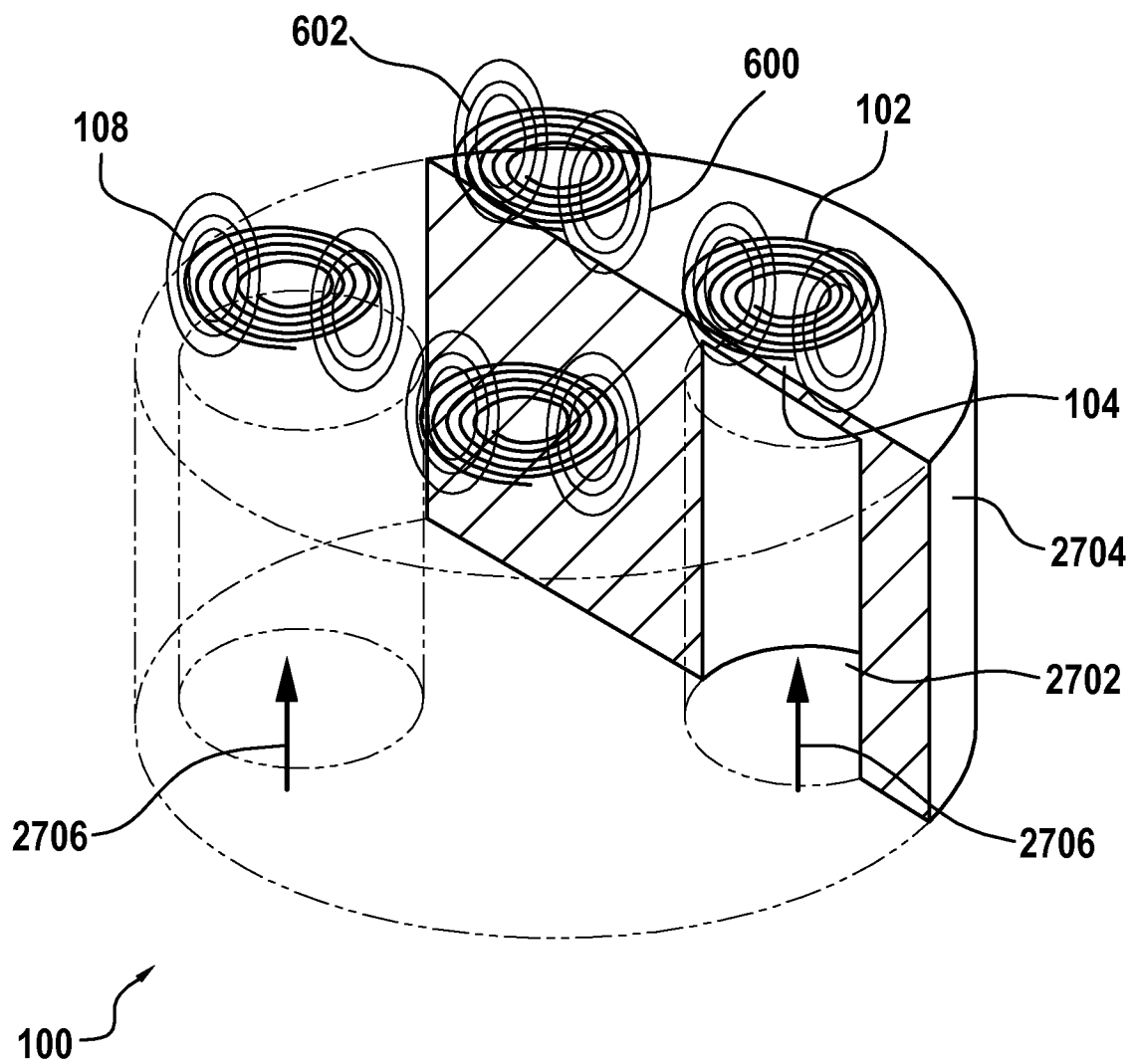


Fig. 27b



27 / 29

Fig. 28a

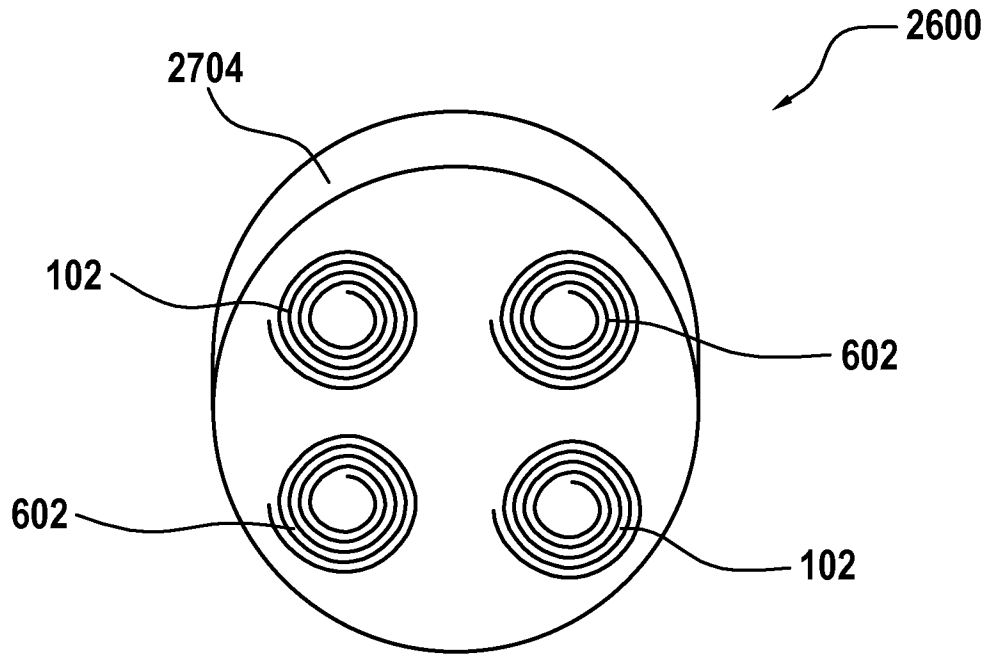
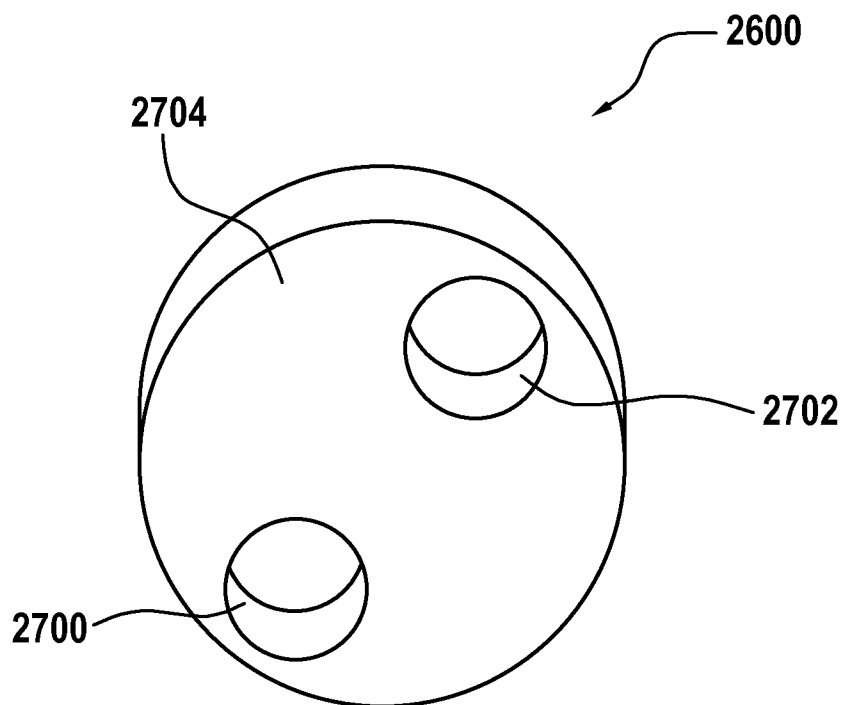
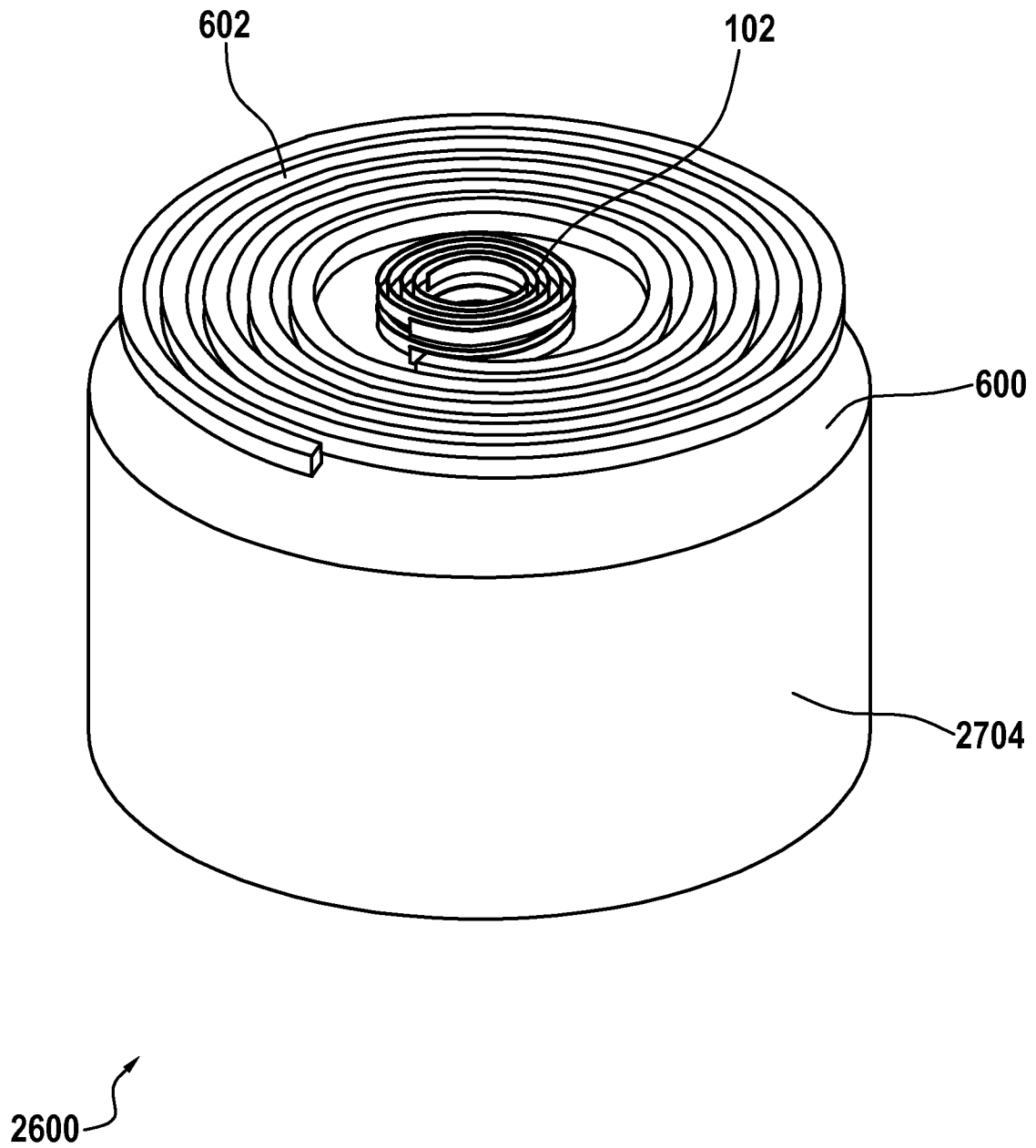


Fig. 28b



28 / 29

Fig. 29a



29 / 29

Fig. 29b

