



(10) **DE 10 2013 113 380 B3** 2015.04.09

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2013 113 380.0**
(22) Anmeldetag: **03.12.2013**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **09.04.2015**

(51) Int Cl.: **G04B 13/00 (2006.01)**
G04B 31/06 (2006.01)
G04D 3/00 (2006.01)
G04B 17/06 (2006.01)

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

(66) Innere Priorität:
10 2013 113 104.2 27.11.2013

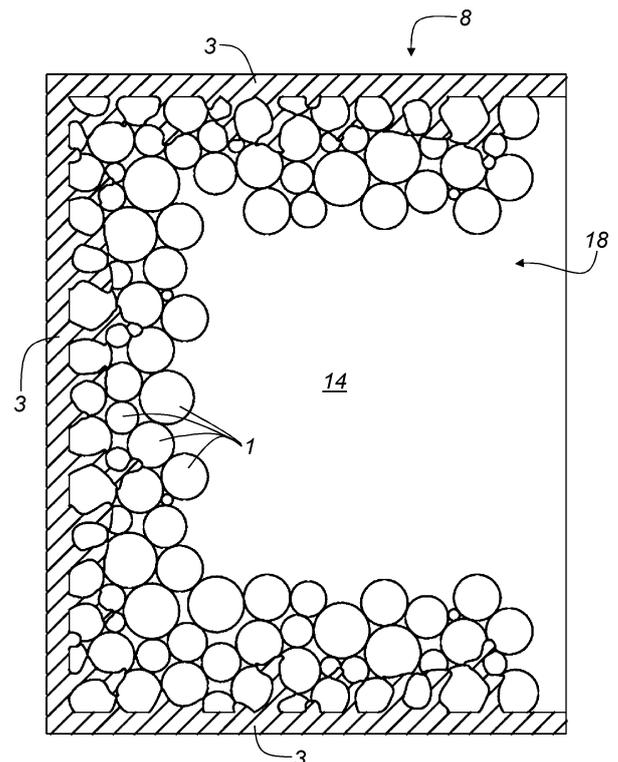
(73) Patentinhaber:
Damasko GmbH, 93092 Barbing, DE

(74) Vertreter:
**Reichert & Lindner Partnerschaft Patentanwälte,
93047 Regensburg, DE**

(72) Erfinder:
Damasko, Konrad, 93055 Regensburg, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:
siehe Folgeseiten

(54) Bezeichnung: **VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON FUNKTIONSELEMENTEN FÜR MECHANISCHE UHRWERKE UND FUNKTIONSELEMENT**



(57) Zusammenfassung: Es ist ein Funktionselement (8) für ein mechanisches Uhrwerk offenbart. Das Funktionselement (8) besteht aus isotropen Silizium-Partikeln (1). Das Funktionselement (8) ist ein Festkörper (6), der durch Sintern hergestellt wird. Der Festkörper (6) hat eine Vielzahl von Poren (2) ausgebildet, die einen maximalen Durchmesser (P) von 0,001 μm bis 1 μm aufweisen. Eine Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung (3) ist auf dem Funktionselement (8) aufgebracht.

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	101 27 733	A1
DE	10 2008 029 429	A1
DE	10 2008 061 182	A1
DE	10 2010 006 790	A1
DE	10 2010 020 792	A1
DE	11 2009 000 068	T5
CH	701 499	A2
EP	1 422 436	A1
WO	2009/ 155 849	A1
WO	2010/ 097 228	A2

MEYER, K. et al.: „Porous Solids and their Characterization“; In: Cryst. Res. Technol. 29, 1994 Seiten 903 – 930

ROUQUEROL, J. et al.: „RECOMMENDATIONS FOR THE CHARACTERIZATION OF POROUS SOLIDS“; In: Pure & Appl. Chem., Vol. 66, No. 8, pp. 1739-1758, 1994

Wikipedia: „Thermische Oxidation von Silizium“; Version zuletzt bearbeitet am 22. November 2009 um 10:34, http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Thermische_Oxidation_von_Silizium&oldid=67109199 [abgerufen am 17.7.2014]

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Funktionselement für mechanische Uhrwerke.

Hintergrund der Erfindung

[0002] Ein mechanisches Uhrwerk weist als zentrale Bestandteile ein Federhaus mit Zugfeder, Räderwerk, Hemmung und Schwingsystem (Unruh) auf. Dabei stellt das Federhaus mit Zugfeder den Antrieb des Uhrwerks zur Verfügung. Die Kraftübertragung erfolgt beginnend beim Federhaus über das Räderwerk zum Ankerrad, das einen Bestandteil der Hemmung darstellt. Das Räderwerk treibt die Zeiger der Uhr an und übersetzt die in der Zugfeder gespeicherte Federkraft in Drehbewegungen verschiedener Geschwindigkeiten, wodurch Sekunden, Minuten, Stunden usw. angezeigt werden.

[0003] Die Unruh umfasst einen Schwingkörper, welcher mittels einer Unruhwellen schwenkbar um eine Drehachse gelagert ist. Ferner ist eine Spiralfeder vorgesehen, die zusammen mit der Masse des Schwingkörpers das schwingungsfähige und taktgebende System bildet. Schließlich umfasst die Unruh eine Vorrichtung zur Gangregulierung, wie beispielsweise einen Ricker, mit welchem die Schwingeneigenschaft der Spiralfeder verändert und damit der gewünschte korrekte Gang der Uhr eingestellt werden kann.

[0004] Der exakte Gang der Uhr basiert auf dem möglichst gleichmäßigen Hin- und Herschwingen der Spiralfeder um ihre Gleichgewichtsposition. Dabei greift der Anker abwechselnd hemmend und freigebend so in das Ankerrad ein, dass die Bewegung stets in gleichem Zeitmaß pulsiert. Ohne stetige Energiezufuhr würde die Unruh jedoch ihre Bewegung einstellen. Deshalb wird kontinuierlich die vom Federhaus kommende Kraft über das Räderwerk auf die Unruh übertragen. Die Hemmung leitet die Kraft über Ankerrad und Anker an die Unruh weiter.

[0005] Beim Verlassen seiner Gleichgewichtsposition bewirkt der Schwingkörper der Unruh ein Vorspannen der Spiralfeder, wodurch ein Rückholdmoment erzeugt wird, das die Spiralfeder, nach ihrer Freigabe durch den Anker, zur Rückkehr in ihre Gleichgewichtsposition veranlasst. Dadurch wird dem Schwingkörper eine gewisse kinetische Energie verliehen, weshalb er über seine Gleichgewichtsposition hinaus schwingt, bis ihn das Gegendrehmoment der Spiralfeder anhält und zum Rückschwingen zwingt. Die Spiralfeder reguliert somit die Schwingungsperiode der Unruh und damit den Gang der Uhr.

[0006] Eine mechanische Uhr besteht aus einer Vielzahl kleinster Funktionselemente, die zum Erreichen

einer hohen Ganggenauigkeit der Uhr exakt aufeinander abgestimmt und mit hoher Genauigkeit geformt werden müssen. Aus dem Stand der Technik sind verschiedene Verfahren zur Herstellung von Funktionselementen für mechanische Uhren bekannt.

[0007] Für die Herstellung der Funktionselemente für mechanische Uhren werden Si-Wafer verwendet. Diese Si-Wafer bestehen im Wesentlichen aus isotropen Silizium-Partikeln, die auf verschiedene Arten hergestellt werden können. Als Nebenprodukt fallen bei der Herstellung von Silizium-Granulat mit Hilfe von Wirbelschicht-Verfahren die gewünschten Silizium-Partikel mit einem Durchmesser von 0,01 µm bis 10 µm an. Bei diesen Verfahren entsteht neben dem grobkörnigen Granulat auch sehr feines Siliziumpulver, dessen Partikelgrößen in dem gewünschten Bereich liegen.

[0008] Siliziumpulver mit Korngrößen im Mikrometer- und Sub-Mikrometer-Bereich lässt sich auch aus Silan-Gas durch Hochtemperatur-Pyrolyse, nach dem Siemens-Verfahren, durch Wasserstoff-Reduktionsverfahren unter Einsatz von Tetrachlorsilanen oder durch andere chemische Gasphasenabscheidungsverfahren erzeugen.

[0009] Aus dem Siliziumpulver wird mittels eines Sinterprozesses ein nanopartikulärer Probenkörper hergestellt. Hierzu offenbart die internationale Patentanmeldung WO 2010/097228 ein Spark-Plasma-Sintern. Die deutsche Veröffentlichung DE 11 2009 000 068 T5 der internationalen Patentanmeldung WO 2009/155849 offenbart den Einsatz von Siliziumpulver mit einem Korndurchmesser von 0,1 µm bis 1000 µm bei kaltisostatischen oder heißisostatischen Sinterprozess.

[0010] Die DE 10 2008 061 182 A1 offenbart die Herstellung von Spiralfedern durch Laserschneiden aus der Nuttschicht eines Silizium-Wafers. Aus der EP 1 422 436 A1 ist ein Verfahren zum Herstellen von Spiralfedern für das Schwingsystem von mechanischen Uhren aus einkristallinem Silizium bekannt.

[0011] Die DE 101 27 733 A1 offenbart ein Verfahren zum Herstellen von Schrauben- oder Spiralfedern aus kristallinem, insbesondere einkristallinem Silizium durch eine mechanische abtragende Bearbeitung. Schließlich offenbart die DE 10 2008 029 429 A1 ein Verfahren zum Herstellen von Spiralfedern für Uhrwerke, bei dem die Spiralfedern durch Ätzverfahren mit Hilfe von Ätzmasken aus einem Silizium-Ausgangsmaterial gewonnen werden.

[0012] Die deutsche Offenlegungsschrift DE 10 2010 006 790 A1 offenbart ein mechanisches Schwingsystem für Uhren. Die Uhrfeder des Schwingsystems ist aus einem nicht metallischen

kristallinen oder gesinterten Werkstoff hergestellt, der eine bestimmte Korngröße besitzt.

[0013] MEYER K. et al.: „Porous Solids and their Characterization“; In: Cryst. Res. Technol. 29, 1994 Seiten 903–930, beschreibt die Ausbildung der Größe und Art der Poren bei unterschiedlichen Aggregationen von Teilchen.

[0014] ROUQUEROL, J. et al.: „Recommendations for the Characterization of Porous Solids“; In: Pure & Appl. Chem., Vol. 66, No. 8, pp. 1739–1758, 1994 beschreibt ein Verfahren zur Charakterisierung von porösen Festkörpern.

[0015] Die deutsche Offenlegungsschrift DE 10 2010 020 792 A1 offenbart ebenfalls ein mechanisches Schwingsystem für Uhren. Die Uhrfeder des Schwingsystems ist aus einem nicht metallischen kristallinen oder gesinterten Werkstoff hergestellt, der eine bestimmte Korngröße besitzt.

[0016] Aus Wikipedia „Thermische Oxidation von Silizium“, Version zuletzt bearbeitet am 22. November 2009 um 10:34, ist bekannt, dass auf einem Werkstück aus Silizium bei der thermischen Oxidation eine Schicht aus SiO_2 ausgebildet wird.

[0017] Die schweizer Patentanmeldung CH 701 499 A2 offenbart die Behandlung eines Bauteils aus Silizium, um dieses mechanisch zu verstärken. Eine aufgebrauchte Oxidschicht wird chemisch entfernt. Durch das Verfahren werden Einkerbungen im Silizium reduziert.

[0018] Die Dicke der Beschichtung aus Siliziumoxid bzw. Siliziumdioxid, die für ein gegebenes Funktionselement erforderlich ist, um eine optimale Temperaturkompensation zu erreichen, kann vom Fachmann problemlos berechnet oder einfach experimentell bestimmt werden. Die so berechneten bzw. bestimmten Schichtdicken für den Siliziumoxid-Überzug sind tabellarisch verfügbar. Üblich sind Beschichtungen mit Dicken von 3 bis 8 μm .

[0019] Die aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren zum Aufbringen einer Siliziumoxid-Beschichtung sind alle sehr zeitaufwändig. Die Durchführung einer thermischen Oxidation zur Erzeugung einer üblichen Schichtdicke von 3 bis 8 μm dauert in der Regel 40 bis 80 Stunden.

[0020] Aufgabe der Erfindung ist, ein Funktionselement für eine mechanische Uhr derart auszugestalten, dass das Funktionselement im Bewegungsverhalten im Idealfall keine Temperaturabhängigkeit zeigt.

[0021] Die obige Aufgabe wird durch ein Funktionselement gelöst, das die Merkmale des Anspruchs 1 umfasst.

[0022] Die Funktionselemente einer mechanischen Uhr sollten in ihrem Bewegungsverhalten im Idealfall keine Temperaturabhängigkeit zeigen. Zur Minimierung der Temperaturabhängigkeit des Bewegungsverhaltens von aus Silizium gefertigten Funktionselementen wird die Tatsache ausgenutzt, dass Siliziumoxid einen, dem Silizium entgegengesetzten Temperaturkoeffizienten des Elastizitätsmoduls aufweist. Durch eine Beschichtung eines Funktionselements aus Silizium mit einem Überzug aus Siliziumoxid bzw. Siliziumdioxid und dem Eindringen von Siliziumoxid bzw. Siliziumdioxid in das Funktionselement kann die Empfindlichkeit des Funktionselements gegenüber Temperaturschwankungen auf ein Minimum reduziert werden.

[0023] Die Herstellung mindestens eines Funktionselements für mechanische Uhrwerke umfasst das Herstellen eines Festkörpers durch Sintern der homogenisierten Mischung aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Partikeln, wobei die Silizium-Partikel einen Durchmesser von 0,01 μm bis 10 μm und die im Festkörper ausgebildeten Poren einen maximalen Durchmesser von 0,001 μm bis 1 μm aufweisen. Schließlich erfolgt die Vereinzelung des mindestens einen Funktionselements durch Abtrag des das jeweilige Funktionselement umgebenden Materials des Festkörpers.

[0024] Auf dem Funktionselement wird durch eine thermische Oxidation eine Oberflächenbeschichtung aus Siliziumoxid bzw. Siliziumdioxid erzeugt und im Funktionselement bilden sich ebenfalls durch die thermische Oxidation eine Vielzahl von Ankern aus. Die Anker dringen in das Material des Funktionselements ein und sorgen für eine Temperaturabhängigkeit des Bewegungsverhaltens des Funktionselements.

[0025] Die im Wesentlichen isotropen Silizium-Partikel weisen bevorzugt einen Durchmesser von 0,03 μm bis 1 μm auf. Die im Festkörper ausgebildeten Poren haben bevorzugt einen Durchmesser von 0,01 μm bis 0,3 μm .

[0026] Der durch das Sintern erzeugte Festkörper weist eine Dichte von zumindest 95% und bevorzugt von zumindest 99% der Dichte von kristallinem Silizium auf.

[0027] Durch das Zusammenspiel der Größe der verwendeten Silizium-Partikel und der Größe der nach dem Sintern im Festkörper gebildeten Poren, erhält man Funktionselemente, deren Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung und auch die Ausbildung der Anker in deutlich verringerter Reaktionszeit er-

zeugt werden. Daraus resultiert eine weiter verbesserte mechanische Stabilität bei gleichzeitig minimierter Temperaturabhängigkeit des Bewegungsverhaltens.

[0028] Bei der Erzeugung der Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung kann die Oxidation des Siliziums aufgrund der auch an der Oberfläche lokalisierten Poren schneller voranschreiten, da eine größere Oberfläche der im Festkörper vorhandenen Silizium-Partikel für die Oxidation zugänglich ist. Es bilden sich somit Anker im Funktionselement durch die thermische Oxidation derart aus, dass sich die Anker aus Siliziumoxid zumindest teilweise bis in eine zweite Schicht aus Silizium-Partikel erstrecken.

[0029] Beispielsweise kann durch die Beschichtung einer Silizium-Spiralfeder mit einem Überzug aus Siliziumoxid die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls der Spiralfeder und damit die Temperaturabhängigkeit der Rückholkonstante C minimiert werden. Dadurch kann die Empfindlichkeit der Spiralfeder gegenüber Temperaturschwankungen auf ein Minimum reduziert werden.

[0030] Mit voranschreitender Oxidation bilden sich im Material des Funktionselements die Siliziumoxid-Anker aus, die bis in die zweite oder dritte Schicht von Silizium-Partikeln in das Funktionselement hineinragen. Überraschenderweise hat sich gezeigt, dass diese Siliziumoxid-Anker dem Funktionselement eine deutlich verbesserte mechanische Stabilität verleihen.

[0031] Diese erhöhte mechanische Stabilität tritt neben der bekannten, durch eine Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung bewirkten Minimierung der Temperaturabhängigkeit des Bewegungsverhaltens des Funktionselements auf.

[0032] Die verwendeten Silizium-Partikel weisen eine „im Wesentlichen isotrope“ Form auf. Unter dem Begriff „im Wesentlichen isotrop“ werden im Rahmen der vorliegenden Erfindung Partikel verstanden, die keine deutlich ausgebildete Vorzugsrichtung aufweisen. Die Silizium-Partikel weisen keine ideale isotrope Form auf, da sie nicht als Kugeln ausgebildet werden, sondern leichte Unregelmäßigkeiten wie Kanten und kleine, ebene Flächen aufweisen.

[0033] Unter dem Durchmesser eines im Wesentlichen isotropen Silizium-Partikels wird der maximale Durchmesser des Silizium-Partikels verstanden.

[0034] Die erfindungsgemäß vorgesehene isostatische Pressmethode beruht auf dem physikalischen Gesetz, dass sich der Druck in Flüssigkeiten und Gasen allseitig gleichmäßig fortpflanzt und auf den beaufschlagten Flächen Kräfte erzeugt, die zu diesen Flächen direkt proportional sind. In dem erfindungs-

gemäßen Verfahren wird eine mit Silizium-Partikeln gefüllte Pressform in den Druckbehälter einer Pressanlage eingebracht. Der Druck, der über die Flüssigkeit in dem Druckbehälter allseitig auf die Pressform wirkt, komprimiert das eingeschlossene Silizium-Pulver gleichmäßig.

[0035] Als Bindemittel werden bevorzugt Polyvinylalkohol, Polyvinylbutyral, Polyethylenglykol und deren Gemische verwendet. Diese Bindemittel haben sich als besonders gut geeignet für die Verwendung bei der Herstellung von Funktionselementen für mechanische Uhren herausgestellt.

[0036] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden Silizium-Partikel und Bindemittel in einem Gewichtsverhältnis Silizium-Partikel zu Bindemittel von 100:0,1 bis zu 100:3 eingesetzt. Besonders bevorzugt werden Silizium-Partikel und Bindemittel in einem Gewichtsverhältnis Silizium-Partikel zu Bindemittel von 100:0,2 bis zu 100:2, und insbesondere bevorzugt in einem Gewichtsverhältnis von 100:0,5 bis zu 100:1 eingesetzt. Die genannten bevorzugten Mengen an Bindemittel sind einerseits groß genug, um für eine ausreichende Verbindung der Silizium-Partikel im Rahmen des Homogenisierungsschritts zu sorgen, und andererseits gering genug, um nach dem Verdichtungsschritt problemlos aus dem Festkörper entfernt werden zu können.

[0037] Besonders bevorzugt wird dem Bindemittel vor dem Vermischen mit den Silizium-Partikeln Ethanol zugefügt, insbesondere bevorzugt in einem Gewichtsverhältnis von Ethanol zu Silizium-Partikel von rund 5:1.

[0038] Das Mischen von Silizium-Partikeln und Bindemittel erfolgt bevorzugt durch Aufsprühen des Bindemittels auf die Silizium-Partikel.

[0039] Besonders gute Ergebnisse lassen sich erzielen, wenn das Homogenisieren der Mischung von Silizium-Partikeln und Bindemittel durch Mahlen in einer Kugelmühle für einen Zeitraum von 2 bis 24 Stunden erfolgt. Insbesondere bevorzugt erfolgt das Mahlen in der Kugelmühle bei gleichzeitiger Vakuumentgasung.

[0040] Besondere Bedeutung für die Ausbildung der gewünschten Poren besitzt der Schritt des Verdichtens der homogenisierten Mischung aus Silizium-Partikeln und Bindemittel zu einem Festkörper. In Folge der Anwendung kalisostatischen oder heißisostatischen Pressens wird der Druck von allen Richtungen gleichmäßig auf das Siliziumpulver ausgeübt. Das heißisostatische Pressen verbessert durch Erwärmung zudem die Struktur des sich ausbildenden Silizium-Festkörpers.

[0041] Grundsätzlich kann ein heißisostatisches Pressen bei 10 bis 800 MPa und 30°C bis 1400°C durchgeführt werden. Ausgezeichnete Eigenschaften der Funktionselemente ergeben sich, wenn das Verdichten bei einer Temperatur von 600°C bis 1400°C oder bei einem Druck von 100 bis 300 MPa erfolgt. Insbesondere bevorzugt erfolgt das Verdichten bei einer Temperatur von 600°C bis 1400°C und bei einem Druck von 100 bis 300 MPa.

[0042] Bevorzugt wird die homogenisierte Mischung aus Silizium-Partikeln und Bindemittel vor dem Verdichtungsschritt bei einer Temperatur von 100°C bis 120°C vorgewärmt. Das Verdichten erfolgt bevorzugt für einen Zeitraum von 2 bis 4 Stunden.

[0043] Besonders gute Eigenschaften weisen die hergestellten Funktionselemente auf, wenn der durch den Verdichtungsschritt erzeugte Festkörper Poren mit einem maximalen Durchmesser von 0,001 µm bis 1 µm aufweist.

[0044] Aus dem Silizium-Festkörper wird in der dem Fachmann bekannten Weise das Funktionselement durch Abtrag des das Funktionselement umgebenden Materials vereinzelt. Der Materialabtrag erfolgt dabei bevorzugt durch Ätzen oder Ausschneiden. Das Ätzen erfolgt besonders bevorzugt durch ein Trockenätzverfahren, das Ausschneiden erfolgt besonders bevorzugt durch Laserschneiden. Die genannten Verfahren sind aus dem Stand der Technik bekannt, weshalb deren Einsatz im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens für den Fachmann kein Problem darstellt.

[0045] Bevorzugt wird die Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung durch eine thermische Oxidation erzeugt. Dabei wirkt Sauerstoff bei erhöhter Temperatur auf das Funktionselement ein. Durch die Zeitdauer der Oxidation kann die Dicke der Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung gesteuert werden. Die genauen Parameter einer thermischen Oxidation zur Bildung einer Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung sind aus dem Stand der Technik bekannt. Deren Auffinden für einen bestimmten Oxidationsvorgang stellt für den Fachmann daher kein Problem dar.

[0046] Das erfindungsgemäße Funktionselement zeichnet sich dadurch aus, dass ein aus isotropen Silizium-Partikeln durch isostatisches Verdichten hergestellter Festkörper eine Vielzahl von Poren ausgebildet hat. Die Poren des gesinterten Festkörpers haben einen maximalen Durchmesser von 0,001 µm bis 1 µm. Das Funktionselement trägt eine Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung auf dem Funktionselement. Ferner sind mehrere Anker aus Siliziumoxid im Festkörper ausgebildet, die sich im Festkörper des Funktionselements zumindest bis zu einer zweiten Schicht aus Silizium-Partikel erstrecken. Bevorzugt

weisen die im Festkörper ausgebildeten Poren einen Durchmesser von 0,01 µm bis 0,3 µm auf.

[0047] Grundsätzlich kann jede Art von Funktionselement für mechanische Uhren hergestellt werden. Bevorzugt handelt es sich bei den Funktionselementen um eine Spiralfeder, ein Zahnrad, ein Gangrad, ein Ankerrad, einen Anker, einen Unruhreif oder eine Welle. Besondere Vorteile ergeben sich bei der Herstellung einer Spiralfeder für mechanische Uhren, da für dieses Funktionselement eine besonders hohe mechanische Stabilität und ein besonders temperaturunabhängiges Schwingungsverhalten erforderlich sind.

[0048] Die vorliegende Erfindung umfasst außerdem eine mechanische Uhr mit einem Funktionselement, das erfindungsgemäß ausgebildet ist.

[0049] Im Folgenden sollen Ausführungsbeispiele die Erfindung und ihre Vorteile anhand der beigefügten Figuren näher erläutern. Die Größenverhältnisse in den Figuren entsprechen nicht immer den realen Größenverhältnissen, da einige Formen vereinfacht und andere Formen zur besseren Veranschaulichung vergrößert im Verhältnis zu anderen Elementen dargestellt sind. Dabei zeigen:

[0050] Fig. 1 eine Draufsicht auf einen mit einem Sinterprozess hergestellten Si-Wafer, bei dem bereits die Funktionselemente (Spiralfedern) durch Ätzen oder Ausschneiden hergestellt wurden;

[0051] Fig. 2 eine Detailansicht des in Fig. 1 mit A gekennzeichneten Bereichs.

[0052] Fig. 3 eine schematische Ansicht eines Ofens, in dem ein Überzug aus Siliziumoxid bzw. Siliziumdioxid zumindest auf den Funktionselementen erzeugt wird;

[0053] Fig. 4 eine schematische Ansicht eines Querschnitts durch einen Teil der Spiralfeder, wobei der Schnitt senkrecht zur Ebene der Spiralfeder ausgerichtet ist; und

[0054] Fig. 5 eine schematische Teilansicht eines vertikalen Schnitts, wobei zwei gegenüberliegende Seitenflächen der Spiralfeder dargestellt sind.

[0055] Obwohl sich die nachfolgende Beschreibung auf eine Spiralfeder als Funktionselement bezieht, soll dies nicht als eine Beschränkung der Erfindung aufgefasst werden.

[0056] Fig. 1 zeigt eine Draufsicht auf einen mit einem Sinterprozess hergestellten Si-Wafers **6**, bei dem bereits die Funktionselemente **8** durch Ätzen oder Ausschneiden hergestellt wurden. Das Funktionselement **8** ist eine Spiralfeder. In dem Verfahren

zur Herstellung des Si-Wafers **6** wurden im Wesentlichen isotrope Silizium-Partikel **1** (siehe **Fig. 5**) mit einem Durchmesser zwischen $0,03\ \mu\text{m}$ bis $1\ \mu\text{m}$ verwendet, die als Nebenprodukt bei der Herstellung von Silizium-Granulat mit Hilfe eines Wirbelschicht-Verfahrens angefallen waren. Als Bindemittel wurde Polyvinylalkohol verwendet. Die Mischung von Silizium-Partikeln **1** und Bindemittel im Verhältnis von 100:0,75 erfolgte durch Aufsprühen einer Bindemittel/Ethanol-Mischung auf die Silizium-Partikel **1**. Die so erzeugte Mischung wurde durch Mahlen in einer Kugelmühle für einen Zeitraum von 12 Stunden unter gleichzeitiger Vakuumentgasung homogenisiert.

[0057] Nach dem Einbringen der homogenisierten Mischung aus Silizium-Partikeln **1** und Bindemittel in eine Pressform (nicht dargestellt) erfolgte ein Sintern der homogenisierten Mischung zu einem Festkörper. Für den Fall, dass das Sintern ein heißisostatisches Verdichten ist, wird dies bei einer Temperatur von 1000°C und einem Druck von 250 MPa für 3 Stunden durchgeführt. Der erzeugte Festkörper bzw. Si-Wafer **6** besitzt Poren **2** (siehe **Fig. 5**) mit einem maximalen Durchmesser P von $0,001\ \mu\text{m}$ bis $1\ \mu\text{m}$. Der durch die Verdichtung der homogenisierten Mischung aus Silizium-Partikeln **1** und Bindemittel erzeugte Festkörper weist bevorzugt eine Dichte von zumindest 95%, bevorzugt zumindest 99% der Dichte von kristallinem Silizium auf.

[0058] Aus dem so erzeugten Festkörper wurde das Bindemittel durch Evakuieren abgezogen. Die Abtrennung des Bindemittels erfolgt bevorzugt durch Evakuieren oder durch Spülen mit einem Inertgas. Gleichzeitig mit dem Abtrennen des Bindemittels wird der gebildete Silizium-Festkörper auf Raumtemperatur abgekühlt.

[0059] **Fig. 2** zeigt eine Detailansicht des in **Fig. 1** mit A gekennzeichneten Bereichs des Si-Wafers **6**. Die Vereinzelung der Spiralfeder **8** erfolgt bevorzugt durch ein Trockenätzverfahren, wodurch das die Spiralfeder **8** umgebende Material **9** abgetragen wird.

[0060] **Fig. 3** zeigt schematisch einen Ofen **10**, in dem die Si-Wafer **6** mit den vom umgebenden Material **9** befreiten Spiralfedern **8** verbracht werden, um eine Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung **3** (siehe **Fig. 4** und **Fig. 5**) auf dem Si-Wafer **6** (Festkörper) aufzubringen. In den Ofen **10** erfolgt eine Sauerstoffzufuhr **11** bei einer Temperatur T von 800°C bis 1400°C . Somit wird eine Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung **3** auf der Spiralfeder **8** erzeugt. Die Si-Wafer **6** verbleiben für die Durchführung der Oxidation für einen Zeitraum von 50 Stunden im Ofen.

[0061] **Fig. 4** zeigt eine schematische Ansicht eines Querschnitts **14** durch einen Teil der Spiralfeder **8**, wobei der Schnitt senkrecht zur Ebene der Spiralfeder **8** ausgerichtet ist. Der Körper **18** der Spiralfeder **8**

trägt nach der Oxidation im Ofen **10** allseitig eine Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung **3**. Die Silizium-Partikel **1** sind idealer Weise als Kugeln dargestellt. Es ist für einen Fachmann selbstverständlich, dass die Silizium-Partikel **1** eine unregelmäßige Oberfläche ausbilden und eine Form aufweisen, die im Wesentlichen der von Kieselsteinen entspricht.

[0062] Die in **Fig. 5** in idealisierter Weise als Kugeln dargestellten Silizium-Partikel **1** weisen jeweils einen mittleren Durchmesser D zwischen $0,03\ \mu\text{m}$ bis $1\ \mu\text{m}$ auf. Es ist eine schematische Teilansicht eines vertikalen Schnitts dargestellt, wobei zwei gegenüberliegende Seitenflächen **16** der Spiralfeder **8** zum Teil dargestellt sind. Zwischen den einzelnen Silizium-Partikeln **1** sind die Poren **2** zu erkennen, die sich aufgrund des Sinterprozesses ausgebildet haben. Die Poren **2** weisen einen maximalen Durchmesser P von $0,001\ \mu\text{m}$ bis $1\ \mu\text{m}$ bevorzugt $0,01\ \mu\text{m}$ bis $0,3\ \mu\text{m}$ auf. Der durch die Verdichtung einer homogenisierten Mischung aus Silizium-Partikeln **1** und dem Bindemittel Polyvinylalkohol erzeugte Festkörper (Si-Wafer **6**) weist eine Dichte von zumindest 95%, bevorzugt zumindest 99% der Dichte von kristallinem Silizium auf. Je nach Wahl der Größenverteilung der Silizium-Partikel **1**, kann die Dichte des gesinterten Festkörpers bis zu 99,9% der Dichte von kristallinem Silizium entsprechen.

[0063] Die Silizium-Oberflächenbeschichtung **3** bildet sich im Laufe der Behandlung des Si-Wafers **6** aus. Im Laufe der Ausbildung der Silizium-Oberflächenbeschichtung **3** bilden sich mehrere Anker **4** aus Siliziumoxid bzw. Siliziumdioxid innerhalb des Si-Wafers **6** aus, die die oben beschriebenen Materialeigenschaften aufweisen. Die einzelnen Silizium-Partikel **1** ordnen sich während des Verdichtens in Schichten $5_1, 5_2, \dots, 5_n$ an. Aufgrund der Größenverteilung der Silizium-Partikel **1** und der Größenverteilung der Poren **2** im Si-Wafer **6** können die Schichten $5_1, 5_2, \dots, 5_n$ nur schematisch eingezeichnet werden. Die Größenverteilung der Poren **2** im Si-Wafer **6** und die Behandlungsparameter im Ofen **10** bei der Herstellung der Silizium-Oberflächenbeschichtung **3** bewirken, dass sich der größte Anteil der Anker **4** aus Siliziumoxid zumindest bis in die zweite Schicht 5_2 bzw. 5_{n-1} aus Silizium-Partikeln **1** erstreckt. Die so hergestellte Spiralfeder weist hervorragende Eigenschaften im Hinblick auf Temperaturverhalten und hervorragende mechanische Stabilität auf.

Bezugszeichenliste

1	Silizium-Partikel
2	Poren
3	Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung
4	Anker aus Siliziumoxid
$5_1, 5_2, \dots, 5_n$	Schichten
6	Si-Wafer, Festkörper

8	Funktionselement, Spiralfeder
9	umgebendes Material
10	Ofen
11	Sauerstoffzufuhr
12	Oberfläche
14	Querschnitt
16	Seitenflächen
18	Körper der Spiralfeder
D	mittlerer Durchmesser Partikel
P	mittlerer Durchmesser Poren
T	Temperatur

8. Funktionselement (**8**) nach den Ansprüchen 1 bis 5, wobei es sich bei dem Funktionselement (**8**) um eine Spiralfeder, ein Zahnrad, ein Gangrad, ein Ankerrad, einen Anker, einen Unruhreif oder eine Welle handelt.

9. Mechanische Uhr mit einem Funktionselement (**8**) gemäß den Ansprüchen 1 bis 8.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Patentansprüche

1. Funktionselement (**8**), das aus einem gesinterten Festkörper (**6**) aus isotropen Silizium-Partikeln (**1**) durch Vereinzelung hergestellt ist und eine Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung (**3**) auf dem Funktionselement (**8**) aufgebracht ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass,

- der gesinterte Festkörper (**6**) eine Vielzahl von Poren (**2**) ausgebildet hat, die einen maximalen Durchmesser (P) von 0,001 μm bis 1 μm aufweisen; und
- mehrere Anker (**4**) aus Siliziumoxid sich zusätzlich zur Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung (**3**) in das Funktionselement (**8**) erstrecken.

2. Funktionselement (**8**) nach Anspruch 1, wobei sich die Anker (**4**) zumindest teilweise bis mindestens in eine zweite Schicht **5₂** aus Silizium-Partikel (**1**) erstrecken.

3. Funktionselement (**8**) nach Anspruch 1, wobei die im gesinterten Festkörper (**6**) ausgebildeten Poren (**2**) einen Durchmesser (P) von 0,01 μm bis 0,3 μm aufweisen.

4. Funktionselement (**8**) nach Anspruch 1, wobei die Silizium-Partikel (**1**) einen Durchmesser (D) von 0,01 μm bis 10 μm , bevorzugt einen Durchmesser (D) von 0,03 μm bis 1 μm , aufweisen.

5. Funktionselement (**8**) nach den Ansprüchen 1 bis 4, wobei der durch das isostatische Verdichten erzeugte Festkörper (**6**) eine Dichte von zumindest 95%, bevorzugt zumindest 99%, der Dichte von kristallinem Silizium aufweist.

6. Funktionselement (**8**) nach den Ansprüchen 1 bis 5, wobei der Festkörper durch ein isostatisches Verdichten bei einer Temperatur von 600°C bis 1400°C und/oder bei einem Druck von 100 bis 300 MPa und für einen Zeitraum von 2 bis 4 Stunden hergestellt ist.

7. Funktionselement (**8**) nach den Ansprüchen 1 bis 5, wobei der Festkörper durch ein Spark Plasma Sintern hergestellt ist.

Anhängende Zeichnungen

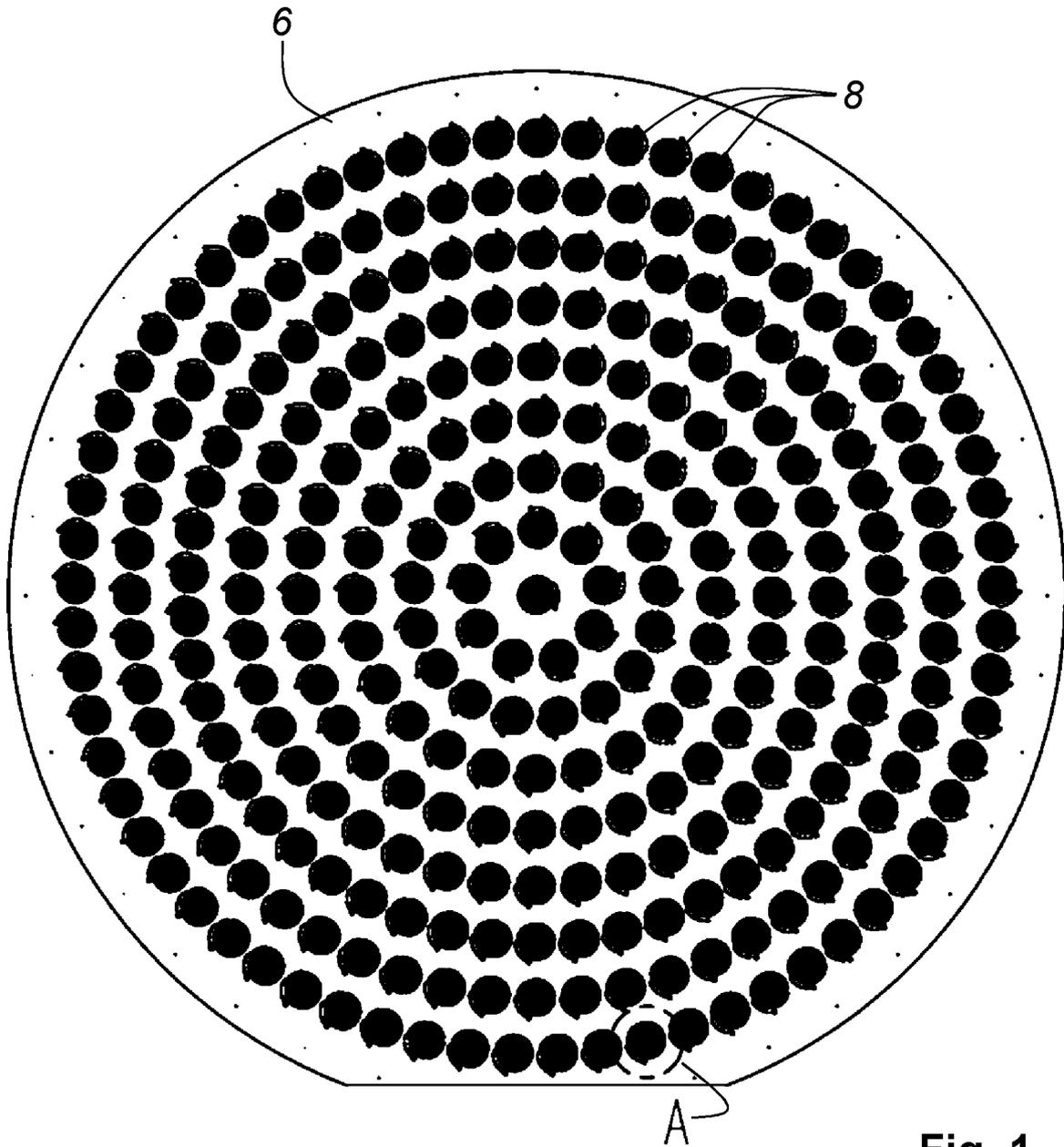


Fig. 1

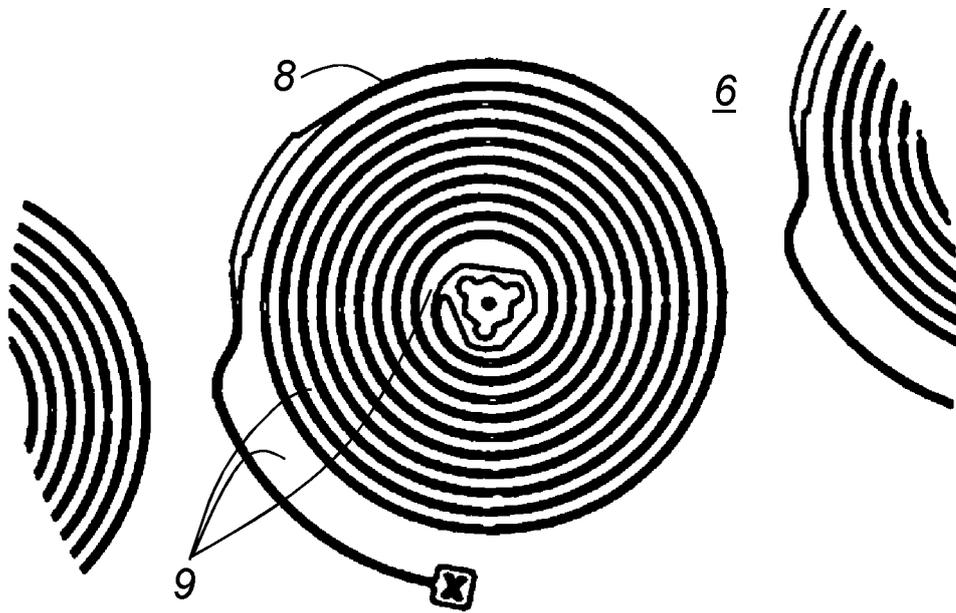


Fig. 2

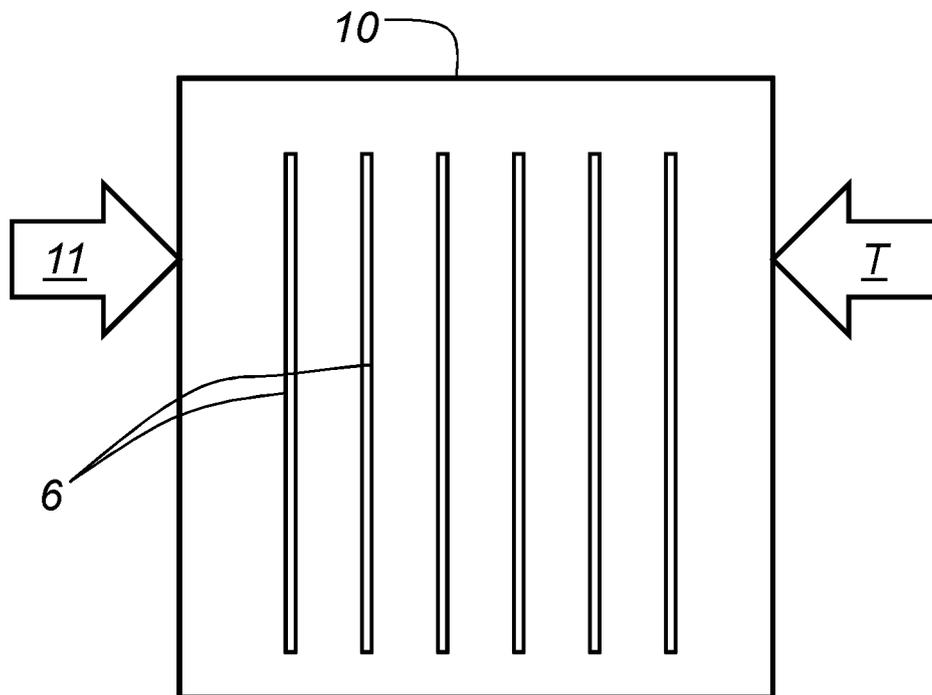


Fig. 3

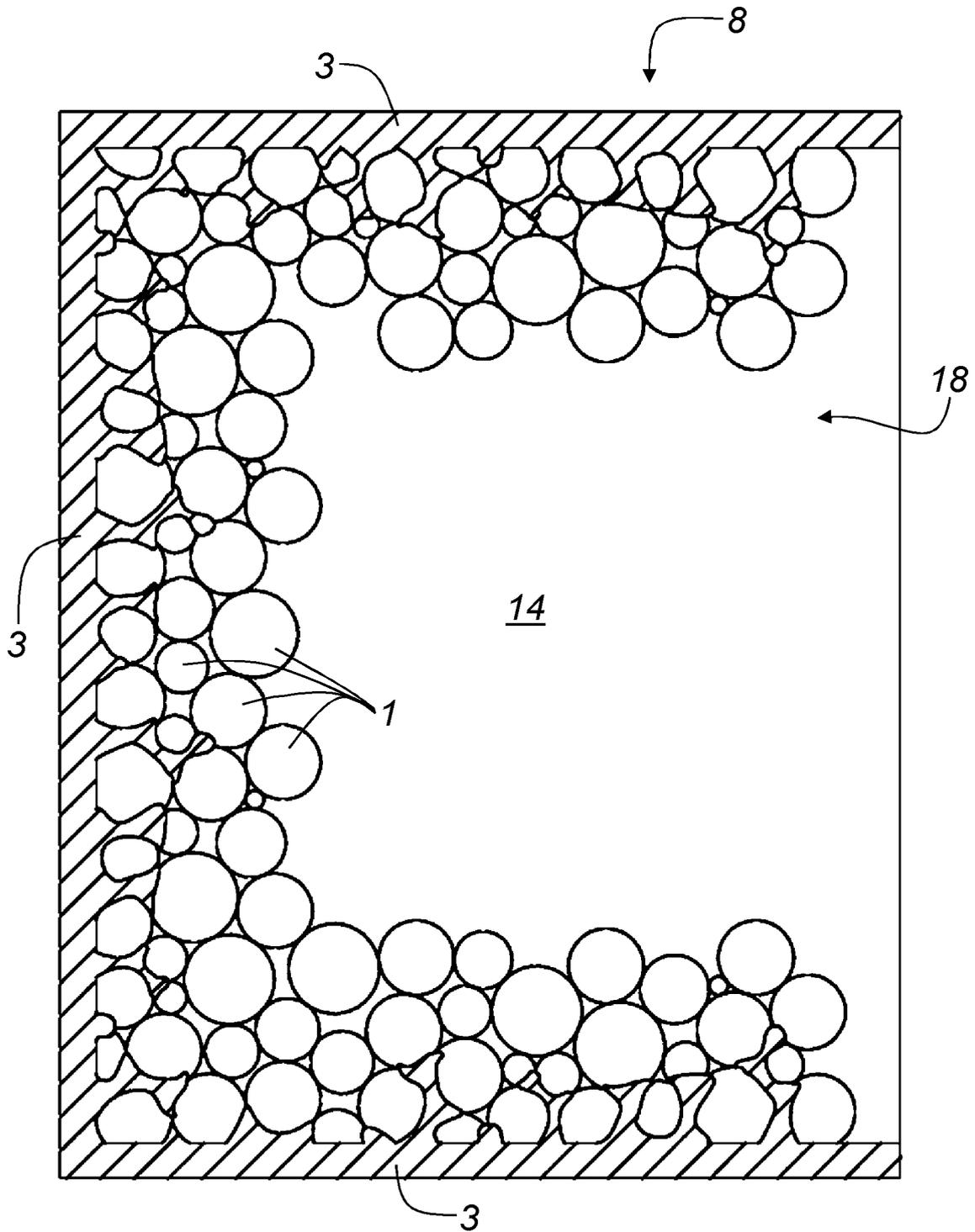


Fig. 4

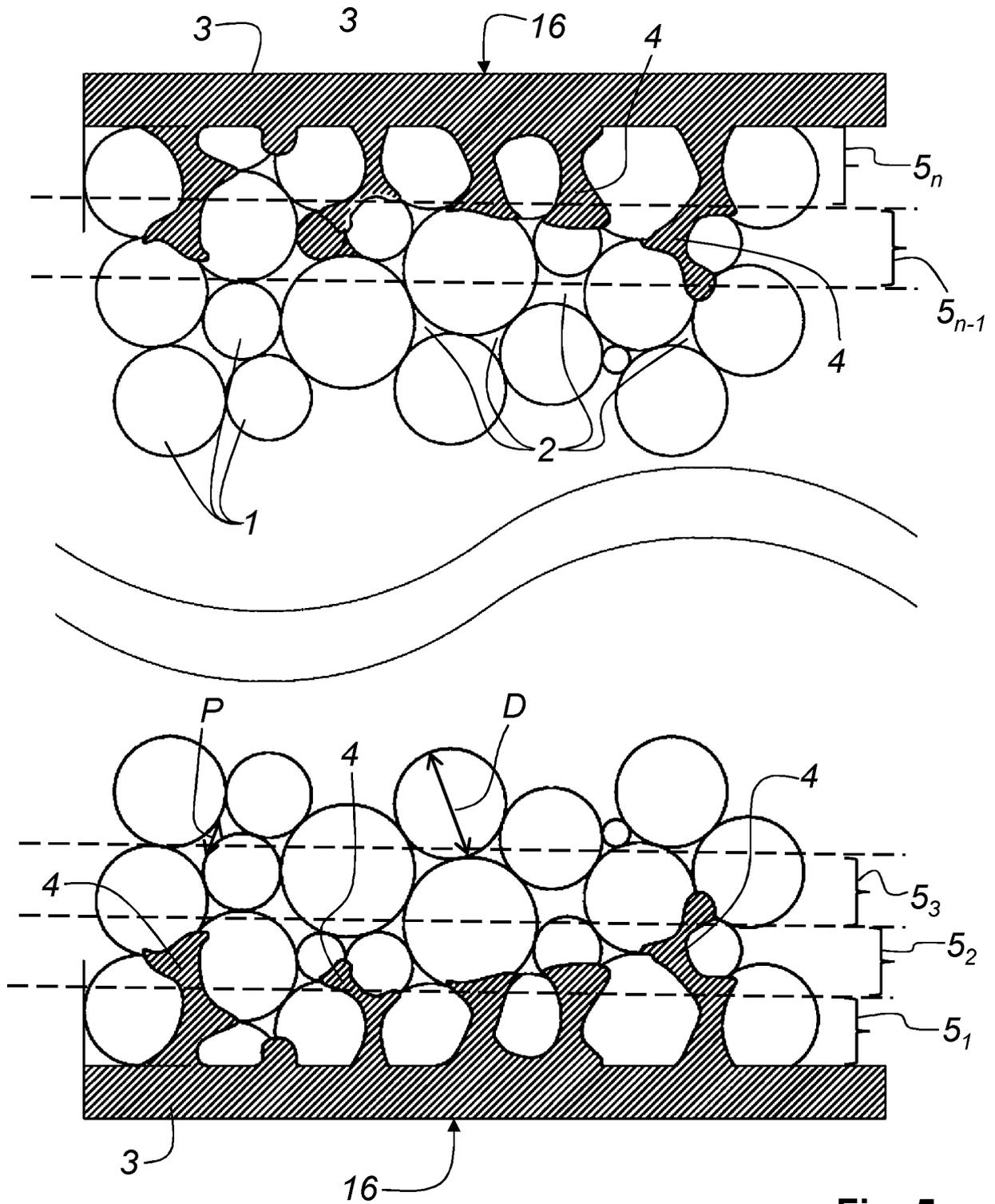


Fig. 5