

(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  
5. Januar 2017 (05.01.2017)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2017/001511 A1**

- (51) Internationale Patentklassifikation:  
*B24D 13/20* (2006.01)    *B24B 29/04* (2006.01)  
*B24D 13/14* (2006.01)    *B24B 37/025* (2012.01)  
*B24B 11/10* (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen:    PCT/EP2016/065192
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
29. Juni 2016 (29.06.2016)
- (25) Einreichungssprache:    Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache:    Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:  
10 2015 110 712.0    2. Juli 2015 (02.07.2015)    DE
- (71) Anmelder: **BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND, VERTRETEN DURCH DAS BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, DIESES VERTRETEN DURCH DEN PRÄSIDENTEN DER PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT** [DE/DE]; Bundesallee 100, 38116 Braunschweig (DE).
- (72) Erfinder: **GÜNTER, Hinzmann**; Am Pfarrhaus 14, 38176 Wendeburg (DE). **RUDOLF, MEEß**; Goslarsche Straße 89, 38118 Braunschweig (DE). **ALEXANDER, Lück**; Stieglitzweg 2, 38108 Braunschweig (DE). **MICHAEL, Müller**; Jochen-Klepper-Straße 16, 38300 Wolfenbüttel 38 (DE).
- (74) Anwalt: **PLÖGER, Jan**; Theodor-Heuss-Straße, 38122 Braunschweig (DE).
- (81) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: MACHINE FOR PRODUCING BALLS, BALL, AND METHOD FOR PRODUCING A BALL

(54) Bezeichnung : MASCHINE ZUM HERSTELLEN VON KUGELN, KUGEL UND VERFAHREN ZUM HERSTELLEN EINER KUGEL

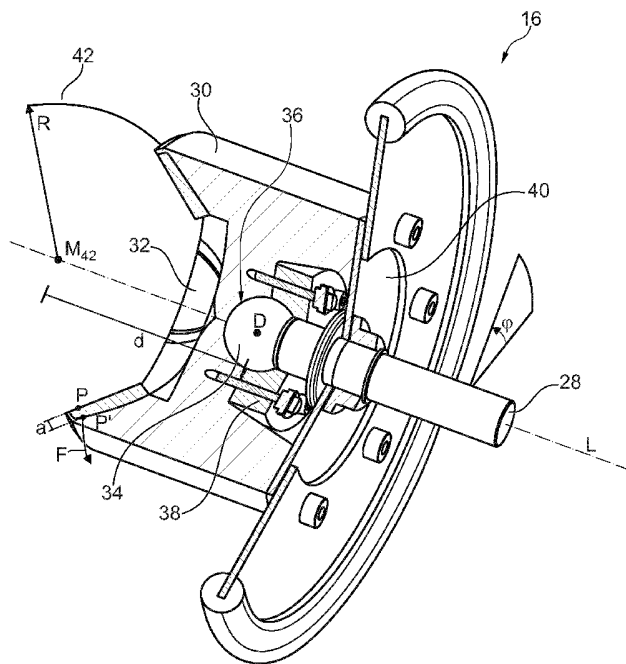


Fig. 2

(57) Abstract: The invention relates to a machine for producing balls (12), comprising (a) a rotary drive (14) and (b) at least one tool (16) which is connected to the rotary drive (14) by means of a mounting (28) in order to be rotated and which has a polishing cup (30), wherein (c) the polishing cup (30) is secured to the mounting (28) in a pivotal manner and has a restoring element (40) which generates a restoring force when the polishing cup (30) is deflected from a rest position and which is made of an entropy-elastic material. According to the invention, (d) the restoring element is designed as a membrane such that balls (12) can be produced with shape flaws of maximally 50 nm.

(57) Zusammenfassung: Maschine zum Herstellen von Kugeln (12), mit (a) einem Drehantrieb (14) und (b) zumindest einem Werkzeug (16), das mittels einem Halter (28) mit dem Drehantrieb (14) zum Drehen verbunden ist und eine Polierkalotte (30) aufweist, wobei (c) die Polierkalotte (30) schwenkbar am Halter (28) befestigt ist und ein Rückstellelement (40) aufweist, das bei einer Auslenkung der Polierkalotte (30) aus einer Ruhelage eine Rückstellkraft erzeugt und aus einem entropieelastischen Material aufgebaut ist. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass (d) das Rückstellelement als Membran ausgebildet ist, so dass Kugeln (12) mit einem Formfehler von höchstens 50 Nanometer herstellbar sind.

WO 2017/001511 A1



**(84) Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Erklärungen gemäß Regel 4.17:**

— hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

## **Maschine zum Herstellen von Kugeln, Kugel und Verfahren zum Herstellen einer Kugel (Hauptantrag)**

Die Erfindung betrifft eine Maschine zum Herstellen von Kugeln, mit einem Drehantrieb und zumindest einem Werkzeug, das mittels einem Halter mit dem Drehantrieb zum Drehen verbunden ist und eine Polierkalotte aufweist, wobei die Polierkalotte schwenkbar am Halter befestigt ist und ein Rückstellelement aufweist, das bei einer Auslenkung der Polierkalotte aus einer Ruhelage eine Rückstellkraft erzeugt und aus einem entropieelastischen Material aufgebaut ist. Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung eine Kugel, insbesondere eine Siliziumkugel, mit einem Durchmesser zwischen 2 Millimeter und 200 Millimeter. Gemäß einem dritten Aspekt betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Herstellen einer Kugel mit einem Formfehler von höchstens 50 Nanometer.

Es wird seit längerer Zeit daran gearbeitet, das Kilogramm auf Naturkonstanten zurückzuführen, um dieses unabhängig vom Ur-Kilogramm definieren zu können. Ein Ansatz dafür ist, eine hochpräzise Kugel aus einem Kristall herzustellen. Bislang ist es gelungen, Kugeln mit einem Formfehler von ungefähr 100 Nanometern herzustellen. Höchste Genauigkeiten, insbesondere Formfehler unter 20 Nanometer, konnten bislang nicht erreicht werden.

Die GB 1 161 091 A betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Läppen oder Polieren von Kugeln. Die Kugel wird dazu von zumindest drei Kalotten bearbeitet, wobei jede Kalotte in einen Gummikörper eingesteckt ist, welcher auf einer antreibbaren Welle angeordnet ist. Mit einer derartigen Vorrichtung werden Formfehler von höchstens 254 Nanometer erreicht.

Die DE 2458875 A1 betrifft eine Vorrichtung zum Schleifen von Kugelflächen und ein Verfahren zu ihrem Betrieb. Eine Kugel wird dazu von drei Polierpfannen bearbeitet, die jeweils an einer antreibbaren Welle angeordnet sind. Zwei der drei Wellen sind über jeweils eine Feder vorspannbar, sodass die Pfannen gegen die

Kugel gedrückt werden können. Dadurch, dass durch Unebenheiten auf der Kugeloberfläche bewirkte Auslenkungen unmittelbar von Schraubenfedern aufgenommen werden, können Formfehler von höchstens 50 Nanometer nicht erreicht werden.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zu Grunde, die Herstellung von Kugeln zu verbessern.

Die Erfindung löst das Problem durch eine gattungsgemäße Maschine, bei der das Rückstellelement als Membran ausgebildet ist, sodass Kugeln mit einem Formfehler von höchstens 50 Nanometer herstellbar sind. ,

Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch eine gattungsgemäße Kugel mit einem Formfehler zwischen 20 Nanometern und 2 Nanometern.

Gemäß einem dritten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein Verfahren zum Herstellen einer Kugel mit einem Formfehler von höchstens 30 Nanometern mit den Schritten: (a) Einspannen eines Kugel-Rohlings mit einem Durchmesser zwischen 8 Millimetern und 200 Millimetern in eine erfindungsgemäße Maschine, die vorzugsweise vier Polierkalotten aufweist, die tetraedrisch um den Kugel-Rohling angeordnet sind, (b) Vorspannen der Polierkalotten auf den Kugel-Rohling mit einer Vorspannkraft und (c) Drehen der Polierkalotte, bis aus dem Kugel-Rohling eine Kugel entstanden ist, deren Formfehler höchstens 20 Nanometer beträgt.

Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass die Oberflächenbeschaffenheit der Kugel verbessert wird und die Rauheit vermindert wird, insbesondere sind geringe Formfehler erreichbar. Das ermöglicht es, die Masse der Kugel mit hoher Genauigkeit aus der Atommasse, der Gitterkonstanten und dem Durchmesser der Kugel zu berechnen. So wird eine reproduzierbare Definition des Kilogramms möglich.

Es ist ein weiterer Vorteil, dass eine durch den Polierprozess beeinflusste Schädigungszone eine sehr geringe Dicke besitzt.

Es ist ein weiterer Vorteil, dass die Kugel in ihrer Oberfläche nur wenige Verunreinigungen aufweist.

Vorteilhaft ist zudem, dass derartige Kugeln als hochgenaue Reflektoren verwendet werden können.

Insgesamt ist es mit der Erfindung möglich, einen geringen Formfehler zu erreichen, eine Oberfläche ohne Kratzer und mit sehr geringen Rauheiten herzustellen, eine definiert dicke Oxidschicht zu erhalten, nur in sehr geringem Maße Fremdatome in die Oberfläche einzubringen und die Kristallstruktur des Kugelmaterials nur wenig zu stören. Die Kombination dieser Vorteile ist bislang nicht erreicht worden.

Der Erfindung liegt die Erkenntnis zu Grunde, dass die Polierkalotte während des Poliervorgangs Nickbewegungen um die Drehachse ausführen können muss, um eine Schädigung der Werkstückrandzone zu vermeiden. Durch die Verwendung von entropielastischem Material werden selbsterregte Schwingungen der Polierkalotte relativ zum Halter und damit relativ zur Kugel vermieden, was die erreichbare Oberflächenqualität zusätzlich erhöht.

Vorteilhaft ist zudem, dass das entropieelastische Material in aller Regel eine umso größere Federkonstante besitzt, je größer die Auslenkung ist. Bei kleinen Auslenkungen, die bei der Bearbeitung von Kugeln mit bereits einer hohen Formgenauigkeit entstehen, entstehen so nur kleine Kräfte auf die Oberfläche der Kugel. Größere Auslenkungen führen zu überproportional größeren Rückstellkräften.

Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter dem Formfehler insbesondere die maximale Abweichung zwischen der Oberfläche der Kugel einerseits

und einer gedachten idealen Kugeloberfläche durch die Oberfläche der Kugel verstanden.

Unter der Polierkalotte wird dasjenige Bauteil verstanden, dessen Oberfläche beim Polieren unmittelbar mit der Oberfläche der zu polierenden Kugel in Kontakt kommt und von der Kugel Material abträgt. Die Polierkalotte besteht vorzugsweise aus Glas, wenn ein Korn mit einer Korngröße von höchstens 1  $\mu\text{m}$  verwendet wird. Für Korn mit einer Korngröße von mehr als 1  $\mu\text{m}$  werden vorzugsweise Metallkalotten verwendet.

Unter dem Rückstellelement wird insbesondere ein Element verstanden, das im Vergleich zu den sonstigen Komponenten im Kraftfluss zwischen dem Halter und der Oberfläche der Polierkalotte, die beim Polieren in Kontakt mit der zu polierenden Kugel kommt, deutlich weniger steif ist. Insbesondere hat das Rückstellelement bezüglich einer Auslenkung eines Punkts der Polierkalotte aus deren Nulllage eine Steifigkeit, die höchstens ein Zehntel der Steifigkeit der sonstigen Komponenten beträgt.

Unter dem Kugel-Rohling wird insbesondere eine Kugel verstanden, deren Formabweichung größer ist als 50 Nanometer, insbesondere größer als 100 Nanometer. Es kann sich also insbesondere um eine Kugel handeln, die mit einem Verfahren nach dem Stand der Technik hergestellt wurde.

Da die Maschine zum Herstellen von Kugeln höchster Oberflächenqualität ausgebildet ist, könnte sie auch als Poliermaschine bezeichnet werden. Die Maschine ist insbesondere zum Läppen der Kugel ausgebildet. Das Verfahren ist vorzugsweise ein Läppverfahren. Unter dem Läppen wird insbesondere ein spanendes Verfahren mit ungebundenem Korn verstanden. Als Schneidstoff werden vorzugsweise Körner mit einer Korngröße von höchstens 1  $\mu\text{m}$  verwendet. Es ist möglich und stellt eine bevorzugte Ausführungsform dar, dass zunächst Körner mit einer Korngröße von höchstens 25  $\mu\text{m}$  verwendet werden.

Günstig ist es, wenn das Polierelement an seiner Polieroberfläche mit Pech belegt ist. Das Poliermedium ist dann zwischen dem Pech und der Kugel angeordnet.

Vorzugsweise ist die Polierkalotte um einem Drehpunkt schwenkbar am Halter gelagert und der Drehpunkt hat einen Abstand von einem Kontaktkugelmittelpunkt einer Kontaktkugel einer Polieroberfläche des Polierelements, wobei dieser Abstand kleiner ist als das Vierfache, insbesondere kleiner als das Doppelte, eines Kontaktkugelradius der Kontaktkugel. Unter der Kontaktkugel wird dabei diejenige gedachte Schmiegekugel verstanden, die die Polieroberfläche optimal approximiert. Sofern die Maschine eine zu polierende Kugel enthält, entspricht die gedachte Kontaktkugel der gedachten Ausgleichskugel durch die Oberfläche der polierenden Kugel.

Vorteilhaft daran ist, dass der Abstand zwischen dem Drehpunkt und dem Kugelmittelpunkt der zu polierenden Kugel vergleichsweise klein ist. Das erleichtert Nickbewegungen der Kugelkalotte um die Drehachse, die gemäß einer bevorzugten Ausführungsform sich entlang einer Längsachse des Halters erstreckt.

Vorzugsweise hat das Polierelement bezüglich einer Schwenkbewegung zwischen Polierkalotte und Halter eine Auslenk-Federkonstante, die bestimmt ist bezüglich einer Kraft, die an einem Punkt der Polieroberfläche angreift und die diesen Punkt relativ zum Halter um einen Mikrometer auslenkt, wobei die Auslenk-Federkonstante höchstens 1 Newton pro Grad, vorzugsweise höchstens 0,25 Newton pro Grad, beträgt. Die Gradangabe bezieht sich auf Winkelgrad, wobei der Vollwinkel  $360^\circ$  hat. Es hat sich herausgestellt, dass eine zu große Auslenk-Federkonstante dazu führt, dass die Polierkalotte der Kugel nicht mehr hinreichend einfach folgen kann.

Vorzugsweise ist die Auslenk-Federkonstante größer als 0,1 Newton pro Grad, insbesondere größer als 10 Newton pro Grad. Es sei angemerkt, dass die Auslenk-Federkonstante vorzugsweise für alle Punkte auf der Polieroberfläche, die

beim Polieren in Kontakt mit der Kugel kommen, höchstens den angegebenen Maximalwert und/oder mindestens den angegebenen Minimalwert hat.

Erfindungsgemäß ist das Rückstellelement als Membran ausgebildet. Das hat den Vorteil, dass die elastischen Eigenschaften bezüglich einer Schwenkbewegung der Polierkalotte relativ zum Halter zumindest im Wesentlichen isotrop sind. Insbesondere ist die Membran so ausgebildet, dass das Maximum einer Differenz zwischen den Auslenk-Federkonstanten bezüglich zweier unterschiedlicher Schwenkrichtungen höchstens 10% beträgt. Die Membran kann auch gewellt ausgeführt sein.

Vorzugsweise hat das Polierelement bezüglich einer Auslenkung eines Punkts der Polieroberfläche aus seiner Nulllage um 1 Mikrometer eine so große Dämpfungskonstante, dass das Polierelement nicht über seine Nulllage überschwingt. In anderen Worten ist die Dämpfungskonstante so groß, dass bei der Schwingung des Polierelements der Kriechfall eintritt.

Vorzugsweise umfasst die Maschine eine Vorspannvorrichtung zum Vorspannen des zumindest einen Polierelements auf die Kugel mit einer Vorspannkraft, wobei die Vorspannkraft so gewählt ist, dass eine rechnerische Flächenpressung der Polieroberfläche auf die Kugel höchstens  $15 \text{ Newton/cm}^2$ , insbesondere  $15 \text{ Newton/cm}^2$ , beträgt. Je größer die Flächenpressung ist, desto größer ist der Materialabtrag pro Zeiteinheit und desto kürzer ist dementsprechend die Zeit, die für die Bearbeitung benötigt wird. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass extrem kleine Formabweichungen nur mit sehr geringen Abtragsraten und sehr definierten Vorspannkräften erreicht werden können.

Ein erfindungsgemäßes Verfahren wird vorzugsweise so durchgeführt, dass ein Abtrag kleiner ist als 3 Nanometer pro Minute, insbesondere 1,5 Nanometer pro Minute. Unter dem Abtrag wird die Abnahme des Radius aufgrund des Polierens verstanden. Es hat sich herausgestellt, dass geringe Abtragsraten, das heißt Änderungsgeschwindigkeiten des Radius, zu Kugeln mit besonders geringem Form-



fehler und sehr guten Oberflächeneigenschaften führen können.

Günstig ist es, wenn das Verfahren so lange durchgeführt wird, bis ein Formfehler höchstens 20 Nanometer beträgt. In anderen Worten ist die Abweichung der Kugel von einer im mathematischen Sinne idealen Kugel dann an jedem Punkt der Oberfläche der Kugel kleiner als 20 Nanometer, vorzugsweise kleiner als 10 Nanometer.

Besonders günstig ist es, wenn pH-neutrale Polierpaste verwendet wird, das heißt, dass ein pH-Wert einer Polierpaste, die zum Durchführen des erfindungsgemäßen Verfahrens verwendet werden kann, zwischen 6,5 und 7,5, insbesondere 6,8 und 7,2, liegt. In anderen Worten beruht das Polieren dann auf einem rein physikalischen Abtrag, nicht aber auf einem physikalisch-chemischen Abtrag.

Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt:

Figur 1 eine erfindungsgemäße Maschine zum Durchführen eines erfindungsgemäßen Verfahrens und

Figur 2 das Polierelement eines erfindungsgemäßen Polierelements der Maschine gemäß Figur 1.

Figur 1 zeigt eine erfindungsgemäße Maschine 10 zum Herstellen von Kugeln 12. Die Maschine 10 umfasst vier Drehantriebe, von denen die Drehantriebe 14.1, 14.2 und 14.3 zu sehen sind. Die Drehantriebe 14.i (i=1,2,3,4) sind mit jeweils einem Polierelement 16.i drehfest verbunden. Zwischen dem Drehantrieb 14.i und dem zugeordneten Polierelement 16.i kann ein Lager 18.i angeordnet sein, das eine Drehachse  $A_i$  aufweist, die zeitlich möglichst wenig in ihrer Lage schwankt.

Die Polierelemente 16.i sind tetraederartig um einen gemeinsamen Mittelpunkt

M<sub>16</sub> angeordnet, der mit einem Kugelmittel M<sub>12</sub> der Kugel 12 zusammenfällt. Die Drehantriebe 14.i, sowie die Lager 18.i sind an einem Gestell 20 befestigt. Die Drehantriebe 12.i werden von einer Steuereinheit 22, die im vorliegenden Fall durch einen Rechner gebildet ist, angesteuert. Es ist günstig, wenn die Drehgeschwindigkeiten und –richtungen der Drehantriebe 14.i über die Zeit variiert werden.

Die Maschine 10 besitzt drei Vorspannvorrichtungen 24, von denen die Vorspannvorrichtungen 24.1 und 24.2 zu erkennen sind. Jede Vorspannvorrichtung 24 besitzt im vorliegenden Fall ein Gewicht 26, dessen Gewichtskraft über ein Zugelement, hier in Form eines Drahts, und eine Umlenkrolle umgelenkt und auf das jeweilige Polierelement 16 geleitet wird. Durch Variation der Gewichte 26 (Bezugszeichen ohne Zählsuffix beziehen sich jeweils auf alle entsprechenden Objekte) kann daher eine Vorspannkraft auf die Polierelemente 16.1, 16.2 und das in Figur 1 nicht zu sehende Polierelement 16.4 variiert werden. Das Polierelement 16.3 bedarf keiner Vorspannvorrichtung, da die Vorspannkraft allein durch das Gewicht des Polierelements 16.4 eingestellt werden kann.

Figur 2 zeigt ein erfindungsgemäßes Polierelement 16, das einen Halter 28 und eine Polierkalotte 30 umfasst. An der Polierkalotte 30 ist eine Polieroberfläche 32 ausgebildet, die beim Betrieb der erfindungsgemäßen Maschine (vgl. Figur 1) an der Kugel 12 anliegt.

Der Halter 28 besitzt einen Kugelkopf 34, um den die Polierkalotte 30 schwenkbar gelagert ist. Der Kugelkopf 34 sitzt in einer Gelenkpfanne 36 der Polierkalotte 30 und ist mit einer Fixierkalotte 38 relativ zur Gelenkpfanne 36 fixiert. Der Kugelkopf 34 bildet mit der Gelenkpfanne 36 und der Fixierkalotte 38 eine Übergangspassung. Diese Übergangspassung ist so eng toleriert, dass einerseits kein merkliches Spiel besteht und andererseits eine Losbrechkraft zum Bewegen der Polierkalotte 30 relativ zum Halter 28 in guter Näherung vernachlässigt werden kann. Insbesondere ist zwischen Kugelkopf 34 einerseits und der Gelenkpfanne 36 und der Fixierkalotte 38 andererseits ein Gleitfluid vorhanden, bei-

spielsweise Mineralöl.

Die Polierkalotte 30 weist ein Rückstellelement 40 auf, das erfindungsgemäß durch eine Membran aus entropieelastischem Material gebildet ist. Bei dem entropieelastischen Material handelt es sich im vorliegenden Fall um Gummi.

Schwenkt die Polierkalotte 30 um den Kugelkopf 34, so bewegt sich beispielsweise ein Punkt P auf der Polieroberfläche 32 auf einem Kreisbogenabschnitt, dessen Mittelpunkt ein Drehpunkt D ist. Der Drehpunkt D hat einen Abstand d zu einem Kontaktkugelmittelpunkt  $M_{42}$  einer gedachten Kontaktkugel 42, die die Schmiegekugel an der Polieroberfläche 32 ist. Im Einsatz entspricht die Kontaktkugel 42 der Realisierung der Kugel, die poliert wird. Der Abstand d ist kleiner als das Doppelte eines Kontaktkugelradius R. Im vorliegenden Fall gilt  $d/R=1,3$ . Es sind aber auch andere Verhältnisse möglich.

Verläuft eine Längsachse L des Halters 28 vertikal und wird an einem Punkt P der Polieroberfläche 32 eine Kraft F angelegt, die in Umfangsrichtung bezüglich einer Bewegung um den Drehmittelpunkt D wirkt, so schwenkt die Polierkalotte 30 um den Drehpunkt D. Der Punkt P bewegt sich dadurch um eine Auslenkung a zum Punkt P'. Die Auslenkung a ist die Bogenlänge zwischen den Punkten P und P', die aber in sehr guter Näherung durch den Abstand der beiden Punkte P und P' beschrieben werden kann. Beim Auslenken schwenkt die Polierkalotte um einen Auslenkwinkel  $\alpha$ , der in Grad gemessen wird. Der Quotient  $F/\alpha$  aus derjenigen Kraft F, die zu einer Auslenkung von einem Mikrometer führt, und dem Auslenkwinkel  $\alpha$ , der dieser Auslenkung a entspricht, wird als Auslenk-Federkonstante  $\kappa$  bezeichnet.

Je fester das Rückstellelement 40 ist, desto größer ist die Auslenk-Federkonstante  $\kappa$ . Im vorliegenden Fall ist dies  $\kappa = \text{ca. } 5 \text{ Newton pro Grad}$ .

Selbstverständlich hängt die Auslenk-Federkonstante  $\kappa$  von der Lage des Punk-

tes P auf der Polieroberfläche 32 ab. Für die angegebene Definition ist ein solcher Punkt zu wählen, der in der Mitte der beiden Ränder der Polieroberfläche 32 liegt, dessen Abstand zum Drehpunkt D also gerade dem Mittelwert zwischen dem vom Mittelpunkt D am stärksten beabstandeten Punkt der Polieroberfläche 32 und dem vom Drehpunkt D am wenigsten beabstandeten Punkt der Polieroberfläche 32 entspricht.

Verläuft die Längsachse L vertikal und wird ein Punkt P auf der Polieroberfläche, der wie oben beschrieben gewählt ist, um einen Mikrometer ausgelenkt und die zur Auslenkung führende Kraft dann schlagartig entfernt, schwingt die Polierkaltete 30 relativ zum feststehenden Halter 28 nicht. Das Rückstellelement 40 ist so ausgebildet, dass die Dämpfungskonstante  $\delta$  so groß ist, dass der aperiodische Grenzfall oder der Kriechfall eintritt.

Zum Durchführen eines erfindungsgemäßen Verfahrens wird die Kugel 12 wie in Figur 1 gezeigt in die Maschine 10 eingespannt und die Drehantriebe 14 werden, vorzugsweise mit unterschiedlichen Drehgeschwindigkeiten und/ oder Drehrichtungen, betrieben. Die Polieroberfläche 32 ist mit Pech belegt. Zwischen dem Pech und der Kugel 12 ist ein Poliermedium vorhanden. Als Poliermedium kommt handelsübliches Titandioxid, zum Beispiel Anatas-Rutil, mit einer Partikelgröße von circa 20 nm bis circa 1  $\mu$ m zum Einsatz. Der pH-Wert der Mischung aus Pech und Poliermedium ist vorzugsweise neutral.

Die Gewichte 26 sind so gewählt, dass ein Abtrag kleiner ist als 3 Nanometer pro Minute. Besonders günstig ist es, wenn der Abtrag  $1 \pm 0,5$  Nanometer pro Minute beträgt. Durch dieses Verfahren lassen sich Kugeln mit einem Durchmesser zwischen 50 und 200 mm herstellen, die einen Formfehler von weniger als 20 Nanometer besitzen. Mittenrauwerte  $R_a$  nach DIN EN ISO 4287:2010 von weniger als 0,4 Nanometer sind erreichbar. Es hat sich herausgestellt, dass eine Randschicht der Kugel 12, bei der es sich vorzugsweise um eine Siliziumkugel handelt, keine nachweisbare Schädigung zeigt. Zudem sind keine Bestandteile des Poliermediums nachweisbar. Die Oberfläche besitzt eine gleichmäßig dünne

Oxidschicht und es sind keine metallischen Kontaminationen nachweisbar. Die Masse der Kugel liegt im vorliegenden Fall bei 1 kg +/- 5 mg.

**Bezugszeichenliste**

10	Maschine	κ	Auslenk-Federkonstante
12	Kugel		
14	Drehantrieb		
16	Polierelement		
18	Lager		
20	Gestell		
22	Steuereinheit		
24	Vorspannvorrichtung		
26	Gewicht		
28	Halter		
30	Polierkalotte		
32	Polieroberfläche		
34	Kugelkopf		
36	Gelenkpfanne		
38	Fixierkalotte		
40	Rückstellelement		
42	Kontaktkugel		
a	Auslenkung		
A	Drehachse		
d	Abstand		
D	Drehpunkt		
F	Kraft		
L	Längsachse		
M	Kontaktkugelmittelpunkt		
P	Punkt		
R	Kontaktkugelradius		
δ	Dämpfungskonstante		

## Patentansprüche

1. Maschine zum Herstellen von Kugeln (12), mit
  - (a) einem Drehantrieb (14) und
  - (b) zumindest einem Werkzeug (16), das
    - mittels einem Halter (28) mit dem Drehantrieb (14) zum Drehen verbunden ist und
    - eine Polierkalotte (30) aufweist,wobei
  - (c) die Polierkalotte (30)
    - schwenkbar am Halter (28) befestigt ist und
    - ein Rückstellelement (40) aufweist, das
      - bei einer Auslenkung der Polierkalotte (30) aus einer Ruhelage eine Rückstellkraft erzeugt und
      - aus einem entropieelastischen Material aufgebaut ist.dadurch gekennzeichnet, dass
  - (d) das Rückstellelement als Membran ausgebildet ist, so dass Kugeln (12) mit einem Formfehler von höchstens 50 Nanometer herstellbar sind.
  
2. Maschine nach Anspruch 0, dadurch gekennzeichnet, dass
  - (a) das Werkzeug (16) eine Auslenk-Federkonstante ( $\kappa$ ) hat, die bestimmt ist bezüglich einer Kraft (F), die an einer einem Punkt (P) der Polieroberfläche angreift und die diesen Punkt (P) relativ zum Halter (28) um 1  $\mu\text{m}$  auslenkt,
  - (b) wobei die Auslenk-Federkonstante ( $\kappa$ ) höchstens 10 Newton pro Grad beträgt und/oder mindestens 0,25 Newton pro Grad beträgt.

3. Maschine nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass  
das Werkzeug (16) bezüglich einer Auslenkung des Punkts (P) der Polieroberfläche (32) um 1  $\mu\text{m}$  eine Dämpfungskonstante ( $\delta$ ) hat, die so groß ist, dass das Polierelement nicht über seine Nulllage überschwingt.
4. Maschine nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch
  - eine Vorspannvorrichtung (24) zum Vorspannen des zumindest einen Polierelements (16) auf die Kugel mit einer Vorspannkraft,
  - wobei die Vorspannkraft so gewählt ist, dass eine rechnerische Flächenpressung der Polieroberfläche (32) auf die Kugel (12) 0,1 bis 15 Newton pro Quadratzentimeter beträgt.
5. Werkzeug (16) für eine Maschine (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, mit
  - (a) einem Halter (28),
  - (b) einer Polierkalotte (30),
    - an der eine Polieroberfläche (32) ausgebildet ist,
    - die am Halter (28) befestigt ist und
    - ein Rückstellelement (40) aufweist, das bei einer Auslenkung der Werkzeuge (16) aus einer Ruhelage eine Rückstellkraft erzeugt und aus einem entropieelastischen Material aufgebaut ist und als Membran ausgebildet ist.
6. Kugel, insbesondere aus Silizium, mit einem Durchmesser zwischen 10 Millimeter bis 200 Millimeter, dadurch gekennzeichnet, dass die Kugel (12) einen Formfehler zwischen 50 Nanometer und 2 Nanometer hat.
7. Verfahren zum Herstellen einer Kugel (12) mit einem Formfehler von höchstens 30 Nanometer, mit den Schritten:
  - (a) Einspannen eines Kugel-Rohlings mit einem Durchmesser zwischen



- 8 Millimeter und 180 Millimeter in eine Maschine (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, die vier Werkzeuge (16) aufweist, die tetraedrisch um den Kugel-Rohling angeordnet sind,
- (b) Vorspannen der Werkzeuge (16) auf den Kugel-Rohling mit einer Vorspannkraft und
  - (c) Drehen der Werkzeuge (16), bis aus dem Kugel-Rohling eine Kugel (12) entstanden ist, deren Formfehler höchstens 30 Nanometer beträgt.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass ein Abtrag kleiner als 3 Nanometer pro Minute, insbesondere 1,5 Nanometer pro Minute, ist.

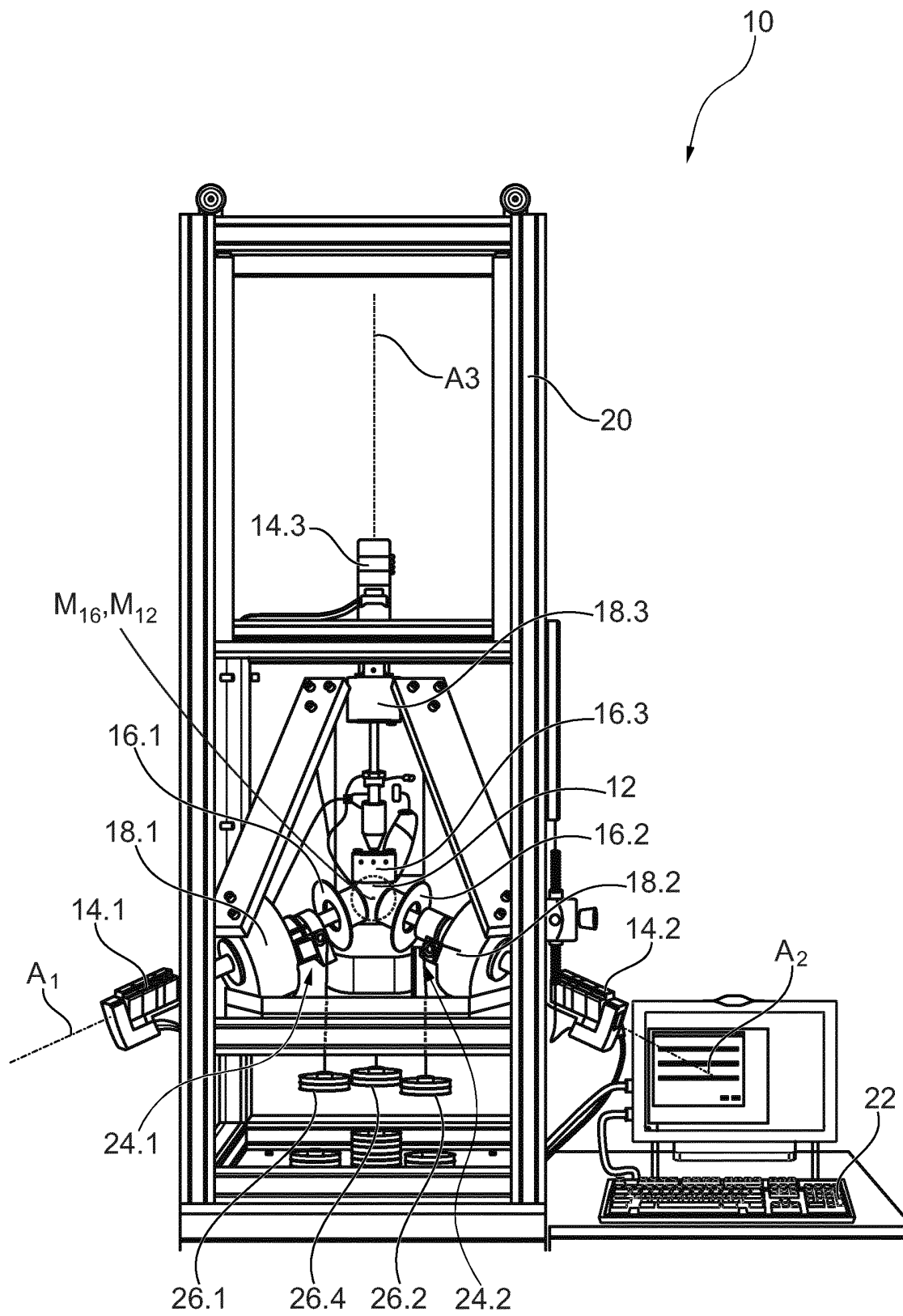


Fig. 1

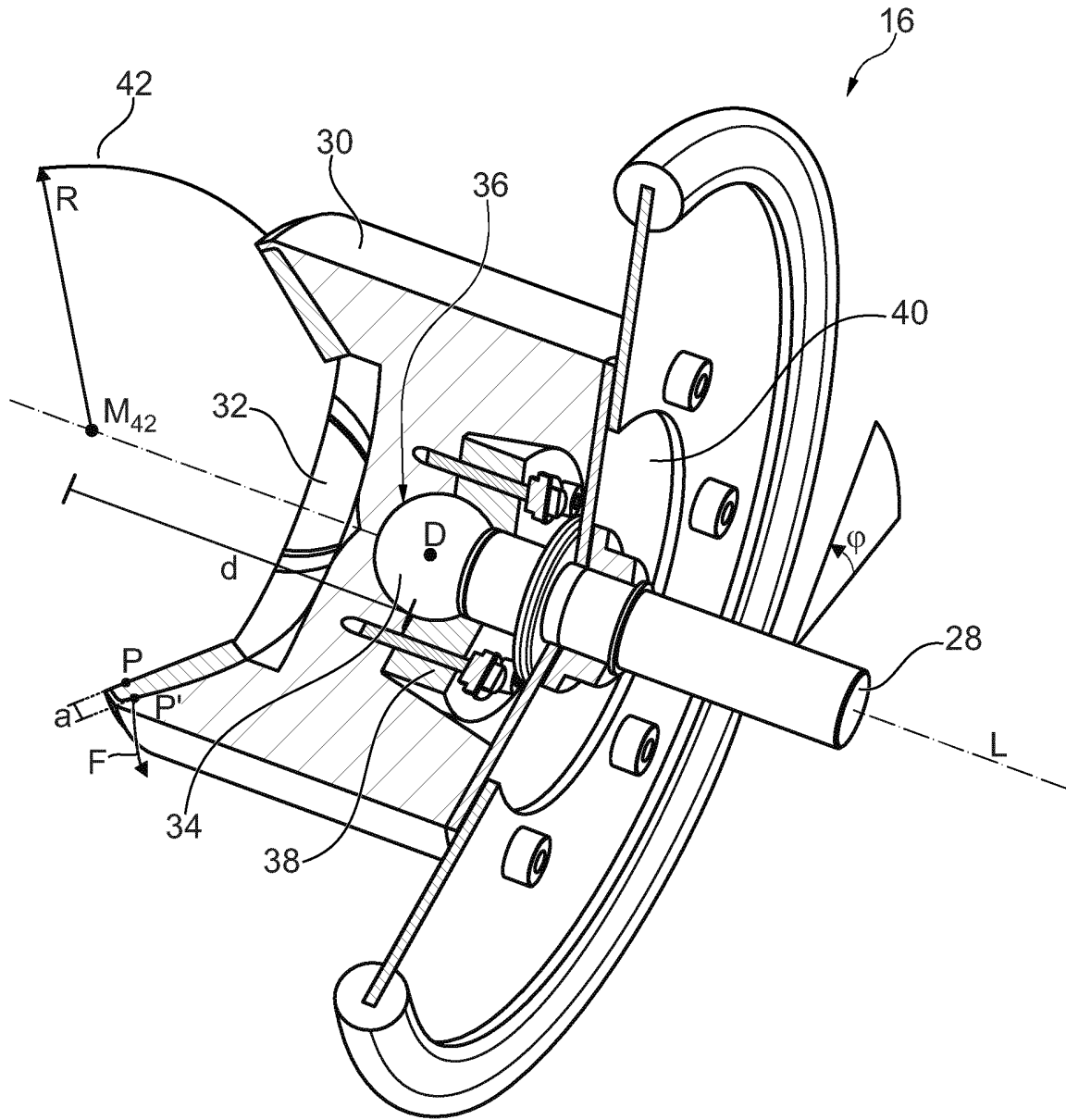


Fig. 2

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No PCT/EP2016/065192
---

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> INV. B24D13/20      B24D13/14      B24B11/10      B24B29/04      B24B37/025 ADD.				
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC				
<b>B. FIELDS SEARCHED</b> Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) B24D B24B				
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched				
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data				
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>				
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.		
X	WO 2004/037489 A2 (ZEISS CARL [DE]; ZEISS STIFTUNG [DE]; KUEBLER CHRISTOPH [DE]; KOEHLE T) 6 May 2004 (2004-05-06)	1,4,5		
Y	page 20, paragraphs 5, 6 page 37, paragraph 5 figures 6, 8, 9	7,8		
X	----- EP 1 698 432 A2 (SATISLOH GMBH [DE]) 6 September 2006 (2006-09-06)	1,4,5		
Y	abstract; figure 1	7,8		
X	----- WO 99/16577 A2 (UNIV OKLAHOMA STATE [US]) 8 April 1999 (1999-04-08)	6		
	page 10, lines 17-25 page 18, lines 13-30 ----- -/--			
<table border="0"> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C.</td> <td><input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.</td> </tr> </table>			<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C.	<input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C.	<input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.			
* Special categories of cited documents :				
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family			
Date of the actual completion of the international search  <p align="center">30 August 2016</p>	Date of mailing of the international search report  <p align="center">09/09/2016</p>			
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer  <p align="center">Endres, Mirja</p>			

1

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2016/065192

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP H03 121759 A (TOSHIBA CORP) 23 May 1991 (1991-05-23) the whole document -----	7,8
A	US 3 961 448 A (AKAHANE SHOICHI) 8 June 1976 (1976-06-08) the whole document -----	1-8

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2016/065192

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 2004037489	A2	06-05-2004	AT 362823 T 15-06-2007
			AT 380094 T 15-12-2007
			AT 415240 T 15-12-2008
			AT 479523 T 15-09-2010
			AU 2003301527 A1 13-05-2004
			DE 10250856 A1 13-05-2004
			EP 1554082 A2 20-07-2005
			EP 1736279 A1 27-12-2006
			EP 1736280 A1 27-12-2006
			EP 1736281 A1 27-12-2006
			JP 4468818 B2 26-05-2010
			JP 2006503716 A 02-02-2006
			US 2006009126 A1 12-01-2006
			US 2007093177 A1 26-04-2007
			US 2007093184 A1 26-04-2007
			WO 2004037489 A2 06-05-2004
-----			
EP 1698432	A2	06-09-2006	DE 102005010583 A1 07-09-2006
			EP 1698432 A2 06-09-2006
			ES 2326991 T3 22-10-2009
			US 2006199481 A1 07-09-2006
-----			
WO 9916577	A2	08-04-1999	AU 1062799 A 23-04-1999
			US 5931718 A 03-08-1999
			WO 9916577 A2 08-04-1999
-----			
JP H03121759	A	23-05-1991	NONE
-----			
US 3961448	A	08-06-1976	AU 7626274 A 10-06-1976
			BE 820492 A1 27-03-1975
			CA 1009039 A 26-04-1977
			CH 569129 B5 14-11-1975
			CH 576842 A5 30-06-1976
			CH 1397373 A4 14-02-1975
			DE 2444759 A1 10-04-1975
			DE 2458875 A1 26-06-1975
			FR 2245625 A1 25-04-1975
			FR 2254400 A1 11-07-1975
			GB 1480776 A 27-07-1977
			GB 1484714 A 01-09-1977
			JP S5059329 A 22-05-1975
			JP S5088694 A 16-07-1975
			NL 7412573 A 16-06-1975
			NL 7412578 A 02-04-1975
SE 7411866 A 01-04-1975			
US 3961448 A 08-06-1976			
-----			

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Internationales Aktenzeichen  
PCT/EP2016/065192

<b>A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES</b> INV. B24D13/20 B24D13/14 B24B11/10 B24B29/04 B24B37/025 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
<b>B. RECHERCHIERTE GEBIETE</b> Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) B24D B24B		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, WPI Data		
<b>C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN</b>		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	WO 2004/037489 A2 (ZEISS CARL [DE]; ZEISS STIFTUNG [DE]; KUEBLER CHRISTOPH [DE]; KOEHLE T) 6. Mai 2004 (2004-05-06)	1,4,5
Y	Seite 20, Absätze 5, 6 Seite 37, Absatz 5 Abbildungen 6, 8, 9	7,8
X	EP 1 698 432 A2 (SATISLOH GMBH [DE]) 6. September 2006 (2006-09-06)	1,4,5
Y	Zusammenfassung; Abbildung 1	7,8
X	WO 99/16577 A2 (UNIV OKLAHOMA STATE [US]) 8. April 1999 (1999-04-08) Seite 10, Zeilen 17-25 Seite 18, Zeilen 13-30	6
	----- -/-	
<input checked="" type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen <input checked="" type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche 30. August 2016		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts 09/09/2016
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Endres, Mirja

## C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	JP H03 121759 A (TOSHIBA CORP) 23. Mai 1991 (1991-05-23) das ganze Dokument -----	7,8
A	US 3 961 448 A (AKAHANE SHOICHI) 8. Juni 1976 (1976-06-08) das ganze Dokument -----	1-8



**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2016/065192

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2004037489 A2	06-05-2004	AT 362823 T	15-06-2007
		AT 380094 T	15-12-2007
		AT 415240 T	15-12-2008
		AT 479523 T	15-09-2010
		AU 2003301527 A1	13-05-2004
		DE 10250856 A1	13-05-2004
		EP 1554082 A2	20-07-2005
		EP 1736279 A1	27-12-2006
		EP 1736280 A1	27-12-2006
		EP 1736281 A1	27-12-2006
		JP 4468818 B2	26-05-2010
		JP 2006503716 A	02-02-2006
		US 2006009126 A1	12-01-2006
		US 2007093177 A1	26-04-2007
		US 2007093184 A1	26-04-2007
		WO 2004037489 A2	06-05-2004
		EP 1698432 A2	06-09-2006
EP 1698432 A2	06-09-2006		
ES 2326991 T3	22-10-2009		
US 2006199481 A1	07-09-2006		
WO 9916577 A2	08-04-1999	AU 1062799 A	23-04-1999
		US 5931718 A	03-08-1999
		WO 9916577 A2	08-04-1999
JP H03121759 A	23-05-1991	KEINE	
US 3961448 A	08-06-1976	AU 7626274 A	10-06-1976
		BE 820492 A1	27-03-1975
		CA 1009039 A	26-04-1977
		CH 569129 B5	14-11-1975
		CH 576842 A5	30-06-1976
		CH 1397373 A4	14-02-1975
		DE 2444759 A1	10-04-1975
		DE 2458875 A1	26-06-1975
		FR 2245625 A1	25-04-1975
		FR 2254400 A1	11-07-1975
		GB 1480776 A	27-07-1977
		GB 1484714 A	01-09-1977
		JP S5059329 A	22-05-1975
		JP S5088694 A	16-07-1975
		NL 7412573 A	16-06-1975
		NL 7412578 A	02-04-1975
SE 7411866 A	01-04-1975		
US 3961448 A	08-06-1976		