

(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
18. Dezember 2014 (18.12.2014)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2014/198712 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:

B24B 11/00 (2006.01) **G01B 21/08** (2006.01)

B24B 37/025 (2012.01) **G01N 3/56** (2006.01)

B24B 49/12 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2014/062006

(22) Internationales Anmeldedatum:
10. Juni 2014 (10.06.2014)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2013 210 724.2 10. Juni 2013 (10.06.2013) DE

(71) Anmelder: **FRAUNHOFER GESELLSCHAFT ZUR
FÖRDERUNG DER ANGEW. FORSCHUNG E.V.**
[DE/DE]; Hansastr. 27 c, 80686 München (DE).

(72) Erfinder: **BETHKE, Reinhold**; Im kalten Tale 59, 38304
Wolfenbüttel (DE).

(74) Anwälte: **ANDRAE | WESTENDORP** et al.;
Uhlandstraße 2, 80336 München (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, 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, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH,
TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA,
ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, 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: RECESS GRINDING DEVICE AND METHOD FOR USING THE SAME

(54) Bezeichnung : KALOTTENSCHLEIFGERÄT UND VERFAHREN ZU DESSEN VERWENDUNG

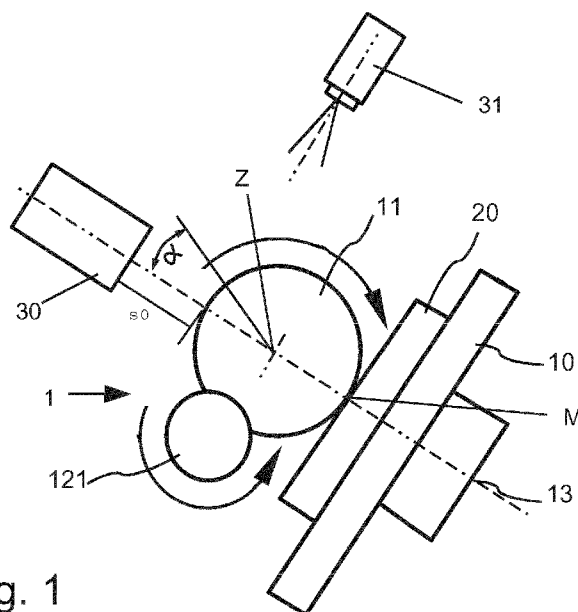


Fig. 1

(57) **Abstract:** The invention relates to a recess grinding device (1) having at least one holding device (10) for holding a specimen (20) and at least one abrasive ball (11, 11b, 11c) which can be set rotating by drive means (12) and can be guided by means of a predefined or predefinable force against the specimen (20), wherein the recess grinding device (1) comprises a position measuring device (30, 31) for measuring the position of the at least one abrasive ball, wherein the position measuring device (30, 31) comprises at least one measuring means for measuring the position of the abrasive ball (11a, 11b, 11c) by means of a measuring principle operating without contact. The invention further relates to a corresponding method for determining the abrasive wear and/or a layer thickness.

(57) **Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft ein Kalottenschleifgerät (1) mit zumindest einer Aufnahmeeinrichtung (10) zur Aufnahme eines Prüflings (20) und zumindest einer Schleifkugel (11a, 11b, 11c), welche durch Antriebsmittel (12) in Rotation bringbar und mit einer vorgegebenen oder vorgebbaren Kraft gegen den Prüfling (20) führbar ist, wobei das Kalottenschleifgerät (1) eine Lagemessvorrichtung (30, 31) zur Messung der Lage der zumindest einen Schleifkugel umfasst, wobei die Lagemessvorrichtung (30, 31) zumindest ein Messmittel

zur Lagemessung der Schleifkugel (11a, 11b, 11c) mittels eines berührungslos arbeitenden Messprinzips umfasst. Weiterhin betrifft die Erfindung ein entsprechendes Verfahren zur Bestimmung des Abriebverschleißes und/oder einer Schichtdicke.



WO 2014/198712 A2

Kalottenschleifgerät und Verfahren zu dessen Verwendung

Die Erfindung betrifft ein Kalottenschleifgerät mit zumindest einer Aufnahmeeinrichtung zur Aufnahme eines Prüflings und zumindest einer Schleifkugel, welche durch Antriebsmittel in Rotation bringbar und mit einer vorgebbaren Kraft gegen den Prüfling führbar ist. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Bestimmung des Abriebverschleißes eines Prüflings, bei welchem zumindest ein Prüfling in zumindest einer Aufnahmeeinrichtung aufgenommen wird und zumindest eine Schleifkugel mit einer vorgebbaren Kraft gegen den Prüfling geführt und durch Antriebsmittel in Rotation gebracht wird, um eine Kalotte in den Prüfling einzuschleifen. Vorrichtungen und Verfahren der eingangs genannten Art können dazu verwendet werden, die Schichtdicke und die Verschleißfestigkeit einer Beschichtung auf dem Prüfling zu bestimmen.

Beschichtungen der eingangs genannten Art können eingesetzt werden, um das dekorative Aussehen von Bauteilen zu verbessern oder deren Reibungs- oder Verschleißverhalten an gewünschte Eigenschaften anzupassen. Für die Gewährleistung der Funktionssicherheit einer solchen Beschichtung ist die Schichtdicke von Interesse. Im Falle von tribologisch

belasteten Beschichtungen ist auch deren Verschleißfestigkeit von Interesse, d.h. die Widerstandskraft gegen Abrieb.

Aus der DIN-EN 1071 Teil 6 ist eine Prüfvorrichtung und ein korrespondierendes Verfahren zur Bestimmung der Schichtdicke und der Verschleißfestigkeit einer Beschichtung auf einem Prüfling bekannt. Bei diesem bekannten Verfahren wird eine Schleifkugel durch Antriebsmittel in Rotation versetzt und zumindest mit einem Teil ihres Eigengewichts gegen den Prüfling geführt. Durch Zufügen eines Abrasivmittels an die Grenzfläche zwischen der Schleifkugel und dem Prüfling entsteht an der Oberfläche des Prüflings eine Kalotte, wenn sich die Schleifkugel zunehmend tiefer in den Prüfling einschleift. Als Abrasivmittel können Emulsionen mit Schleifpartikeln verwendet werden. Die Schleifpartikel können Diamant, Oxide, Karbide, Nitride oder Silizide enthalten. Die Basis der Emulsion kann deionisiertes Wasser oder ein Öl sein. Der Volumenanteil der Partikel kann zwischen 2 % und 20 % variieren.

Bei herkömmlich bekannten Schleifgeräten wird die Tiefe der Kalotte profilometrisch oder durch mikroskopische Auswertung bestimmt. Der Schleifweg ergibt sich aus der Prüfdauer und der Rotationsgeschwindigkeit der Kugel. Aus den Parametern Schleifweg, Auflagekraft und Kalottenvolumen lässt sich der Verschleißkoeffizient berechnen. Aus Durchmesser und Tiefe der Kalotte kann die Schichtdicke einer Beschichtung bestimmt werden.

Diese bekannten Schleifgeräte weisen jedoch den Nachteil auf, dass Messungen nur zu Beginn und am Ende des Schleifvorganges durchgeführt werden können oder der Schleifvorgang zur Bestimmung der Kalottentiefe unterbrochen werden muss. Hierdurch werden Messfehler erzeugt, wenn der Prüfling nach der Messung in anderer Lage im Schleifgerät montiert wird.

Ausgehend vom Stand der Technik liegt der Erfindung somit die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung des Abriebverschleißes und/oder der Schichtdicke eines beschichteten Prüflings anzugeben, welches zeitabhängige Untersuchungen eines Prüflings in kürzerer Zeit und/oder mit größerer Genauigkeit ermöglicht.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Kalottenschleifgerät nach Anspruch 1 und ein Verfahren nach Anspruch 10 gelöst.

Ein Kalottenschleifgerät umfasst zumindest eine Aufnahmeeinrichtung zur Aufnahme zumindest eines Prüflings und zumindest eine Schleifkugel, welche durch Antriebsmittel in Rotation bringbar und mit einer vorgegebenen oder vorgebbaren Kraft gegen den Prüfling führbar ist. In einigen Ausführungsformen der Erfindung handelt es sich bei der Schleifkugel um eine freilaufende Schleifkugel, d.h. die Schleifkugel ist nicht mit einer Antriebsachse fest verbunden. Eine feste Verbindung im Sinne der vorliegenden Erfindung würde beispielsweise bei form- oder stoffschlüssiger Verbindung oder einer Klebeverbindung vorliegen.

Weiterhin umfasst das Kalottenschleifgerät eine Lagemessvorrichtung zur Messung der Lage der zumindest einen Schleifkugel. Die Funktion der Lagemessvorrichtung umfasst nicht notwendiger Weise die exakte Bestimmung der Lage im dreidimensionalen Raum, sondern insbesondere zumindest einen Messwert, der für die Bestimmung der Lageänderung der Schleifkugel während des Bearbeitungsvorgangs verwendbar ist. Hierdurch ist es möglich, während einem laufenden Schleifvorgang die Lage der Schleifkugel zu überwachen und zu Zeitpunkten während des Schleifvorgangs die bereits erreichte Schleiftiefe zu bestimmen. Somit fällt zunächst der bisher erforderliche nachfolgende Arbeitsschritt der Auswertung der geschliffenen Kalotte weg. Dieser Schritt wurde häufig manuell durchgeführt und der Auswertevorgang

birgt die Gefahr eines Ablesefehlers. Gerade bei dünnen Beschichtungsdicken ist die exakte manuelle Schleiftiefenmessung ggf. schwierig. Da während des gesamten Schleifvorgangs eine Vielzahl von Messwerten aufgenommen werden kann, können diese über eine Interpolation verbunden werden, um so eventuelle Messfehler zu mitteln und so kann die Schleiftiefe einfach und genau bestimmt werden. Ferner können die ermittelten Messwerte digital gespeichert oder ausgedruckt werden, um so eine Dokumentation des durchgeführten Schleifvorgangs im Sinne einer Qualitätskontrolle durchführen zu können. In diesem Sinne ist das Kalottenschleifgerät bevorzugt eingerichtet, eine Lagemessung der Schleifkugel während eines laufenden Schleifvorgangs durchzuführen und insbesondere eingerichtet ist, über eine Lageänderung der Schleifkugel die Tiefe des Eindringens der Schleifkugel in einen in das Kalottenschleifgerät aufgenommenen Prüfling zu bestimmen.

In einigen Ausführungsformen der Erfindung kann durch Aufnahme einer Mehrzahl von Messwerten zu unterschiedlichen Zeiten der Verschleißwiderstand und/oder die Schichtdicke einer Mehrzahl von Einzelschichten eines Mehrschichtsystems bestimmt werden.

Bevorzugt umfasst die Lagemessvorrichtung zumindest ein Messmittel zur Lagemessung der Schleifkugel mittels eines berührungslos arbeitenden Messprinzips. So wird der Schleifvorgang durch die Messung selbst nicht beeinflusst. Insbesondere ist die Lagemessvorrichtung eingerichtet, automatisiert in vorbestimmten oder vorbestimmbaren Zeitabständen Messwerte der Lage der Schleifkugel zu ermitteln. Hierdurch kann der zeitliche Ablauf des Schleifvorgangs reproduzierbar dokumentiert werden und Fehler, wie z.B. scheinbar erhöhte Schleifleistungen zu Beginn des Schleifvorgangs, die durch Einschleifbedingungen hervorgerufen werden, ermittelt und bei der Auswertung kompensiert werden.

In einigen Ausführungsformen ist die Lagemessvorrichtung dazu eingerichtet, den Abstand der Lagemessvorrichtung zu der Schleifkugel zu messen. Da Abstandsmessvorrichtungen am Markt als Standardmessvorrichtungen gut erhältlich sind, kann hiermit kostengünstig und sehr genau die Lage gemessen werden, wobei bevorzugt lediglich die relative Verschiebung der Schleifkugel während des Schleifens in Richtung der Schleifnormalachse bestimmt wird. In einigen Ausführungsformen der Erfindung kann die Lageänderung durch Lasertriangulation bestimmt werden. In einigen Ausführungsformen der Erfindung kann die Lageänderung durch eine kapazitive oder induktive Messung bestimmt werden. In einigen Ausführungsformen der Erfindung kann die Lageänderung durch elektronische Bildauswertung aus einem digitalen Kamerabild bestimmt werden.

Weiterführend kann die Schleifnormalachse durch den Kontaktpunkt eines in dem Kalottenschleifgerät aufgenommenen Prüflings mit der Schleifkugel und dem Mittelpunkt der Schleifkugel definiert sein und die Lagemessvorrichtung kann im Winkel von weniger als 30° von der Schleifnormalrichtung mit Betrachtung des Kugelmittelpunkts als Winkelbezugspunkt abweichen. Da somit die Lagemessvorrichtung weitgehend in Verlängerung der Schleifnormalen hinter der Schleifkugel liegt, bewirkt die Verschiebung der Schleifkugel in die geschliffene Kalotte hinein, einen entsprechenden Messwert der Verschiebung.

Alternativ ist die Lagemessvorrichtung eingerichtet, eine in die Messrichtung der Lagemessvorrichtung projizierte Umfangslinie der Schleifkugel oder einen Teil davon zu detektieren. Bevorzugt weist dabei die Lagemessvorrichtung eine Kamera oder einen eindimensionalen Photosensor zur Detektion einer Umfangslinie der Schleifkugel oder eines Teils davon oder eines Punkts der Umfangslinie auf. Diese Ausrichtung der Lagemessvorrichtung ist insbesondere vorteilhaft bei der Verwendung einer Kamera, wenn sie derart

seitlich oder oberhalb oder unterhalb der Schleifkugel angeordnet ist, so dass die Schleifkugel sich bei ihrer Verschiebung durch das aufgenommene Bild bewegt. So kann über die Auswertung der mit einem Helligkeitskontrast aufgenommenen Umfangslinie ihre Verschiebung bestimmt werden. Da die Linie eine Vielzahl von Bildpunkten beinhaltet, kann über die Vielzahl dieser Messpunkte (=Bildpunkte) eine durch die Redundanz erhöhte Messgenauigkeit erzielt werden. Die Kamera wird dabei als ein zweidimensionaler Photosensor angesehen. Es ist auch möglich, einen (eindimensionalen) Liniendetektor zu verwenden, der jeweils nur einen Punkt der Umfangslinie und dessen Verschiebung detektieren kann.

In einigen Ausführungsformen ist das Kalottenschleifgerät eingerichtet, eine initiale Startposition und nachfolgende Änderungspositionen einer Schleifkugel zu bestimmen, um über die Relativbewegung der Schleifkugel die Tiefe des Eindringens der Schleifkugel in den Prüfling zu bestimmen. Dabei ist das Kalottenschleifgerät bevorzugt eingerichtet, den Zahlenwert der Tiefe des Eindringens an einer Anzeige anzuzeigen und/oder in einem Speichermedium zu speichern. Ein entsprechendes Speichermedium ist in einigen Ausführungsformen ein elektronisches Speichermedium, wobei auch ein Drucker auch als ein geeignetes Speichermedium verstanden wird. Es kann bevorzugt nicht der Messwert der Abstandsmessung ausgegeben werden, sondern die daraus berechnete Kalottenschleiftiefe oder das entsprechende Kalottenvolumen. Bei diesen Berechnungen können nämlich Anpassungsberechnungen beinhaltet sein, die insbesondere den Verschleiß an der Schleifkugel berücksichtigen.

Weiter kann das Kalottenschleifgerät bevorzugt eingerichtet sein, Weg-Zeit-Wertepaarungen, wie insbesondere ein Weg-Zeitdiagramm, der Tiefe des Eindringens der Schleifkugel in einen Prüfling zu bestimmen und zu speichern. Alternativ kann das Kalottenschleifgerät eingerichtet sein, in

vorgegebenen oder vorgebbaren Zeitabständen die bezeichnete Tiefe zu bestimmen und zu speichern. Hierdurch wird es ermöglicht eine saubere und komplette Dokumentation zu erstellen, die im Bereich der Qualitätssicherung gefordert sein kann. Auch lassen sich durch die Vielzahl der Messwerte, bzw. Wertepaarungen Messfehler, die vereinzelt aufgetreten sein könnten, ausmitteln. So lässt sich neben der Festigkeit einer oder mehrerer Schichten der Beschichtung auch ihre jeweilige Dicke automatisiert und somit genauer als bei einer manuellen Messung kontrollieren. Die Zeit des Wegzeitdiagramms ist insbesondere die Zeit der schleifenden Prüflingsbearbeitung.

Bei einem Verfahren zur Bestimmung des Abriebverschleißes und/oder einer Schichtdicke eines Prüflings wird zumindest ein Prüfling in zumindest eine Aufnahmeeinrichtung aufgenommen und zumindest eine Schleifkugel wird mit einer vorgebbaren oder vorgegebenen Kraft gegen den Prüfling geführt und durch Antriebsmittel in Rotation gebracht, um eine Kalotte in den Prüfling einzuschleifen. Dabei wird der schleifenden Prüflingsbearbeitung zumindest ein Messwert in Bezug auf die Lage der Schleifkugel mit einem automatisierten Messverfahren aufgenommen, wodurch sich u.a. die bereits beschriebenen Vorteile der automatisierten Messung mit hoher Genauigkeit ergeben.

In einigen Ausführungsformen der Erfindung kann die Lagemessvorrichtung dazu eingerichtet sein, aus einer zyklischen Änderung des Abstandes zwischen der Lagemessvorrichtung und der Schleifkugel eine Drehzahl der Schleifkugel zu ermitteln. Es hat sich herausgestellt, dass die Schleifkugeln in der Regel kleine Abweichungen von der exakten Kugelform aufweisen. Hierdurch ändert sich der Abstand zwischen der Messvorrichtung und der Oberfläche der Schleifkugel zyklisch. Aus dem sich zyklisch ändernden Signal kann entweder eine Drehzahl bzw. eine Winkelgeschwindigkeit der Schleifkugel abgeleitet werden oder die

Anzahl der Umdrehungen kann bestimmt werden, um auf diese Weise den Weg exakt zu bestimmen.

Bevorzugt wird zu Beginn des Schleifvorgangs eine Solltiefe des Schleifens festgelegt und bei dem Erreichen dieser Solltiefe wird ein Warn- oder Informationssignal ausgegeben wird oder der Schleifvorgang beendet. Somit kann der Schleifvorgang insbesondere softwaregesteuert abgebrochen werden, sobald geforderte Wegstrecken erreicht wurden, was eine deutliche Verfahrensbeschleunigung im Vergleich zum herkömmlichen Schleifen bedeutet, bei dem deutlich tiefer geschliffen werden musste, um so sicher das geforderte Schleifergebnis erzielt zu haben.

Nachfolgend soll die Erfindung anhand von Figuren ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens näher erläutert werden. Dabei zeigt

Fig. 1 schematisch das einem Kalottenschleifgerät zugrundeliegende Messprinzip.

Fig. 2 erläutert die Auswertung eines gemäß Fig. 1 erhaltenen Kalottenschliffs.

Fig. 3 zeigt eine Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Kalottenschleifmaschine mit drei Schleifkugeln.

Fig. 4 zeigt einen Schleifaufbau mit mehreren Beschichtungsschichten und

Fig. 5 zeigt ein durch die Messwerte erstelltes Weg-Zeit-Diagramm bei dem mehrschichtigen Prüflingsaufbau.

Fig. 1 zeigt schematisch die Durchführung des vorgeschlagenen Verfahrens. Fig. 1 zeigt einen Schnitt durch eine Schleifkugel 11. Die Schleifkugel 11 kann beispielsweise aus gehärtetem Stahl bestehen oder einen

Stahl enthalten und einen Durchmesser von etwa 10 mm bis etwa 40 mm aufweisen.

Die Schleifkugel 11 liegt auf einer rotierbaren Welle 121 auf. Bei Rotation der Welle 121 wird über die Reibungskräfte zwischen Welle und Schleifkugel auch die Schleifkugel 11 in Rotation versetzt. Die jeweiligen Drehrichtungen sind durch Pfeile schematisch verdeutlicht.

Weiterhin liegt die Schleifkugel 11 auf der Oberfläche eines Prüflings 20 auf. Der Prüfling 20 kann einen Grundwerkstoff mit einer darauf angebrachten Beschichtung aufweisen. In anderen Ausführungsformen der Erfindung kann der Prüfling 20 ein unbeschichteter Werkstoff sein, beispielsweise ein gehärteter oder angelassener Stahl. Der Prüfling 20 weist bevorzugt eine plane Oberfläche zur Durchführung des Verfahrens auf.

Selbstverständlich ist die Durchführung des Verfahrens jedoch auch bei konkav oder konvex gekrümmten Oberflächen des Prüflings 20 möglich, wenn die erhaltenen Messwerte entsprechend korrigiert werden.

Der Prüfling 20 ist in einer Aufnahmeeinrichtung 10 gehalten. Die zu untersuchende Oberfläche des Prüflings 20 ist dabei zwischen etwa 90° und etwa 10° zur Senkrechten geneigt. In einigen Ausführungsformen der Erfindung beträgt die Neigung der zu untersuchenden Oberfläche gegen die Senkrechte etwa 60° bis etwa 70°. Hierdurch ruht das Eigengewicht der Schleifkugel 11 sowohl auf der Welle 121 als auch auf dem Prüfling 20. Durch Anpassen der Neigung des Prüflings kann die Gewichtsverteilung zwischen Welle 121 und Prüfling 20 angepasst werden, ebenso durch Anpassung des horizontalen Abstandes.

Weiterhin weist die Vorrichtung 1 eine optionale Messeinrichtung 13 auf. Die Messeinrichtung 13 kann die in

etwa senkrecht auf den Prüfling 20 einwirkende Normalkraft bestimmen. Sofern die Einrichtung 13 in einigen Ausführungsformen der Erfindung fehlt, kann die einwirkende Normalkraft auch aus dem Gewicht der Schleifkugel 11 und der geometrischen Anordnung von Kugel, Welle und Prüfling bestimmt werden. Die einwirkende Normalkraft, der von der Schleifkugel auf den Prüfling 20 zurückgelegte Schleifweg und das Volumen der eingeschliffenen Kalotte ergeben zusammen ein Maß für die Abriebfestigkeit des Prüflings 20.

Die Auswertung der Messung ist nochmals in Fig. 2 dargestellt. Fig. 2 zeigt den Querschnitt durch einen Prüfling 20. Im dargestellten Ausführungsbeispiel handelt es sich beim Prüfling 20 um einen Quader mit ebener Oberfläche. In anderen Ausführungsformen der Erfindung kann der Prüfling 20 selbstverständlich auch eine andere Geometrie aufweisen.

Auf dem Prüfling 20 ist eine Schichte einer Beschichtung 21 angeordnet, beispielsweise aus einem amorphen Kohlenstoff oder einer Keramik. Die Beschichtung 21 weist eine Dicke h auf, welche beispielsweise zwischen etwa $1\text{ }\mu\text{m}$ und etwa $500\text{ }\mu\text{m}$ betragen kann. Bei einer mehrschichtigen Beschichtung kann jede Schichtdicke zwischen etwa $1\text{ }\mu\text{m}$ und etwa $500\text{ }\mu\text{m}$ liegen.

Die Schleifkugel 11 wird durch fortgesetztes Abrollen auf der Oberfläche der Beschichtung 21 in den Prüfling 20 eingeschliffen. Hierdurch entsteht eine Kalotte 25, welche in etwa komplementär zur Schleifkugel 11 geformt ist. Im Schnitt der Fig. 2 weist die Kalotte die Tiefe T auf. Diese setzt sich zusammen aus der Schichtdicke h der Beschichtung und der Eindringtiefe t in den Grundwerkstoff des Prüflings 20.

Im unteren Bildteil der Fig. 2 ist die Aufsicht auf die Kalotte 25 dargestellt. Erkennbar sind zwei konzentrische Kreise mit den Durchmessern D und d . Der äußere Durchmesser

D ergibt sich aus dem Radius R der Schleifkugel 11 und der Schleiftiefe T . Der kleinere Durchmesser d ergibt sich aus dem Radius R der Schleifkugel 11 und der Dicke h der Beschichtung. Insoweit kann durch Bestimmung des Durchmessers d die Schichtdicke der Beschichtung 21 ermittelt werden. Die Tiefe T definiert zusammen mit dem Radius R der Kalotte den Abriebverschleiß des Prüflings.

Fig. 3 zeigt eine perspektivische Darstellung eine Kalottenschleifmaschine mit drei Schleifkugeln 11a, 11b und 11c. Im dargestellten Ausführungsbeispiel ist die Kalottenschleifmaschine 1 dazu eingerichtet, drei Prüflinge 20a, 20b und 20c gleichzeitig zu bearbeiten. Da die drei Prüflinge 20a, 20b und 20c in einfacher Weise in gleichem Abstand und in gleicher Neigung zu den Antriebsmitteln 12 auf der Plattform 16 der Maschine 1 montiert werden können, wirkt auf sämtliche Prüflinge 20 dieselbe Gewichtskraft der jeweils zugeordneten Schleifkugel 11. In einigen Ausführungsformen der Erfindung können drei Prüflinge 20a, 20b und 20c mit einer gemeinsamen Aufnahmevorrichtung auf der Kalottenschleifmaschine 1 montiert werden, so dass sich eine besonders einfache Justage einer Mehrzahl von Prüflingen 20 ergibt.

Die drei Schleifkugeln 11a, 11b und 11c können in einigen Ausführungsformen der Erfindung den gleichen Durchmesser aufweisen und/oder aus dem gleichen Material bestehen. In anderen Ausführungsformen der Erfindung können Schleifkugeln 11a, 11b und 11c mit unterschiedlichem Durchmesser und/oder aus unterschiedlichem Material Verwendung finden.

Die drei Schleifkugeln 11a, 11b und 11c werden durch ein gemeinsames Antriebsmittel 12 in Rotation versetzt. Hierdurch ist sichergestellt, dass die Schleifkugeln 11 mit gleicher Rotationsgeschwindigkeit und gleicher Dauer auf die jeweiligen Prüflinge 20 einwirken. Da auch die Auflagekraft identisch ist, ist die Tiefe der eingeschliffenen Kalotte

unmittelbar ein Maß für den jeweiligen Abriebverschleiß, so dass der Prüfling mit der tiefsten Kalotte den größten Abriebverschleiß aufweist und der Prüfling mit der flachsten Kalotte die größte Widerstandsfähigkeit gegen Verschleiß aufweist. Umfangreiche Vergleichsberechnungen oder nicht erkannte Fehlerquellen, welche zu einer unterschiedlichen abrasiven Belastung und dadurch zur Fehlinterpretation des Messergebnisses führen, können somit vermieden werden.

Die Antriebsmittel 12 umfassen im dargestellten Ausführungsbeispiel eine rotierbare Welle 121. Die Welle 121 ist in einem linken Aufnahmelager 125 und einem rechten Aufnahmelager 124 gelagert. Der Rundlauf der Welle 121 kann in einigen Ausführungsformen der Erfindung besser als 100 µm, besser als 50 µm oder besser als 20 µm sein. Eine längere Welle kann auch ein oder mehrere mittlere Aufnahmelager entlang der Längserstreckung aufweisen.

Im linken Aufnahmelager 125 können elektrische Antriebsmittel vorhanden sein, beispielsweise ein Elektromotor, mit welchem die Welle 121 in Rotation versetzt werden kann.

Die Welle 121 weist drei Positioniereinrichtungen auf, so dass jede Schleifkugel 11 in einer Positioniereinrichtung aufgenommen ist. Hierdurch wird vermieden, dass die Schleifkugeln 11 entlang der Welle 121 wandern, so dass nicht oder nicht ausschließlich die gewünschte Stelle am jeweiligen Prüfling 20 dem Verschleiß durch die Schleifkugel 11 ausgesetzt ist.

Die Positioniereinrichtungen umfassen im dargestellten Ausführungsbeispiel jeweils eine Nut 122, welche beispielsweise durch Drehen in die Welle 121 eingebracht werden kann. Die Nut 122 kann konkave Grenzflächen aufweisen, welche in etwa komplementär zur Außenkontur der Schleifkugeln 11 geformt sind. In anderen Ausführungsformen

der Erfindung können die Nuten 122 auch geradlinige Begrenzungsflächen aufweisen, so dass die Schleifkugeln 11 nicht vollflächig an den Begrenzungsflächen der Nuten 122 anliegen.

Als Verschleißschutz für die Welle 122 und/oder zur Erhöhung der Reibungskraft zwischen der Welle 121 und den Schleifkugeln 11 sind optionale Polymer- und/oder Elastomerelemente 123 vorgesehen. Diese können ein etwas geringeres Innenmaß aufweisen als der Außendurchmesser der Welle 122, so dass die Elastomerelemente 123 durch einen Presssitz auf der Welle 121 gehalten werden können. Dies erlaubt einerseits eine sichere Befestigung und andererseits einen leichten Austausch, wenn die Elastomerelemente 123 durch Einwirkung der Schleifkugeln 11 verschlissen sind. In einigen Ausführungsformen der Erfindung können die Elastomerelemente 123 die Form eines O-Rings aufweisen.

Zur Kontrolle des Versuchs kann sich im Gehäuse 15 des Kalottenschleifgerätes 1 eine Elektronik befinden, welche beispielsweise einen Mikroprozessor oder einen Mikrocontroller aufweisen kann. In diesem Fall kann eine Steuerung und/oder eine Regelung für die elektrischen Antriebsmittel 12 in Form einer Software ausgeführt sein. In anderen Ausführungsformen der Erfindung kann die Steuerung und/oder Regelung als analoge und/oder digitale Schaltung ausgeführt sein.

Für Benutzereingaben steht eine Frontplatte 14 zur Verfügung, welche Teil des Gehäuses 15 ist und eine Tastatur 141 für Benutzereingaben und ein Display 142 zur Ausgabe von Daten an den Benutzer aufweisen kann. Hierdurch kann der Benutzer beispielsweise unterschiedliche Prüfprogramme abrufen, welche sich beispielsweise in Laufdauer oder Drehzahl unterscheiden können.

Weiterhin kann das Kalottenschleifgerät 1 nicht dargestellte Mittel zum Aufbringen einer Schleifsuspension auf die Schleifkugeln 11 aufweisen. Auch der Auftrag der Schleifsuspension kann über eine Elektronik im Inneren des Gehäuses 15 kontrolliert werden und durch Benutzereingaben über die Frontplatte 14 gesteuert werden.

Zudem weist das Kalottenschleifgerät 1 gemäß der Ausführungsform der Fig. 1 auf der Schleifnormalachse S eine Lagemessvorrichtung 30 auf. Fig. 1 zeigt die Schleifnormalachse S als die Achse durch den Schleifkugelmittelpunkt Z und dem Berührungspunkt M der Schleifkugel 11 mit dem Prüfling 20 definiert. Bei einer Schleifkugel, die sich, wie in Fig. 2 gezeigt, bereits in den Prüfling eingeschliffen hat, wird als der Berührungspunkt M der Mittelpunkt der Kalotte betrachtet. Die Lagemessvorrichtung 30 kann eine Abstandsmessvorrichtung sein, die den Abstand in der Schleifnormalrichtung S zu der Oberfläche der Schleifkugel 11 misst. Als Messprinzip können optische Messprinzipien, wie z.B. Laserdistanzmessung oder Triangulationsmessung oder elektromagnetische, wie kapazitive oder induktive oder Messprinzipien oder auf Wirbelstrommessung basierende Messprinzipien verwendet werden.

So kann bspw. die Schleifkugel mit einem elektrischen Potential verbunden werden und die Lagemessvorrichtung erstellt ein Messfeld, welches aufgrund der Feldänderung den Abstand zu der Schleifkugel bestimmt.

In anderen Ausführungsformen der Erfindung wird eine Spule mit Wechselstrom gespeist, worauf sich ein Magnetfeld um die Spule ausbildet. Befindet sich die Kugel als elektrisch leitender Gegenstand in diesem Magnetfeld, entstehen darin gemäß dem faradayschen Induktionsgesetz Wirbelströme. 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 durch Amplitudenänderung der Sensorspule als messbare Größe am Controller abgreifen. Diese Ausführungsform der Erfindung kann den Vorteil aufweisen, dass auch bei Verschmutzung der Kugel, beispielsweise durch Schleifsuspension, eine zuverlässige Messung des Abstandes möglich ist.

Das Ziel der Messung ist es, aufgrund der Lageänderung der Schleifkugel 11 die Tiefe der Kalotte während dem Schleifvorgang über eine Vielzahl von zeitlich versetzten Messungen zu bestimmen. Dazu liegt die Lagemessvorrichtung, wie bereits erwähnt, bevorzugt auf der Schleifnormalachse S. Abweichungen in einem Winkelbereich α von $\pm 15^\circ$ in alle Richtungen ausgehend vom Kugelmittelpunkt Z können akzeptabel sein, da die Messergebnisse dadurch nicht übermäßig beeinflusst werden. Ggf. können über eine Winkelberechnung Messfehler, die sich durch einen großen Wert α ergeben, korrigiert werden. In diesem Fall können größere Werte für den Winkelbereich α zulässig sein.

Gemäß dem Aufbau der Fig. 1 ergibt sich die Kalottentiefe, bzw. Schleiftiefe, T nach der Formel $T = \Delta s - 2 * \Delta R$, wobei $\Delta s = s_x - s_0$ und $\Delta R = R_x - R_0$, wobei s_x der gemessene Abstand der Schleifkugel 11 zu der Lagemessvorrichtung 30 zu einem bestimmten Messzeitpunkt x und s_0 der Abstand der Schleifkugel zu Beginn der Messung ist. R_x ist der Radius der Schleifkugel 11 bei dem Messzeitpunkt x und R_0 ist der Radius der Schleifkugel zu Beginn des Schleifvorgangs, was dem Beginn des Messvorgangs entspricht.

In manchen bevorzugten Ausführungsformen lässt sich der Verschleiß ΔR an der Schleifkugel 11 als geringfügig ignorieren, so dass sich die Formel zu: $T = \Delta s$ vereinfacht.

In anderen bevorzugten Ausführungsformen, werden für ΔR Erfahrungswerte des Verschleißes verwendet. So kann bspw.

bei einer Referenzmessung bei gegebenen Werkstoffpaarungen der Verschleiß der Schleifkugel bei einer Anzahl n von Drehungen der rotierenden Welle 121 bestimmt werden und damit eine Korrekturkonstante k bestimmt werden, so dass die Kalottentiefe sich ergibt als: $T = \Delta s - k * n$. Auch kann bspw. die Schleifdauer t als Referenz für den Verschleiß der Schleifkugel verwendet werden, so dass die Formel lautet: $T = \Delta s - k_1 * t$, wobei ebenfalls k_1 ein nähernder Erfahrungswert ist.

Aus der Formel ergibt sich, dass die absolute Entfernung von der Lagemessvorrichtung zu der Schleifkugel nicht relevant ist, sondern vielmehr die Lageverschiebung der Schleifkugel während des Bearbeitungsvorgangs. So ist es nicht notwendig für die Lagemessvorrichtung eine dauerhafte Befestigung der Lagemessvorrichtung an dem Schleifgerät vorzusehen, sondern sie kann zwischen zwei Schleifvorgängen mit einfachen Schraubmitteln lösbar und befestigbar sein, ohne dass bei dem Wiederbefestigen eine hohe Reproduzierbarkeit der exakten Lage der Lagemessvorrichtung notwendig ist. Wesentlich ist jedoch, dass innerhalb einer Messung bzw. eines Schleifvorgangs der Abstand von der Lagemessvorrichtung zu dem Prüfling 20 identisch bleibt.

Die Messung der Position mit der Lagemessvorrichtung 30 findet in wiederholten gleichen Zeitabständen von jeweils 60 s statt. In anderen Ausführungsformen der Erfindung können die Zeitabstände auch nicht äquidistant sein. Bei alternativen Ausführungsformen kann die Zeitmessung in kürzeren oder längeren Abständen erfolgen, welche ausgewählt sind aus dem Intervall von etwa 1 ms bis etwa 10 s oder etwa 1 s bis etwa 600 s. So wird eine große Anzahl von Messwerten erhalten. Diese Messwerte können zu einem Wegzeit-Diagramm verbunden werden, wobei die Auswertung bei äquidistanten messwerten besonders einfach ist.

In Fig. 1 ist zusätzlich eine alternative Ausführungsform 31 der Lagemessvorrichtung eingezeichnet. Bevorzugt wird lediglich eine der Lagemessvorrichtungen 30 oder 31 verwendet. Diese Lagemessvorrichtung 31 ist bevorzugt eine Kamera und sie ist in Bezug auf ihre optische Achse senkrecht zu der Schleifnormalrichtung S und senkrecht zu der rotierenden Welle 121 angeordnet. Die optische Achse kann den Punkt der Oberfläche der Schleifkugel (11) schneiden, der dem Berührungspunkt M gegenüber liegt. Es wird dabei die Beleuchtung der Kamera 31 derart eingerichtet, dass sich ein Kontrast zu dem Hintergrund ergibt und so nimmt die Kamera einen Kreisbogen, der der Prüfkugelkontur entspricht, auf. Über eine Vielzahl von Messungen der Kamera 31 kann ein Verschieben der aufgenommenen Kreisbogenkontur festgestellt werden und auf diese Weise die Verschiebung Δs der Schleifkugel, über die, wie oben bereits erläutert, die Tiefe der Kalotte bestimmt werden kann. Auch kann bei Ausführungsformen des Kalottenschleifgeräts 1 mit mehreren Schleifkugeln die Kamera 31 derart ausgerichtet werden, dass mit nur einer Kamera 31 die bezeichneten Kreisbögen mehrerer Schleifkugeln bestimmbar sind.

Vorstehend wurde mit der Fig. 2 ein Prüfling 20 mit einer einschichtigen Beschichtung 21 betrachtet. Alternativ können, wie in Fig. 4 gezeigt, auch Prüflinge mit mehreren Beschichtungen 21 und 22 verwendet werden. Die Messwerte der Lagemessvorrichtung 30, 31 ergeben das Weg-Zeit-Diagramm der Fig. 5. Zum Zeitpunkt t_0 des Beginns der Messung wird der Messwert der Lagemesswert s_0 gemessen, welcher für die nachfolgenden Berechnungen der Lageveränderung als Bezugsmaß verwendet wird. Zu Beginn des Schleifvorgangs schleift sich die Schleifkugel 11 aufgrund der Einschleifvorgänge und der anfangs geringen Kontaktfläche von der Schleifkugel zu dem Prüfling 20 relativ schnell ein. Zum Zeitpunkt t_1 ist die Schleiftiefe T derart fortgeschritten, dass die Kalotte 25 die zweite Schicht 22 der Beschichtung erreicht hat, wobei

$T=h_1$ ist. Im vorliegenden Beispiel ist die Abriebfestigkeit der zweiten Schicht 22 geringer, als die der ersten Schicht 21. Somit ist die Wegkurve der Schleifkugel 11 steiler. Zum Zeitpunkt t_2 wird das Grundmaterial des Prüflings erreicht. Ab diesem Zeitpunkt steigt die Schleiftiefenerhöhung steiler an. Wenn das Grundmaterial erreicht ist, steigt der also Schleiftiefenzuwachs an, was von der Steuerung des Kalottenschleifgeräts erkannt werden kann, um ggf. so den Schleifvorgang abubrechen.

Bei einer weiteren bevorzugten Ausführungsform umfasst das Kalottenschleifgerät mehrere Schleifkugeln und für jede Schleifkugel ist ein Aufnahmebereich für eine Lagemessvorrichtung vorgesehen, so dass eine einzige Lagemessvorrichtung an unterschiedlichen Aufnahmebereichen positionierbar ist, um die Lage der entsprechenden Schleifkugel zu bestimmen. Bei dieser Ausgestaltung wird eine sehr spielarme Positionierung und/oder sehr gut reproduzierbar positionierbare Lagerung bzw. Befestigung der Lagemessvorrichtung benötigt. So kann die Lagemessvorrichtung beispielsweise in einer Schwalbenschwanzführung gelagert werden, die bspw. parallel zu der rotierbaren Welle angeordnet ist. Durch ein einfaches Verschieben der Lagemessvorrichtung in dieser Führung kann die Lagemessvorrichtung zu unterschiedlichen Schleifkugeln bewegt werden, um so die jeweilige Position zu bestimmen.

Selbstverständlich ist die Erfindung nicht auf die in den Figuren dargestellten Ausführungsformen beschränkt. Die vorstehende Beschreibung ist daher nicht als beschränkend, sondern als erläuternd anzusehen. Die nachfolgenden Ansprüche sind so zu verstehen, dass ein genanntes Merkmal in zumindest einer Ausführungsform der Erfindung vorhanden ist. Dies schließt die Anwesenheit weiterer Merkmale nicht aus. Merkmale unterschiedlicher Ausführungsformen sind frei miteinander kombinierbar.

Ansprüche

1. Kalottenschleifgerät (1) mit zumindest einer Aufnahmeeinrichtung (10) zur Aufnahme eines Prüflings (20) und zumindest einer Schleifkugel (11a, 11b, 11c), welche durch Antriebsmittel (12) in Rotation bringbar und mit einer vorgegebenen oder vorgebbaren Kraft gegen den Prüfling (20) führbar ist, wobei das Kalottenschleifgerät (1) eine Lagemessvorrichtung (30, 31) zur Messung der Lage der zumindest einen Schleifkugel umfasst, dadurch gekennzeichnet, dass die Lagemessvorrichtung (30, 31) zumindest ein Messmittel zur Lagemessung der Schleifkugel (11a, 11b, 11c) mittels eines berührungslos arbeitenden Messprinzips umfasst.
2. Kalottenschleifgerät gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Lagemessvorrichtung (30, 31) dazu eingerichtet ist, eine Lagemessung der Schleifkugel während eines laufenden Schleifvorgangs durchzuführen
3. Kalottenschleifgerät gemäß Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Lagemessvorrichtung (30, 31) dazu eingerichtet ist, über eine Lageänderung der Schleifkugel die Tiefe (T) des Eindringens der Schleifkugel in einen in das Kalottenschleifgerät (1) aufgenommenen Prüfling (20) zu bestimmen.
4. Kalottenschleifgerät gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Lagemessvorrichtung (30) dazu eingerichtet ist, den Abstand zwischen der Lagemessvorrichtung und der Schleifkugel (11a, 11b, 11c) zu messen.
5. Kalottenschleifgerät gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Lagemessvorrichtung (30) dazu eingerichtet ist, aus einer zyklischen Änderung des

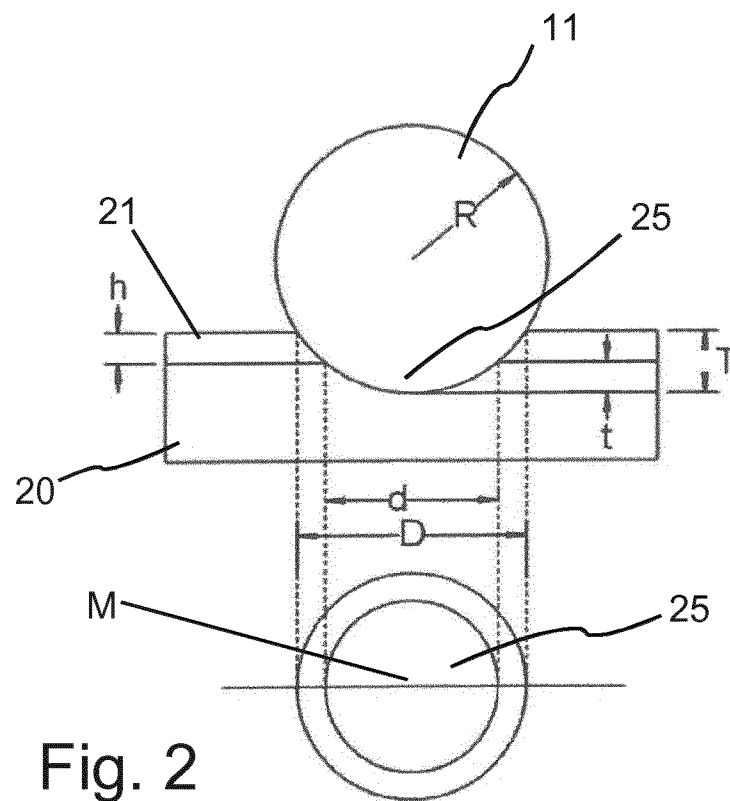
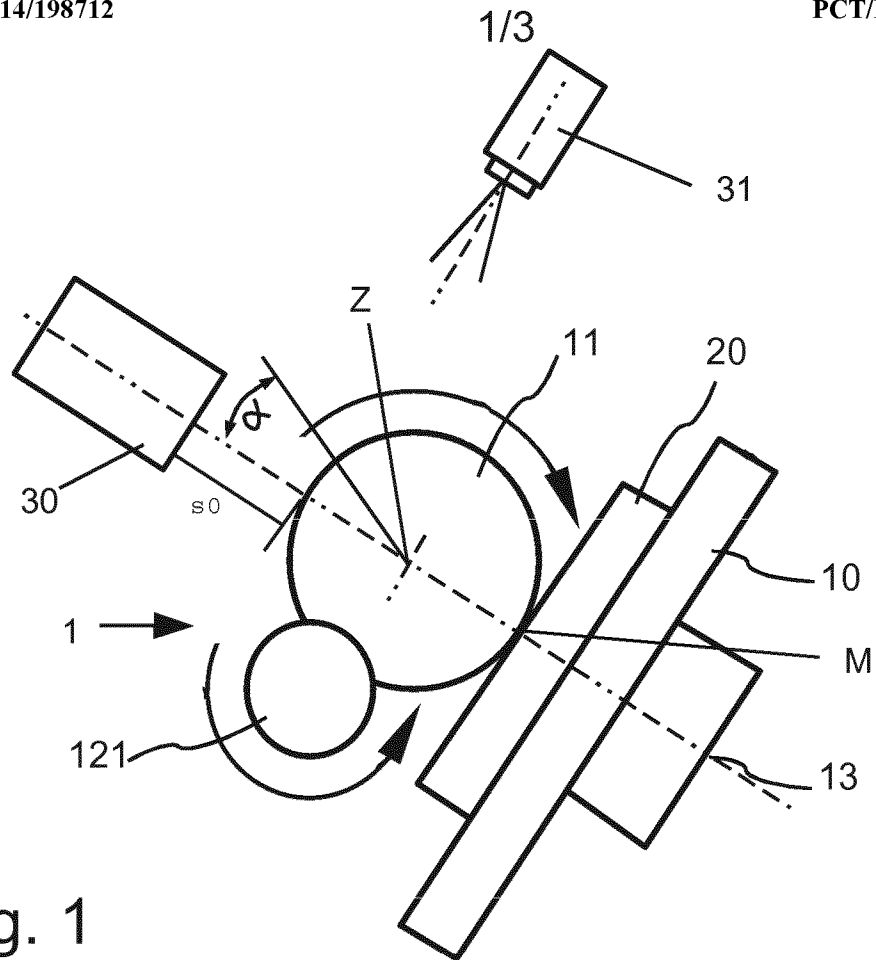
Abstandes zwischen der Lagemessvorrichtung und der Schleifkugel (11a, 11b, 11c) eine Drehzahl der Schleifkugel zu ermitteln.

6. Kalottenschleifgerät gemäß Anspruch 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass durch den Kontaktpunkt (M) eines in dem Kalottenschleifgerät aufgenommenen Prüflings (20) mit der Schleifkugel (11) und dem Mittelpunkt (Z) der Schleifkugel (11) eine Schleifnormalrichtung (S) definiert ist und die Lagemessvorrichtung (30) im Winkel (α) von weniger als 30° von der Schleifnormalrichtung (S) mit Betrachtung des Kugelmittelpunkts (Z) als Winkelbezugspunkt abweicht.
7. Kalottenschleifgerät gemäß Anspruch 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Lagemessvorrichtung (31) eingerichtet ist, eine in die Messrichtung der Lagemessvorrichtung projizierte Umfangslinie der Schleifkugel oder einen Teil davon zu detektieren.
8. Kalottenschleifgerät gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Lagemessvorrichtung (31) eine Kamera oder einen eindimensionalen Photosensor zur Detektion einer Umfangslinie der Schleifkugel oder eines Teils davon oder eines Punkts der Umfangslinie aufweist.
9. Kalottenschleifgerät gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass das Kalottenschleifgerät eingerichtet ist, Weg-Zeit-Wertepaarungen, wie insbesondere ein Weg-Zeitdiagramm, der Tiefe (T) des Eindringens der Schleifkugel in einen Prüfling (20) zu bestimmen und zu speichern
oder
dass das Kalottenschleifgerät eingerichtet ist, in vorgegebenen oder vorgebbaren Zeitabständen die bezeichnete Tiefe (T) zu bestimmen und zu speichern, wobei die Zeitabstände insbesondere konstant sind.

10. Verfahren zur Bestimmung des Abriebverschleißes und/oder einer Schichtdicke einer oder mehrerer Beschichtung(en) eines Prüflings, bei welchem zumindest ein Prüfling in zumindest eine Aufnahmeeinrichtung (10) aufgenommen wird und zumindest eine Schleifkugel (11) mit einer vorgebbaren oder vorgegebenen Kraft gegen den Prüfling (20) geführt und durch Antriebsmittel (12) in Rotation gebracht wird, um eine Kalotte in den Prüfling (20) einzuschleifen, dadurch gekennzeichnet, dass während der schleifenden Prüflingsbearbeitung zumindest ein Messwert in Bezug auf die Lage der Schleifkugel (11) mit einem automatisierten Messverfahren berührungslos aufgenommen wird.
11. Verfahren gemäß Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass zu Beginn des Schleifvorgangs eine Sollschleiftiefe festgelegt wird und bei dem Erreichen dieser Sollschleiftiefe ein Warn- oder Informationssignal ausgegeben wird und/oder der Schleifvorgang beendet wird.
12. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass über eine Lageänderung der Schleifkugel die Tiefe (T) des Eindringens der Schleifkugel in einen in das Kalottenschleifgerät (1) aufgenommenen Prüfling (20) bestimmt wird.
13. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand zwischen der Lagemessvorrichtung und der Schleifkugel (11a, 11b, 11c) gemessen wird.
14. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 10 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass durch den Kontaktpunkt (M) eines in dem Kalottenschleifgerät aufgenommenen Prüflings (20) mit der Schleifkugel (11) und dem Mittelpunkt (Z) der Schleifkugel (11) eine Schleifnormalrichtung (S) definiert ist und die Lagemessvorrichtung (30) im Winkel (α) von weniger als 30° von der Schleifnormalrichtung (S) mit

Betrachtung des Kugelmittelpunkts (Z) als Winkelbezugspunkt abweicht.

15. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 10 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass eine in die Messrichtung der Lage-messvorrichtung projizierte Umfangslinie der Schleifkugel oder ein Teil davon detektiert wird.
16. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 10 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass eine Kamera oder ein eindimensionaler Photosensor zur Detektion einer Umfangslinie des Schleifkugel oder eines Teils davon oder eines Punkts der Umfanglinie verwendet wird.
17. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 10 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass Weg-Zeit-Wertepaarungen, wie insbesondere ein Weg-Zeitdiagramm der Tiefe (T) des Eindringens der Schleifkugel in einen Prüfling (20) bestimmt und/oder gespeichert wird.



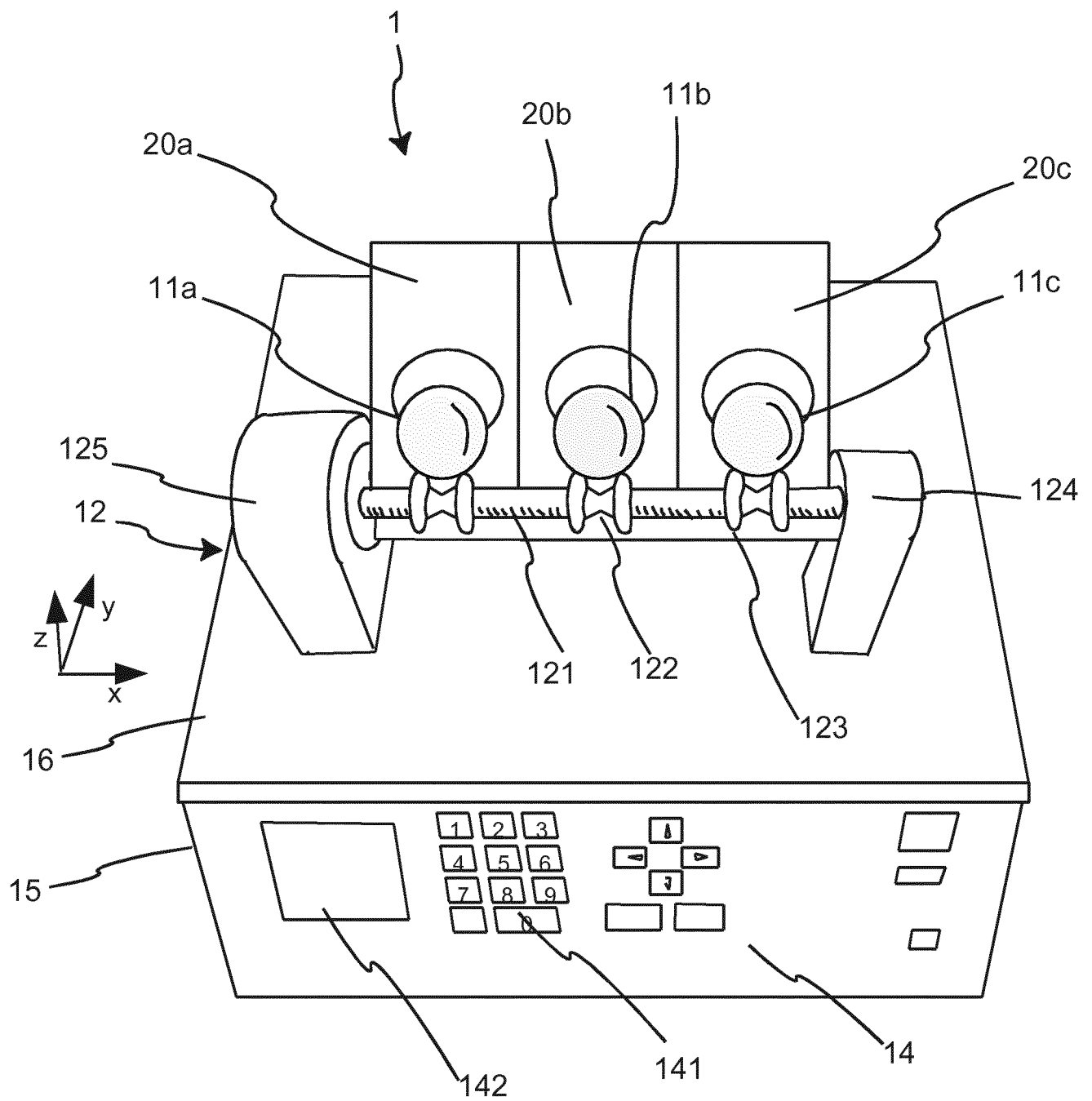


Fig. 3

3/3

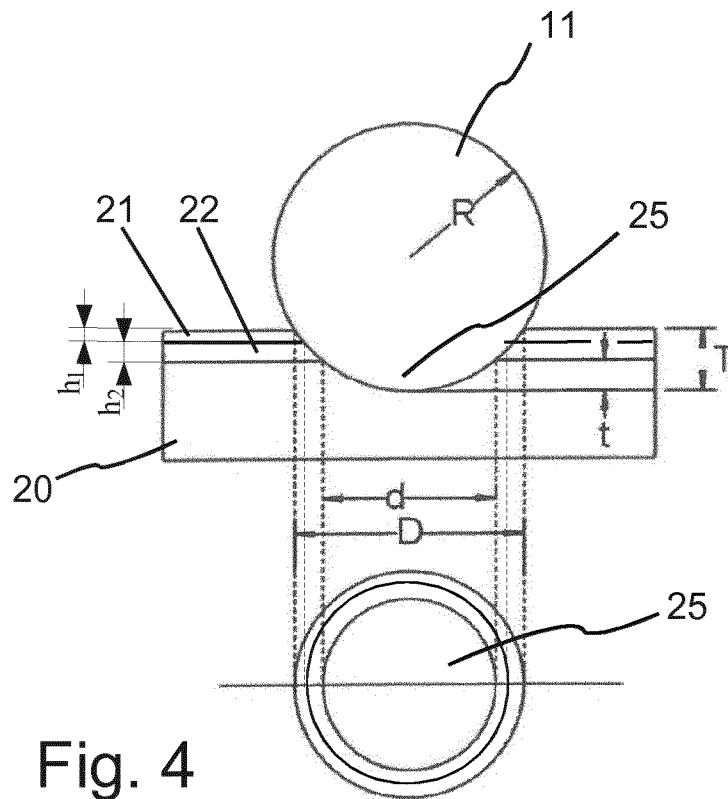


Fig. 4

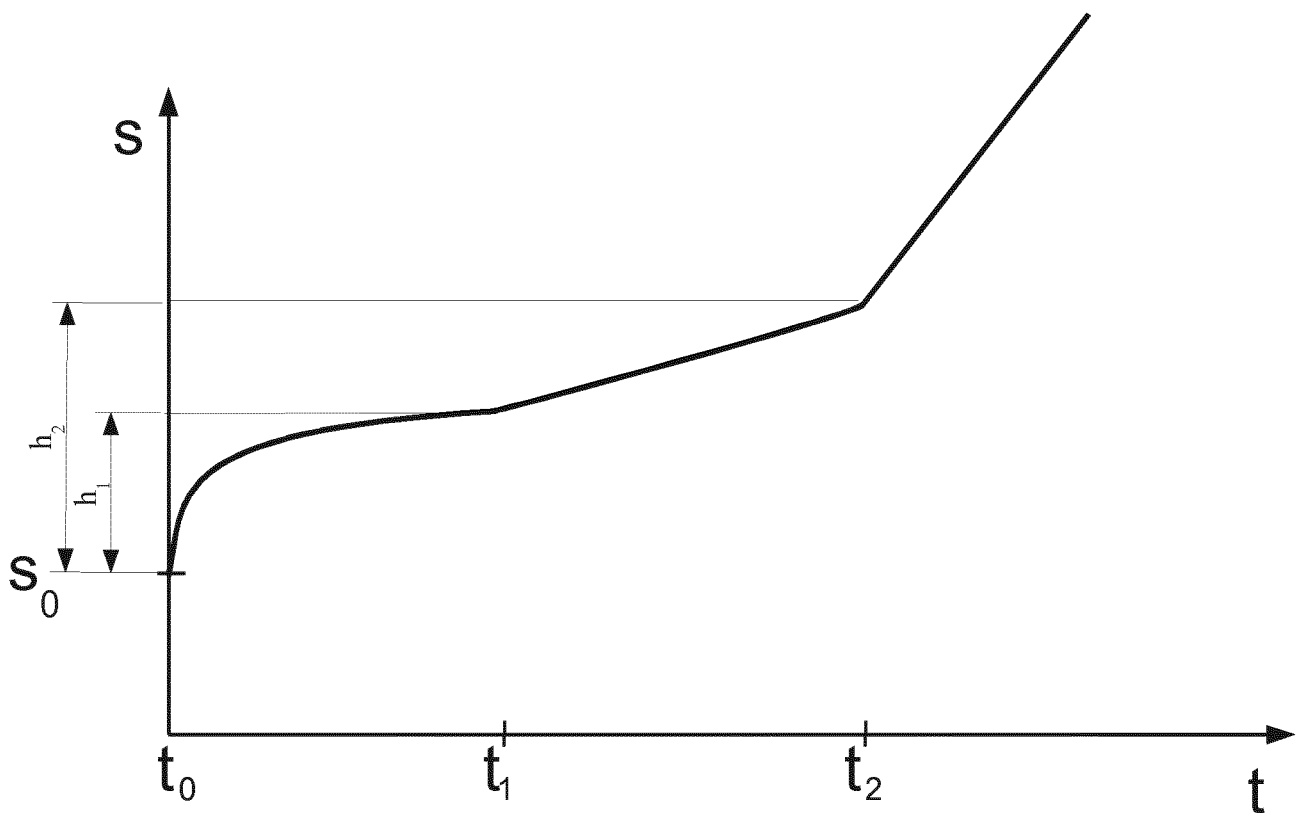


Fig. 5