(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
25. August 2016 (25.08.2016)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2016/131736 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
B24B 33/02 (2006.01) *B24B 49/08* (2006.01)
B24B 49/02 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2016/053087

(22) Internationales Anmeldedatum:
15. Februar 2016 (15.02.2016)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2015 203 052.0
20. Februar 2015 (20.02.2015) DE

(71) Anmelder: **ELGAN-DIAMANTWERKZEUGE GMBH & CO. KG** [DE/DE]; Oberboihinger Straße 60, 72622 Nürtingen (DE).

(72) Erfinder: **XAVIER, Fabio Antonio**; Kapellenstr. 12, 72622 Nürtingen (DE). **WEIBLEN, Joachim**; Badstr. 3, 72555 Metzingen (DE). **KRANICHSFELD, Florian**; Im Benzenfurt 1, 72644 Oberboihingen (DE). **BACHMANN, Oliver**; Im Schlat 8, 72636 Frickenhausen (DE).

(74) Anwalt: **PATENTANWÄLTE RUFF, WILHELM, BEIER, DAUSTER & PARTNER MBB**; 10 40 36, 70035 Stuttgart (DE).

(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, 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.

(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).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: HONING METHOD FOR FORM HONING

(54) Bezeichnung : HONVERFAHREN ZUM FORMHONEN

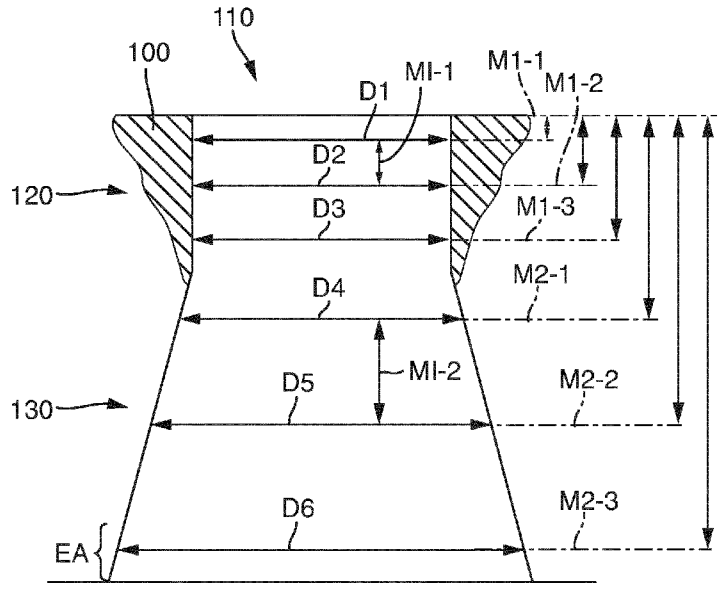

Fig. 3

(57) Abstract: The invention relates to a honing method for machining the inner surface of a bore (110) in a workpiece (100) with the aid of at least one honing operation, wherein during a honing operation, an expandable honing tool coupled with a spindle is moved back and forth inside the bore for generating a lifting movement in the axial direction of the bore, and at the same time, is rotated about a tool axis for generating a rotational movement superimposing the lifting movement. In this way, a bore is generated that is rotationally symmetrical with respect to a bore axis and that deviates from the circular cylinder shape, which bore has a circular cylindrical first bore section (120) and adjacent thereto, has a non- circular cylindrical second bore section (130) having an axially variable diameter. A measuring of the diameter of the first bore section (120) in at least one measuring plane (M1-1, M1-2, M1-3) for determining a first diameter value and a measuring of the diameter of the second bore section (130) in at least one second measuring plane (M2-1, M2-2, M2-3) for determining a second diameter value takes place. An evaluation of the second diameter value takes place using the first diameter value in order to determine actual shape values, which represent an actual shape of the bore. The actual shape values are compared to target shape values in order to determine shape deviation values. A subsequent honing operation is controlled subject to the shape deviation values.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2016/131736 A1

Veröffentlicht:

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

Bei einem Honverfahren zur Bearbeitung der Innenfläche einer Bohrung (110) in einem Werkstück (100) mithilfe mindestens einer Honoperation wird während einer Honoperation ein an eine Spindel angekoppeltes, aufweitbares Honwerkzeug innerhalb der Bohrung zur Erzeugung einer Hubbewegung in Axialrichtung der Bohrung hin und her bewegt und gleichzeitig zur Erzeugung einer der Hubbewegung überlagerten Drehbewegung um eine Werkzeugachse gedreht. Dabei wird eine in Bezug auf eine Bohrungsachserotationssymmetrische, von der Kreiszylinderform abweichende Bohrung erzeugt, die einen kreiszylindrischen ersten Bohrungsabschnitt (120) und daran anschließend einen nicht-kreiszylindrischen zweiten Bohrungsabschnitt (130) mit axial veränderlichem Durchmesser aufweist. Es erfolgt eine Messungdes Durchmessers des ersten Bohrungsabschnitts (120) in mindestens einer ersten Messebene (M1-1, M1-2, M1-3) zur Ermittlung eines ersten Durchmesserwerts sowie eine Messung des Durchmessers des zweiten Bohrungsabschnitts (130) in mindestens einer zweiten Messebene (M2-1, M2-2, M2-3) zur Ermittlung eines zweiten Durchmesserwerts. Eine Bewertungdes zweiten Durchmesserwerts erfolgt unter Verwendung des ersten Durchmesserwerts, um Ist-Formwerte zu ermitteln, die eine Ist-Form der Bohrung repräsentieren. Die Ist-Formwerte werden mit Soll-Formwertenverglichen, um Formabweichungswertezu ermitteln. Eine nachfolgende Honoperationwird in Abhängigkeit von den Formabweichungswertengesteuert.

Honverfahren zum Formhonen

ANWENDUNGSGEBIET UND STAND DER TECHNIK

Die Erfindung betrifft ein Honverfahren zur Bearbeitung der Innenfläche einer Bohrung in einem Werkstück mithilfe mindestens einer Honoperation gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1 sowie eine zur Durchführung des Honverfahrens konfigurierte Bearbeitungsanlage. Ein bevorzugtes Anwendungsgebiet ist das Honen von Zylinderlaufflächen bei der Herstellung von Zylinderblöcken oder Zylinderlaufbuchsen für Hubkolbenmaschinen.

Die Zylinderlaufflächen in Zylinderblöcken (Zylinderkurbelgehäusen) oder Zylinderlaufbuchsen von Brennkraftmaschinen oder anderen Hubkolbenmaschinen sind im Betrieb einer starken tribologischen Beanspruchung ausgesetzt. Daher kommt es bei der Herstellung von Zylinderblöcken oder Zylinderlaufbuchsen darauf an, diese Zylinderlaufflächen so zu bearbeiten, dass später bei allen Betriebsbedingungen eine ausreichende Schmierung durch einen Schmiermittelfilm gewährleistet ist und der Reibwiderstand zwischen sich relativ zueinander bewegenden Teilen möglichst gering gehalten wird.

Die qualitätsbestimmende Endbearbeitung solcher tribologisch beanspruchbaren Innenflächen erfolgt in der Regel mit geeigneten Honverfahren, die typischer Weise mehrere aufeinanderfolgende Honoperationen umfassen. Das Honen ist ein Zerspanungsverfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden. Bei einer Honoperation wird ein aufweitbares Honwerkzeug innerhalb der zu bearbeitenden Bohrung zur Erzeugung einer Hubbewegung in Axialrichtung der Bohrung mit einer Hubfrequenz hin- und her bewegt und gleichzeitig zur Erzeugung einer der Hubbewegung überlagerten Drehbewegung mit einer vorgebbaren Drehzahl gedreht. Zur Aufweitung des Honwerkzeugs werden die am Honwerkzeug angebrachten Schneidstoffkörper über ein Zustellsystem mit einer radial zur Werkzeugachse wirkenden Zustellkraft und/oder Zustellgeschwindigkeit zugestellt und an die zu bearbeitende Innenfläche angedrückt. Beim Honen entsteht in der Regel an der Innenfläche ein für die Honbearbeitung typisches Kreuzschliffmuster mit sich überkreuzenden Bearbeitungsspuren, die auch als „Honriefen“ bezeichnet werden.

Mit steigenden Anforderungen an die Sparsamkeit und Umweltfreundlichkeit von Motoren ist die Optimierung des tribologischen Systems Kolben/Kolbenringe/Zylinderlauffläche von besonderer Bedeutung, um geringe Reibung, geringen Verschleiß und geringen Ölverbrauch zu erreichen. Der Reibungsanteil der Kolbengruppe kann bis zu 35% betragen, so dass eine Reibungsreduzierung in diesem Bereich wünschenswert ist.

Eine Technologie, die für die Reduzierung der Reibung und des Verschleißes immer mehr an Bedeutung gewinnt, ist die Vermeidung bzw. Reduzierung von Zylinderverzügen bzw. Deformationen des Motorblocks (Zylinderkurbelgehäuses) bei der Montage und/oder im Betrieb. Nach einer konventionellen Honbearbeitung soll eine Zylinderbohrung typischerweise eine Bohrungsform haben, die möglichst wenig, z.B. maximal wenige Mikrometer, von einer idealen Kreiszylinderform abweicht. Während der Montage und/oder des Betriebs des Motors kann es jedoch zu deutlichen Formfehlern (Verzügen) kommen, die bis zu mehreren Hundertsteln Millimeter betragen und die Performance des Motors verringern können. Die Ursachen von Verzügen bzw. Deformationen sind unterschiedlich. Es kann sich um statische oder quasi statische thermische und/oder mechanische Belastungen handeln oder um dynamische Belastungen. Auch die Konstruktion und das Design von Zylinderblöcken haben Einfluss auf die Neigung zu Deformationen. Die Dichtfunktion des Kolbenringpakets wird durch solche schwer kontrollierbaren Deformationen typischerweise verschlechtert, wodurch sich der Blow-by, der Ölverbrauch und auch die Reibung erhöhen können.

Das sogenannte Formhonen ist eine Technologie, welche durch eine Invertierung der Zylinderverzüge (Erzeugung einer Negativform des Fehlers) bei der Bearbeitung die Entstehung einer Idealform nach der Montage oder im Betriebszustand des Motors gewährleisten oder annähern soll. Dabei wird am unverspannten Werkstück mittels Honen eine von der Kreiszylinderform definiert abweichende Bohrungsform erzeugt. Solche Bohrungsformen sind in der Regel in Axialrichtung und/oder in Umfangsrichtung unsymmetrisch, weil auch die Deformationen des Zylinderblocks in der Regel nicht symmetrisch sind. Im Betriebszustand soll sich eine möglichst ideale Kreiszylinderform ergeben, so dass das Kolbenringpaket über den gesamten Bohrungsumfang gut abdichten kann.

Verschiedene Varianten des Formhonens, die es erlauben, nicht-rotationssymmetrische Bohrungsformen mit einer systematischen Abweichung von einer 2-zähligen Rotationssymmetrie zu erzeugen, werden in der EP 1 790 435 B1 beschrieben. Bei einer Variante wird während und/oder nach einer formerzeugenden Honoperation eine Vermessung der Bohrungsform zur Ermittlung von Form-Istwerten durchgeführt. Eine Differenz zwischen den Form-Istwerten und der Sollform wird zur Korrektur der Steuerung der Zustellung verarbeitet.

In der WO 2014/146919 A1 wird ein Honverfahren zum Formhonen beschrieben, bei dem eine in Bezug auf die Bohrungsachse rotationssymmetrische Bohrung erzeugt wird, die in der Nähe des Bohrungseintritts einen engeren zylindrischen Bohrungsabschnitt und daran anschließend, also weiter entfernt vom Bohrungseintritt, einen sich erweiternden Bohrungsabschnitt mit axial veränderlichem Durchmesser aufweist. In der Anmeldung werden auch Honwerkzeuge be-

schrieben, die mindestens eine ringförmige Schneidgruppe mit Schneidstoffkörpern aufweisen, die als in Umfangsrichtung breite und in Axialrichtung schmale Honsegmente gestaltet sind. Bei Verwendung derartiger Honwerkzeuge lassen sich Bohrungsformen mit axialem Konturverlauf besonders präzise und wirtschaftlich bearbeiten.

AUFGABE UND LÖSUNG

Es ist eine Aufgabe der Erfindung, ein Honverfahren der eingangs erwähnten Art bereitzustellen, das es erlaubt, an Bohrungen, die im fertig bearbeiten Zustand einen axialen Konturverlauf haben sollen, den gewünschten Konturverlauf über die gesamte relevante Bohrungslänge mit ausreichender Präzision zu erzeugen. Weiterhin soll eine zur Durchführung des Honverfahrens geeignete Bearbeitungsanlage bereitgestellt werden.

Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Honverfahren mit den Merkmalen von Anspruch 1 sowie durch eine Bearbeitungsanlage mit den Merkmalen von Anspruch 9. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

Bei dem Honverfahren wird mittels Honen eine in Bezug auf eine Bohrungsachse rotationssymmetrische Bohrung erzeugt, deren Form von einer Kreiszylinderform abweicht. Die Bohrung hat einen kreiszylindrischen ersten Bohrungsabschnitt sowie daran anschließend einen nichtkreiszylindrischen zweiten Bohrungsabschnitt, dessen Durchmesser sich in Axialrichtung ändert. Der kreiszylindrische erste Bohrungsabschnitt befindet sich in der Regel unmittelbar an der Eintrittsseite der Bohrung, während der zweite Bohrungsabschnitt weiter entfernt vom Bohrungseintritt liegt und im Vergleich zum ersten Bohrungsabschnitt einen größeren Durchmesser hat, so dass sich die Bohrung in Richtung des eintrittsfernen Bohrungsendes mindestens über einen Abschnitt erweitert. Weitere Bohrungsabschnitte können vorhanden sein.

Untersuchungen der Erfinder haben gezeigt, dass die nach Abschluss der Honbearbeitung gewünschte Soll-Form der Bohrung mit besonders hoher Präzision erreicht werden kann, wenn eine besondere Nachmessstrategie angewendet wird und deren Messergebnisse bei der Bearbeitung weiterer Werkstücke berücksichtigt werden. Dabei wird eine Messung des Durchmessers des (kreiszylindrischen) ersten Bohrungsabschnitts in mindestens einer ersten Messebene im Bereich des ersten Bohrungsabschnitts durchgeführt, um einen ersten Durchmesserwert zu ermitteln. Weiterhin wird eine Messung des Durchmessers des zweiten Bohrungsabschnitts in mindestens einer zweiten Messebene im Bereich des zweiten Bohrungsabschnitts durchgeführt, um einen zweiten Durchmesserwert zu ermitteln. Die Reihenfolge dieser Messschritte ist

grundsätzlich beliebig, häufig ist es jedoch zweckmäßig, zuerst im ersten Bohrungsabschnitt und danach im zweiten Bohrungsabschnitt zu messen. Der zweite Durchmesserwert wird dann unter Verwendung des ersten Durchmesserwerts bewertet, um Ist-Formwerte zu ermitteln, die eine Ist-Form der Bohrung repräsentieren. Bei diesem Bewertungsschritt wird somit der zweite Durchmesserwert mit Bezug zu dem im kreiszylindrischen ersten Bohrungsabschnitt ermittelten ersten Durchmesserwert bewertet. Der erste Durchmesserwert kann bei dem Bewertungsschritt somit als werkstückinterner Bezugswert für die Dimensionsbestimmung dienen. Die auf diese Weise ermittelten Ist-Formwerte werden dann mit Soll-Formwerten verglichen, um Formabweichungswerte zu ermitteln. Eine nachfolgende Honoperation wird dann in Abhängigkeit von den Formabweichungswerten gesteuert.

Eine Besonderheit dieser Vorgehensweise liegt darin, dass durch diese Nachmessstrategie der im kreiszylindrischen ersten Bohrungsabschnitt ermittelte erste Durchmesserwert als Bezugswert für die Bewertung derjenigen Durchmesserwerte genutzt wird, welche in dem (in der Regel schwieriger zu beurteilenden) nicht-kreiszylindrischen zweiten Bohrungsabschnitt durch Messung ermittelt werden. Der erste Bohrungsabschnitt bzw. der darin ermittelte erste Durchmesserwert dient somit als werkstückinterne Referenz für die gesamte Messung.

Es kann ausreichen, den Durchmesser des ersten Bohrungsabschnitts nur in einer einzigen Messebene zu messen, beispielsweise im mittleren Bereich des ersten Bohrungsabschnitts. Eine wesentliche Verbesserung der Präzision wird bei Ausführungsformen erreicht, bei welchen beim Messen des Durchmessers des ersten Bohrungsabschnitts in zwei oder mehr axial zueinander versetzten ersten Messebenen jeweils ein erster Durchmesser gemessen wird und zur Ermittlung des ersten Durchmesserwerts ein Mittelwert der ersten Durchmesser gebildet wird. Die Referenzierung an den Durchmesserwerten des ersten Bohrungsabschnitts wird hierdurch weniger anfällig für zufällige Fehlmessungen oder zufällige lokale Formabweichungen innerhalb des ersten Bohrungsabschnitts. Üblicherweise wird der arithmetische Mittelwert mehrerer Messungen ermittelt. Obwohl Messungen in zwei zueinander axial versetzten ersten Messebenen ausreichen können, wird vorzugsweise an drei oder mehr ersten Messebenen gemessen. Insbesondere kann an genau drei ersten Messebenen gemessen werden. Hierdurch kann ein guter Kompromiss zwischen der erzielbaren Messgenauigkeit und der für die Messung insgesamt erforderlichen Messzeit erzielt werden.

Auch bei der Messung des zweiten Durchmessers kann es ausreichen, lediglich in einer einzigen zweiten Messebene an einer vorab definierten Axialposition zu messen. Zur Verringerung der Messunsicherheit bzw. zur Verbesserung der Präzision ist jedoch vorzugsweise vorgesehen, dass beim Messen des Durchmessers des zweiten Bohrungsabschnitts in zwei oder mehr

axial zueinander versetzten zweiten Messebenen jeweils ein zweiter Durchmesser gemessen wird und ein axialer Konturverlauf des zweiten Bohrungsabschnitts unter Verwendung dieser Mehrzahl von zweiten Durchmessern ermittelt wird. Auch hier können Messungen an zwei axial zueinander versetzten Messebenen ausreichen, wobei jedoch drei oder mehr Messungen an drei oder mehr axial versetzten zweiten Messebenen präzisere Messergebnisse liefern können. Beispielsweise können auf diese Weise präzise Aussagen zur Gleichmäßigkeit einer Konusform, einer Trompetenform oder einer Glockenform des zweiten Bohrungsabschnitts getroffen werden.

Bei einer Verfahrensvariante wird beim Messen des Durchmessers des zweiten Bohrungsabschnitts ein zweiter Durchmesser in einem vom ersten Bohrungsabschnitt entfernten Endabschnitt des zweiten Bohrungsabschnitts gemessen und aus dem zweiten Durchmesser im Endabschnitt und dem ersten Durchmesserwert ein Vorweitewert ermittelt. Die „Vorweite“ ist in dieser Anmeldung als Differenz zwischen dem Bohrungsdurchmesser am eintrittsfernen Bohrungsende und dem Bohrungsdurchmesser im zylindrischen Bohrungsabschnitt definiert. Der Vorweitewert kann beispielsweise aus der Differenz zwischen dem im Endbereich ermittelten zweiten Durchmesser und dem ersten Durchmesserwert ermittelt werden. Der für die Messung vorgesehene Endabschnitt befindet sich vorzugsweise im eintrittsfernen Drittel oder im eintrittsfernen Viertel der axialen Länge des zweiten Bohrungsabschnitts, also in relativ großer axialer Entfernung zum ersten Bohrungsabschnitt.

Bei einer Verfahrensvariante, bei welcher Messungen in mehreren Messebenen des ersten und des zweiten Bohrungsabschnitts durchgeführt werden, wird vorzugsweise ein axiales Messintervall zwischen benachbarten zweiten Messebenen so gewählt, dass dieses axiale Messintervall kleiner ist als ein axiales Messintervall zwischen benachbarten ersten Messebenen. Es wird also im nicht-kreiszylindrischen Bohrungsabschnitt mit einer höheren axialen Auflösung (bzw. mit geringerem Abstand zwischen benachbarten Messebenen) gemessen, während im kreiszylindrischen ersten Bohrungsabschnitt ein gröberes Raster an Messebenen vorgesehen sein kann. Hierdurch kann die für die Messung insgesamt benötigte Messzeit ohne substanziellen Verlust der Messgenauigkeit optimiert werden. Ein axiales Messintervall zwischen unmittelbar benachbarten Messebenen kann z.B. im zweiten Bohrungsabschnitt 50% oder weniger und/oder 40% oder weniger und/oder 30% oder weniger als ein axiales Messintervall im ersten Bohrungsabschnitt betragen. Es ist auch möglich, ein umgekehrtes Verhältnis der axialen Messintervalle (gröbere Rasterung im zweiten Bohrungsabschnitt) zu wählen oder über die gesamte Bohrungslänge mit dem gleichen axialen Messintervall zu arbeiten.

Vorzugsweise werden erste Durchmesserwerte und zweite Durchmesserwerte einer Bohrung in Form eines die Ist-Form der Bohrung repräsentierenden Datensatzes in einem Speicher einer Steuereinrichtung gespeichert. Die Werte werden dadurch für eine spätere Weiterverarbeitung verfügbar.

Bei bevorzugten Varianten werden in einer Messebene die zugehörigen Durchmesserwerte in zwei senkrecht zueinander verlaufenden Messrichtungen gemessen. Die so erhaltenen Messwerte können gemittelt werden. Diese Art der Messung erlaubt auch Hinweise auf mögliche kritische Formabweichungen, also Abweichungen von der gewünschten rotationssymmetrischen Bohrungsform. Es kann auch ausreichen, jeweils nur in einer einzigen diametralen Messrichtung zu messen.

Für die Messungen können unterschiedliche Messtechniken genutzt werden. Beispielsweise wären taktile Messungen, kapazitive oder induktive Messungen oder andere elektromagnetische Messungen möglich. Vorzugsweise werden jedoch die Messungen mit einem pneumatischen Messsystem durchgeführt. Berührungslos arbeitende pneumatische Messsysteme mit ausreichender Messgenauigkeit sind verfügbar und ausreichend robust, um auch im fertigungsnahen Bereich dauerhaft eingesetzt werden zu können.

Das Honverfahren kann mit unterschiedlich gestalteten Honwerkzeugen durchgeführt werden. Vorzugsweise wird bei der Bearbeitung ein aufweitbares Honwerkzeug verwendet, welches in einem spindelfernen Endbereich eines Werkzeugkörpers eine aufweitbare, ringförmige Schneidgruppe mit mehreren um den Umfang des Werkzeugkörpers verteilten Schneidstoffkörpern aufweist, wobei eine axiale Länge der Schneidstoffkörper kleiner ist als der wirksame Außendurchmesser der ringförmigen Schneidgruppe bei vollständig zurückgezogenen Schneidstoffkörpern. Beispiele geeigneter Honwerkzeuge mit einer oder zwei ringförmigen Schneidgruppen sowie mit einfacher Aufweitung oder Doppel-Aufweitung sind in der WO 2014/146919 A1 angegeben. Der Offenbarungsgehalt der WO 2014/146919 A1 wird insoweit durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht. Alternativ sind z.B. auch piezoelektrisch gesteuerte Honwerkzeuge verwendbar.

Die Erfindung betrifft auch eine zur Durchführung des Honverfahrens konfigurierte Bearbeitungsanlage. Es kann sich dabei um eine Honanlage mit einer spezialisierten Honmaschine oder um eine Bearbeitungsanlage mit einer anderen Werkzeugmaschine handeln, die die hier benötigten Funktionalitäten bietet.

Vorzugsweise hat die Bearbeitungsanlage eine von einer Honeinheit gesonderte Nachmessstation, zu der das Werkstück nach Ende der Bearbeitung für die Messung transferiert wird. An der Nachmessstation sind Messungen ggf. zeitlich überlapppend mit einer Honbearbeitung möglich Die Durchmessermessungen können bei anderen Varianten auch mittels eines in ein Honwerkzeug integrierten Messsystems durchgeführt werden.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Weitere Vorteile und Aspekte der Erfindung ergeben sich aus den Ansprüchen und aus der nachfolgenden Beschreibung von bevorzugten Ausführungsbeispielen der Erfindung, die nachfolgend anhand der Figuren erläutert sind.

Fig. 1 zeigt einen schematischen Längsschnitt durch ein Ausführungsbeispiel einer zylindrisch-konischen Bohrung mit einen eintrittsseitigen kreiszylindrischen ersten Bohrungsabschnitt und einen eintrittsfernen konischen zweiten Bohrungsabschnitt;

Fig. 2 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Honwerkzeugs bei der Bearbeitung einer zylindrisch-konischen Bohrung;

Fig. 3 zeigt schematisch ein Beispiel für eine Nachmessstrategie; und

Fig. 4 zeigt einen pneumatischen Messdorn bei der Durchführung einer Messung in der Bohrung.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER AUSFÜHRUNGSBEISPIELE

Im Folgenden werden Ausführungsbeispiele von Honverfahren beschrieben, die im Rahmen von Ausführungsformen der Erfindung genutzt werden können, um rotationssymmetrische Bohrungen mit axialem Konturverlauf mit hoher Präzision zu erzeugen.

Fig. 1 zeigt einen schematischen Längsschnitt durch ein Ausführungsbeispiel einer solchen Bohrung 110 in einem Werkstück 100 in Form eines Motorblocks (Zylinderkurbelgehäuses) für eine Brennkraftmaschine. Die Soll-Form der Bohrung ist in Bezug auf ihre Bohrungsachse 112 rotationssymmetrisch und erstreckt sich über eine Bohrungslänge L von einem im Einbauzustand dem Zylinderkopf zugewandten Bohrungseintritt 114 bis zum Bohrungsaustritt 116 an gegenüberliegenden Ende. Die Bohrung kann in mehrere aneinander angrenzende Abschnitte

unterschiedlicher Funktion unterteilt werden, die gleitend, d.h. ohne Bildung von Stufen oder Kanten, ineinander übergehen.

Ein erster Bohrungsabschnitt 120 am eintrittsseitigen Ende hat einen ersten Soll-Durchmesser DS1 und eine erste Länge L1. Der erste Soll-Durchmesser liegt über die gesamte erste Länge L1 vor, so dass der erste Bohrungsabschnitt eine kreiszylindrische Gestalt hat. Der erste Bohrungsabschnitt geht in einen axial schmalen Übergangsabschnitt mit Übergangsradius R1 stufenlos in einen zweiten Bohrungsabschnitt 130 über, der sich vom Übergangsabschnitt bis zum austrittsseitigen Ende der Bohrung erstreckt. Der zweite Bohrungsabschnitt 130 hat im Wesentlichen eine konische bzw. kegelstumpfförmige Gestalt und erstreckt sich über eine zweite Länge L2. Der zweite Bohrungsabschnitt hat durchgängig einen Innendurchmesser (zweiter Soll-Durchmesser) DS2, der größer als der erste Soll-Durchmesser DS1 ist, wobei der zweite Soll-Durchmesser ausgehend vom Übergangsabschnitt zum Bohrungsende hin in Axialrichtung kontinuierlich linear zunimmt. Der Konuswinkel α (Winkel zwischen der Bohrungsachse und einer in einer Axialebene verlaufenden Mantellinie des zweiten Bohrungsabschnitts) kann z.B. im Bereich von weniger als 1° liegen, ggf. auch bei weniger als 0.2°. Die Differenz zwischen dem Soll-Durchmesser DS1 in zylindrischen Bohrungsabschnitt und dem Soll-Durchmesser am Bohrungsaustritt 116 wird hier als Sollwert für die „Vorweite“ bezeichnet.

Die erste Länge L1 kann beispielsweise zwischen 10% und 60% der Bohrungslänge L betragen. Die zweite Länge L2 ist typischerweise größer als die erste Länge und liegt häufig zwischen 30% und 80% der Bohrungslänge L. Der Übergangsabschnitt ist gegenüber den daran angrenzenden Bohrungsabschnitten sehr kurz. Auch Abweichungen von diesen geometrischen Verhältnissen sind möglich.

Der Durchmesserunterschied zwischen dem ersten Soll-Durchmesser DS1 und dem zweiten Soll-Durchmesser DS2 in eintrittsferneren Teilen liegt deutlich außerhalb der für die Honbearbeitung typischen Toleranzen, die für eine Zylinderform in der Größenordnung von maximal 10 µm (bezogen auf den Durchmesser) liegen. Bei einem Absolutwert des Innendurchmessers in der Größenordnung zwischen 50 mm und 500 mm (letzteres z.B. bei Schiffsmotoren) kann der maximale Durchmesserunterschied (also die Vorweite) beispielsweise zwischen 20 µm und 500 µm liegen.

Die Längen der äußeren Bohrungsabschnitte und der Radius des Übergangsabschnitts können so optimiert sein, dass sich in typischen Betriebszuständen des Motors geringer Blow-by, geringer Ölverbrauch und geringer Verschleiß der Kolbenringe ergeben.

Die Form der Bohrung führt dazu, dass die Bohrung im eintrittsnahen Bereich vergleichsweise eng ist, so dass die Kolbenringe des in der Bohrung laufenden Kolbens unter hoher Ringspannung an die Bohrungsinnenfläche 118 gedrückt werden. Dadurch wird dort, wo die Verbrennung hauptsächlich erfolgt und hohe Drücke auftreten, eine zuverlässige Abdichtung erreicht und der Ölfilm wird im Abwärtshub abgestreift. Der durch die Verbrennung beschleunigte Kolben bewegt sich dann Richtung Bohrungsaustritt, wobei die Kolbenringe zunächst den Übergangsabschnitt und dann den konischen zweiten Bohrungsabschnitt mit dem sich kontinuierlich erweiterten Innendurchmesser durchlaufen. Ab dem Übergangsabschnitt können sich die Kolbenringe allmählich entspannen, wobei die Abdichtung ausreichend bleibt, weil die Druckdifferenz an den Kolbenringen sinkt. Am eintrittsfernen Ende des zweiten Bohrungsabschnitts erreicht das Ringpaket seine niedrigste Spannung. Beim Aufwärtshub nimmt die Ringspannung dann allmählich wieder zu, bis die Kolbenringe den Übergangsabschnitt erreichen und diesen in Richtung des ersten Bohrungsabschnitts durchlaufen. Weiterhin wird berücksichtigt, dass eine durch Wärmeeinflüsse verursachte Aufweitung der Zylinderlaufbahn im oberen, zylindrischen Teil der Bohrung stärker ist als im konischen Bereich. Dadurch ergibt sich im befeuerten Zustand insgesamt eine weitgehend zylindrische bzw. deutlich weniger konische Bohrungsform als im kalten Zustand.

Bei einem Honverfahren zur Erzeugung dieser zylindrisch-konischen Bohrungsformen wird bei einem Ausführungsbeispiel zunächst eine durchgehend (über die gesamte Bohrungslänge L) kreiszylindrische Bohrung mit einem geringen Untermaß bezogen auf den Soll-Durchmesser SD1 im ersten Bohrungsabschnitt erzeugt. Hierzu kann beispielsweise ein Langhub-Honwerkzeug mit relativ langen Honleisten verwendet werden. Diese Honoperation kann als Zwischenhonoperation nach einer vorhergehenden Vorhonoperation durchgeführt werden.

Bei einer anschließenden Honoperation, mit welcher u.a. die zum Bohrungsende sich erweiternde konische Form im zweiten Bohrungsabschnitt erzeugt wird, wird dann ein Honwerkzeug der in Fig. 2 gezeigten Art verwendet. Das Honwerkzeug 200 weist eine einzige ringförmige Schneidgruppe 220 mit um den Umfang des Werkzeugkörpers verteilten Schneidstoffkörpern auf, die mittels eines nicht näher dargestellten Schneidstoffkörper-Zustellsystems in Radialrichtung zur Werkzeugachse 212 zugestellt bzw. zurückgezogen werden können (siehe Doppelpfeile). Die Schneidstoffkörper sind als Honsegmente gestaltet, deren Breite in Umfangsrichtung deutlich größer ist als ihre Länge in Axialrichtung. Dadurch sind die für den Materialabtrag am Werkstück zuständigen Schneidstoffkörper in einer axial relativ schmalen Zone, d.h. einem Ring der Schneidgruppe, konzentriert und nehmen einen relativ großen Anteil des Umfangs des Honwerkzeugs ein. Dadurch können mit relativ hoher Materialabtragsleistung Bohrungsformen erzeugt werden, bei denen in Axialrichtung Bohrungsabschnitte unterschiedlicher Durchmesser

aneinander angrenzen. Das Honwerkzeug wird im Beispielsfall gelenkig an die Honspindel einer Honmaschine angekoppelt, um eine begrenzte Beweglichkeit des Honwerkzeugs gegenüber der Honspindel zuzulassen. Hierzu ist am spindelseitigen Ende des Honwerkzeugs ein mehrachsiges Gelenk 210 ausgebildet, zum Beispiel ein kardanisches Gelenk oder ein Kugelgelenk.

Bei anderen Varianten ist eine starre Werkzeugausführung (ohne Gelenk) in Verbindung mit einer starren Antriebsstange, einer Biegestange oder einer Schwimmkopfstange vorgesehen.

Es können im Prinzip alle für diesen Prozess geeigneten Typen von Honwerkzeugen verwendet werden, insbesondere solche Honwerkzeuge, wie sie in der WO 2014/146919 A1 der Anmelderin offenbart sind. Der diesbezügliche Offenbarungsgehalt dieser Anmeldung wird durch Bezugnahme zum Inhalt der vorliegenden Beschreibung gemacht.

Um ausgehend von einer durchgehend kreiszylindrischen Bohrungsform die gewünschte zylindrisch-konische Bohrungsform zu erzielen, kann beispielsweise eine hubabhängige Steuerung der Aufweitung des Honwerkzeugs in der Weise durchgeführt werden, dass eine Steuerung des Zustellsystems für die radiale Zustellung der Schneidstoffkörper mit der Steuerung für die Hubposition (in Axialrichtung) gekoppelt wird. Dies kann beispielsweise so erfolgen, dass die Zustellkraft und/oder die Zustellgeschwindigkeit von Schneidstoffkörpern des Honwerkzeugs in Abhängigkeit von der Hubposition des Honwerkzeugs gesteuert werden. Im konischen Teil (zweiter Bohrungsabschnitt) würde dann die Zustellkraft bei Abwärtsbewegung des Honwerkzeugs (in Richtung Bohrungsaustritt 116) zunehmen und bei Aufwärtsbewegung (in Richtung des ersten Bohrungsabschnitts) abnehmen. Andere Verfahrensführungen sind ebenfalls möglich, insbesondere solche, wie sie in der WO 2014/146919 A1 beschrieben sind.

Nach Abschluss der Honoperation, durch welche die gewünschte Bohrungsform erzeugt wird, wird bei bevorzugten Varianten an einer von der Honeinheit gesonderten Nachmessstation eine Nachmessoperation am fertig bearbeiteten Werkstück durchgeführt. Sofern die Messung ergibt, dass die Werte um mehr als 30%, 40%, 50% oder 60% das erlaubte Toleranzfeld der gemessenen Ist-Form der Bohrung ausnutzen (z.B. bei 40% Ausnutzung ergibt sich eine Toleranzreserve von jeweils 30% zur oberen und unteren Toleranzgrenze), können entsprechende Kompensationssignale erzeugt werden, um bei der darauffolgenden Honbearbeitung einer nächsten Bohrung mit geänderten Honparametern zu arbeiten und dadurch die gewünschte Soll-Form mit besserer Präzision zu erreichen.

Bei einem im Zusammenhang mit den Fig. 3 und 4 näher erläuterten Honverfahren werden Maßnahmen getroffen, um sicherzustellen, dass im Rahmen der Toleranzen immer das gleiche Verhältnis zwischen den Durchmesserdimensionen des kreiszylindrischen ersten Bohrungsabschnitts 120 und den Dimensionen des konischen zweiten Bohrungsabschnitts 130 herrscht. Weiterhin soll sichergestellt werden, dass die Absolutwerte der Durchmesser im kreiszylindrischen Bohrungsabschnitt und im konischen Bohrungsabschnitt zuverlässig erfasst werden können. Bei außerhalb des erlaubten Bereichs (Kriterium der Kompensation) liegenden Abweichungen zwischen der gemessenen Ist-Form und der angestrebten Soll-Form ist eine automatische Korrektur des Honprozesses für die Bearbeitung nachfolgender Bohrungen vorgesehen.

Bei dem Beispiel aus Fig. 3 wird der Durchmesser des nominell kreiszylindrischen ersten Bohrungsabschnitts 120 in drei axial gegeneinander versetzten Messebenen M1-1, M1-2 und M1-3 gemessen. Diese liegen in gleichmäßigen axialen Abständen jeweils um ein erstes Messintervall MI-1 axial versetzt zueinander. Die entsprechenden Durchmesserwerte werden als D1, D2 und D3 bezeichnet. Der Durchschnittswert dieser drei Messungen ergibt den effektiven ersten Durchmesser D_{eff} gemäß der Vorschrift D_{eff} = (D1+D2+D3)/3. Der effektive Durchmesser wird als erster Durchmesserwert zur Beschreibung der Ist-Form gespeichert. Auch die einzelnen Messwerte D1, D2 und D3 werden gemeinsam mit den zugehörigen Axialpositionen der Messebenen gespeichert. Der so ermittelte erste Durchmesserwert D_{eff} dient als Bezug für die Durchmesserwerte im konischen zweiten Bohrungsabschnitt.

Zur Messung des konischen zweiten Bohrungsabschnitts 130 werden Durchmessermessungen in drei axial zueinander versetzten zweiten Messebenen M2-1, M2-2 und M2-3 durchgeführt, um die zugehörigen zweiten Durchmesserwerte D4, D5 und D6 zu bestimmen. Die zweiten Messebenen liegen in gleichmäßigen axialen Abständen jeweils um ein zweites Messintervall MI-2 axial versetzt zueinander. Die so erhaltenen zweiten Durchmesserwerte (D4, D5 und D6) werden dann in einer Vergleichsoperation automatisch unter Verwendung des ersten Durchmesserwerts (D_{eff}) bewertet, um daraus Ist-Formwerte zu ermitteln, die die vorliegende zylindrisch-konische Ist-Form der Bohrung repräsentieren. Aus einem Vergleich der Ist-Formwerte mit durch die Spezifikation vorgegebenen Soll-Formwerten werden Formabweichungswerte ermittelt. Nachfolgende Honoperationen werden dann in Abhängigkeit von den Formabweichungswerten gesteuert. Dadurch ist es unter anderem möglich, bei Durchmesserabweichungen des konischen Bohrungsabschnitts im Verhältnis zum zylindrischen Teil der Zylinderbohrung (erster Bohrungsabschnitt) eine Durchmesserkompensation durchzuführen.

Alternativ oder zusätzlich kann der effektive Durchmesser D_{eff}, welcher für den zylindrischen ersten Bohrungsabschnitt 120 ermittelt wurde, mit demjenigen Durchmesserwert D6 verglichen

werden, der in der am weitesten vom Bohrungseintritt entfernten zweiten Messebene M2-3 in einem bohrungsfernen Endabschnitt EA des zweiten Bohrungsabschnitts ermittelt wurde. Bei bekannten Axialposition der Messebene M2-3 kann die Differenz des effektiven Durchmessers D_{eff} im ersten Bohrungsabschnitt zum Durchmesser D6 in der untersten Messebene M2-3 zur Berechnung der tatsächlichen Vorweite der Bohrungsform, also die Ist-Vorweite, genutzt werden. Die Differenz der Ist-Vorweite zur Soll-Vorweite wird beim nächsten Bearbeitungstakt im Bedarfsfall kompensiert. Das gleiche gilt für Abweichungen des Durchmessers im zylindrischen Bereich.

Ein mögliches Korrekturszenario bzw. Kompensationsszenario wird nachfolgend anhand von Tabelle 1 erläutert. Hierbei wird von einem Honprozess ausgegangen, bei welchem zunächst in einer Zwischenhon-Operation ZH mittels Honen eine kreiszylindrische Bohrungsform erzeugt wird und danach in einer Formhon-Operation FH die gewünschte Bohrungsform mit zylindrischem ersten Bohrungsabschnitt und konischem zweiten Bohrungsabschnitt durch axial unterschiedlich starken Materialabtrag im zweiten Bohrungsabschnitt erzeugt wird.

Tabelle 1

ZB	KB	KOMP-ZH	KOMP-FH
Ø i.O.	VW zu groß	**0**	**-**
Ø i.O.	VW zu klein	**0**	**+**
Ø zu groß	VW zu groß	**-**	**- / -**
Ø zu groß	VW zu klein	**-**	**+**
Ø zu klein	VW zu groß	**+**	**-**
Ø zu klein	VW zu klein	**+**	**+ / +**
Ø zu groß	VW i.O.	**-**	**-**
Ø zu klein	VW i.O.	**+**	**+**

In der Tabelle wird in den Spaltenüberschriften der kreiszylindrische erste Bohrungsabschnitt bzw. der zylindrische Bereich mit „ZB“ und der konische zweite Bohrungsabschnitt bzw. der konische Bereich mit „KB“ abgekürzt. Das Kürzel KOMP-ZH steht für eine Kompensation in der

Zwischenhon-Stufe, während das Kürzel KOMP-FH für eine Kompensation in der Formhon-Stufe steht. Der Begriff Kompensation bedeutet hierbei, dass die Honparameter im Verhältnis zu den Honparametern der vorhergehenden Bearbeitung verändert werden, um eine festgestellte Abweichung von der Soll-Form bei der nächsten Honbearbeitung möglichst zu vermeiden oder zu verkleinern. Das Kürzel VW steht für den ermittelten Ist-Wert der Vorweite. In den rechten Spalten bedeutet „0“, dass keine Verstellung bzw. Kompensation erfolgt, während „+“ für eine Vorstellung der Kompensation und „-“ für eine Zurückstellung der Kompensation steht. Dort, wo in der rechten Spalte zwei „+“-Zeichen oder zwei „-„ Zeichen stehen, wird ein doppelter Korrekturschritt durchgeführt, um die Verstellung in der Zwischenhon-Stufe ZH zu kompensieren, wenn sowohl im zylindrischen Bereich als auch im konischen Bereich kompensiert werden muss.

Aus der zweiten Zeile ergibt sich beispielsweise, welche Maßnahmen durch die Steuerung eingeleitet werden, wenn die Messung ergibt, dass der Durchmesser (Symbol „Ø“) im zylindrischen Bereich ZB zwar in Ordnung („i.O“) bzw. im Rahmen der Toleranzen ist, die Vorweite VW jedoch zu klein ist. In diesem Fall bleibt die Zwischenhon-Operation ZH bei der Bearbeitung des nachfolgenden Werkstücks unverändert (Kompensation = „0“), während die Honparameter für das Formhonen FH im Sinne einer Vorstellung der Kompensation so verändert werden, dass sich eine stärkere Aufweitung in Richtung des eintrittsfernen Bohrungsendes ergibt. Die anderen Zeilen der Tabelle sind entsprechend zu interpretieren.

Für eine dauerhafte Erfassung des Bohrungsgeometrie beim Formhonen während des Serienbetriebs ist bei einer Bearbeitungsanlage vorgesehen, der Honmaschine eine Nachmessstation nachzuschalten, in welcher die fertig gehonten Bauteile mithilfe eines pneumatischen Messdorns (d.h. durch Luftmessen) vermessen werden können. Es ist eine Rückführung der Messergebnisse in die Steuerung der Honmaschine vorgesehen, um auf eventuelle Formabweichungen unmittelbar bei der Bearbeitung des nächsten Werkstücks reagieren zu können. Die Nachmessstation ist so konfiguriert, dass auch der axiale Konturverlauf erfasst und ausgewählt werden kann.

Sofern ein Messsystem beispielsweise mit einem pneumatischen Messdorn 400 gemäß Fig. 4 verfügbar ist, kann das System durch Änderungen in der Steuerungssoftware, d.h. durch Änderung des Prüfplans, auch zur Erfassung der axialen Kontur in der Zylinderbohrung verwendet werden. Beim Ausführungsbeispiel von Fig. 4 stehen zwei Messkanäle mit je zwei zueinander diametral angeordneten Messdüsen 410-A1, 410-A2 (Messrichtung A) und 410-B1 zur Verfügung, um den Durchmesser in zwei zueinander senkrechten Messrichtungen A und B messen zu können.

Pneumatische Messdorne arbeiten nach dem Düse-Prallplatte-Prinzip. Für die Messung wird Druckluft aus den Messdüsen in Richtung Bohrungswandung geblasen. Der sich ergebende Staudruck im Bereich der Messdüsen kann als Maß für den Abstand der Messdüse zu Bohrungswandung dienen. Ein mit der Messdüse über eine Druckleitung verbundener Messwandler sorgt für eine Umwandlung des (pneumatischen) Drucksignals in ein elektrisch weiterverarbeitbares Spannungssignal. Anstelle des Drucks kann auch der Volumenstrom der Druckluft zur Auswertung genutzt werden. Mittels zweier diametral gegenüberliegender Messdüsen kann bei einem gegebenen diametralen Abstand zwischen den Messdüsen der Bohrungsdurchmesser in der Messebene ermittelt werden. Pneumatische Messdorne ermöglichen ein berührungsloses, vom Werkstoff des Messobjekts unabhängiges Messen und im Rahmen ihres Messbereichs hohe Messgenauigkeiten, die im Falle von Nachmesseinheiten in der Regel deutlich unterhalb eines Mikrometers liegen, beispielsweise im Bereich von 0,2 µm bis 0,3 µm bei wiederholter Messung.

Abweichend von der schematischen Darstellung in Fig. 3 wird bei einem bevorzugten Verfahren die Messung so gesteuert, dass die axialen Messintervalle MI-2 zwischen unmittelbar aufeinanderfolgenden Messebenen in dem zweiten Bohrungsabschnitt 130, in welchem sich der Durchmesser beispielsweise kontinuierlich ändert, kleiner sind die Messintervalle MI-1 im kreiszylindrischen ersten Bohrungsabschnitt 120, in welchem der Durchmesser in allen Axialpositionen nominell gleich ist. Beispielsweise kann durch ein Messintervall von z.B. 3 mm im zweiten Bohrungsabschnitt 130 die von der Kreiszylinderform abweichende konische Bohrungsform sehr genau erfasst werden. In Kombination mit einem größeren Messintervall (z.B. von 10 mm) im kreiszylindrischen ersten Bohrungsabschnitt 120 ist eine Erfassung und Auswertung auch über die gesamte Bohrungslänge L möglich. Für jeden Messpunkt bzw. jede Messebene sind zulässige Minimalwerte und Maximalwerte vorgegeben. Bei Abweichungen erfolgt eine Kompensation an der jeweiligen Honspindel beispielsweise in derjenigen Weise, die im Zusammenhang mit Tabelle 1 erläutert wurde. Zusätzlich können die Werte einer Bohrung weiterverarbeitet, in einem Diagramm dargestellt und in einer Datenbank dauerhaft abgelegt werden.

Bei derzeit verfügbaren Luftmesssystemen kann eine Verweilzeit in der jeweiligen Messebene in der Größenordnung von 0,5 s ausreichen, um ausreichend genaue Messwerte zu erhalten. Dadurch ist eine sichere Erfassung der Durchmesser in einer serienüblichen Taktzeit von beispielsweise 25 bis 30 s gut möglich. Die Messrichtung ist dabei im Übrigen frei wählbar, so dass sowohl vom eintrittsseitigen Ende zum eintrittsfernen Ende als auch vom (breiteren) eintrittsfernen Ende hin zum (engeren) Bohrungseintritt gemessen werden kann.

Bei der beispielhaft dargestellten Ausführungsform ist die erwünschte axiale Kontur im zweiten Bohrungsabschnitt die Kontur eines einfachen Konus mit kontinuierlicher (linearer) Durchmesservergrößerung von Ende des ersten Bohrungsabschnitts in Richtung Bohrungsende. Es sind auch andere Bohrungsformen möglich, z.B. eine Trompetenform oder eine Glockenform bzw. Flaschenform einer Bohrung. Bei einer Flaschenform könnte sich z.B. an einen konischen zweiten Bohrungsabschnitt in Richtung des eintrittsfernen Bohrungsendes ein dritter Bohrungsabschnitt anschließen, der kreiszylindrisch ist oder einen anderen Konuswinkel als der zweite Bohrungsabschnitt aufweisen kann.

- - - - - - - - - - - - - - -

Patentansprüche

1. Honverfahren zur Bearbeitung der Innenfläche einer Bohrung (110) in einem Werkstück (100) mithilfe mindestens einer Honoperation, insbesondere zum Honen von Zylinderlaufflächen bei der Herstellung von Zylinderblöcken oder Zylinderlaufbuchsen für Hubkolbenmaschinen, worin

während einer Honoperation ein an eine Spindel angekoppeltes, aufweitbares Honwerkzeug (200) innerhalb der Bohrung zur Erzeugung einer Hubbewegung in Axialrichtung der Bohrung hin und her bewegt und gleichzeitig zur Erzeugung einer der Hubbewegung überlagerten Drehbewegung um eine Werkzeugachse gedreht wird, und

eine in Bezug auf eine Bohrungsachse (112) rotationssymmetrische, von der Kreiszylinderform abweichende Bohrung erzeugt wird, die einen kreiszylindrischen ersten Bohrungsabschnitt (120) und daran anschließend einen nicht-kreiszylindrischen zweiten Bohrungsabschnitt (130) mit axial veränderlichem Durchmesser aufweist,

gekennzeichnet durch folgende Schritte:

Messen des Durchmessers des ersten Bohrungsabschnitts (120) in mindestens einer ersten Messebene (M1-1, M1-2, M1-3) zur Ermittlung eines ersten Durchmesserwerts;

Messen des Durchmessers des zweiten Bohrungsabschnitts (130) in mindestens einer zweiten Messebene (M2-1, M2-2, M2-3) zur Ermittlung eines zweiten Durchmesserwerts;

Bewerten des zweiten Durchmesserwerts unter Verwendung des ersten Durchmesserwerts zur Ermittlung von Ist-Formwerten, die eine Ist-Form der Bohrung repräsentieren;

Vergleichen der Ist-Formwerte mit Soll-Formwerten zur Ermittlung von Formabweichungswerten;

Steuern einer nachfolgenden Honoperation in Abhängigkeit von den Formabweichungswerten.

2. Honverfahren nach Anspruch 1, worin beim Messen des Durchmessers des ersten Bohrungsabschnitts in zwei oder mehr axial zueinander versetzten ersten Messebenen (M1-1 bis M1-3) jeweils ein erster Durchmesser gemessen wird und zur Ermittlung des ersten Durchmesserwerts ein Mittelwert der ersten Durchmesser gebildet wird, wobei vorzugsweise der erste Durchmesser in genau drei axial zueinander versetzten Messebenen gemessen wird.

3. Honverfahren nach Anspruch 1 oder 2, worin beim Messen des Durchmessers des zweiten Bohrungsabschnitts (130) in zwei oder mehr axial zueinander versetzten zweiten Messebenen (M2-1, M2-2, M2-3) jeweils ein zweiter Durchmesser gemessen wird und ein axialer Konturverlauf des zweiten Bohrungsabschnitts unter Verwendung der zweiten Durchmesser ermittelt wird.

4. Honverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin beim Messen des Durchmessers des zweiten Bohrungsabschnitts (130) ein zweiter Durchmesser (D6) in einem vom ersten Bohrungsabschnitt (120) entfernten Endabschnitt (EA) des zweiten Bohrungsabschnitts gemessen wird und aus dem zweiten Durchmesser im Endabschnitt und dem ersten Durchmesserwert ein Vorweitewert ermittelt wird.

5. Honverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin erste Durchmesserwerte und zweite Durchmesserwerte einer Bohrung in Form eines die Ist-Form der Bohrung repräsentierenden Datensatzes in einem Speicher einer Steuereinrichtung gespeichert werden.

6. Honverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin in einer Messebene zugehörige Durchmesserwerte in zwei senkrecht zueinander verlaufenden Messrichtungen gemessen werden.

7. Honverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin bei Messungen in mehreren Messebenen des ersten Bohrungsabschnitts (120) und des zweiten Bohrungsabschnitts (130) ein axiales Messintervall (MI-2) zwischen benachbarten zweiten Messebenen kleiner ist als ein axiales Messintervall (MI-1) zwischen benachbarten ersten Messebenen, insbesondere weniger als halb so groß.

8. Honverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin die Messungen mit einem pneumatischen Messsystem durchgeführt werden.

9. Bearbeitungsanlage zur Feinbearbeitung einer Innenfläche einer Bohrung (110) in einem Werkstück (100) mithilfe mindestens einer Honoperation, insbesondere zum Honen von Zylinderlaufflächen bei der Herstellung von Zylinderblöcken oder Zylinderlaufbuchsen für Hubkolbenmaschinen, mit mindestens einer Spindel zur Bewegung eines an die Spindel angekuppelten Honwerkzeuges (200) innerhalb der Bohrung derart, dass durch mindestens einen an dem Honwerkzeug angebrachten Schneidstoffkörper eine Bearbeitung der Innenfläche erfolgt, dadurch gekennzeichnet, dass die Bearbeitungsanlage dafür konfiguriert ist, ein Honverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8 an dem Werkstück durchzuführen.

10. Bearbeitungsanlage nach Anspruch 9, gekennzeichnet durch eine von einer Honeinheit gesonderte Nachmessstation, zu der das Werkstück nach Ende der Bearbeitung für die Messung transferierbar ist.

- - - - - - - - - - - - - -

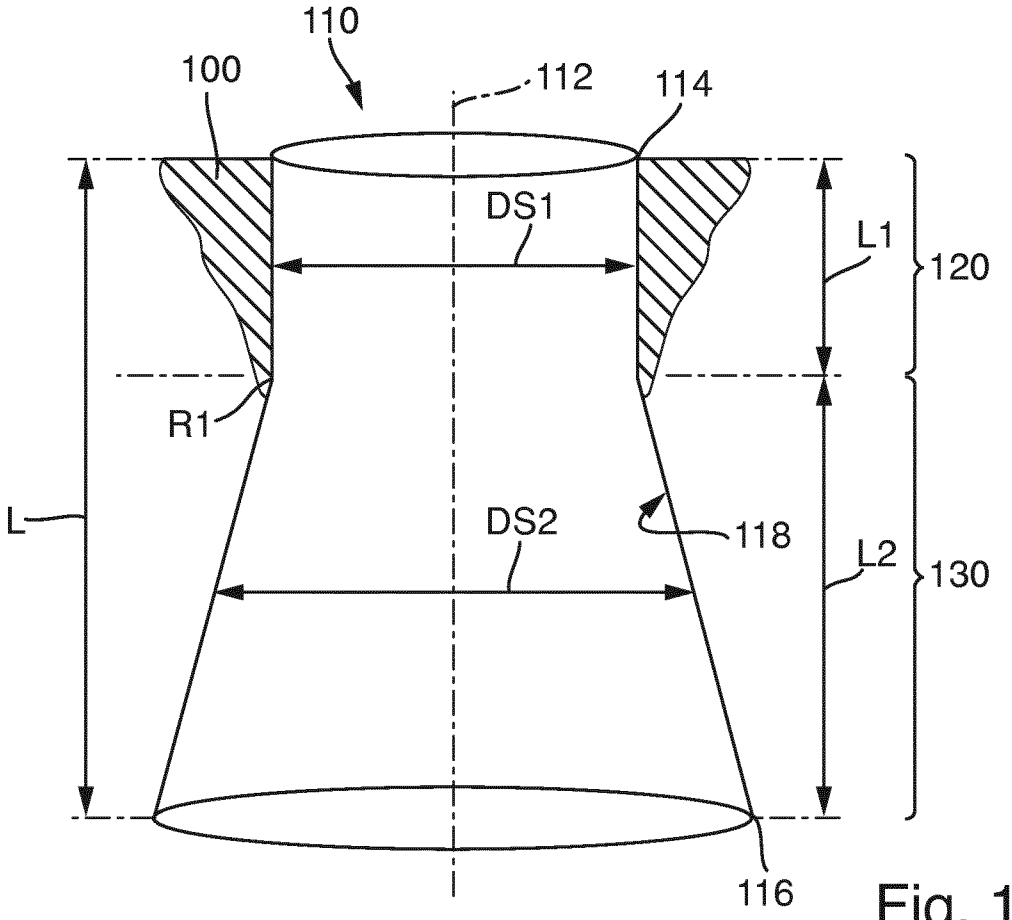

Fig. 1

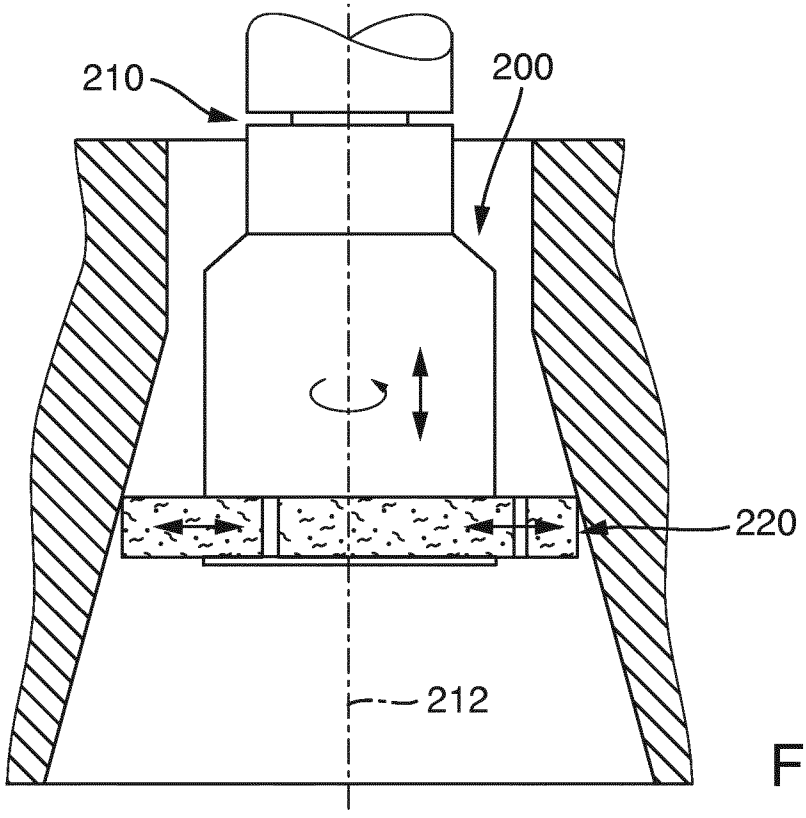

Fig. 2

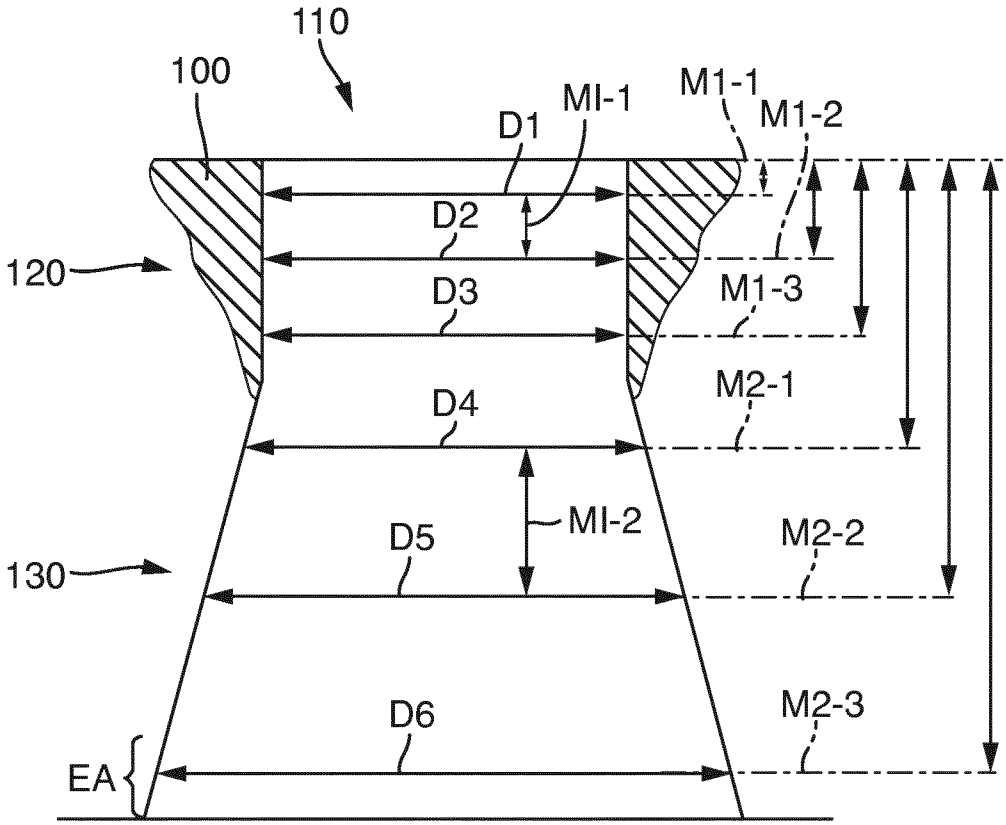
110
100
MI-1
M1-1
M1-2
D1
D2
120
D3
M1-3
M2-1
D4
MI-2
D5
M2-2
130
D6
M2-3
EA

Fig. 3

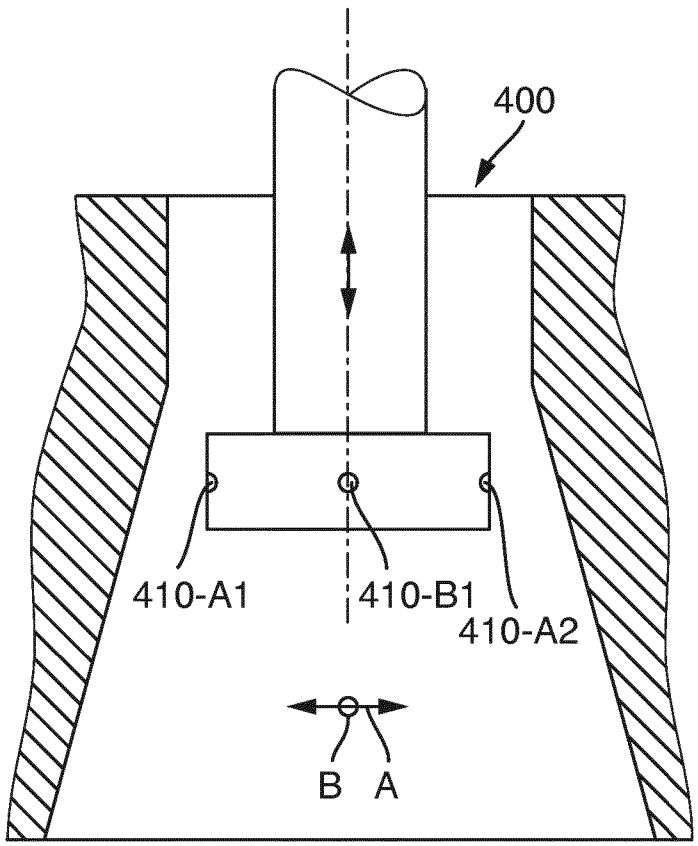
400
410-A1
410-B1
410-A2
B
A

Fig. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2016/053087

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. B24B33/02 B24B49/02 B24B49/08
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 2014/146919 A1 (ELGAN DIAMANTWERKZEUGE GMBH & CO KG [DE]) 25 September 2014 (2014-09-25) cited in the application	1,3-5, 7-9
Y	page 1, lines 4-9 page 7, lines 12-16 page 23, lines 13-24	2,6,10
Y	DE 37 03 429 A1 (DISKUS WERKE FRANKFURT MAIN AG [DE]) 18 August 1988 (1988-08-18)	10
A	column 1, lines 39-61 column 2, lines 14-35, 50-57	1
Y	JP 2000 291487 A (NISSAN MOTOR) 17 October 2000 (2000-10-17) paragraphs [0010], [0030], [0031]	2

-/--

[X] Further documents are listed in the continuation of Box C.

[X] See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
24 May 2016	01/06/2016

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

3

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (April 2005)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2016/053087

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	EP 1 815 944 A1 (NAGEL MASCH WERKZEUG [DE]) 8 August 2007 (2007-08-08) paragraphs [0049], [0100]	6
A	EP 1 790 435 A1 (NAGEL MASCH WERKZEUG [DE]) 30 May 2007 (2007-05-30) paragraphs [0065], [0066]	1-10

3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/EP2016/053087

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 2014146919 A1	25-09-2014	CN 105246649 A	13-01-2016
		DE 102013204714 A1	02-10-2014
		DE 202014010306 U1	06-03-2015
		EP 2976184 A1	27-01-2016
		KR 20150132548 A	25-11-2015
		WO 2014146919 A1	25-09-2014
DE 3703429 A1	18-08-1988	DE 3703429 A1	18-08-1988
		IT 1215800 B	22-02-1990
		JP 2935115 B2	16-08-1999
		JP S63196373 A	15-08-1988
JP 2000291487 A	17-10-2000	JP 4193086 B2	10-12-2008
		JP 2000291487 A	17-10-2000
EP 1815944 A1	08-08-2007	NONE	
EP 1790435 A1	30-05-2007	EP 1790435 A1	30-05-2007
		EP 2110204 A1	21-10-2009
		EP 2277661 A1	26-01-2011
		EP 2277662 A1	26-01-2011
		EP 2279829 A1	02-02-2011

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2016/053087

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. B24B33/02 B24B49/02 B24B49/08
ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
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

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	WO 2014/146919 A1 (ELGAN DIAMANTWERKZEUGE GMBH & CO KG [DE]) 25. September 2014 (2014-09-25) in der Anmeldung erwähnt	1,3-5, 7-9
Y	Seite 1, Zeilen 4-9 Seite 7, Zeilen 12-16 Seite 23, Zeilen 13-24	2,6,10

Y	DE 37 03 429 A1 (DISKUS WERKE FRANKFURT MAIN AG [DE]) 18. August 1988 (1988-08-18)	10
A	Spalte 1, Zeilen 39-61 Spalte 2, Zeilen 14-35, 50-57	1

Y	JP 2000 291487 A (NISSAN MOTOR) 17. Oktober 2000 (2000-10-17) Absätze [0010], [0030], [0031]	2

	-/--	

[X] Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen [X] Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
24. Mai 2016	01/06/2016

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

3

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	EP 1 815 944 A1 (NAGEL MASCH WERKZEUG [DE]) 8. August 2007 (2007-08-08) Absätze [0049], [0100]	6
A	EP 1 790 435 A1 (NAGEL MASCH WERKZEUG [DE]) 30. Mai 2007 (2007-05-30) Absätze [0065], [0066]	1-10

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2016/053087

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2014146919 A1	25-09-2014	CN 105246649 A	13-01-2016
		DE 102013204714 A1	02-10-2014
		DE 202014010306 U1	06-03-2015
		EP 2976184 A1	27-01-2016
		KR 20150132548 A	25-11-2015
		WO 2014146919 A1	25-09-2014
DE 3703429 A1	18-08-1988	DE 3703429 A1	18-08-1988
		IT 1215800 B	22-02-1990
		JP 2935115 B2	16-08-1999
		JP S63196373 A	15-08-1988
JP 2000291487 A	17-10-2000	JP 4193086 B2	10-12-2008
		JP 2000291487 A	17-10-2000
EP 1815944 A1	08-08-2007	KEINE	
EP 1790435 A1	30-05-2007	EP 1790435 A1	30-05-2007
		EP 2110204 A1	21-10-2009
		EP 2277661 A1	26-01-2011
		EP 2277662 A1	26-01-2011
		EP 2279829 A1	02-02-2011