



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).

**Veröffentlicht:**

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)

---

in the contact time between grinding element and bore inner surface.

**(57) Zusammenfassung:** Ein Feinbearbeitungsverfahren zum Herstellen einer nicht-kreiszyllindrischen Bohrung (110), die wenigstens einen nicht-kreiszyllindrischen Bohrungsabschnitt mit einem unrunder Bohrungsquerschnitt und/oder einem axialen Konturverlauf aufweist, verwendet eine Werkzeugmaschine (400), die eine Hauptspindel (410) aufweist, welche mittels eines ersten Antriebs (440) um eine Hauptspindelachse (412) drehbar und mittels eines zweiten Antriebs (450) parallel zur Hauptspindelachse verschiebbar ist. Die Bohrung (110) wird ausgehend von einer Ausgangsform durch eine Schleifoperation mit axial und/oder azimuthal ungleichmäßigem Materialabtrag in eine nicht-kreiszyllindrische Bohrungsform gebracht. Danach wird die Innenfläche der Bohrung mittels mindestens einer weiteren Bearbeitungsoperation endbearbeitet. Es wird eine Schleifwerkzeuginheit (500) an die Hauptspindel (410) angekoppelt. Die Schleifwerkzeuginheit hat einen um eine Grundkörper-Achse (522) drehbaren Grundkörper (520), der wenigstens eine Schleifspindeleinheit (550) mit einem Schleifwerkzeug (560) trägt, das mittels eines Schleifwerkzeug-Antriebs (580) um eine Schleifwerkzeugachse (562) rotierend antreibbar ist. Durch Erzeugen von Arbeitsbewegungen des Schleifwerkzeugs (560) wird eine Schleifoperation durchgeführt, wobei das Schleifwerkzeug (560) zur Erzeugung von Materialabtrag an der Bohrungsinnenfläche (115) mit einer vorgebbaren Drehzahl rotiert wird; eine abrasive Umfangsfläche (567) eines Schleifkörpers (565) des Schleifwerkzeugs durch einseitige Zustellung des Schleifwerkzeugs in Richtung der Bohrungsinnenfläche lokal in Eingriff mit der Bohrungsinnenfläche (115) gebracht wird; eine axiale Position des Schleifwerkzeugs (560) in der Bohrung über Ansteuerung des zweiten Antriebs (450) gesteuert wird; eine Winkelposition des Schleifwerkzeugs (560) in der Bohrung über Ansteuerung des ersten Antriebs (440) gesteuert wird; und eine lokale Materialabtragsrate im lokalen Eingriffsbereich zwischen dem Schleifkörper (565) und der Bohrungsinnenfläche (115) über eine Variation der Zustellung des Schleifwerkzeugs und/oder über eine Variation der Drehzahl des Schleifkörpers und/oder über eine Variation der Kontaktzeit zwischen Schleifkörper und Bohrungsinnenfläche gesteuert wird.

Feinbearbeitungsverfahren zum Herstellen einer nicht-kreiszyllindrischen Bohrung sowie  
Feinbearbeitungssystem und Schleifwerkzeugeinheit

ANWENDUNGSGEBIET UND STAND DER TECHNIK

Die Erfindung betrifft ein Feinbearbeitungsverfahren zum Herstellen einer nicht-kreiszyllindrischen Bohrung, die wenigstens einen nicht-kreiszyllindrischen Bohrungsabschnitt mit einem unrunder Bohrungsquerschnitt und/oder einem axialen Konturverlauf aufweist, sowie ein zur Durchführung des Feinbearbeitungsverfahrens geeignetes Feinbearbeitungssystem und eine dabei verwendbare Schleifwerkzeugeinheit.

Die Zylinderlauflächen 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 Zylinderlauflächen 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 radial zur Drehachse des Honwerkzeugs zugestellt. 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/Zylinderlaufläche von besonderer Bedeutung, um geringe Reibung, geringen Verschleiß und geringen Ölverbrauch zu erreichen.

Der makroskopischen Gestalt (Makroform) der Bohrungen sowie der Oberflächenstruktur kommt dabei besondere Bedeutung zu.

In vielen Fällen sollte eine Zylinderbohrung im Betrieb des Motors eine Bohrungsform haben, die möglichst wenig von einer idealen Kreiszyylinderform abweicht, so dass das Kolbenringpaket über den gesamten Bohrungsumfang gut abdichten kann. Um dies zu erreichen ist es zweckmäßig, der Zylinderbohrung im kalten Werkstück eine nicht-kreiszyllindrische Bohrungsform zu verleihen. Denn während der Montage und/oder während des Betriebs des Motors kann es zu deutlichen Formfehlern (Verzügen) kommen, die bis zu mehreren Hundertstel Millimeter betragen und die Performance des Motors verringern können. Die Dichtfunktion des Kolbenringpakets und die Kolbenreibung werden durch solche schwer kontrollierbaren Deformationen typischerweise verschlechtert, wodurch sich der Blow-by, der Ölverbrauch und auch die Reibung erhöhen können.

Es gibt bereits Feinbearbeitungsverfahren, die es ermöglichen, durch eine Invertierung der Zylinderverzüge (Erzeugung einer Negativform des Fehlers) bei der Bearbeitung des unverspannten Werkstücks die Entstehung einer Idealform nach der Montage oder im Betriebszustand des Motors wenigstens annähernd zu erreichen. Den Feinbearbeitungsverfahren ist gemeinsam, dass sie ausgehend von einer beispielsweise etwa kreiszyllindrischen Ausgangsform der Bohrung durch örtlich ungleichmäßigen spanenden Materialabtrag eine nicht-kreiszyllindrische Bohrungsform erzeugen können, die wenigstens einen nicht-kreiszyllindrischen Bohrungsabschnitt mit einem unrunderen Bohrungsquerschnitt und/oder einem axialen Konturverlauf aufweist.

Beim sogenannten Formhonen wird am unverspannten Werkstück mittels des Feinbearbeitungsverfahrens Honen eine von der Kreiszyylinderform definiert abweichende Bohrungsform erzeugt. Die Endbearbeitung zur Erzeugung der gewünschten Oberflächenstruktur erfolgt ebenfalls mittels Honen. Verschiedene Varianten des Formhonen, die es erlauben, nicht-rotationssymmetrische Bohrungsformen mit einer systematischen Abweichung von einer 2-zähligen Rotationssymmetrie und gezielt strukturierten Bohrungsinflächen zu erzeugen, werden in der EP 1 790 435 B1 beschrieben.

Die EP 1 321 229 A1 beschreibt Verfahren zur Herstellung einer Bohrung, insbesondere der Zylinderbohrung einer Hubkolbenmaschine, wobei die Bohrung in unbelastetem Zustand eine Ausgangsform aufweist und im Betriebszustand eine von der Ausgangsform abweichende Sollform. Es wird erwähnt, dass sich die Ausgangsform grundsätzlich durch Verfahren mit

definierter Schneide, Schleifen, Funkenerosion oder Honen herstellen lässt. Ein Honverfahren wird näher erläutert.

Die GB 2 310 704 A offenbart ein Feinbearbeitungsverfahren, bei dem die Bohrung zunächst ausgehend von einer Ausgangsform durch eine numerisch gesteuerte Bohroperation mit geometrisch bestimmter Schneide in eine nicht-kreiszyindrische Bohrungsform gebracht wird und danach die Innenfläche der Bohrung mittels mindestens einer Honoperation endbearbeitet wird, um der Bohrunginnenfläche die gewünschte Oberflächenstruktur zu verleihen.

Die DE 10 2014 225 164 A1 beschreibt ein Feinbearbeitungsverfahren, bei dem die Bohrung zunächst ausgehend von einer Ausgangsform durch eine Schleifoperation in eine nicht-kreiszyindrische, rotationssymmetrische Form gebracht wird und danach die Innenfläche der Bohrung mittels mindestens einer Honoperation endbearbeitet wird. Für die Schleifoperation wird ein aufweitbares Honwerkzeug verwendet, das mindestens eine bezüglich ihres wirksamen Durchmessers aufweitbare ringförmige Schneidgruppe mit mehreren um den Umfang des Werkzeugkörpers verteilten, in Axialrichtung relativ kurzen Schneidstoffkörpern aufweist. In einer Konturerzeugungsphase wird durch Erzeugen eines in Axialrichtung der Bohrung ungleichen Materialabtrags an der Innenfläche der Bohrung ein nicht-kreiszyindrischer rotationssymmetrischer Bohrungsabschnitt mit einem vorgebbaren axialen Konturverlauf erzeugt. Das Honwerkzeug wird hierzu an die Arbeitsspindel bzw. Hauptspindel einer Werkzeugmaschine angekoppelt. Es erfolgt ein schnelles Drehen des Honwerkzeugs in Kombination mit einem langsamen axialen Bewegen des Honwerkzeugs. Dabei erfolgt während der axialen Bewegung des Honwerkzeugs ein weggesteuertes radiales Zustellen der Schneidstoffkörper mit einer von der Axialposition abhängigen Zustellposition. Eine Besonderheit dieses Verfahrens liegt darin, dass einerseits ein Honwerkzeug verwendet wird, also ein Werkzeug, welches für Honoperationen grundsätzlich geeignet ist und mit geometrisch unbestimmten Schneiden arbeitet. Andererseits wird das Honwerkzeug jedoch mit im Vergleich zum klassischen Honen sehr hohen Drehzahlen und im Vergleich zum klassischen Honen niedriger Hubgeschwindigkeit betrieben, so dass der resultierende Prozess des Materialabtrags einem Schleifprozess bzw. einer Schleifoperation ähnelt.

#### AUFGABE UND LÖSUNG

Es ist eine Aufgabe der Erfindung, ein spanendes Feinbearbeitungsverfahren bereitzustellen, das es erlaubt, Bohrungen mit exakt vorgebbarer nicht-kreiszyindrischer Bohrungsform und definierter Oberflächenstruktur effizient und hinsichtlich der erzielbaren Bohrungsformen flexibel herzustellen. Es ist eine weitere Aufgabe, die dazu erforderlichen Komponenten bereitzustellen.

Zur Lösung dieser Aufgabe stellt die Erfindung ein Feinbearbeitungsverfahren mit den Merkmalen von Anspruch 1 bereit. Weiterhin werden eine Schleifwerkzeugeinheit mit den Merkmalen von Anspruch 10 sowie ein Feinbearbeitungssystem mit den Merkmalen von Anspruch 17 bereitgestellt. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

Das Feinbearbeitungsverfahren dient zum Herstellen einer nicht-kreiszyllindrischen Bohrung. Darunter wird hier eine Bohrung verstanden, die wenigstens einen nicht-kreiszyllindrischen Bohrungsabschnitt aufweist, der einem unrunder Bohrungsquerschnitt und/oder einen axialen Konturverlauf aufweist.

Ein „unrunder Bohrungsquerschnitt“ ist dann gegeben, wenn die Querschnittsform der Bohrung in dem Bohrungsabschnitt von einer Kreisform signifikant abweicht. Der Querschnitt kann z.B. oval sein, eine Kleeblattform haben oder auch eine nicht-symmetrische Formabweichung, ggf. mit höherer Ordnung. Beispielsweise kann eine gleichmäßige oder ungleichmäßige Welligkeit in Umfangsrichtung (Azimutalrichtung) vorliegen.

Ein „axialer Konturverlauf“ ist z.B. dann gegeben, wenn die Querschnittsform und/oder die Querschnittsgröße der Bohrung in Axialrichtung variiert. Beispielsweise hat ein konisch gestalteter rotationssymmetrischer Bohrungsabschnitt einen axialen Konturverlauf, bei dem sich bei durchgehend kreisförmiger Querschnittsform der Bohrungsdurchmesser in Axialrichtung kontinuierlich vergrößert oder verkleinert.

Eine Abweichung von der Kreiszyllinderform kann ausschließlich darin bestehen, dass bei durchgehend kreisrunder Querschnittsform ein axialer Konturverlauf vorgesehen ist. Beispielsweise kann eine rotationssymmetrische Bohrung mit Tonnenform, Flaschenform oder Konusform oder eine Bohrung mit einem kreiszyllindrischen Abschnitt und einem daran anschließenden konischen Abschnitt erzeugt werden. Wenn sich die Querschnittsform in Axialrichtung der Bohrung ändert, liegt zusätzlich ein axialer Konturverlauf vor. Möglich sind z.B. Bohrungen, die an einem Bohrungsende eine unrunder Querschnittsform (z.B. ovale Form oder Kleeblattform) haben, wobei sich diese Form mit zunehmendem Abstand von diesem Bohrungsende zu einer zunehmend kreisförmigen Querschnittsform verändert und gleichzeitig der mittlere Durchmesser in Richtung des anderen Bohrungsendes wie bei einem Konus allmählich zunimmt. In einem nicht-kreiszyllindrischen Bohrungsabschnitt kann also eine Überlagerung aus unrunder Form und axialem Konturverlauf vorliegen.

Soweit hier geometrische Formen (z.B. Kreisform, Kreiszylinderform etc.) der realen Bohrungsinnenfläche beschrieben werden, so sind nicht mathematisch exakte Formen gemeint, sondern solche im Rahmen der Fertigungstoleranzen des Feinbearbeitungsverfahrens, die geringfügig von der jeweils mathematisch exakten Form abweichen können. Entsprechend bezieht sich der Begriff „Abweichung“ auf solche Unterschiede zu einer Referenzform, die signifikant außerhalb der Fertigungstoleranzen liegen.

Die Bohrung kann über ihre komplette Länge eine nicht-kreiszylindrische Gestalt haben. Es ist auch möglich, dass zusätzlich zu dem (mindestens einen) nicht-kreiszylindrischen Bohrungsabschnitt wenigstens ein kreiszylindrischer Bohrungsabschnitt vorgesehen ist bzw. erzeugt wird.

Das Feinbearbeitungsverfahren wird unter Verwendung einer Werkzeugmaschine durchgeführt, die eine Hauptspindel (Arbeitsspindel, Werkzeugmaschinen­spindel) aufweist, welche mittels eines ersten Antriebs um eine Hauptspindelachse drehbar und mittels eines zweiten Antriebs parallel zur Hauptspindelachse (also in Axialrichtung) verschiebbar ist. Die Arbeitsbewegungen der Hauptspindel können durch Signale einer Steuereinheit der Werkzeugmaschine gesteuert werden, so dass z.B. die axiale Position, die Winkelposition und die Drehzahl der Hauptspindel und deren gegenseitigen Abhängigkeiten als Funktion der Zeit bzw. des Maschinentaktes durch ein Steuerprogramm präzise vorgegeben werden können.

Die Bohrung wird ausgehend von einer Ausgangsform durch eine Schleifoperation mit axial und/oder azimutal ungleichmäßigem Materialabtrag in eine nicht-kreiszylindrische Bohrungsform gebracht. Da die Schleifoperation aufgrund des axial und/oder in Umfangsrichtung ungleichmäßigen Materialabtrags einen wesentlichen Anteil zur Formgebung der Bohrung leisten kann und mittels Schleifen eine signifikante Veränderung der Ausgangsform herbeigeführt wird, wird dieser Verfahrensschritt in dieser Anmeldung auch als „Formschleifoperation“ oder „Formschleifen“ bezeichnet.

Gemäß einer Formulierung der Erfindung wird nach Abschluss dieser Schleifoperation die dadurch geschliffene Innenfläche der Bohrung mittels mindestens einer weiteren Bearbeitungsoperation endbearbeitet. Diese Endbearbeitung ermöglicht es, an der fertig bearbeiteten Bohrung eine Oberflächenstruktur zu erhalten, die sich von einer durch Schleifen erzielbaren Oberflächenstruktur unterscheidet. Bei der weiteren Bearbeitungsoperation kann es sich insbesondere um eine Honoperation handeln, mit der z.B. unter weitgehender Beseitigung der durch Schleifen erzeugten Oberflächenstruktur, aber unter weitgehender Beibehaltung der

Makroform, die am Endprodukt gewünschte Oberflächenstruktur der Bohrung, z.B. mit gekreuzten Honriefen, erzeugt wird.

Die Ausgangsform kann beispielsweise kreiszylindrisch sein, was aber nicht zwingend ist. Es ist auch möglich, die Bohrung vor Beginn der Schleifoperation durch eine entsprechende Vorbearbeitung, z.B. durch eine andere Schleifoperation oder durch eine Feinbohroperation, in eine nicht-kreiszylindrische Ausgangsform zu bringen, z.B. eine rotationssymmetrische Ausgangsform mit axialem Konturverlauf. Beispielsweise kann die Ausgangsform eine Tonnenform, Flaschenform oder Konusform oder eine Form mit einem kreiszylindrischen Abschnitt und wenigstens einem daran anschließenden konischen Abschnitt sein. Diese nicht-kreiszylindrische Ausgangsform kann dann durch die Formschleifoperation noch modifiziert werden, z.B. durch Erzeugen einer azimuthalen Welligkeit an der bereits nicht-kreiszylindrischen Ausgangsform. Dadurch kann eine Bohrungsform mit signifikanten Abweichungen von der Rotationssymmetrie erzeugt werden.

Bei dem Feinbearbeitungsverfahren wird zur Durchführung der Schleifoperation eine an die Arbeitsspindel ankoppelbare Schleifwerkzeugeinheit verwendet, die einen Grundkörper aufweist, der um eine Grundkörper-Achse drehbar ist. Der Grundkörper trägt wenigstens eine Schleifspindeleinheit mit einem daran befestigten Schleifwerkzeug, welches mittels eines Schleifwerkzeug-Antriebs um eine Schleifwerkzeugachse rotierend antreibbar ist. Der Schleifwerkzeug-Antrieb ist ein zur Schleifwerkzeugeinheit gehörender Antrieb, der zusätzlich zum ersten Antrieb der Werkzeugmaschine vorhanden ist und im Schleifbetrieb (während der Schleifoperation) eine Drehung des Schleifwerkzeugs unabhängig von einer eventuellen Drehung der Hauptspindel bewirken kann.

Das Schleifwerkzeug weist einen Schleifkörper mit abrasiver Umfangsfläche auf. Der Durchmesser des Schleifkörpers ist in der Weise kleiner als der Bohrungsdurchmesser, dass ein Eingriff zwischen Bohrungsinnenwand und Schleifkörper nur in einem schmalen Eingriffsbereich am Umfang des Schleifkörpers stattfindet.

Die Schleifwerkzeugeinheit wird an die Hauptspindel angekoppelt. Dann wird durch Erzeugen von Arbeitsbewegungen des Schleifwerkzeugs an der Bohrungsinnenfläche eine Schleifoperation mit axial und/oder azimuthal ungleichmäßigem Materialabtrag (Formschleifoperation) durchgeführt. Dazu wird das Schleifwerkzeug über den Schleifwerkzeug-Antrieb mit einer vorgebbaren (konstanten oder zeitlich variierenden) Drehzahl rotiert, um an der Bohrungsinnenfläche den angestrebten Materialabtrag erzeugen zu können. Eine abrasive Umfangsfläche des Schleifkörpers des Schleifwerkzeugs wird durch einseitige Zustellung des

Schleifwerkzeugs in Richtung der Bohrungsinnenfläche lokal in Eingriff mit der Bohrungsinnenfläche gebracht. In dem mehr oder weniger linienförmigen oder nur schmalen Eingriffsbereich zwischen Bohrungsinnenfläche und Schleifkörperumfangsfläche findet der Materialabtrag durch Schleifen statt. Eine axiale Position des Schleifwerkzeugs in der Bohrung wird über Ansteuern des zweiten Antriebs der Werkzeugmaschine gesteuert. Eine Winkelposition des Schleifwerkzeugs in der Bohrung wird über Ansteuerung des ersten Antriebs der Werkzeugmaschine gesteuert.

Das Ausmaß des Materialabtrags im lokalen Eingriffsbereich zwischen Schleifkörper und Bohrungsinnenfläche, also die lokale Materialabtragsrate bzw. das pro Zeiteinheit zerspante Volumen, wird über eine Variation der Zustellung des Schleifwerkzeugs und/oder über eine Variation der Drehzahl des Schleifkörpers und/oder über eine Variation der Kontaktzeit zwischen Schleifkörper und Bohrungsinnenfläche gesteuert.

Bei der Schleifoperation wird der wesentliche Anteil der für den Materialabtrag erforderlichen Schnittgeschwindigkeit zwischen Schleifkörper und Bohrungsinnenfläche durch eine entsprechend hohe Drehzahl des Schleifwerkzeugs erreicht. Diese wird mittels des Schleifwerkzeug-Antriebs unabhängig von einer eventuellen Drehung der Hauptspindel erzeugt. Die über die Signale der Steuereinheit der Werkzeugmaschine gesteuerten Arbeitsbewegungen der Hauptspindel dienen überwiegend oder ausschließlich zum Führen des Schleifwerkzeugs innerhalb der Bohrung, insbesondere zur Vorgabe der axialen Position und der Winkelposition des Schleifwerkzeugs und damit zur Vorgabe der Lage des Eingriffsbereichs zwischen Umfang des Schleifkörpers und Bohrungsinnenfläche im Verlauf der Schleifoperation. Die Hauptspindel und der Schleifkörper können sich gleichsinnig oder gegensinnig drehen, wobei eine gegensinnige Drehung zur Erhöhung der effektiven Schnittgeschwindigkeit beitragen kann.

Über den ersten Antrieb und den zweiten Antrieb wird sichergestellt, dass das Schleifwerkzeug bzw. dessen Schleifkörper im Verlauf der Schleifoperation die komplette Innenfläche des in eine nicht-kreiszyklische Form zu bringenden Bohrungsabschnitts erreichen kann, so dass an der gesamten Innenfläche dieses Bohrungsabschnitts mittels Schleifen mehr oder weniger stark Material abgetragen werden kann.

Durch Variation der Drehzahl und/oder der axialen Hubgeschwindigkeit der Hauptspindel kann über die Ansteuerung des ersten und des zweiten Antriebs die lokale Kontaktzeit zwischen Schleifkörper und Bohrungsinnenfläche in Abhängigkeit von der Axialposition und der Winkelposition des Eingriffsbereichs gezielt vorgegeben werden. In anderen Worten: diese

beiden Antriebe können zur Steuerung der Vorschubgeschwindigkeit des Schleifwerkzeugs entlang der vorgesehenen Bahn an der Bohrungsinnenfläche genutzt werden.

Die Schleifoperation (Formschleifoperation) kann als Spielart des Innenschleifens mittels Umfangsschleifen angesehen werden, unterscheidet sich allerdings vom klassischen Innenrundschleifen dadurch, dass die Arbeitsbewegungen des Schleifwerkzeugs so gesteuert werden, dass die mittels Schleifen erzeugte Bohrungsform signifikant von einer kreiszylindrischen Bohrungsform abweicht.

Bei vielen Verfahrensvarianten erfolgt eine variable Steuerung der Zustellung des Schleifwerkzeugs in Abhängigkeit von der axialen Position und der Winkelposition des Schleifwerkzeugs. Wird die Zustellposition des Schleifwerkzeugs bei einer Bewegung entlang der durch die Hauptspindel vorgegebenen Bahn verändert, kann das Schleifwerkzeug gezielt mehr oder weniger stark in Eingriff mit der Bohrungsinnenwand gebracht werden und dort Material abtragen. Die Zustellrichtung entspricht dabei vorzugsweise im Wesentlichen der lokalen Normalenrichtung auf die Bohrungsinnenfläche, kann aber auch schräg dazu verlaufen, wenn wenigstens eine Komponente der Zustellung senkrecht zur Bohrungsoberfläche orientiert ist.

Die Zustellung gehört zu denjenigen Schnittgrößen oder Eingriffsgrößen, die sich besonders präzise über Steuerbefehle der Steuereinheit der Werkzeugmaschine vorgeben lassen. Über eine variable Steuerung der Zustellung kann auch bei konstanter Drehzahl des Schleifwerkzeugs und/oder konstanter Drehzahl und Axialgeschwindigkeit der Hauptspindel präzise eine gezielte Abweichung von einer kreisrunden Bohrungsform erzeugt werden.

Die Zustellung kann beispielsweise derart gesteuert werden, dass sie während einer Umdrehung der Hauptspindel gemäß einer vorgegebenen Funktion mit wenigstens einer Zunahme der Zustellposition und wenigstens einer Abnahme der Zustellposition variiert. Dadurch kann eine unrunde Querschnittsform gezielt erzeugt werden. Je nach Anzahl der Zunahmen und Abnahmen der Zustellposition können auch Formabweichungen höherer Ordnung in Umfangsrichtung mit hoher Präzision in jeder gewünschten Axialposition erzeugt werden.

Bei manchen Varianten wird die Zustellposition des Schleifwerkzeugs durch radiale Verlagerung der Schleifspindeleinheit relativ zur Grundkörper-Achse der Schleifwerkzeugeinheit verändert. In diesem Fall findet also eine werkzeuginterne Zustellung statt.

Alternativ oder zusätzlich ist es auch möglich, dass eine Zustellposition des Schleifwerkzeugs durch radiale Verlagerung der Hauptspindel relativ zu ihrer Normalposition verändert wird. In diesem Fall können auch Schleifwerkzeugeinheiten verwendet werden, die keine werkzeuginterne Zustellung ermöglichen. Beispielsweise kann eine Werkzeugmaschine mit einer magnetisch gelagerten Hauptspindel verwendet werden. Darunter werden hier Werkzeugmaschinen verstanden, deren Hauptspindel in einer Magnetlagereinrichtung magnetisch gelagert ist. Dabei kann ein Vorteil der magnetischen Lagerung ausgenutzt werden, nämlich eine gewisse steuerbare Beweglichkeit der drehbaren Hauptspindel innerhalb des Lagerluftspalts. Die Magnetlagereinrichtung kann also maschinenfest montiert sein und die Hauptspindel ist gegenüber der Magnetlagereinrichtung magnetisch verlagerbar. So ist es beispielsweise möglich, mittels des ersten Antriebs die Hauptspindel um ihre Hauptspindelachse in eine Eigendrehung zu versetzen und gleichzeitig die Lage der Hauptspindelachse über elektrische Ansteuerung von Elektromagneten in Richtungen senkrecht zur Hauptspindelachse gezielt zu verlagern. Zwar ist das Ausmaß der möglichen Verlagerung bei heutzutage verfügbaren magnetisch gelagerten Spindeln relativ begrenzt, beispielsweise auf Größenordnungen von etwa 100  $\mu\text{m}$ , jedoch reichen derartig geringe Auslenkungsmöglichkeiten in vielen Anwendungsfällen aus, um die gewünschten Formabweichungen in der Bohrung unter Zuhilfenahme einer Verlagerung der Hauptspindel zu erzeugen. Solche Formabweichungen liegen beispielsweise bei der Bearbeitung von Zylinderbohrungen für Hubkolbenmaschinen nicht selten in der Größenordnung von maximal 25 bis 30  $\mu\text{m}$  im Radius bzw. 50 bis 60  $\mu\text{m}$  im Durchmesser der Bohrung.

Es ist alternativ oder zusätzlich auch möglich, dass die Zustellposition des Schleifwerkzeugs durch radiale Verlagerung der das Schleifwerkzeug tragenden rotierbaren Schleifspindel relativ zu ihrer Lagereinrichtung verändert wird. Beispielsweise kann eine Schleifspindeleinheit mit einer magnetisch gelagerten Schleifspindel verwendet werden, so dass es möglich ist, die Achslage des rotierenden Teils gegenüber dem nicht-rotierenden Teil durch elektrische Ansteuerung gezielt zu verändern.

Bei manchen Verfahrensvarianten wird eine variable Steuerung der Drehzahl des Schleifwerkzeugs in Abhängigkeit von der axialen Position und der Winkelposition des Schleifwerkzeugs durchgeführt. Die Drehzahlen können z.B. im Bereich von 600  $\text{min}^{-1}$  bis 10000  $\text{min}^{-1}$  oder darüber liegen. Durch Erhöhung der Drehzahl ergibt sich in der Regel ein höherer Materialabtrag pro Zeiteinheit wegen entsprechend höherer Schnittgeschwindigkeit. Durch eine Variation der Drehzahl kann somit auch bei konstanter Zustellposition ein örtlich variierender Materialabtrag erzeugt werden. Die Drehzahl kann beispielsweise derart gesteuert werden, dass sich die Drehzahl während einer Umdrehung der Hauptspindel gemäß einer

vorgebbaren Drehzahlfunktion mit wenigstens einer Zunahme der Drehzahl und wenigstens einer Abnahme der Drehzahl variiert. Die Andruckkräfte des Schleifwerkzeugs an die Bohrungsinnenfläche können bei dieser Variante zum großen Teil aus Elastizität innerhalb des Feinbearbeitungssystems resultieren, die dann relaxieren, wenn das rotierende Schleifwerkzeug Material abträgt.

Wenn es die Bearbeitungsaufgabe ermöglicht, allein durch variable Steuerung der Drehzahl zu örtlich ungleichem Materialabtrag zu gelangen, so können Schleifwerkzeugeinheiten bzw. Feinbearbeitungssysteme verwendet werden, die keine Möglichkeit zur Variation der Zustellung des Schleifwerkzeugs bieten. Über eine variable Steuerung der Drehzahl können jedoch nach den Erfahrungen der Erfinder in der Regel nur relativ geringe absolute Materialabträge zuverlässig erzielt werden, beispielsweise im Bereich von maximal 10 µm. Dies kann jedoch in vielen Fällen, beispielsweise beim Formschleifen von Zylinderlaufflächen, durchaus ausreichend sein.

Eine variable Steuerung der Zustellung des Schleifwerkzeugs kann mit einer variablen Steuerung der Drehzahl des Schleifwerkzeugs kombiniert bzw. überlagert werden. Es ist auch möglich, eine der Einflussgrößen (z.B. die Zustellung) zu variieren und dabei die andere Einflussgröße (z.B. die Drehzahl) konstant zu halten.

Bei bevorzugten Varianten wird die Schleifwerkzeugeinheit starr an die Hauptspindel angekoppelt. Bei einer starren Ankopplung liegt die Grundkörper-Achse dauerhaft koaxial mit der Hauptspindelachse. Dadurch ist eine besonders exakte Steuerung der Position des lokalen Eingriffs zwischen Schleifkörper und Bohrungsinnenfläche über die Antriebe der Hauptspindel Werkzeugmaschine möglich.

Eine starre Ankopplung ist jedoch nicht zwingend. Alternativ kann zwischen dem Grundkörper der Schleifwerkzeugeinheit und der Hauptspindel wenigstens ein Gelenk vorhanden sein, welches beispielsweise in die Schleifwerkzeugeinheit integriert sein kann. In diesem Fall können gesonderte Führungseinrichtungen zur Führung der axialen Bewegung der Schleifwerkzeugeinheit innerhalb der Bohrung günstig sein, beispielsweise eine obere Führung und/oder eine untere Führung außerhalb des Werkstücks.

Es ist auch möglich, eine innere Führung der Schleifwerkzeugeinheit in der Bohrung vorzusehen. So gibt es beispielsweise Ausführungsformen von Schleifwerkzeugeinheiten, die eine aufweitbare Führungsgruppe mit mehreren um den Umfang des Grundkörpers verteilten Führungsleisten aufweisen, die teilweise oder vollständig zwischen dem Schleifwerkzeug und

einer spindelseitigen Kupplungsstruktur der Schleifwerkzeugeinheit und/oder zwischen dem Schleifwerkzeug und einem spindelfernen Ende des Grundkörpers angeordnet und mittels eines Führungsgruppen-Zustellsystems unabhängig von dem Schleifwerkzeug radial zugestellt werden können.

Nach Abschluss der Schleifoperation (Formschleifoperation) weist die Bohrungsinnenfläche in der Regel eine typische Schleifstruktur auf, die unter anderem gekennzeichnet ist durch Schleifriefen, die mehr oder weniger in Umfangsrichtung der Bohrungsinnenwand verlaufen. Eine derartige Struktur kann für manche Anwendungsfälle günstig sein, so dass keine weitere Bearbeitungsoperation nötig ist und die Schleifoperation die bestimmungsgemäße Oberflächenstruktur erzeugt. In solchen Fällen kann eine weitere Bearbeitungsoperation entfallen. Dies wird als besonderer Aspekt der vorliegenden Offenbarung angesehen. Eine Formschleifoperation ohne nachfolgende weitere Bearbeitungsoperation ist somit ebenfalls Gegenstand dieser Offenbarung.

In der Regel wird jedoch nach der Schleifoperation die Innenfläche der Bohrung mittels mindestens einer weiteren Bearbeitungsoperation endbearbeitet. Diese Endbearbeitung kann mittels Honen durchgeführt werden. Beispielsweise schließt sich bei der Bearbeitung von Zylinderlaufflächen in Zylindern für Hubkolbenmaschinen an die Schleifoperation typischerweise mindestens eine Honoperation an. Bei manchen Ausführungsformen wird dazu nach Abschluss der Schleifoperation die Schleifwerkzeugeinheit von der Hauptspindel abgekoppelt, ein Honwerkzeug wird an die Hauptspindel angekoppelt und mittels des Honwerkzeugs wird mindestens eine Honoperation an der Bohrungsinnenfläche durchgeführt. Dadurch können die beiden unterschiedlichen spanenden Bearbeitungsverfahren (erst Schleifen, danach Honen) ohne Umspannen des Werkstücks in ein und derselben Aufspannung durchgeführt werden, wodurch die Bearbeitungspräzision besonders hoch wird.

Als Alternative kann eine Schleifwerkzeugeinheit verwendet werden, die eine gesondert zustellbare Schneidgruppe zum Honen aufweist. Diese wird dann anstelle des Schleifkörpers in Arbeitseingriff mit der Bohrungsinnenfläche gebracht. Die Schleifwerkzeugeinheit kann insoweit ähnlich aufgebaut sein wie ein Honwerkzeug mit Doppelaufweitung. Die Schneidgruppe für das Honen kann z.B. im spindelabgewandten Endbereich dieser Werkzeugeinheit angeordnet sein, so dass der Schleifkörper näher an der Kupplungsstelle zwischen dieser und der Schneidgruppe zum Honen liegt.

Bei manchen Ausführungsformen wird nach Abschluss der Schleifoperation eine Nachlauf-Honoperation zur Erzeugung einer an der Bohrungsinnenfläche gewünschten

Oberflächenstruktur im Wesentlichen ohne Veränderung der Makroform der Bohrung durchgeführt. Beim „Nachlaufhonen“ können hierfür besonders konzipierte Honwerkzeuge verwendet werden, die nur schwach abrasive und/oder elastisch nachgiebig und/oder federnd gehaltene Schneidstoffkörper aufweisen, die einer vorher durch Schleifen erzeugten Kontur der Bohrung im Wesentlichen nachlaufen und in erster Linie nur gröbere und ggf. feinere Schleifriefen beseitigen und die Oberflächenstruktur verbessern, ohne die Makroform signifikant zu verändern. Mit einer Nachlauf-Honoperation kann beispielsweise eine Kreuzschliffstruktur geeigneter Rauheit und geeigneter Honwinkel erzeugt werden.

Die Schleifoperation (Formschleifoperation) kann nach Maßgabe einer Voreinstellung gesteuert werden (open loop control), um die angestrebte nicht-kreiszyindrische Bohrungsform zu erhalten. Bei manchen Ausführungsformen wird die Schleifoperation in Abhängigkeit von durch Messung der Bohrung gewonnenen Form-Messsignalen, insbesondere Durchmesser-Messsignalen, gesteuert. Hierdurch kann ggf. die angestrebte Bohrungsform mit höherer Formgenauigkeit erreicht werden. Am einfachsten kann die messungsunterstützte Formschleifoperation durch Verwendung einer Nachmess-Station realisiert werden, die eine fertig bearbeitete Bohrung misst, um ggf. (bei zu großen Formabweichungen) auf Basis der Messergebnisse die Bearbeitungsparameter für die Bearbeitung der folgenden Bohrungen gezielt modifizieren zu können. Eine Nachmess-Station, die z.B. mit einem Luftmessdorn oder mit taktilen Sensoren ausgestattet sein kann, kann z.B. dann ausreichen, wenn die Ausgangsform, z.B. eine „Grundflaschenform“ oder ein Konus, durch eine bekannte vorherige, in-prozess-geregelte Konturhoning mit einem Ringwerkzeug erzeugt wurde und durch das Formschleifen danach nur relativ geringe lokale Formänderungen eingebracht werden sollen. Es ist auch eine Formschleifoperation unter Nutzung einer In-Prozess-Messung möglich, um ggf. während der Schleifoperation die Bearbeitungsparameter dynamisch in Abhängigkeit von Form-Messsignalen, wie z.B. Durchmesser-Messsignalen, ändern zu können (closed loop control). Die Schleifwerkzeugeinheit kann hierzu einen oder mehrere integrierte Sensoren eines Form-Messsystems aufweisen, z.B. Luftmessdüsen, die radial ausgerichtet sein können. Sensoren können z.B. in Höhe des Schleifkörpers, ggf. aber auch oberhalb und/oder unterhalb angeordnet sein. Die in der Regel relativ langsame Bewegung der Hauptspindel (Axial und/oder Drehung) ermöglicht auch bei relativ trägen Messsystemen ein genaues Messen.

Die Erfindung betrifft auch eine Schleifwerkzeugeinheit, die im Rahmen des Feinbearbeitungsverfahrens verwendet werden kann, gegebenenfalls aber auch bei anderen Feinbearbeitungsverfahren. Die Schleifwerkzeugeinheit hat einen Grundkörper, der mittels einer Kupplungseinrichtung an eine Hauptspindel einer Werkzeugmaschine angekoppelt werden kann und durch Arbeitsbewegungen der Hauptspindel um eine Grundkörper-Achse drehbar und

parallel zur Grundkörper-Achse bewegbar ist. Die Schleifwerkzeugeinheit weist (mindestens) eine von dem Grundkörper getragene Schleifspindeleinheit zum Tragen eines Schleifwerkzeugs auf, das einen Schleifkörper mit einer abrasiven Umfangsfläche aufweist und mittels eines Schleifwerkzeug-Antriebs um eine Schleifwerkzeugachse rotierend angetrieben werden kann. Der Schleifwerkzeug-Antrieb ist in die Schleifwerkzeugeinheit integriert.

Die Schleifwerkzeugeinheit stellt somit eine autarke Werkzeugeinheit dar, die einen Eigenantrieb zum Drehen des Schleifkörpers beinhaltet. Auf einen externen Antrieb, der z.B. über ein Getriebe auf das Schleifwerkzeug wirkt und dieses antreibt, kann verzichtet werden. Die Hauptspindel, an die die Schleifwerkzeugeinheit angekoppelt wird, dient in erster Linie der Führung der Schleifwerkzeugeinheit, um die abrasive Umfangsfläche des Schleifkörpers gezielt an vorgegebenen Positionen mit der Innenfläche einer zu bearbeitenden Bohrung in Eingriff zu bringen.

Bei vielen Ausführungsformen weist der Schleifwerkzeug-Antrieb einen Elektromotor auf. Die Schleifspindeleinheit kann nach Art einer elektrisch betriebenen Motorspindel geeigneter Größe ausgelegt sein, bei der der Stator der Motorspindel am Grundkörper oder an einer vom Grundkörper getragenen Komponente der Schleifwerkzeugeinheit montiert ist und der Rotor der Schleifspindeleinheit, z.B. eine rotierbare Welle, den Schleifkörper trägt. Bei Verwendung eines Elektromotors als Schleifwerkzeug-Antrieb sind besonders gute Steuerungsmöglichkeiten hinsichtlich der Drehzahl des Schleifkörpers gegeben.

Als Alternative ist es beispielsweise möglich, dass die Schleifwerkzeugeinheit ein Fluidkanalsystem zur Zufuhr von Kühlschmierstoff in die Schleifwerkzeugeinheit aufweist und dass der Schleifwerkzeug-Antrieb eine Turbine zur Umsetzung von Strömungsenergie des Kühlschmierstoffs in eine Drehbewegung des Schleifwerkzeugs aufweist. Ein derartiger hydraulischer Antrieb kann beispielsweise dort genutzt werden, wo die Werkzeugmaschine ohnehin mit Einrichtungen zur internen Kühlschmierstoffzuführung zu einem angekoppelten Werkzeug ausgestattet ist.

Gegebenenfalls kann auch ein pneumatischer Antrieb für das Schleifwerkzeug vorgesehen sein.

Bei manchen Ausführungsformen ist vorgesehen, dass die Schleifspindeleinheit fest am Grundkörper montiert ist, so dass sie gegenüber dem Grundkörper nicht verlagert werden kann. Solche Schleifwerkzeugeinheiten können beispielsweise dann verwendet werden, wenn die

Werkzeugmaschine eine Hauptspindel hat, die senkrecht zur Hauptspindelachse gesteuert verlagert werden kann, wie beispielsweise bei einer magnetisch gelagerten Spindel.

Universeller einsetzbar sind Schleifwerkzeugeinheiten, die sich dadurch auszeichnen, dass sie ein bezüglich des Grundkörpers bewegliches Zustellelement einer Zustelleinrichtung zur Zustellung des Schleifwerkzeugs in Richtung der Bohrungsinnenfläche aufweisen. Die Zustelleinrichtung kann beispielsweise so ausgelegt sein, dass das vom Grundkörper getragene Schleifwerkzeug bzw. die Schleifspindeleinheit im angekoppelten Zustand der Schleifwerkzeugeinheit gesteuert z.B. in Radialrichtung zur Grundkörper-Achse verlagert werden kann. Dadurch kann der Radialabstand zwischen dem zum Eingreifen an der Bohrungsinnenwand vorgesehenen Umfangsabschnitt des Schleifkörpers und der Grundkörperachse vorzugsweise stufenlos verstellt werden. Der Wirkradius der Schleifwerkzeugeinheit kann somit durch externe Steuerung über die Zustelleinrichtung während einer Schleifoperation nach einer Vorgabe ortsabhängig verändert werden, und zwar insbesondere in Abhängigkeit von der Axialposition und der Winkelposition der Hauptspindel bzw. des daran angekoppelten Grundkörpers.

Bei manchen Ausführungsformen weist die Zustelleinrichtung einen in die Schleifwerkzeugeinheit integrierten elektrisch ansteuerbaren Aktuator zur Verlagerung der Schleifspindeleinheit auf. Bei dem Aktuator kann es sich beispielsweise um einen Elektromotor oder um einen piezoelektrisch arbeitenden Aktuator handeln. Ein einziger Aktuator kann ausreichen, es ist jedoch auch möglich, mehrere koordiniert ansteuerbare Aktuatoren vorzusehen.

Bei manchen Ausführungsformen weist die Zustelleinrichtung einen Zustellkonus auf, der in einer parallel zur Grundkörper-Achse verlaufenden Führungsöffnung axial verschiebbar angeordnet ist und über zusammenwirkende Keilflächen bei axialer Verlagerung des Zustellkonus eine radiale Zustellung der Schleifspindeleinheit bewirkt. Derartige Schleifwerkzeugeinheiten können besonders vorteilhaft mit Werkzeugmaschinen in Form von Honmaschinen genutzt werden, da diese typischerweise ein präzise steuerbares Zustellsystem aufweisen, welches innerhalb der Hauptspindel ein axial verschiebbares Zustellelement aufweist, welches bei angekoppeltem Werkzeug mit einem werkzeuginternen axial verschiebbaren Zustellelement zusammenwirkt. In diesem Fall kann auf gesonderte Aktuatoren innerhalb der Schleifwerkzeugeinheit verzichtet werden.

Der Schleifkörper des Schleifwerkzeugs ist vorzugsweise so ausgelegt, dass er wenigstens im Bereich der abrasiven Umfangsfläche Schneidstoffkörner aus kubischem Bornitrid (CBN) oder

Diamant in einer keramischen oder metallischen Bindung aufweist. Derartige Schleifkörper zeichnen sich gegenüber andersartigen Schleifkörpern unter anderem durch sehr geringen Verschleiß aus, so dass eine Nachkompensation der Zustellung nicht oder nur in relativ großen Zeitintervallen erforderlich wird. Hierdurch kann einerseits die geometrische Präzision bei der Herstellung unrunder Bohrungsformen erhöht werden, andererseits können die Nebenzeiten für Werkzeugwechsel insgesamt kurz gehalten werden, wodurch ein hochproduktiver Feinbearbeitungsprozess möglich wird.

Die Erfindung betrifft auch ein Feinbearbeitungssystem zum Herstellen einer nicht-kreiszyllindrischen Bohrung, die wenigstens einen nicht-kreiszyllindrischen Bohrungsabschnitt mit einem unrunderen Bohrungsquerschnitt und/oder einem axialen Konturverlauf aufweist. Das Feinbearbeitungssystem umfasst eine Werkzeugmaschine, die durch Signale einer Steuereinheit gesteuert werden kann und die eine Hauptspindel aufweist, welche mittels eines ersten Antriebs um eine Hauptspindelachse drehbar und mittels eines zweiten Antriebs parallel zur Hauptspindelachse verschiebbar ist. Das Feinbearbeitungssystem umfasst weiterhin wenigstens eine Schleifwerkzeugeinheit der in dieser Anmeldung beschriebenen Art.

Vorzugsweise umfasst das Feinbearbeitungssystem weiterhin wenigstens ein Honwerkzeug.

Vorzugsweise ist ein automatisches Werkzeugwechselsystem zum wahlweisen Ankoppeln eines Honwerkzeugs oder einer Schleifwerkzeugeinheit an die Hauptspindel vorgesehen. Dadurch kann das gesamte Feinbearbeitungsverfahren an ein und derselben Werkzeugmaschine ohne Umspannen des Werkstücks ohne Eingriff eines Bedieners vollautomatisiert durchgeführt werden.

Bei manchen Ausführungsformen umfasst die Werkzeugmaschine ein Zustellsystem zur steuerbaren Verlagerung der Hauptspindel in Richtungen senkrecht zur Hauptspindelachse. Dadurch kann eine Zustellung des Schleifwerkzeugs in Richtung der Bohrungswand durch radiale Bewegungen der Hauptspindel bewirkt werden. In diesem Fall können einfacher aufgebaute Schleifwerkzeugeinheiten ohne interne Zustellelemente zur Veränderung der Zustellposition der Schleifspindeleinheit verwendet werden. Bei manchen Ausführungsformen ist die Hauptspindel der Werkzeugmaschine in einer Magnetlagereinrichtung magnetisch gelagert. Die Magnetlagereinrichtung kann maschinenfest montiert und die Hauptspindel gegenüber der Magnetlagereinrichtung magnetisch verlagerbar sein. Nutzungsmöglichkeiten des Konzepts wurden bereits oben beschrieben.

## 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 nicht-kreiszyklindrische Bohrung, die eine Überlagerung eines unrunder Bohrungsquerschnitts mit einem axialen Konturverlauf aufweist;
- Fig. 2 zeigt in Fig. 2A bis Fig. 2C die Querschnittsformen der Bohrungen in den Ebenen I, II und III in Fig. 1;
- Fig. 3 zeigt schematisch Komponenten eines Feinbearbeitungssystems gemäß einer Ausführungsform mit einer an die Hauptspindel angekoppelten Schleifwerkzeugeinheit;
- Fig. 4 zeigt eine schematische Ansicht einer senkrecht zur Bohrungssachse verlaufenden Ebene der Bohrung zwischen Bohrungseintritt und Bohrungsaustritt bei der Erzeugung eines unrunder Bohrungsquerschnitts durch Schleifen;
- Fig. 5 zeigt eine andere Ausführungsform einer Schleifwerkzeugeinheit, die starr an das freie Ende einer Hauptspindel angekoppelt ist;
- Fig. 6 zeigt eine weitere Ausführungsform einer Schleifwerkzeugeinheit, die starr an eine Hauptspindel angekoppelt werden kann;
- Fig. 7 zeigt schematisch eine Ausführungsform einer Schleifwerkzeugeinheit, die eine aufweitbare Führungsgruppe mit mehreren um den Umfang des Grundkörpers verteilten Führungsleisten aufweist;
- Fig. 8 zeigt eine Schleifwerkzeugeinheit mit einer Schleifspindeleinheit, die in fester Position im Werkzeug montiert ist.

## DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER AUSFÜHRUNGSBEISPIELE

Nachfolgend werden einige Ausführungsbeispiele von Feinbearbeitungsverfahren und dazu verwendeten Feinbearbeitungssystemen bzw. Vorrichtungen und Werkzeugen beschrieben, die

es erlauben, in einem Werkstück eine nicht-kreiszyklindrische Bohrung herzustellen, die wenigstens einen nicht-kreiszyklindrischen Bohrungsabschnitt aufweist, der einen unrunder Bohrungsquerschnitt, einen axialen Konturverlauf oder eine Überlagerung eines unrunder Bohrungsquerschnitts mit einem axialen Konturverlauf aufweist.

Die Feinbearbeitungsverfahren umfassen eine hier auch als „Formschleifoperation“ bezeichnete Schleifoperation, die dafür ausgelegt ist, einen in Axialrichtung und/oder in Umfangsrichtung der Bohrung ungleichmäßigen Materialabtrag zu erzeugen. Dies kann insbesondere durch eine oder mehrere der folgenden Maßnahmen erreicht werden: (i) Durch eine individuelle Aussteuerung (Zustellung) eines rotierenden Schleifkörpers (z.B. senkrecht zur Bohrungsachse) in Abhängigkeit von der radialen Position (Winkel-Lage) und der axialen (Bohrungshöhe). (ii) Durch eine Variation der Drehzahl des Schleifkörpers und somit der Materialabtragleistung. (iii) Durch eine Variation der Verweilzeit (Kontaktzeit) an der jeweiligen Stelle, z.B. durch unterschiedliche Umfangsgeschwindigkeit der Hauptspindel.

Die 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 Bohrung weist eine Bohrungsachse 112 auf und erstreckt sich in Axialrichtung über eine Bohrungslänge von einem im Einbauzustand dem Zylinderkopf zugewandten Bohrungseintritt 114 bis zum Bohrungsaustritt 116 am gegenüberliegenden Ende. Fig. 1 zeigt mit gestrichelten Linien eine Ausgangsform AF der Bohrung vor Beginn der hier beschriebenen Feinbearbeitungsoperationen. Die Ausgangsform resultiert aus vorangegangenen Bearbeitungsstufen (z.B. mittels Feinbohren und/oder Schleifen) und hat im Beispielsfall die Form eines zur Bohrungsachse 112 zentrierten Kreiszyklinders. Mit durchgezogenen Linien ist die Sollform SF der Bohrung nach Abschluss der Feinbearbeitung gezeigt.

Die hier beispielhaft dargestellte angestrebte Sollform SF kann in mehrere aneinander angrenzende Abschnitte unterteilt werden, die kontinuierlich bzw. ohne Bildung von Stufen, Kanten oder Sprüngen in Axialrichtung gesehen ineinander übergehen. Die Fig. 2A, 2B und 2C zeigen schematische Querschnittsdarstellungen des Bohrungsquerschnitts in den in Fig. 1 markierten Ebenen I, II und III.

In unmittelbarer Nähe des Bohrungseintritts, beispielsweise in der Ebene I, hat die Bohrung einen unrunder Bohrungsquerschnitt, also eine Querschnittsform, die signifikant von einer Kreisform abweicht. In der Ebene I ist der Bohrungsquerschnitt etwa kleeblattförmig mit vier in ca. 90° zueinander stehenden radialen Ausbuchtungen, zwischen denen in Umfangsrichtung

jeweils Abschnitte mit einem lokalen Minimum des Bohrungsradius bzw. des Bohrungsdurchmessers liegen. Die Bohrungsquerschnittsform kann auch als vier-zählige azimutale Welligkeit beschrieben werden. Die radialen Abweichungen von einer idealen Kreisform sind übertrieben dargestellt, am realen Werkstück können sie beispielsweise in der Größenordnung einiger zehn Mikrometer liegen.

Mit zunehmendem Abstand zum Bohrungseintritt 114 wird diese Formabweichung höherer Ordnung immer schwächer ausgeprägt. Die Querschnittsform nähert sich immer mehr einer Kreisform an. Dabei bleibt innerhalb des bohrungsnahen ersten Bohrungsabschnitts BA1 der mittlere Bohrungsdurchmesser im Wesentlichen über eine gewisse Länge etwa gleich. Die dargestellte Ebene II liegt innerhalb eines zweiten Bohrungsabschnitts BA2, der hier auch als Übergangsabschnitt bezeichnet wird und der den Übergang zwischen dem ersten Bohrungsabschnitt BA1 (mit mehr oder weniger konstantem mittleren Bohrungsdurchmesser in Axialrichtung) und einem dritten Bohrungsabschnitt BA3 markiert, in welchem der mittlere Durchmesser der Bohrung in Richtung des Bohrungsaustritts kontinuierlich zunimmt. Innerhalb dieses dritten Bohrungsabschnitts BA3 ist die Sollform SF mehr oder weniger konisch, so dass beispielsweise in der Ebene III nahe dem Bohrungsaustritt eine kreisförmige Querschnittsform (Fig. 2C) vorliegt, deren Durchmesser größer ist als in der Ebene II.

Die Sollform der insgesamt nicht-kreiszyklischen Bohrung ist also in der Nähe des Bohrungseintritts 114 vor allem durch eine unrunde Bohrungsform mit mehrzähliger Welligkeit in Umfangsrichtung geprägt, mit größerer Entfernung davon nimmt diese Welligkeit ab und in Richtung des Bohrungsaustritts schließt sich nach einem Übergang ein rotationssymmetrischer Bohrungsabschnitt (dritter Bohrungsabschnitt BA3) an, der einen axialen Konturverlauf hat, was unter anderem bedeutet, dass eine Mantellinie der Bohrungsinnenfläche 115 nicht parallel zur Bohrungssachse 112 verläuft.

Die angestrebte Gestalt (Form) der Bohrungsinnenfläche zeigt stetige Veränderungen der Oberflächenform ohne Sprünge oder Kanten mit ineinander übergehenden eindimensional oder zweidimensional gekrümmte Oberflächenabschnitten.

Diese komplexe, insgesamt nicht-kreiszyklische Bohrungsform im kalten Zustand des Werkstücks zeichnet sich dadurch aus, dass sie so berechnet ist, dass sich im Betrieb des Motors, also bei aufgeschraubtem Zylinderkopf und einem bei Betriebstemperatur laufendem Motor, durch ungleichmäßige Verformung eine mehr oder weniger kreiszyklische Bohrungsform (Betriebsform) ergibt, so dass sich in typischen Betriebszuständen des Motors geringer Blow-by, geringer Ölverbrauch und geringer Verschleiß der Kolbenringe ergeben.

Die Durchmesserunterschiede innerhalb des ersten Bohrungsabschnitts BA1 zwischen den Querrichtungen kleinsten und größten Durchmessers können beispielsweise in der Größenordnung von einigen zehn Mikrometern liegen, selten oberhalb von 20 bis 50  $\mu\text{m}$ . Die Durchmesserunterschiede zwischen dem mittleren Durchmesser im ersten Bohrungsabschnitt und dem Durchmesser in der Nähe des Bohrungsaustritts können beispielsweise im Bereich von 20  $\mu\text{m}$  bis 200  $\mu\text{m}$  bis 500  $\mu\text{m}$  liegen.

Zur Herstellung einer derartigen Bohrung mit einem oder mehreren nicht-kreisförmigen Bohrungsabschnitten wird ein Feinbearbeitungssystem mit einer Werkzeugmaschine verwendet. Fig. 3 zeigt schematisch Komponenten eines Feinbearbeitungssystems 300 gemäß einer Ausführungsform in Richtung parallel zur x-Richtung des Maschinenkoordinatensystems MKS. Das Feinbearbeitungssystem 300 umfasst eine NC-gesteuerte, mehrachsige Werkzeugmaschine 400. Die beispielhaft gezeigte Werkzeugmaschine ist als Honmaschine ausgelegt, die mehrere in x-Richtung nebeneinander angeordnete und gleichzeitig betreibbare Bearbeitungseinheiten aufweist, die bei dedizierten Honmaschinen gelegentlich auch als Honeinheiten bezeichnet werden. Fig. 3 zeigt einige Komponenten einer dieser Bearbeitungseinheiten. Eine computerbasierte Steuereinrichtung 415 steuert die Arbeitsbewegungen sämtlicher beweglicher Komponenten der Werkzeugmaschine.

Die Werkzeugmaschine 400 ist für die Feinbearbeitung von Zylinderlaufflächen bei der Herstellung von Zylinderblöcken für Brennkraftmaschinen eingerichtet. Ein aktuell zu bearbeitendes Werkstück 100 ist auf einer Werkstückhaltevorrichtung 425 fest aufgespannt. Die Position des Werkstücks auf der Werkstückhaltevorrichtung wird durch Indexierelemente 426 vorgegeben, so dass ein definierter Bezug zwischen dem Werkstückkoordinatensystem WKS und dem Maschinenkoordinatensystem MKS existiert. Die Werkstückhalteeinrichtung weist einen horizontal verfahrbaren Schlitten 427 auf, der unter der Steuerung durch die Steuereinheit 415 mithilfe eines nicht dargestellten Antriebs parallel zur y-Richtung des Maschinenkoordinatensystems verfahren werden kann. Es gibt auch Varianten mit einem Kreuztisch, die es erlauben, das Werkstück in der x-y-Ebene in jede beliebige Richtung zu verfahren. Auch Varianten mit fest positionierter, nicht-verfahrbarer Werkstückhalteeinrichtung sind möglich.

Das Werkstück ist im Beispielsfall ein Zylinderkurbelgehäuse eines Vier-Zylinder-Reihenmotors mit vier achsparallelen Zylinderbohrungen. Die als nächstes zu bearbeitende Bohrung 110 ist im dargestellten Zustand als Folge der vorherigen Bearbeitung im Wesentlichen kreiszylindrisch und zentriert zur Bohrungssache 112. Sie soll durch nachfolgende

Feinbearbeitungsoperationen in eine davon signifikant abweichende nicht-kreiszyindrische Sollform gebracht werden.

Die schematisch dargestellte Bearbeitungseinheit der Werkzeugmaschine ist an einer auf dem Maschinenbett der Werkzeugmaschine aufgebrachten, nicht näher dargestellten Trägerkonstruktion angebracht. Die Bearbeitungseinheit umfasst eine Hauptspindeleinheit 430 mit einem Spindelkasten 435, der als Lagerung für die Hauptspindel 410 der Bearbeitungseinheit dient. Der Spindelkasten ist dabei die rotatorisch feste Komponente, die Hauptspindel ist eine darin drehbar gelagerte Welle. Die Hauptspindel ist mit vertikaler Hauptspindelachse 412 im Spindelkasten geführt. Ein erster Antrieb 440 dient als Drehantrieb für die Hauptspindel, um diese um die Hauptspindelachse 412 zu drehen. Damit können Drehzahl und Drehposition der Hauptspindel variabel und exakt vorgegeben werden. Ein zweiter Antrieb 450 dient als Hubantrieb zur gesteuerten Verlagerung bzw. Verschiebung der Hauptspindel parallel zur Hauptspindelachse 412. Die Arbeitsbewegungen der Hauptspindel werden über die Steuereinheit 415 gesteuert, an die die Antriebe 440, 450 angeschlossen sind. Der erste Antrieb (Drehantrieb) 440 kann beispielsweise am Spindelkasten 435 angebracht sein und direkt oder über einen Kettenantrieb auf die Hauptspindel wirken. Der zweite Antrieb 450 (Hubantrieb), der die Vertikalbewegung der Hauptspindel steuert, kann beispielsweise den Spindelkasten inklusive der Hauptspindel vertikal bewegen. Bei anderen Ausführungsbeispielen ist der Spindelkasten in Axialrichtung fest montiert und der Hubantrieb bewegt z.B. über eine Kugelrollspindel die Hauptspindel relativ zum Spindelkasten in axialer Richtung.

Bei manchen Ausführungsformen kann der Spindelkasten parallel zur y-Richtung und/oder parallel zur x-Richtung des Maschinenkoordinatensystems gesteuert verlagert werden. Es gibt auch Varianten mit magnetisch gelagerter Hauptspindel, die sich unter anderem dadurch auszeichnen, dass die Hauptspindel in einer Magnetlagereinrichtung des Spindelkastens magnetisch gelagert ist und gegenüber der Magnetlagereinrichtung über Ansteuerung der Lagermagnete in gewissem Ausmaß radial zur Hauptspindelachse 412 in beliebige Richtungen innerhalb der x-y-Ebene gesteuert verlagert werden kann.

Die in Fig. 3 dargestellte Werkzeugmaschine ist dafür eingerichtet, die Bohrung ausgehend von der durch die Vorbearbeitung resultierenden, hier kreiszyindrischen Ausgangsform mithilfe einer Schleifoperation mit axial und/oder azimuthal ungleichmäßigem Materialabtrag in eine nicht-kreiszyindrische Bohrungsform zu bringen. Eine derartige Schleifoperation wird im Rahmen dieser Anmeldung auch als „Formschleifoperation“ oder „Formschleifen“ bezeichnet, weil die Bohrungsform, d.h. die Makroform der Bohrung in einem Schleifprozess durch ungleichmäßigen Schleifabtrag gezielt verändert wird.

Zur Durchführung dieser Schleifoperation wird eine Schleifwerkzeuginheit 500 verwendet, die im Beispielsfall bei fertig eingerichteter Werkzeugmaschine mithilfe einer Kupplungseinrichtung 460 starr an das freie untere Ende der Hauptspindel angekoppelt ist. Die Schnittstelle zwischen Schleifwerkzeuginheit 500 und Hauptspindel 410 ist nur schematisch dargestellt. Zur Herstellung der starren, aber lösbaren Verbindung zwischen Hauptspindel 410 und Schleifwerkzeuginheit 500 kann beispielsweise eine entsprechend gesicherte Bajonettverbindung, eine Schraubverbindung, eine Flanschverbindung oder eine Kegelerbindung, zum Beispiel mit Hohlschaftkegel (HSK), vorgesehen sein. Weder in der Hauptspindel 410 noch in der Schleifwerkzeuginheit 500 ist ein Gelenk vorgesehen.

Die Schleifwerkzeuginheit hat einen Grundkörper 520, der eine zentrale Grundkörper-Achse 522 definiert, die auch als Hauptachse der Schleifwerkzeuginheit bezeichnet werden kann. Die Ankopplung an die Hauptspindel erfolgt so, dass die Grundkörper-Achse 522 koaxial zur Hauptspindelachse 412 verläuft, so dass die Schleifwerkzeuginheit durch Drehung der Hauptspindel in eine Drehung um die Grundkörper-Achse versetzt werden kann.

Der Grundkörper 520 trägt (wenigstens) eine Schleifspindeleinheit 550, die am oder im Grundkörper 520 entweder mit festem Bezug zu diesem oder aber gegenüber dem Grundkörper gesteuert verlagerbar montiert ist. Die Schleifspindeleinheit trägt ein Schleifwerkzeug 560, das einen Schleifkörper 565 aufweist, der mithilfe eines Schleifwerkzeug-Antriebs 580 um eine Schleifwerkzeugachse 562 unbegrenzt rotiert werden kann. Der Schleifwerkzeug-Antrieb ist in die Schleifwerkzeuginheit 500 integriert.

Der Schleifkörper 565 hat im Wesentlichen die Form einer Schleifscheibe geeigneter Höhe, die mit ihrer abrasiven Umfangsfläche 567 in Kontakt mit der Bohrungsinnenfläche 115 gebracht werden kann, um dort mittels Schleifen (genauer gesagt mittels Umfangsschleifen) Material abzutragen.

Die Schleifwerkzeugachse 562 ist parallel zur Grundkörperachse 522 bzw. zur Hauptspindelachse 412 ausgerichtet und liegt mit radialem Abstand exzentrisch zu dieser. Der Durchmesser des Schleifkörpers 565 ist deutlich kleiner als der Durchmesser der Bohrung, so dass der Schleifkörper zu jedem Zeitpunkt mit seiner Umfangsfläche nur mit einem relativ schmalen Eingriffsbereich in abrasivem Kontakt mit der Bohrungsinnenfläche stehen kann. Der Durchmesser des Schleifkörpers kann beispielsweise im Bereich zwischen 90 % und 10 %, insbesondere zwischen 20% und 50%, des mittleren Durchmessers der zu bearbeitenden Bohrung liegen. Der Schleifkörperdurchmesser kann z.B. im Hinblick auf die Größenordnung

der kleinsten zu erzeugenden Kontur ausgewählt sein, z.B. abhängig von gewünschten azimutalen Ausbeulungen oder Wellen.

Die Position der Schleifwerkzeugachse 562 und der Durchmesser des Schleifkörpers 565 sind so aufeinander abgestimmt, dass der Schleifkörper seitlich über die Außenkontur des Grundkörpers 520 hinausragen kann, so dass nur die abrasive Außenfläche des Schleifkörpers in Kontakt mit der Bohrunginnenfläche kommen kann.

Bei der dargestellten Ausführungsform sind die Schleifspindeleinheit 550 bzw. das Schleifwerkzeug 560 in Radialrichtung zur Grundkörperachse 522 stufenlos zustellbar, und zwar unabhängig von eventuellen Lateralbewegungen der Hauptspindel 410. Die Schleifspindeleinheit 550 ist dazu in einem nicht näher dargestellten Träger montiert, der innerhalb des Grundkörpers 520 radial verschiebbar gelagert ist und der als Zustellelement einer Zustelleinrichtung zur Zustellung des Schleifwerkzeugs in Richtung der Bohrunginnenfläche 115 dient. Der für die Bohrunginnenbearbeitung effektive Wirkradius des Schleifwerkzeugs, also der radiale Abstand zwischen der radial am weitesten außen liegenden Seite des Schleifkörpers und der Grundkörperachse 520, kann dadurch stufenlos verstellt werden. Zur Erzeugung dieser Bewegung weist die Zustelleinrichtung einen elektrisch ansteuerbaren Aktuator 590 auf, beispielsweise in Form eines Elektromotors oder eines Aktuators mit piezoelektrischen Elementen.

Mithilfe des Feinbearbeitungssystems kann durch Erzeugen von Arbeitsbewegungen des Schleifwerkzeugs eine Schleifoperation durchgeführt werden, mit der die Form (Gestalt) der Bohrung 110 in definierter Weise sowohl in Axialrichtung als auch in Umfangsrichtung gezielt verändert werden kann. Dazu wird die Schleifwerkzeugeinheit nach Ankoppeln an die Hauptspindel durch Absenken der Hauptspindel parallel zu ihrer Hauptspindelachse in die Bohrung eingeführt, bis sich der Schleifkörper auf einer axialen Höhe befindet, in welcher die Schleifbearbeitung beginnen soll. Das Schleifwerkzeug wird mittels des Schleifwerkzeug-Antriebs um die Schleifwerkzeugachse mit einer vorgebbaren Drehzahl gedreht. Diese Drehzahl kann zeitlich konstant bleiben oder variieren. Durch eine einseitige Zustellung des Schleifwerkzeugs in Richtung der Bohrunginnenfläche wird die abrasive Umfangsfläche 567 des Schleifkörpers 565 des Schleifwerkzeugs in Arbeitseingriff mit der Bohrunginnenfläche 115 gebracht. Diese Zustellung erfolgt vorzugsweise bei bereits rotierendem Schleifkörper.

Bei der Schleifoperation kann nun die axiale Position des Schleifwerkzeugs in der Bohrung über eine Ansteuerung des zweiten Antriebs 450 (Hubantrieb) der Werkzeugmaschine gesteuert werden, während die Winkelposition des Schleifwerkzeugs in der Bohrung über eine

Ansteuerung des ersten Antriebs 440 (Drehantrieb) gesteuert werden kann. Da diese Bewegungen vermittelt über die Hauptspindel 410 gesteuert werden können, kann die Schleifwerkzeugeinheit auf Verstelleinrichtungen in Axialrichtung und Umfangsrichtung verzichten und somit relativ einfach aufgebaut sein.

Die lokale Materialabtragrate im lokalen Eingriffsbereich zwischen der Umfangsfläche 567 des Schleifkörpers 565 und der Bohrungsinnenfläche 115 kann über eine Variation der Zustellung des Schleifwerkzeugs, über eine Variation der Drehzahl des Schleifwerkzeugs bzw. des Schleifkörpers und/oder über eine Variation der Kontaktzeit zwischen Schleifkörper und Bohrungsinnenfläche mit hoher Präzision gesteuert werden.

Beim Ausführungsbeispiel von Fig. 3 kann die Zustellposition über Ansteuerung des Aktuators 590 stufenlos und zeitabhängig verändert werden. Die Lage der Hauptspindelachse und der davon abhängigen Grundkörper-Achse können dabei unverändert bleiben, so dass dazu Varianten von Werkzeugmaschinen genutzt werden können, die beispielsweise keine radiale Verlagerung der Hauptspindel in Richtung senkrecht zur Hauptspindelachse zulassen.

Die Drehzahl des Schleifkörpers kann durch Ansteuerung des Schleifwerkzeug-Antriebs 580 stufenlos variiert werden, um die lokale Schnittgeschwindigkeit zu variieren. Typische Drehzahlen können z.B. im Bereich von  $600 \text{ min}^{-1}$  bis  $10000 \text{ min}^{-1}$  liegen, ggf. auch darüber.

Die Kontaktzeit zwischen Schleifkörper und Bohrungsinnenfläche kann mithilfe der Antriebe 440 und 450 der Werkzeugmaschine zielgenau gesteuert werden. Wird beispielsweise bei stehendem Hubantrieb 450 die Hauptspindel nur gedreht, so hängt die lokale Kontaktzeit in dem durch den Schleifkörper bearbeiteten Axialbereich von der Drehzahl bzw. Drehgeschwindigkeit der Hauptspindel ab in der Weise, dass die bezogen auf einen Ort an der Bohrungsinnenfläche lokale Kontaktzeit umso geringer wird, je höher die Drehzahl der Hauptspindel ist. Entsprechendes gilt für eine Variation der Hubgeschwindigkeit. Ist diese langsam, so ist die lokale Verweilzeit des rotierenden Schleifwerkzeugs an einem Ort der Innenfläche tendenziell größer als bei größerer Hubgeschwindigkeit. Auf diese Weise kann die Materialabtragrate, also das pro Zeiteinheit abgespante Volumen, für jeden Ort an der Bohrungsinnenfläche sowohl in Axialrichtung als auch in Umfangsrichtung sehr präzise gesteuert werden, um ausgehend von der Ausgangsform die gewünschte nicht-kreiszyindrische Bohrungsform durch eine gesteuerte Schleifoperation zu erhalten.

Fig. 4 zeigt eine schematische Ansicht einer senkrecht zur Bohrungssachse 112 verlaufenden Ebene der Bohrung zwischen Bohrungseintritt und Bohrungsaustritt bei der Erzeugung eines

unrunden Bohrungsquerschnitts durch Schleifen. Der Schleifkörper 565 dreht sich dabei mit hoher Drehzahl (Doppelpfeil) um die Schleifwerkzeugachse 562, während die gesamte Schleifwerkzeugeinheit um die coaxial zur Bohrungsachse verlaufende Grundkörper-Achse mit wesentlich langsamerer Drehgeschwindigkeit (beispielsweise 10 bis 50  $\text{min}^{-1}$ ) gedreht wird. Während einer einzigen Umdrehung der Hauptspindel bzw. der Schleifwerkzeugeinheit wird die Schleifspindeleinheit mehrfach nach radial außen zugestellt und danach allmählich wieder nach radial innen zurückgezogen. Durch den mehrfachen Wechsel von Zustellung nach außen und Zurückholen nach innen während einer Drehung wird die in Umfangsrichtung wellige Bohrungsform im gezeigten Bohrungsabschnitt erzeugt.

In der Regel findet gleichzeitig ein Vorschub der Schleifwerkzeugeinheit parallel zur Hauptspindelachse bzw. zur Bohrungsachse 115 statt, so dass die unrunde Bohrungsform über einen längeren Bohrungsabschnitt erzeugt werden kann. Das Ausmaß der Welligkeit kann in Axialrichtung konstant bleiben, gegebenenfalls aber auch in Axialrichtung zunehmen oder abnehmen, beispielsweise in der Weise, dass in einer weiter entfernt liegenden Bohrungsebene der Bohrungsquerschnitt zunehmend kreisrund wird bzw. die Welligkeit weniger stark ausgeprägt wird.

In den nachfolgenden Figuren werden funktionell ähnliche Komponenten oder Einrichtungen aus Gründen der Einfachheit mit den gleichen Bezugszeichen bezeichnet wie in den vorangegangenen Figuren, wobei die Figurennummer jeweils mit „-“, angehängt ist.

Fig. 5 zeigt eine andere Ausführungsform einer Schleifwerkzeugeinheit 500-5, die starr an das freie Ende einer Hauptspindel 410 angekoppelt ist. Die Schleifwerkzeugeinheit kann als Formschleifwerkzeug mit integriertem Schleifkörper bezeichnet werden, der durch einen Motor 580-5 angetrieben wird. Bei der gezeigten Ausführungsform gibt es eine mittels Elektromotor 590-5 betriebene Antriebseinheit für die radiale grobe Verstellung des Schleifkörpers bzw. der Schleifspindeleinheit 550-5. Zusätzlich ist eine feine Verstellung dadurch möglich, dass die Schleifspindeleinheit eine magnetgelagerte Schleifspindel hat, die eine radiale Verschiebung der Schleifspindel innerhalb der Magnetlagerung erlaubt. Die Schleifspindeleinheit 550-5 weist ein Spindelgehäuse mit einer Magnetlagereinrichtung auf, die die drehbare Welle lagert, welche an ihrem freien Ende den Schleifkörper 565-5 trägt. Zwischen der Welle und den Magneten der Lagerung existiert ein Luftspalt. Dadurch ist es möglich, die drehbare Komponente (Welle mit daran befestigtem Schleifkörper 565-5) gegenüber dem Spindelgehäuse radial zur Schleifwerkzeugachse 562-5 in beliebige Radialrichtungen zu verlagern, beispielsweise in einer Größenordnung von 10  $\mu\text{m}$  bis zu 20  $\mu\text{m}$  bis 200  $\mu\text{m}$  bezogen auf eine zentrierte Null-Lage. Die Schleifspindeleinheit 550-5 als Ganzes ist in einem radial verschiebbaren Zustellelement

gelagert, welches mithilfe des Elektromotors 590-5 radial zur Grundkörperachse 522-5 verlagert werden kann. Mithilfe dieses Motors ist eine radiale Grobzustellung des Schleifkörpers 565-5 möglich. Dieser Zustellung kann eine Feinzustellung mithilfe der magnetisch gelagerten Spindel überlagert sein.

Die Schleifwerkzeugeinheit 500-5 ist in zwei axialen Positionen dargestellt. In der oberen Position wird mithilfe des Schleifkörpers 565-5 ein oberer Bohrungsabschnitt im Wesentlichen ohne axialen Konturverlauf (Mantellinien am Bohrungsabschnitt etwa parallel zur Bohrungsachse) bearbeitet. Dieser Bohrungsabschnitt kann beispielsweise kreiszylindrisch sein oder aber eine unrunde Form aufweisen, beispielsweise eine ovale bzw. elliptische Form oder eine Kleeblattform. Darunter schließt sich ein Bohrungsabschnitt an, in welchem sich der Bohrungsdurchmesser mit zunehmendem Abstand vom Bohrungseintritt kontinuierlich vergrößert. Dieser Bohrungsabschnitt kann beispielsweise konisch bzw. kegelstumpfförmig sein. Um diese Bohrungsform zu erzeugen, wird die Zustellung der Schleifspindeleinheit während der Schleifoperation so gesteuert, dass die radiale Zustellposition im unteren Abschnitt mit zunehmendem Abstand vom Bohrungseintritt linear zunimmt. Eine Zwischenposition in der Nähe des Bohrungseintritts ist mit gestrichelten Linien dargestellt.

Es wäre auch möglich, zweistufig vorzugehen, indem zunächst in einer vorgeschalteten Vorbearbeitungsoperation, z.B. durch Feinbohren oder Formhonen, eine rotationssymmetrische Bohrungsform mit axialem Konturverlauf (z.B. Konus oder Kegelstumpf) erzeugt wird und danach nur die gewünschten Ausbeulungen zur Erzeugung eines unrunder Bohrungsquerschnitts mittels der Formschleifoperation an dieser rotationssymmetrischen Ausgangsform zu erzeugen.

Fig. 6 zeigt eine weitere Ausführungsform einer Schleifwerkzeugeinheit 500-6, die starr an eine Hauptspindel 410 angekoppelt werden kann. Auch bei dieser Ausführungsform ist die Schleifspindeleinheit 550-6 an einem Zustellelement 575 befestigt, welches innerhalb des Grundkörpers 520-6 radial verschiebbar gelagert ist. Die zugehörige Zustelleinrichtung weist einen Zustellkonus 570 auf, der in einer koaxial zur Grundkörper-Achse 522-6 verlaufenden Führungsöffnung axial verschiebbar geführt ist und in der Nähe seines freien Endes eine Schrägfläche aufweist, die mit einer korrespondierenden Schrägfläche des Zustellelements zusammenwirkt, um dieses radial zu verschieben, wenn der Zustellkonus axial verschoben wird. Die Schleifspindeleinheit kann damit durch axiales Verschieben des Zustellkonus 570 radial zugestellt werden.

Es gibt Ausführungsformen, bei denen dies die einzige radiale Zustellmöglichkeit für die Schleifspindeleinheit ist. Bei manchen Varianten hat die Schleifspindeleinheit eine magnetgelagerte Spindel, so dass die Welle der Schleifspindeleinheit, die den Schleifkörper trägt, innerhalb ihrer Lagerung noch radial zu ihrer Drehachse verlagert werden kann. Damit ist eine Kombination von Grobzustellung (über Betätigung des Zustellkonus) und Feinzustellung (über elektrische Ansteuerung der magnetisch gelagerten Spindel) möglich.

Fig. 7 zeigt schematisch eine weitere Ausführungsform einer Schleifwerkzeugeinheit 500-7. Die Schleifspindeleinheit 550-7 ist wie bei anderen Ausführungsbeispielen radial versetzt zur Grundkörper-Achse angeordnet und mithilfe einer Zustelleinrichtung radial zur Grundkörper-Achse stufenlos verstellbar, um den radialen Abstand zwischen der radialen Außenseite des Schleifkörpers 565-7 und der Grundkörper-Achse zu verstellen. Eine Besonderheit besteht darin, dass die Schleifwerkzeugeinheit eine aufweitbare Führungsgruppe 580-7 mit mehreren um den Umfang des Grundkörpers verteilten Führungsleisten 582 aufweist, die mittels eines Führungsgruppen-Zustellsystems mit einem axial innerhalb des Grundkörpers verschiebbaren Zustellkonus 585 radial zustellbar sind. Die Führungsleisten können beispielsweise aus Hartmetall bestehen und an ihren radialen Außenseiten poliert sein, so dass sich glatte, nicht-schneidende Führungsflächen ergeben.

Mithilfe der aufweitbaren Führungsgruppe ist es möglich, dass sich die Schleifwerkzeugeinheit innerhalb der Bohrung gegen die Einwirkung von durch das Schleifen verursachten Querkräften abstützt. Bei Verwendung einer solchen Schleifwerkzeugeinheit kann diese gelenkig an die Hauptspindel angekoppelt sein und es sind keine externen Führungen zur axialen Führung der Auf- und Ab-Bewegung der Schleifwerkzeugeinheit nötig. Die Schleifwerkzeugeinheit 500-7 kann beispielsweise dann genutzt werden, wenn zwischen der Hauptspindel der Werkzeugmaschine und dem Werkzeug noch eine Gelenkstange zwischengeschaltet ist, zum Beispiel um einen axialen Versatz zwischen der Lage der Hauptspindelachse und der Soll-Lage der Bohrungsachse auszugleichen.

Bei den bisher beschriebenen Ausführungsbeispielen von Schleifwerkzeugeinheiten gibt es die Möglichkeit, die Schleifspindeleinheit relativ zum Grundkörper der Schleifwerkzeugeinheit zu verlagern und damit in eine gewünschte radiale Zustellposition zu bringen. Eine solche integrierte Zustellmöglichkeit ist jedoch nicht zwingend. Fig. 8 zeigt eine Schleifwerkzeugeinheit 500-8 mit einem integrierten Schleifkörper 565-8, der durch einen Motor 580-8 angetrieben wird. Die Schleifspindeleinheit 550-8, die den Schleifkörper 565-8 trägt, ist in fester Position im Werkzeug bzw. dessen Grundkörper 520-8 montiert, kann also gegenüber diesem nicht verstellt werden.

Eine radiale Zustellung des Schleifkörpers in Richtung senkrecht zur Schleifwerkzeugachse 562-8 ist bei diesem Ausführungsbeispiel dadurch möglich, dass die Schleifwerkzeugeinheit an einer Hauptspindel 410-8 montiert ist, welche radial (in Richtungen senkrecht zur Hauptspindelachse 412-8) gesteuert verlagerbar ist. In diesen Fällen wird also die Zustellposition des Schleifwerkzeugs durch radiale Verlagerung der Hauptspindel relativ zu einer Normalposition verändert. Dies kann z.B. dadurch erreicht werden, dass die Werkzeugmaschine mit einer magnetisch gelagerten Hauptspindel ausgestattet ist, die eine begrenzte relative radiale Verlagerung des drehbaren Teils der Hauptspindereinheit (also der Hauptspindel) gegenüber dem stationären Teil der Hauptspindereinheit (nämlich der Lagereinrichtung für die Hauptspindel) zulässt.

Sofern der nicht-rotatorische Teil der Hauptspindereinheit in Radialrichtung gesteuert verlagerbar werden kann, kann auch eine derartige radiale Verlagerung zur zeitabhängigen Steuerung die Radialposition des Schleifkörpers innerhalb der Bohrung genutzt werden.

Die Arbeitsposition des Schleifkörpers relativ zum Werkstück bzw. zur Bohrung könnte auch dadurch verändert werden, dass während der Schleifoperation das Werkstück relativ zu einer stationär gehaltenen Hauptspindel in einer Ebene senkrecht zur Hauptspindelachse gesteuert verlagerbar wird. Auch Kombinationen von Verlagerungen der Hauptspindel und des Werkstücks in Richtungen senkrecht zur Hauptspindelachse können dazu genutzt werden, die Arbeitsposition des Schleifkörpers relativ zum Werkstück zu steuern.

Bei allen Ausführungsbeispielen ist es möglich, die axiale Position des Schleifwerkzeugs in der Bohrung durch Ansteuerung des Hubantriebs der Hauptspindel und die Winkelposition des Schleifwerkzeugs in der Bohrung durch Ansteuerung des Drehantriebs der Werkzeugmaschine zu steuern. Die Zustellung des Schleifkörpers kann über werkzeuginterne Einrichtungen und/oder über maschinenseitige Einrichtungen erfolgen. In jedem Fall kann eine Schleifoperation durchgeführt werden, bei der die lokale Materialabtragsrate in einem lokalen Eingriffsbereich zwischen dem Schleifkörper und der Bohrungsinnenfläche durch Variieren eines oder mehrerer Prozessparameter gezielt gesteuert werden kann, um durch einen Schleifprozess die gewünschte Sollform der Bohrung nach Abschluss der Schleifoperation zu erhalten.

Die Bohrungsinnenfläche weist nach Abschluss der Formschleifoperation typischerweise Schleifriefen R1 auf, die aufgrund der hohen Drehzahl des Schleifkörpers im Vergleich zu den anderen Arbeitsbewegungen mehr oder weniger in Umfangsrichtung der Bohrung und/oder in einem kleinen Winkel dazu stehen. Außerdem hat die Bohrungsinnenfläche danach ggf. eine

Schleifstruktur, die für die bestimmungsgemäße Verwendung des mit Bohrung versehenen Werkstücks noch nicht optimal ist.

Daher schließt sich bei der hier beschriebenen Ausführungsformen nach Abschluss der Schleifoperation wenigstens eine weitere Bearbeitungsoperation an, mit deren Hilfe die Innenfläche der Bohrung endbearbeitet wird, um die letztendlich gewünschte Oberflächenstruktur und gegebenenfalls Bohrungsform zu erreichen. In vielen Fällen, insbesondere bei der Bearbeitung von Zylinderlaufflächen in Zylinderblöcken oder Zylinderlaufbuchsen von Brennkraftmaschinen oder anderen Hubkolbenmaschinen schließen sich nach der Schleifoperation eine oder mehrere Honoperationen an, die mithilfe geeigneter Honwerkzeuge (mindestens ein Honwerkzeug) durchgeführt werden können.

Es ist möglich, das Werkstück dazu aus der gezeigten Werkzeugmaschine zu entladen und in eine weitere Werkzeugmaschine nach Art einer Honmaschine zu transportieren. In diesem Fall kann die gezeigte Werkzeugmaschine mit angekoppelter Schleifwerkzeugeinheit speziell auf die Durchführung von Formschleifoperationen ausgelegt sein.

Bei bevorzugten Ausführungsformen finden jedoch nachgeschaltete Honoperationen (eine oder mehrere) an derselben Werkzeugmaschine statt. Dazu wird nach Abschluss der Schleifoperation die Schleifwerkzeugeinheit von der Hauptspindel abgekoppelt, ein Honwerkzeug wird an die Hauptspindel angekoppelt und mittels des Honwerkzeugs wird mindestens eine Honoperation an der Bohrunginnenfläche durchgeführt.

Alternativ oder zusätzlich könnte eine Schleifwerkzeugeinheit auch so aufgebaut sein, dass sie eine gesondert zustellbare Schneidgruppe zur Durchführung einer Honoperation aufweist. In diesem Fall wäre ein Werkzeugwechsel für die Durchführung dieser Honoperation nicht erforderlich.

Eine nachgeschaltete Honoperation kann so ausgelegt sein, dass die Form der Bohrung nochmals gezielt verändert und damit die Bohrung in die letztendlich gewünschte Bohrungsform gebracht wird. Eine derartige formverändernde Honoperation weist typischerweise einen wesentlich geringeren Materialabtrag auf als die vorgeschaltete Schleifoperation.

Bei den meisten Varianten des Feinbearbeitungsverfahrens sind nachgeschaltete Honoperationen (eine oder mehrere) jedoch im Wesentlichen dafür vorgesehen, nur die aus dem Schleifen resultierende Oberflächenstruktur zu beseitigen und an der Bohrunginnenfläche die für den bestimmungsgemäßen Gebrauch gewünschte Oberflächenstruktur (beispielsweise

mit Honriefen, die einander unter geeigneten Winkeln überkreuzen) zu erzeugen, ohne die Makroform wesentlich zu verändern. Dabei laufen sie Schneidstoffkörper des Honwerkzeugs der durch Schleifen erzeugten Form mehr oder weniger nach, ohne sie zu verändern.

Bei einem derartigen „Nachlaufhonen“ können beispielsweise hierfür besonders konzipierte Honwerkzeuge verwendet werden, deren Schneidstoffkörper nur schwach abrasiv sind (feinkörnige Schleifkörper) und/oder deren Schleifkörper elastisch nachgiebig gehalten sind, so dass sie einer vorher durch Schleifen erzeugten Kontur der Bohrung im Wesentlichen nachlaufen können, ohne die Makroform der Bohrung signifikant zu verändern. Zum Nachlaufhonen besonders geeignete Honwerkzeuge sind beispielsweise in der DE 10 2013 204 714 A1 oder in der DE 10 2014 212 941 A1 der Anmelderin offenbart. Der Offenbarungsgehalt dieser Dokumente bezüglich Aufbau und Funktion von Honwerkzeugen wird durch Bezugnahme zum Inhalt der vorliegenden Beschreibung gemacht.

Insbesondere kann die Nachlaufhon-Operation mithilfe eines Honwerkzeugs durchgeführt werden, das einen Werkzeugkörper aufweist sowie eine aufweitbare ringförmige Schneidgruppe mit mehreren um den Umfang des Werkzeugkörpers verteilten Schneidstoffkörpern, deren in Axialrichtung gemessene axiale Länge kleiner als ein wirksamer Außendurchmesser der Schneidgruppe bei vollständig zurückgezogenen Schneidstoffkörpern ist. Aufgrund der relativen kurzen axialen Länge der Schneidstoffkörper der Schneidgruppe sind derartige Honwerkzeuge besonders gut zur Verfolgung einer schon existierenden axialen Kontur einer Bohrung geeignet. Die Schneidstoffkörper können elastisch nachgiebig gelagert sein, so dass sie eine Bohrungskontur besonders gut verfolgen können, auch in unrunder Bohrungsabschnitten.

Die bildlich dargestellten Schleifwerkzeugeinheiten haben jeweils genau eine Schleifspindereinheit mit einem einzigen Schleifkörper. Es gibt auch Varianten von Schleifwerkzeugeinheiten mit zwei, drei, vier oder mehr individuellen Schleifspindereinheiten, die vorzugsweise unabhängig voneinander ansteuerbar sind. Die zugehörigen Schleifkörper können z.B. in Umfangsrichtung versetzt zueinander angeordnet sein, z.B. paarweise diametral gegenüberliegend.

-----

## Patentansprüche

1. Feinbearbeitungsverfahren zum Herstellen einer nicht-kreiszyllindrischen Bohrung (110), die wenigstens einen nicht-kreiszyllindrischen Bohrungsabschnitt mit einem unrunderen Bohrungsquerschnitt und/oder einem axialen Konturverlauf aufweist,

unter Verwendung einer Werkzeugmaschine (400), die eine Hauptspindel (410) aufweist, welche mittels eines ersten Antriebs (440) um eine Hauptspindelachse (412) drehbar und mittels eines zweiten Antriebs (450) parallel zur Hauptspindelachse verschiebbar ist,

wobei die Bohrung (110) ausgehend von einer Ausgangsform durch eine Schleifoperation mit axial und/oder azimuthal ungleichmäßigem Materialabtrag in eine nicht-kreiszyllindrische Bohrungsform gebracht wird und danach die Innenfläche der Bohrung mittels mindestens einer weiteren Bearbeitungsoperation endbearbeitet wird,

gekennzeichnet durch:

Ankoppeln einer Schleifwerkzeugeinheit (500) an die Hauptspindel (410), wobei die Schleifwerkzeugeinheit einen um eine Grundkörper-Achse (522) drehbaren Grundkörper (520) aufweist, der wenigstens eine Schleifspindeleinheit mit einem Schleifwerkzeug (560) trägt, das mittels eines Schleifwerkzeug-Antriebs (580) um eine Schleifwerkzeugachse (562) rotierend antreibbar ist;

Durchführen einer Schleifoperation durch Erzeugen von Arbeitsbewegungen des Schleifwerkzeugs (560), wobei

das Schleifwerkzeug (560) zur Erzeugung von Materialabtrag an der Bohrungsinnenfläche (115) mit einer vorgebbaren Drehzahl rotiert wird;

eine abrasive Umfangsfläche (567) eines Schleifkörpers (565) des Schleifwerkzeugs durch einseitige Zustellung des Schleifwerkzeugs in Richtung der Bohrungsinnenfläche lokal in Eingriff mit der Bohrungsinnenfläche (115) gebracht wird;

eine axiale Position des Schleifwerkzeugs (560) in der Bohrung über Ansteuerung des zweiten Antriebs (450) gesteuert wird;

eine Winkelposition des Schleifwerkzeugs (560) in der Bohrung über Ansteuerung des ersten Antriebs (440) gesteuert wird; und

eine lokale Materialabtragsrate im lokalen Eingriffsbereich zwischen dem Schleifkörper (565) und der Bohrungsinnenfläche (115) über eine Variation der Zustellung des Schleifwerkzeugs und/oder über eine Variation der Drehzahl des Schleifkörpers und/oder über eine Variation der Kontaktzeit zwischen Schleifkörper und Bohrungsinnenfläche gesteuert wird.

2. Feinbearbeitungsverfahren nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch eine variable Steuerung der Zustellung des Schleifwerkzeugs (560) in Abhängigkeit von der axialen Position und der Winkelposition des Schleifwerkzeugs.

3. Feinbearbeitungsverfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Zustellung derart gesteuert wird, dass sie während einer Umdrehung der Hauptspindel (410) gemäß einer vorgegebenen Funktion mit wenigstens einer Zunahme der Zustellposition und wenigstens einer Abnahme der Zustellposition variiert.
4. Feinbearbeitungsverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Zustellposition des Schleifwerkzeugs (560) während der Schleifoperation durch radiale Verlagerung der Schleifspindeleinheit (550) relativ zur Grundkörper-Achse (522) verändert wird.
5. Feinbearbeitungsverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Zustellposition des Schleifwerkzeugs (560) während der Schleifoperation durch radiale Verlagerung Hauptspindel (410) relativ zu einer Normalposition verändert wird, wobei vorzugsweise eine Werkzeugmaschine (400) mit einer magnetisch gelagerten Hauptspindel verwendet wird.
6. Feinbearbeitungsverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine variable Steuerung der Drehzahl des Schleifwerkzeugs (560) in Abhängigkeit von der axialen Position und der Winkelposition des Schleifwerkzeugs, wobei vorzugsweise die Drehzahl derart gesteuert wird, dass die Drehzahl während einer Umdrehung der Hauptspindel (410) gemäß einer vorgebbaren Drehzahlfunktion mit wenigstens einer Zunahme der Drehzahl und wenigstens einer Abnahme der Drehzahl variiert.
7. Feinbearbeitungsverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Schleifwerkzeugeinheit (560) starr an die Hauptspindel (410) angekoppelt wird oder dass zwischen dem Grundkörper (520) der Schleifwerkzeugeinheit und der Hauptspindel wenigstens ein Gelenk vorhanden ist, wobei gesonderte Führungseinrichtungen (580-7) zur Führung der axialen Bewegung der Schleifwerkzeugeinheit innerhalb der Bohrung vorgesehen sind.
8. Feinbearbeitungsverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine weitere Bearbeitungsoperation eine Honoperation ist, wobei vorzugsweise nach Abschluss der Schleifoperation eine Nachlauf-Honoperation zur Erzeugung einer an der Bohrungsinnenfläche (115) gewünschten Oberflächenstruktur im Wesentlichen ohne Veränderung der Makroform der Bohrung durchgeführt wird.

9. Feinbearbeitungsverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass nach Abschluss der Schleifoperation die Schleifwerkzeugeinheit (500) von der Hauptspindel (410) abgekoppelt, ein Honwerkzeug an die Hauptspindel angekoppelt und mittels des Honwerkzeug mindestens eine Honoperation an der Bohrungsinnenfläche durchgeführt wird.

10. Schleifwerkzeugeinheit (500), insbesondere zur Verwendung bei einem Feinbearbeitungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9 mit:

einem Grundkörper (520), der mittels einer Kupplungseinrichtung (460) an eine Hauptspindel (410) einer Werkzeugmaschine (400) ankoppelbar und durch Arbeitsbewegungen der Hauptspindel um eine Grundkörper-Achse (512) drehbar und parallel zur Grundkörper-Achse bewegbar ist;

einer von dem Grundkörper getragenen Schleifspindeleinheit (550) zum Tragen eines Schleifwerkzeugs (560), das einen Schleifkörper (565) mit einer abrasiven Umfangsfläche (567) aufweist und mittels eines Schleifwerkzeug-Antriebs (580) um eine Schleifwerkzeugachse (562) rotierend antreibbar ist;

wobei der Schleifwerkzeug-Antrieb (580) in die Schleifwerkzeugeinheit (500) integriert ist.

11. Schleifwerkzeugeinheit (500) nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Schleifwerkzeugs-Antrieb (580) einen Elektromotor aufweist oder dass die Schleifwerkzeugeinheit ein Fluidkanalsystem zur Zufuhr von Kühlschmierstoff in die Schleifwerkzeugeinheit aufweist und dass der Schleifwerkzeug-Antrieb eine Turbine zur Umsetzung von Strömungsenergie des Kühlschmierstoffs in eine Drehbewegung des Schleifwerkzeugs aufweist.

12. Schleifwerkzeugeinheit (500) nach Anspruch 10 oder 11, gekennzeichnet durch ein bezüglich des Grundkörpers (520) bewegliches Zustellelement (575) einer Zustelleinrichtung zur Zustellung des Schleifwerkzeugs in Richtung der Bohrungsinnenfläche, insbesondere zur Verlagerung der Schleifspindeleinheit (550) des Schleifwerkzeugs in Radialrichtung zur Grundkörper-Achse (512).

13. Schleifwerkzeugeinheit (500) nach einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Zustelleinrichtung einen elektrisch ansteuerbaren Aktuator (590) zur Verlagerung der Schleifspindeleinheit (550) aufweist und/oder dass die Zustelleinrichtung einen Zustellkonus (570) aufweist, der in einer parallel zur Grundkörper-Achse verlaufenden Führungsöffnung axial verschiebbar angeordnet ist und über zusammenwirkende Keilflächen bei axialer Verlagerung des Zustellkonus ein radiale Zustellung des Schleifwerkzeugs bewirkt.

14. Schleifwerkzeugeinheit (500) nach einem der Ansprüche 10 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Schleifspindeleinheit in einem Spindelgehäuse magnetisch gelagert ist.
15. Schleifwerkzeugeinheit nach einem der Ansprüche 10 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass der Schleifkörper (565) des Schleifwerkzeugs (560) wenigstens im Bereich der abrasiven Umfangsfläche (567) Schneidstoffkörner aus kubischem Bornitrid (CBN) oder Diamant in einer keramischen oder metallischen Bindung aufweist.
16. Schleifwerkzeugeinheit nach einem der Ansprüche 10 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Schleifwerkzeugeinheit eine aufweitbare Führungsgruppe (580-7) mit mehreren um den Umfang des Grundkörpers verteilten Führungsleisten (582) aufweist, die teilweise oder vollständig zwischen dem Schleifwerkzeug (560) und einer spindelseitigen Kupplungsstruktur der Schleifwerkzeugeinheit (500-7) und/oder zwischen dem Schleifwerkzeug und einem spindelfernen Ende des Grundkörper angeordnet und mittels eines Führungsgruppen-Zustellsystems unabhängig von dem Schleifwerkzeug radial zustellbar sind.
17. Feinbearbeitungssystem (300) zum Herstellen einer nicht-kreiszyllindrischen Bohrung (110), die wenigstens einen nicht-kreiszyllindrischen Bohrungsabschnitt mit einem unrunder Bohrungsquerschnitt und/oder einem axialen Konturverlauf aufweist, mit einer durch Signale einer Steuereinheit (415) steuerbaren Werkzeugmaschine (400), die eine Hauptspindel (410) aufweist, welche mittels eines ersten Antriebs (440) um eine Hauptspindelachse (412) drehbar und mittels eines zweiten Antriebs (450) parallel zur Hauptspindelachse (412) verschiebbar ist; dadurch gekennzeichnet, dass das Feinbearbeitungssystem wenigstens eine Schleifwerkzeugeinheit (500) gemäß einem der Ansprüche 10 bis 16 aufweist.
18. Feinbearbeitungssystem nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass das Feinbearbeitungssystem (300) wenigstens ein Honwerkzeug aufweist, insbesondere ein Honwerkzeug mit elastisch nachgiebig und/oder federnd gehaltenen Schneidstoffkörpern zum Nachlauf-Honen.
19. Feinbearbeitungssystem nach Anspruch 17 oder 18, gekennzeichnet durch ein automatisches Werkzeugwechselsystem zum wahlweisen Ankoppeln eines Honwerkzeugs oder einer Schleifwerkzeugeinheit an die Hauptspindel.

20. Feinbearbeitungssystem nach einem der Ansprüche 17 bis 19, gekennzeichnet durch ein Zustellsystem zur steuerbaren Verlagerung der Hauptspindel in Richtungen senkrecht zur Hauptspindelachse, wobei vorzugsweise die Hauptspindel der Werkzeugmaschine in einer Magnetlagereinrichtung magnetisch gelagert ist.

-----

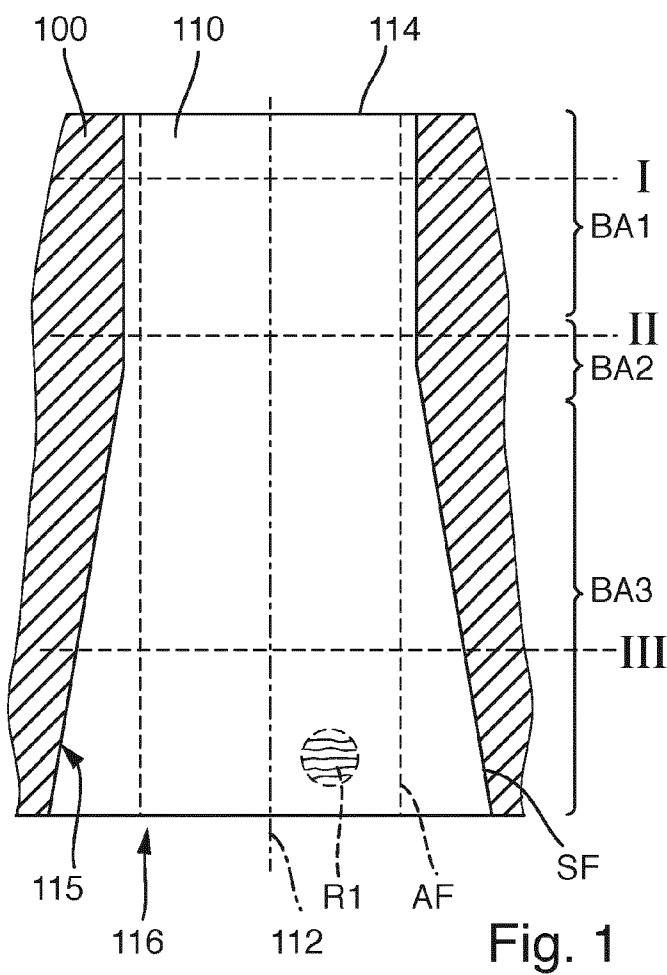


Fig. 1

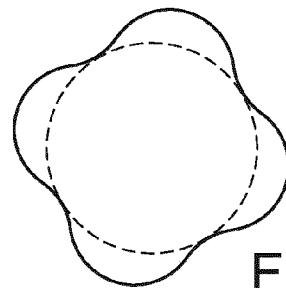


Fig. 2A

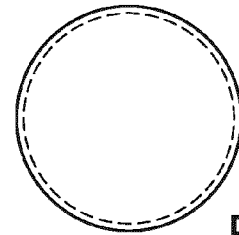


Fig. 2B

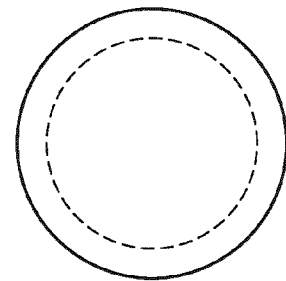


Fig. 2C

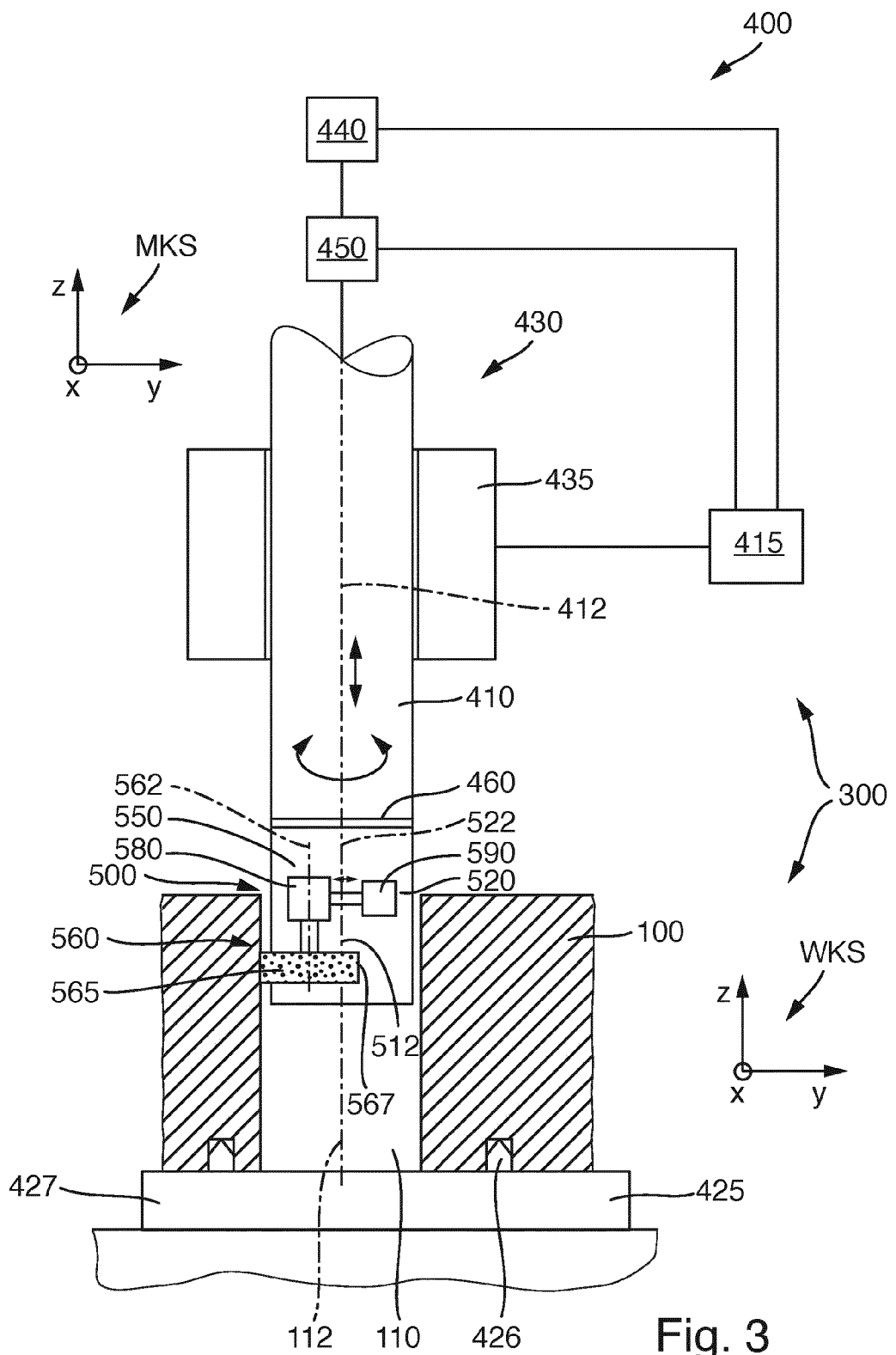


Fig. 3

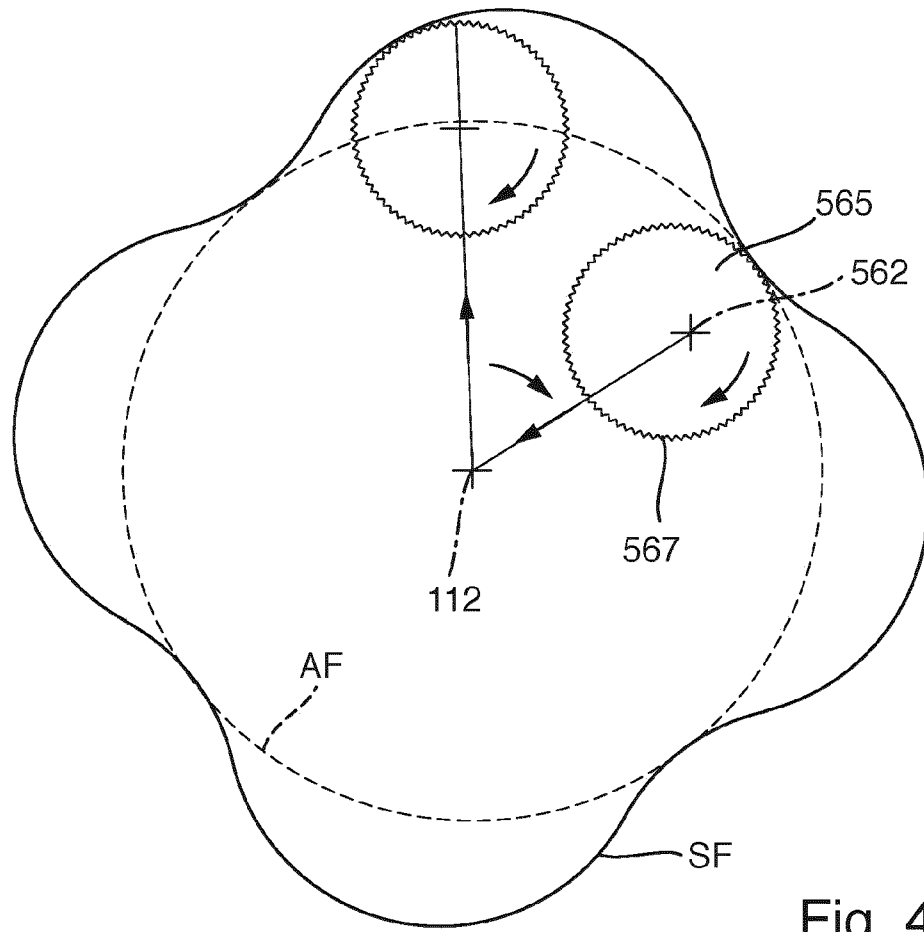


Fig. 4

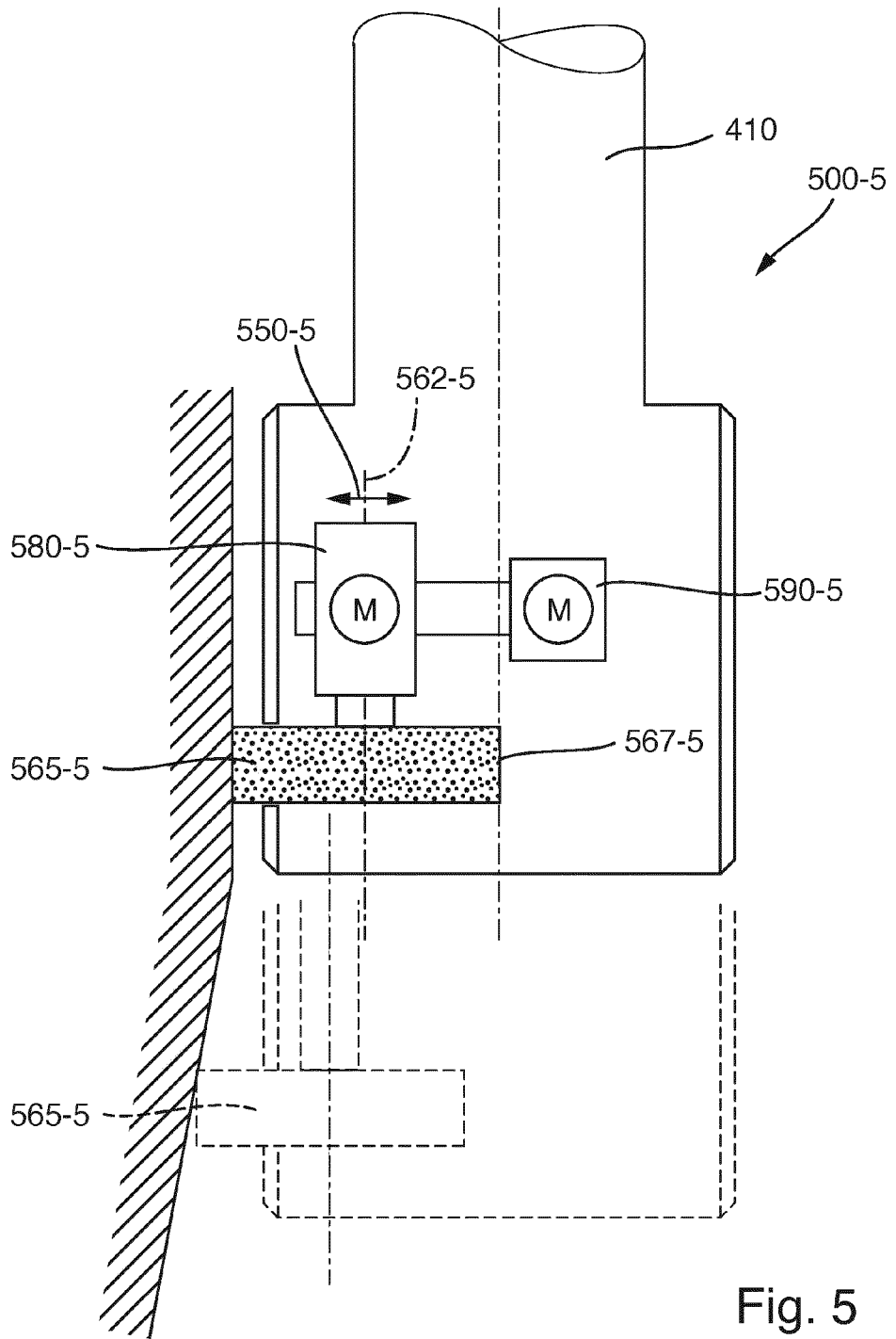


Fig. 5

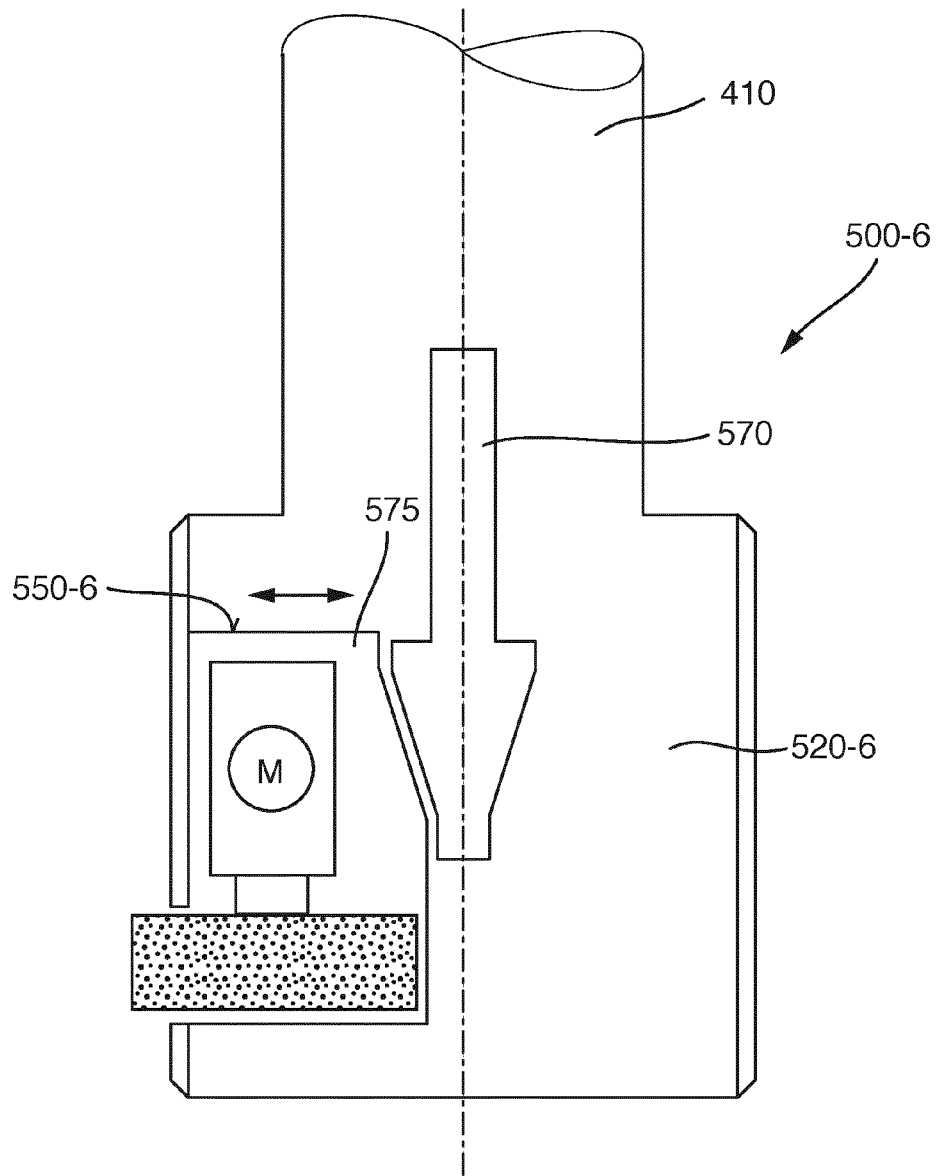


Fig. 6

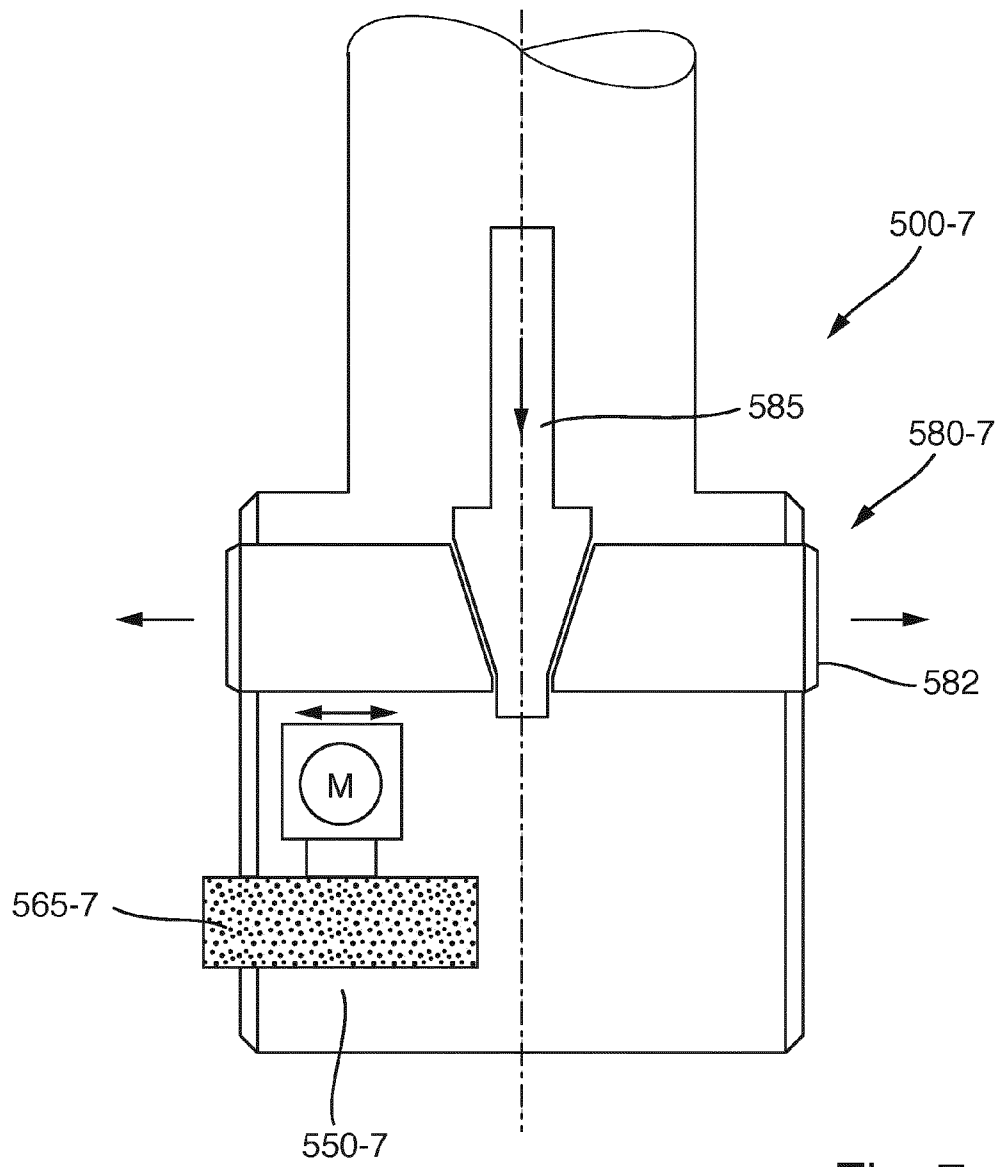


Fig. 7

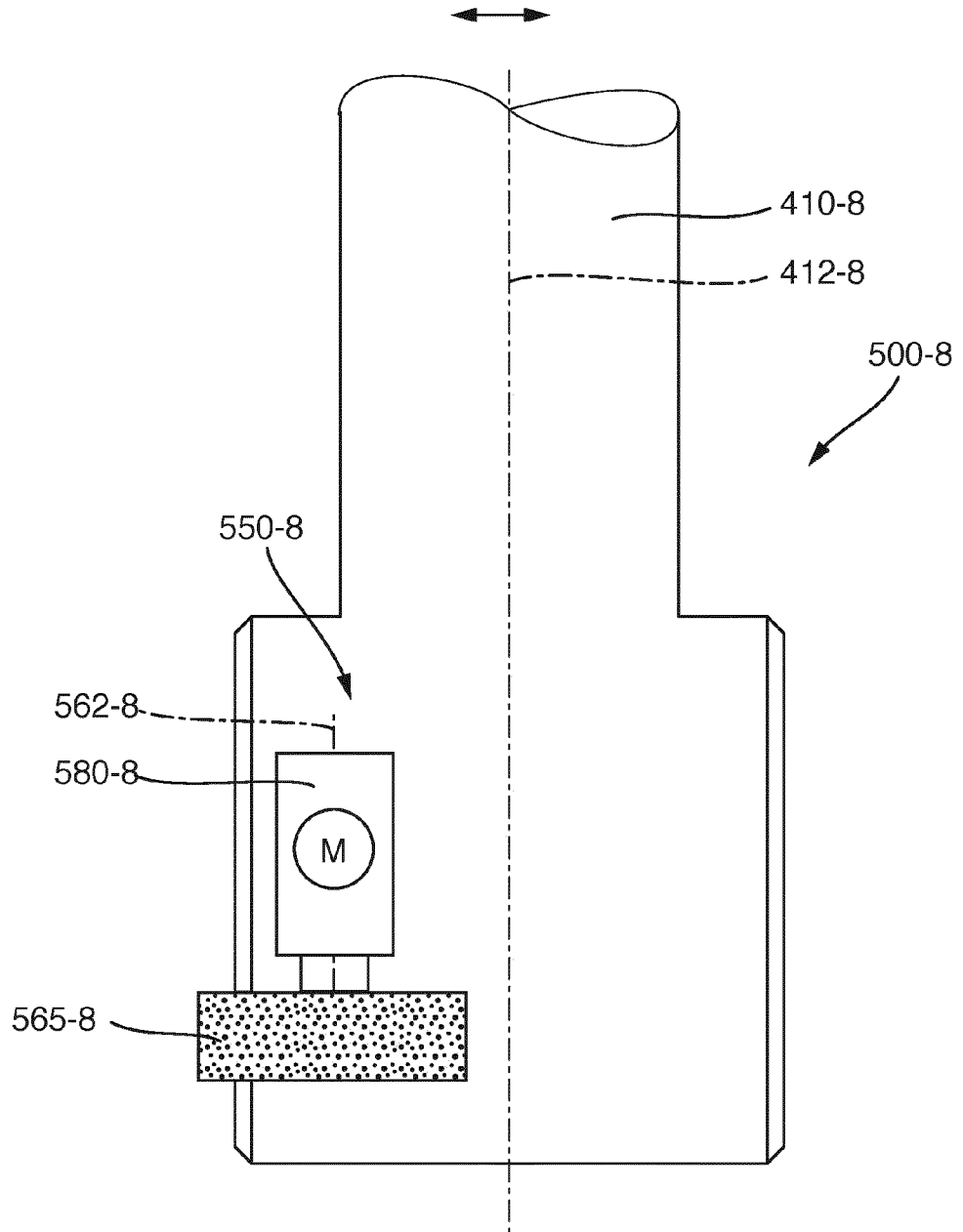


Fig. 8

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

**PCT/EP2019/059161**

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
<i>B24B 33/00</i> (2006.01)i; <i>B24B 33/08</i> (2006.01)i; <i>B24B 33/10</i> (2006.01)i; <i>B24B 5/40</i> (2006.01)i; <i>B24B 33/02</i> (2006.01)i; <i>B24B 41/04</i> (2006.01)i; <i>B24B 47/12</i> (2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) B24B		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	KR 20090131501 A (KIM TAE WHOAN [KR]) 29 December 2009 (2009-12-29) figure 1 paragraphs [0016] - [0027]	10-15
X Y	DE 2731554 A1 (CHRISTENSEN INC) 18 January 1979 (1979-01-18) page 9, paragraph 1 page 11, paragraph 2 figures 1-4	10-20 1,2,4,7-9
Y	DE 102013204714 A1 (ELGAN DIAMANTWERKZEUGE GMBH & CO KG [DE]) 02 October 2014 (2014-10-02) cited in the application paragraphs [0025], [0026], [0050], [0055], [0062]; claims 1-2; figures 3A, 3B	1-9
Y	DE 102006062665 A1 (GEHRING GMBH & CO KG [DE]) 03 July 2008 (2008-07-03) paragraph [0039]	1-9
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search <b>22 July 2019</b>		Date of mailing of the international search report <b>09 August 2019</b>
Name and mailing address of the ISA/EP <b>European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands</b> Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer <b>Endres, Mirja</b>  Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/EP2019/059161**

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
KR	20090131501	A	29 December 2009	NONE	
DE	2731554	A1	18 January 1979	NONE	
DE	102013204714	A1	02 October 2014	BR 112015023549 A2	18 July 2017
				CN 105246649 A	13 January 2016
				DE 102013204714 A1	02 October 2014
				DE 202014010306 U1	06 March 2015
				EP 2976184 A1	27 January 2016
				ES 2652645 T3	05 February 2018
				HU E035781 T2	28 May 2018
				JP 6092461 B2	08 March 2017
				JP 2016516595 A	09 June 2016
				KR 20150132548 A	25 November 2015
				PL 2976184 T3	30 March 2018
				SI 2976184 T1	28 February 2018
				US 2016303702 A1	20 October 2016
				WO 2014146919 A1	25 September 2014
DE	102006062665	A1	03 July 2008	NONE	

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES		
INV.	B24B33/00 B24B41/04	B24B33/08 B24B47/12
	B24B33/10	B24B5/40
		B24B33/02
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	KR 2009 0131501 A (KIM TAE WHOAN [KR]) 29. Dezember 2009 (2009-12-29) Abbildung 1 Absätze [0016] - [0027] -----	10-15
X	DE 27 31 554 A1 (CHRISTENSEN INC) 18. Januar 1979 (1979-01-18)	10-20
Y	Seite 9, Absatz 1 Seite 11, Absatz 2 Abbildungen 1-4 -----	1,2,4, 7-9
Y	DE 10 2013 204714 A1 (ELGAN DIAMANTWERKZEUGE GMBH & CO KG [DE]) 2. Oktober 2014 (2014-10-02) in der Anmeldung erwähnt Absätze [0025], [0026], [0050], [0055], [0062]; Ansprüche 1-2; Abbildungen 3A, 3B ----- -/--	1-9
<input checked="" type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen <input checked="" type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche		Absenddatum des internationalen Recherchenberichts
22. Juli 2019		09/08/2019
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter  Endres, Mirja

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	DE 10 2006 062665 A1 (GEHRING GMBH & CO KG [DE]) 3. Juli 2008 (2008-07-03) Absatz [0039] -----	1-9

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2019/059161

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
KR 20090131501 A	29-12-2009	KEINE	
-----			
DE 2731554 A1	18-01-1979	KEINE	
-----			
DE 102013204714 A1	02-10-2014	BR 112015023549 A2	18-07-2017
		CN 105246649 A	13-01-2016
		DE 102013204714 A1	02-10-2014
		DE 202014010306 U1	06-03-2015
		EP 2976184 A1	27-01-2016
		ES 2652645 T3	05-02-2018
		HU E035781 T2	28-05-2018
		JP 6092461 B2	08-03-2017
		JP 2016516595 A	09-06-2016
		KR 20150132548 A	25-11-2015
		PL 2976184 T3	30-03-2018
		SI 2976184 T1	28-02-2018
		US 2016303702 A1	20-10-2016
		WO 2014146919 A1	25-09-2014
-----			
DE 102006062665 A1	03-07-2008	KEINE	
-----			