



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
**21.10.2009 Patentblatt 2009/43**

(51) Int Cl.:  
**B24B 33/02 (2006.01) B24B 33/08 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: **09009260.2**

(22) Anmeldetag: **25.11.2005**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**DE**

(62) Dokumentnummer(n) der früheren Anmeldung(en) nach Art. 76 EPÜ:  
**05025813.6 / 1 790 435**

(71) Anmelder: **Nagel Maschinen- und Werkzeugfabrik GmbH**  
**72622 Nürtingen (DE)**

(72) Erfinder: **Weigmann, Uwe-Peter**  
**72622 Nürtingen (DE)**

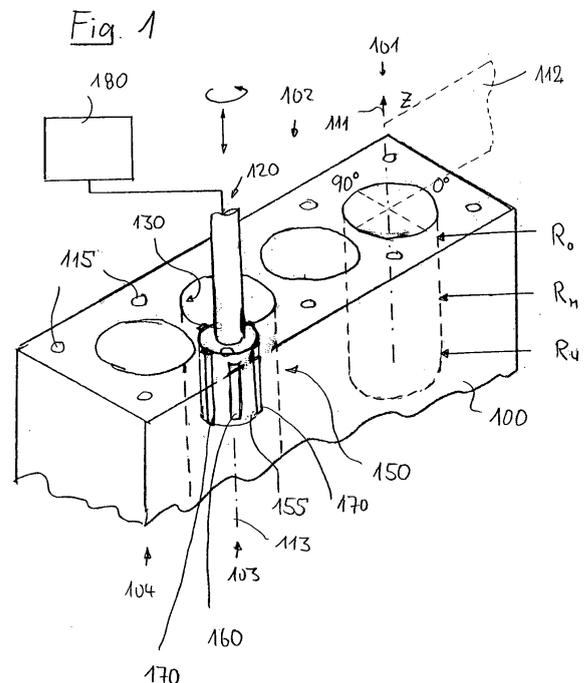
(74) Vertreter: **Muschik, Thomas**  
**Patentanwälte Ruff, Wilhelm,**  
**Beier, Dauster & Partner,**  
**Kronenstrasse 30**  
**70174 Stuttgart (DE)**

Bemerkungen:

Diese Anmeldung ist am 16-07-2009 als Teilanmeldung zu der unter INID-Code 62 erwähnten Anmeldung eingereicht worden.

(54) **Verfahren zum Honen von Bohrungen sowie Honwerkzeug hierfür**

(57) Bei einem Verfahren zum Honen der Innenfläche einer Bohrung in einem Werkstück, insbesondere zum Honen einer Zylinderlauffläche bei der Herstellung von Zylinderblöcken für Brennkraftmaschinen, wird ein Honwerkzeug innerhalb der Bohrung axial beweglich und um seine Werkzeugachse rotierend angetrieben wird und es wird eine an dem Honwerkzeug angebrachte Schneidgruppe mit mindestens einem Schneidstoffkörper zur materialabtragenden Bearbeitung der Innenfläche mit einer Zustellkraft an die Innenfläche angedrückt. Dabei erfolgt eine im Wesentlichen starre Führung der Axialbewegung des Honwerkzeuges zur Erzeugung einer Axialbewegung des Honwerkzeuges im wesentlichen parallel zur Bohrungsachse der Bohrung, und es wird eine zeitlich asymmetrische Steuerung der Zustellkraft einer einseitig der Werkzeugachse an dem Honwerkzeug angebrachten Schneidgruppe in Abhängigkeit von der Winkelposition und ggf. von der Hublage des Honwerkzeuges derart durchgeführt, dass die Bohrung zumindest in einem axialen Bohrungsabschnitt eine nicht-kreiszyindrische Bohrungsform erhält. Die einseitig an dem Werkzeugkörper angebrachte Schneidgruppe wird mittels eines Basiszustellsystems bis in eine vorgebbare Radialposition zugestellt. Ausgehend von der durch das Basiszustellsystem vorgegebenen Radialposition erfolgt eine radiale Zustellung bzw. ein radiales Zurückziehen der Schneidgruppe mittels eines unabhängig von dem Basiszustellsystem betätigbaren dynamischen Feinzustellsystems.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Honen der Innenfläche einer Bohrung in einem Werkstück, insbesondere zum Honen einer Zylinderlauffläche bei der Herstellung von Motorblöcken für Brennkraftmaschinen. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Honwerkzeug und eine Honmaschine, die besonders zur Durchführung des Verfahrens geeignet und ausgestaltet sind, sowie ein Werkstück mit mindestens einer Bohrung, die eine gehobene Innenfläche aufweist.

**[0002]** Bei der Herstellung von Zylinderblöcken von Brennkraftmaschinen werden die Zylinderlaufflächen üblicherweise durch ein Honverfahren endbearbeitet. Beim Einsatz des Endbearbeitungsverfahrens Honen werden oft erhebliche Anstrengungen unternommen, um die geforderte Bauteilform mit einem möglichst geringen Formfehler zu erzielen.

**[0003]** Auch wenn unmittelbar im Anschluss an die Bearbeitung keine Formfehler vorhanden sind, geht oftmals nach der Montage oder im Betrieb des bearbeiteten Werkstücks die einsatzoptimale Bauteilgeometrie durch elastische Deformationen verloren. Beispielsweise ist es bekannt, dass die Montage des Zylinderkopfes auf einem Zylinderblock (Motorblock) zu einer nicht zu vernachlässigenden Deformation der Zylinderbohrungen vor allem im Bereich der Zylinderkopfschrauben führen kann. Während des Motorenbetriebes sollten jedoch die Kolbenringe, die durch die mechanische Deformation, aber auch durch thermische Deformationen verzogene Zylinderbohrung so ausfüllen, dass eine saubere Abdichtung des Brennraumes im Motorenbetrieb gewährleistet ist. Eine vollständige Anlage der Kolbenringe an der Zylinderbohrung mit einem möglichst gleichmäßigen und geringen Spiel zwischen Kolbenring und Zylinderinnenwand wird erleichtert, wenn der montierte und betriebswarme Motor Zylinderbohrungen mit geringem Zylinderformfehler besitzt. Bei zu großen Werten des Zylinderformfehlers ist die saubere Abdichtung durch die Kolbenringe nicht mehr gewährleistet, der Partikelaustritt des Motors steigt, der Wirkungsgrad vermindert sich, und die Lebensdauer des Systems kann sich verkürzen.

**[0004]** Zur Vermeidung derartiger Probleme ist in der DE 28 10 322 C2 vorgeschlagen worden, die Verschlechterung der Zylinderform der Zylinderbohrungen bei der Montage des Zylinderkopfes dadurch zu vermeiden, dass der Motorblock für die Honbearbeitung mit Hilfe einer Spaneinrichtung deformiert wird, die die spätere Deformation durch den Zylinderkopf simuliert. In dem verspannten Zustand, der dem später bei der Montage vorliegendem Zustand entspricht, findet die Honbearbeitung statt, danach wird die Verspannung wieder gelöst. Ein ähnlicher Vorschlag ist in der JP 11-267960 beschrieben.

**[0005]** Um zusätzlich die Verformung durch Temperatureinwirkung zu simulieren, ist es außerdem bekannt, das Werkstück mittels heißem Honöl aufzuheizen. Diese Verfahren sind jedoch aufwändig und teuer und mit hohen Sicherheitsrisiken für die Maschinenbediener ver-

bunden. Sie werden daher nur für die Einzelfertigung, nicht jedoch in der Serienfertigung eingesetzt.

**[0006]** Die europäische Patentanmeldung EP 1 321 229 A1 beschreibt ein Verfahren zur Herstellung einer Bohrung, die in unbelastetem Zustand eine Ausgangsform aufweist und im Betriebszustand eine von der Ausgangsform abweichende Sollform. Das Verfahren umfasst die Ermittlung der Verformung einer Bohrung mit Sollform im Betriebszustand. Mittels der Sollform und der ermittelten Verformung wird die Ausgangsform ermittelt und die Bohrung wird durch ein Bearbeitungsverfahren in die Ausgangsform gebracht. Die nach dem Verfahren hergestellte Ausgangsform soll im Betriebszustand die gewünschte Sollform annehmen. Bei der beschriebenen Ausführungsform ist die Sollform zylindrisch, während die Ausgangsform einen im Wesentlichen kreiszylindrischen Abschnitt, einen im Wesentlichen elliptischen Abschnitt und einen dazwischenliegenden Übergangsabschnitt hat.

**[0007]** In der Dissertationsschrift "Variables Formhonen durch rechnergestützte Honprozesssteuerung" von R. Zurrin, veröffentlicht in: wbk - Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe, Band 26 (1990) wird vorgeschlagen, die beschriebenen Probleme durch das Fertigungsverfahren "Formhonen" zu beheben. Darunter wird in dieser Schrift ein Honen mit gesteuerter Vorschubbewegung verstanden, das es erlaubt, örtlich (hub- und winkellagenabhängig) verschiedene Abtragsraten während des Honprozesses zu erreichen, um eine Negativform der Verformungen mit einer definierten Oberfläche zu erzeugen (vergleiche insbesondere Seiten 10 bis 20). Das Formhonen wird am Beispiel von verformten Zylinderblöcken erläutert, bei denen die Zylinderbohrungen eine vierfachsymmetrische Unrundheit vierter Ordnung, d.h. eine Bohrungsform mit 4-zähliger Radialsymmetrie bezogen auf die Bohrungsachse, haben. Diese unrunde Bohrungsform wird durch Steuerung der Zustellkraft beziehungsweise des Anpressdruckes eines einfach aufweitenden Honwerkzeuges über den Hub und den Drehwinkel erreicht.

**[0008]** Es ist eine Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zum Honen der Innenfläche einer Bohrung mit einem Werkstück bereitzustellen, das es ermöglicht, nicht-kreiszylindrische Bohrungsformen mit komplexen Abweichungen von einer exakten Kreiszylindrizität durch Honen zu erzeugen. Es ist eine andere Aufgabe der Erfindung, ein solches Verfahren bereitzustellen, das eine hohe Flexibilität bezüglich der beim Formhonen zu erzielenden, unrunder Bohrungsform erlaubt. Weiterhin ist es Aufgabe der Erfindung, ein zur Durchführung des Verfahrens geeignetes Honwerkzeug bereitzustellen.

**[0009]** Zur Lösung dieser und anderer Aufgaben stellt die Erfindung ein Verfahren mit den Merkmalen von Anspruch 1 und ein Honwerkzeug mit den Merkmalen von Anspruch 8 bereit.

**[0010]** Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den anhängigen Ansprüchen angegeben. Der

Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

**[0011]** Bei einem erfindungsgemäßen Verfahren zum Honen der Innenfläche einer Bohrung in einem Werkstück, insbesondere zum Honen einer Zylinderlauffläche bei der Herstellung von Zylinderblöcken für Brennkraftmaschinen, wird ein Honwerkzeug innerhalb der Bohrung axial beweglich und um seine Werkzeugachse rotierend angetrieben und eine an dem Honwerkzeug angebrachte Schneidgruppe mit mindestens einem Schneidstoffkörper zur materialabtragenden Bearbeitung der Innenfläche wird mit einer Zustellkraft an die Innenfläche angedrückt. Erfindungsgemäß erfolgt eine im Wesentlichen starre Führung der Axialbewegung des Honwerkzeuges zur Erzeugung einer Axialbewegung des Honwerkzeuges im wesentlichen parallel zur Bohrungssachse der Bohrung und es wird eine zeitlich asymmetrische Steuerung der Zustellkraft einer einseitig der Werkzeugachse an dem Honwerkzeug angebrachten Schneidgruppe in Abhängigkeit von der Winkelposition und ggf. von der Hublage des Honwerkzeuges derart durchgeführt, dass die Bohrung zumindest in einem axialen Bohrungsabschnitt eine nicht-kreiszyklindrische Bohrungsform erhält.

**[0012]** Idealerweise sollte bei der Honbearbeitung von Zylinderbohrungen in Zylinderblöcken eine Form der Zylinderbohrung erzeugt werden, die im montierten und betriebswarmen Zustand des Motors zu einem minimalen Fehler in der Zylinderform (Zylindrizitätsfehler) führt. Zum Erreichen dieses Fertigungszieles einer "einsatzoptimalen Bohrungsgeometrie" sollte die Negativform des Fehlers, der durch die während der Montage und während des Betriebes erzeugten Deformationen entsteht, durch die Honbearbeitung erzeugt und somit vorgehalten werden. Die Steifigkeit und thermische Deformation ist jedoch bei strukturell uneinheitlichen Werkstücken z.B. durch Wandstärkenunterschiede und durch unterschiedliche Anbindungen der Zylinderlaufbahnen an das motorinterne Kühlsystem o. dgl. nicht symmetrisch. Daher ist zur idealen Abbildung der Negativform ein Honverfahren erforderlich, das die Erzeugung einer beliebigen, in der Regel unsymmetrischen Bohrungsform ermöglicht.

**[0013]** Die herkömmlichen Honverfahren sind in dieser Hinsicht jedoch beschränkt. Das grundlegende Prinzip des herkömmlichen Honens liegt in der flächenhaften Anlage der Schneidstoffkörper sowie einer doppelt kardanschen, beweglichen Lagerung des Honwerkzeuges. Bei Zustellung von vollständig oder nahezu symmetrisch um den Umfang verteilten Honleisten findet eine selbsttätige Ausrichtung des Werkzeuges in der Zylinderbohrung statt. Bei der Erzeugung von unrunder Bohrungsformen besteht jedoch durch diesen Ansatz das Problem, dass bei der Erhöhung der Zustellkraft bzw. des Anpressdruckes bei einer Schneidgruppe auf der diametral zur Werkzeugachse gegenüberliegenden Seite der Werkzeugachse der Anpressdruck von dort in Eingriff mit der Bohrungswand stehenden Schneidstoffkörpern sich

automatisch ebenfalls erhöht. Jede Änderung der Zustellkraft wirkt sich somit auf der diametral zur Werkzeugachse gegenüberliegenden Seite (Druck und Gegen-druckseite) in gleicher oder sehr ähnlicher Weise aus, so dass sich die Form der bearbeiteten Bohrung an diametral gegenüberliegenden Seiten im Wesentlichen in gleicher Weise ändert. Dies führt bei den im Stand der Technik beschriebenen Ansätzen zur Ausbildung einer zwar nicht kreiszyklindrischen, jedenfalls aber bezogen auf die Bohrungssachse 2-zählig radialsymmetrischen Bohrungsform. Es kann sich dabei insbesondere um eine elliptische Bohrungsform oder um die in der Dissertation von Zurin beschriebene Bohrungsform mit 4-zähliger Radialsymmetrie handeln, die eine Sonderform der 2-zähligen Radialsymmetrie darstellt.

**[0014]** Die Erfindung hebt diese Beschränkung auf. Durch die im Wesentlichen starre Führung der Axialbewegung des Honwerkzeuges in Verbindung mit der Steuerung der Zustellkraft einer einseitig der Werkzeugachse an dem Honwerkzeug angebrachten Schneidgruppe wird erreicht, dass diese Schneidgruppe in ihrem Eingriffswinkelbereich einen Materialabtrag bewirkt, ohne dass dies zwangsläufig zu einem vergleichbaren Materialabtrag an der diametral gegenüberliegenden Seite der Bohrungsinnenfläche führt. Die dem Anpressdruck der Schneidgruppe entgegenwirkende Gegenkraft wird nicht durch materialabtragende Schneidstoffkörper aufgebracht, sondern durch die im Wesentlichen starre Führung der Axialbewegung des Honwerkzeuges, die ein Ausweichen des Honwerkzeuges quer zur Werkzeugachse bei einseitigem Anpressen der Schneidstoffkörper an die Bohrungsinnenfläche verhindert.

**[0015]** Zur flexiblen Steuerung der Bohrungsform wird somit insbesondere ein Verfahren bzw. ein System vorgeschlagen, bei dem der Anpressdruck von Schneidstoffkörpern an einem begrenzten Umfangswinkelbereich der Innenfläche der Bohrung erhöht werden kann, ohne dass dies auf der diametral gegenüberliegenden Seite ebenfalls zu einer Erhöhung des Anpressdruckes anderer Schneidstoffkörper führt.

**[0016]** Es ist möglich, dass das Honwerkzeug nur eine einzige Schneidgruppe hat, deren Schneidstoffkörper (einer oder mehrere) alle auf einer Seite des Honwerkzeuges angeordnet sind. Es können auch mehrere, unabhängig voneinander ansteuerbare Schneidgruppen vorgesehen sein, die gegebenenfalls auch an diametral gegenüberliegenden Seiten des Honwerkzeuges angeordnet sein können. Falls Schneidgruppen an gegenüberliegenden Seiten angeordnet sind, sollte zu einem gegebenen Zeitpunkt nur an einer der gegenüberliegenden Seiten eine Schneidgruppe in materialabtragendem Eingriff mit der Bohrungsinnenwand sein, während die an der gegenüberliegenden Seite angeordnete Schneidgruppe zurückgezogen bzw. druckentlastet ist und somit keinen oder keinen substantiellen Materialabtrag leistet.

**[0017]** Die einseitig an dem Werkzeugkörper angebrachte Schneidgruppe wird bei der beanspruchten Er-

findung mittels eines Basiszustellsystems bis in eine vorgebbare Radialposition zugestellt und ausgehend von der durch das Basiszustellsystem vorgegebenen Radialposition erfolgt eine radiale Zustellung bzw. ein radiales Zurückziehen der Schneidgruppe mittels eines unabhängig von dem Basiszustellsystem betätigbaren dynamischen Feinzustellsystems.

**[0018]** Die Zustellbewegung der Schneidstoffkörper der Schneidgruppe wird somit mit Hilfe eines Schneidgruppen-Zustellsystems gesteuert, welches in zwei unabhängig voneinander betätigbare Teilsystem unterteilt ist. Das Basiszustellsystem kann so ausgelegt sein, dass bei einer Grobzustellung die materialabtragenden Bereiche der Schneidstoffkörper mit Hilfe des Basiszustellsystems der Innenfläche der Bohrung bei einem relativ großen ersten Verstellweg bis auf einen geringen Abstand oder bis zur Berührung angenähert werden können. Das dynamische Feinzustellsystem kann demgegenüber für die Erzeugung kurzzeitiger Wechsel des Zustelldruckes und relativ zu dem ersten Verstellweg kurze zweite Verstellwege ausgelegt sein.

**[0019]** Da das Feinzustellsystem so konstruiert sein kann, dass nur relativ niedrige bewegte Massen erforderlich sind, kann das Feinzustellsystem hochdynamisch ausgelegt sein. Bei manchen Ausführungsformen erzeugt das Feinzustellsystem während einer einzigen Umdrehung des Honwerkzeugs mehrere, insbesondere inzwischen zwei und zehn, periodische oder aperiodische Wechsel zwischen Anstieg und Abnahme der Zustellkraft. Dadurch können auch komplex gekrümmte und mit einer Vielzahl von lokalen Maxima und Minima versehene Konturen der Bohrungsinnenwand mit hoher Genauigkeit erzeugt werden.

**[0020]** Bei der Grobzustellung kann die Schneidgruppe mittels des Basiszustellsystems beispielsweise über einen ersten Verstellweg zugestellt werden, der mindestens 1 mm, vorzugsweise mindestens 4 mm beträgt. Die Schneidgruppe kann dagegen mittels des Feinzustellsystems über einen zweiten Verstellweg verstellt werden, der im Bereich unterhalb 100 µm liegt, insbesondere im Bereich von 20 µm und 60 µm im Radius.

**[0021]** Bei manchen Ausführungsformen wird das Basiszustellsystem über einen außerhalb des Honwerkzeugs angeordneten Antrieb und das Feinzustellsystem über einen innerhalb des Honwerkzeugs angeordneten Antrieb betätigt. Der Antrieb des Basiszustellsystems kann sich beispielsweise in der Honmaschine befinden. Bei dem innerhalb des Honwerkzeugs angeordneten Antrieb kann es sich beispielsweise um einen elektromechanischen Antrieb oder um einen piezoelektrischen Antrieb handeln.

**[0022]** Bei einer Weiterbildung des Verfahrens wird das Honwerkzeug zur im Wesentlichen starren Führung der Axialbewegung innerhalb der Bohrung axial gleitbeweglich und quer zur Werkzeugachse im Wesentlichen unbeweglich abgestützt. Dadurch ist es möglich, auf außerhalb des Werkstückes anzuordnende Führungseinrichtungen zu verzichten.

**[0023]** Bei einer Weiterbildung wird hierzu ein Honwerkzeug verwendet, welches einen Satz von um den Umfang des Honwerkzeuges verteilten Führungsleisten zur axialen Führung des Honwerkzeuges in der Bohrung umfasst, die vorzugsweise unabhängig von der Schneidgruppe in Richtung auf die Innenfläche der Bohrung zu stellbar sind, wobei die im Wesentlichen starre Führung der Axialbewegung dadurch erreicht wird, dass die Führungsleisten während der Bewegung des Honwerkzeuges in der Bohrung an die Innenfläche der Bohrung angedrückt werden.

**[0024]** Bei dieser Verfahrensvariante zentrieren die Führungsleisten das Honwerkzeug innerhalb der Bohrung. Die Führungsleisten sind vorzugsweise so ausgelegt, dass sie kaum einen oder nur einen geringen Werkstoffabtrag erzeugen, was hier als "im Wesentlichen nicht-schneidende Führungsleisten" bezeichnet wird. Die Führungsleisten können zumindest in den im Kontakt mit der Innenfläche der Bohrung tretenden Bereichen aus einem Kunststoff, aus Gummi, einem Elastomer geeigneter Härte (z.B. Vulkollan®), einem Metall, einem Hartmetall oder aus einer Keramik bestehen oder es kann sich um Honleisten mit einem hohen Schneidstoffanteil handeln.

**[0025]** Es ist auch möglich, dass die im Wesentlichen starre Führung der Axialbewegung des Honwerkzeuges dadurch erreicht wird, dass das Honwerkzeug außerhalb der Bohrung des Werkstückes axial beweglich und quer zur Werkzeugachse im Wesentlichen unbeweglich geführt wird. Je nach Typ der Bohrung kann hierzu eine einseitige Führung ausschließlich an der Eintrittsseite der Bohrung, eine einseitige Führung ausschließlich an der der Eintrittsseite gegenüberliegenden Austrittsseite der Bohrung (bei Durchgangsbohrungen), oder eine beidseitige Führung sowohl an der Eintrittsseite, als auch an der gegenüberliegenden Austrittsseite vorgesehen sein. Eine gegen Querbewegung starre Kopplung des Honwerkzeuges an eine gegen Querbewegung starr geführte Honspindel kann ggf. ebenfalls ausreichen, die starre Führung der Axialbewegung des Honwerkzeuges zu gewährleisten. Dann kann ggf. auf Führungselemente im Bereich des Honwerkzeuges völlig verzichtet werden. Die ausschließlich externe Führung der Axialbewegung des Honwerkzeuges erfordert höchste Genauigkeit bei der relativen Positionierung zwischen Werkstück und Honwerkzeug.

**[0026]** Um eine möglichst flexible Steuerung der Form des Bohrungsquerschnittes im bearbeitenden Bereich zu erhalten, ist bei einer Variante vorgesehen, dass ein Honwerkzeug verwendet wird, das eine einzige separat zu stellbare Schneidgruppe hat, die vorzugsweise einen Eingriffswinkel von weniger als 90° besitzt. Der Begriff "Eingriffswinkel" beschreibt hier den Winkelbereich entlang des Umfanges des Honwerkzeuges, in dem Schneidstoffkörper der Schneidgruppe in Eingriff mit der Bohrungswandung stehen. Häufig ist es günstig, wenn der Eingriffswinkel zwischen ca. 1° und ca. 70° liegt, er kann beispielsweise zwischen 5° und 60° liegen und/

oder zwischen 20° und 45°. Je kleiner der Eingriffswinkel ist, desto exakter ist eine komplexe Form der Kontur der Innenfläche durch Steuerung der Zustellkraft in Abhängigkeit von der Winkelposition des Honwerkzeuges zu erreichen.

**[0027]** Es können auch Honwerkzeuge mit mehreren unabhängig voneinander zustellbaren Schneidgruppen verwendet werden, sofern durch die Steuerung sichergestellt ist, dass der Anpressdruck einer Schneidgruppe unabhängig vom Anpressdruck anderer, an anderen Umfangspositionen angeordneter Schneidgruppen ist. Wird beispielsweise ein Honwerkzeug mit vier jeweils um 90° umfangsversetzt angeordneten Schneidgruppen verwendet, so kann deren Zustelldruck so gesteuert werden, dass sich jeweils um 90° phasenversetzte Zustelldruckverläufe zwischen um 90° umfangsversetzte Schneidgruppen ergeben. Dadurch kann erreicht werden, dass während einer einzigen Umdrehung des Honwerkzeuges der gleiche Umfangsabschnitt der Bohrungsinnenwand durch die vier Schneidgruppen zeitlich nacheinander materialabtragend überarbeitet wird. Hierdurch kann die Abtragsleistung insgesamt gesteigert werden.

**[0028]** Mit Hilfe des Verfahrens können zusätzlich zu den auch durch herkömmliche Verfahren erzeugbaren, unrunder Bohrungsformen bisher nicht mögliche unrunder Bohrungsformen durch Honen erzeugt werden. Bei einer Ausführungsform wird die Steuerung der Zustellkraft so durchgeführt, dass die Zustellkraft bzw. der Anpressdruck bei einer vollen Umdrehung des Honwerkzeuges um die Werkzeugachse in einem vorgegebenen axialen Bohrungsbereich mehr als zwei, insbesondere mehr als vier lokale Maxima und Minima durchläuft. Die lokalen Maxima bzw. Minima ergeben sich durch einen periodischen oder aperiodischen Wechsel zwischen Anstieg und Abnahme der Zustellkraft bei einer Werkzeugumdrehung. Betrachtet man beispielsweise eine 4-fach symmetrische Kreisformabweichung in einem axialen Bohrungsbereich, so würde die Zustellkraft eines Honwerkzeuges mit einer einzigen einseitig angeordneten Schneidgruppe bei einer Umdrehung des Honwerkzeuges vier gleichmäßig beabstandete Maxima und vier dazwischen liegende, ebenfalls gleichmäßig beabstandete lokale Minima der Zustellkraft erfordern, um die 4-fach symmetrische Form ausgehend von einer ideal kreiszylindrischen Form zu erzeugen. Ist die Steuerung der Honmaschine dagegen so konfiguriert, dass auch deutlich höhere Anzahlen lokaler Maxima und Minima erzeugbar sind, so kann beispielsweise eine komplexe Bohrungsquerschnittsform erzeugt werden, deren Grundform der 4-fach symmetrischen Form ähnelt, der jedoch kurzweilige Durchmesser- bzw. Radiusschwankungen nach Art von "Oberwellen" überlagert sind.

**[0029]** In Axialrichtung der Bohrung können unterschiedliche nicht-runde und kreisrunde axiale Bohrungsabschnitte abwechseln bzw. ineinander übergehen. Dies kann durch gleichzeitige Variation des Zustelldruckes in Abhängigkeit von der Winkellage und von der Hubposi-

tion (Axialposition) erreicht werden. Auf diese Weise können auch in sich verdrillte Bohrungsformen erreicht werden. Eine solche Bohrungsform ergibt sich beispielsweise dann, wenn an einer Bohrungsinnenfläche eine lokale Ausbeulung (lokale Radiusvergrößerung) im Wesentlichen entlang einer Schraubenlinie in axialer Richtung verläuft.

**[0030]** Bei manchen Verfahrensvarianten wird eine nicht-kreiszylindrische Bohrungsform erzeugt, die von einer bezogen auf die Bohrungsschse 2-zählig radialsymmetrischen Form signifikant abweicht.

**[0031]** Die erzielten Formabweichungen von einer bezogen auf die Bohrungsschse 2-zählig radialsymmetrischen Form liegen dabei deutlich außerhalb der üblichen, bei den hier betrachteten Honverfahren geltenden Toleranzen des Zylindritätsfehlers, der in vielen Fällen bei weniger als 10 µm liegen soll.

**[0032]** Bei bevorzugten Varianten entsprechen die Formabweichungen von einer bezogen auf die Bohrungsschse 2-zählig radialsymmetrischen Form einem Zylindritätsfehler von deutlich mehr als 10 µm, wobei der Zylindritätsfehler vorzugsweise bei mehr als 20 µm, insbesondere zwischen 20 µm und ca. 60 µm liegt. Der Zylindritätsfehler wird hier durch die Zylinderformtoleranz beschrieben. Die zugehörige Toleranzzone wird durch zwei zur Bohrungsschse und zueinander koaxiale, die Bohrungsinnenwand innen oder außen berührende Zylinder bestimmt, wobei der Radialabstand zwischen den beiden Zylindern ein Maß für die Zylindergüte darstellt. Für die Zwecke dieser Anmeldung wird der Zylindritätsfehler  $\Delta Z$  definiert als  $\Delta Z = (D_A - D_I) / 2$ , wobei  $D_A$  der Durchmesser des die Bohrungsinnenwand außen berührenden Zylinders und  $D_I$  der Durchmesser des die Bohrungswand innen berührenden Zylinders ist.

**[0033]** Ein zur Durchführung des Verfahrens geeignetes Honwerkzeug hat einen Werkzeugkörper, der eine Werkzeugachse definiert; eine an dem Werkzeugkörper angebrachte Schneidgruppe mit mindestens einem Schneidstoffkörper zum materialabtragenden Bearbeiten der Innenfläche; und ein der Schneidgruppe zugeordnetes Schneidgruppen-Zustellsystem zur Ausübung einer radial zur Werkzeugachse wirkenden Zustellkraft auf die Schneidkörper der Schneidgruppe, wobei die Schneidstoffkörper der Schneidgruppe ausschließlich an einer Seite des Honwerkzeuges angeordnet sind und wobei dem Honwerkzeug eine Axialführungseinrichtung zur im Wesentlichen starren Führung der Axialbewegung des Honwerkzeuges im Wesentlichen parallel zu der Bohrungsschse zugeordnet ist. Die Axialführungseinrichtung ist dabei zur Aufnahme der durch die angedrückte Schneidgruppe erzeugten Reaktionskraft ausgelegt.

**[0034]** Das Honwerkzeug zeichnet sich dadurch aus, dass das auf die Schneidgruppe wirkende Schneidgruppen-Zustellsystem eine Kombination eines Basiszustellsystems mit einem dynamischen Feinzustellsystem umfasst.

**[0035]** Bei einer Ausführungsform ist das Basiszustellsystem für die Schneidgruppe so ausgelegt, dass damit

die materialabtragenden Bereiche der Schneidstoffkörper der Bohrungsinnenwand bis auf einen geringen Abstand oder bis zur Berührung angenähert werden können (Grobzustellung). Der radiale Verstellweg des beispielsweise mechanisch, elektromechanisch oder hydraulisch betreibbaren Basiszustellsystems kann im Bereich einer oder mehrerer Millimeter (z.B. bis zu 4 mm) liegen. Das dynamische Feinzustellsystem kann dagegen auf kurzzeitige Lastwechsel bzw. kurzzeitige Wechsel des Zustelldruckes und relativ kurze Verstellwege optimiert sein, um auch bei schnell drehendem Honwerkzeug bei einer vollen Umdrehung des Honwerkzeuges ggf. viele Lastwechsel durchführen zu können. Typische Verstellwege des Feinzustellsystems können im Bereich von weniger als 100 µm liegen, beispielsweise im Bereich zwischen 20 µm und 60 µm radialem Verstellweg. Bei einer Ausführungsform umfasst das dynamische Feinzustellsystem ein piezoelektrisches System, das z.B. zwischen einem durch das Basiszustellsystem in eine vorgebbare Radialposition verstellbaren Trägerelement und den Schneidstoffkörpern der Schneidgruppe angeordnet sein kann. Die Schneidstoffkörper können gruppenweise oder einzeln, ggf. auch phasenversetzt zueinander angetrieben werden.

**[0036]** Eine Kombination eines Basiszustellsystems, z.B. mit Antrieb in der Honmaschine, mit einem dynamischen Feinzustellsystem, dessen Antrieb in das Honwerkzeug integriert ist, ist möglich.

**[0037]** Insbesondere kann das Honwerkzeug eine einzige Schneidgruppe aufweisen, die vorzugsweise einen Eingriffswinkel von weniger als 90° besitzt. Ein solches Honwerkzeug ist so ansteuerbar, dass bei einem Eingriff der Schneidkörper dieser Schneidgruppe an der Innenwand der Bohrung in einem Umfangsbereich von mindestens 270° des Umfanges keine Schneidstoffkörper gleichzeitig in materialabtragendem Eingriff mit der Bohrungswandung sind.

**[0038]** Bei manchen Ausführungsformen hat die Axialführungseinrichtung Führungsleisten für eine axiale Führung des Honwerkzeuges in der Bohrung, wobei die Führungsleistungen mittels einer Führungsleisten-Zustelleinrichtung in Richtung auf die Innenfläche der Bohrung zustellbar sind. Vorzugsweise sind die Führungsleisten unabhängig von der Schneidgruppe in Richtung auf die Bohrungsinnenfläche zustellbar.

**[0039]** Bei einer Ausführungsform umfasst die Axialführungseinrichtung einen Satz von um den Umfang des Honwerkzeuges verteilten Führungsleisten zur axialen Führung des Honwerkzeuges in der Bohrung, wobei die Führungsleisten mittels einer Führungsleisten-Zustelleinrichtung unabhängig von den Schneidstoffkörpern der Schneidgruppe in Richtung auf die Innenfläche der Bohrung zustellbar sind. Hierbei kann beispielsweise ein kardanisch, doppelkardanisch oder schwimmend gelagertes Honwerkzeug mit Doppelaufweitung, d.h. mit zwei unabhängig voneinander aktivierbaren Zustellsystemen eingesetzt werden. Mit einem Zustellsystem werden die Führungsleisten aktiviert, die das Honwerkzeug in der

Bohrung zentrieren. Mit dem anderen Zustellsystem wird eine auf einer Seite des Honwerkzeuges angebrachte Scheidgruppe aktiviert, die in ihrem Eingriffswinkelbereich den lokal begrenzten Materialabtrag bewirkt. Die Zustellkraft der Schneidstoffkörper der Schneidgruppe, die mit einem entsprechenden Anpressdruck der Schneidstoffkörper korrespondiert, wird dann in Abhängigkeit von Hublage und/oder Winkelposition des Honwerkzeuges gesteuert, um in vorgebbaren Bereichen entlang des Umfanges und in Axialrichtung der Bohrung einen gezielten Materialabtrag zu bewirken. Die Reaktionskraft der in Schneideingriff mit der Bohrungsinnenwand stehenden Schneidstoffkörper wird auf der gegenüberliegenden Seite von den Führungsleisten ohne Auswirkung auf die Bohrungsform abgefangen. Der Begriff "Führungsleisten" umfasst insbesondere leistenförmige Führungselemente, die die Zentrierung gewährleisten. Auch andersartig geformte Führungselemente sollen erfasst sein, soweit sie die Funktion der im Wesentlichen starren Führung des Honwerkzeuges durch Abstützung an der Innenwand der Bohrung erfüllen.

**[0040]** Das auf die Schneidgruppe wirkende Schneidgruppen-Zustellsystem kann durch einen in der Honmaschine angebrachten Antrieb gesteuert werden, der über ein Zustellgestänge bzw. über ein Getriebe auf die Schneidstoffkörper der Schneidgruppe wirkt und deren Zustellkraft bestimmt. In diesem Fall ist das Schneidgruppen-Zustellsystem des Honwerkzeuges zur Übertragung der Zustellkraft eines außerhalb des Honwerkzeuges angeordneten Antriebes ausgebildet. Es ist auch möglich, dass das Schneidgruppen-Zustellsystem für die Schneidgruppe einen innerhalb des Honwerkzeuges angeordneten Antrieb besitzt.

**[0041]** Bei den Zustellsystemen sowohl für die Führungsleisten als auch für die Schneidkörper der Schneidgruppe können hydraulische, elektromechanische, piezoelektrische, pneumatische und andere geeignete Antriebe eingesetzt werden.

**[0042]** Die im Wesentlichen starre Axialführung des Honwerkzeuges wird bei manchen Ausführungsformen dadurch erreicht, dass die Axialführungseinrichtung mindestens eine während des Honens außerhalb der Bohrung anzuordnende Führungseinheit zur im Wesentlichen starren Führung der Axialbewegung des Honwerkzeuges umfasst. Es können Honwerkzeuge mit starrer Werkzeugführung eingesetzt werden. In diesem Fall wird nur das Schneidgruppen-Zustellsystem zur Betätigung der einseitig an dem Honwerkzeug angebrachten Schneidgruppe benötigt. Die Reaktionskräfte der angeordneten Schneidstoffkörper werden von der starren Werkzeugführung aufgenommen. In diesem Fall können somit Honwerkzeuge mit einfacher Aufweitung verwendet werden.

**[0043]** Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird die komplexe, unrunde und ggf. unsymmetrische Bohrungsform ausgehend von einer durch einen Vorbearbeitungsschritt erzeugten Bohrungsform durch Honen erzeugt. Diese Formgebung durch Honen führt in der Re-

gel noch nicht zu der für die Innenfläche der Bohrung gewünschten Oberflächenstruktur, die die tribologischen Eigenschaften der Innenfläche entscheidend mitbestimmt. Daher wird bei einer bevorzugten Ausführungsform nach der formerzeugenden Honoperation zur Erzeugung der unrunder Bohrungsform mindestens eine im Wesentlichen formneutrale (d.h. die Makroform der Bohrung nicht wesentlich verändernde) Bearbeitungsoperation zur Bearbeitung oberflächennaher Bereiche der Innenfläche durchgeführt. Dabei kann es sich z.B. um eine sog. "Plateauhonbearbeitung" handeln, bei der zur Verbesserung des Motoreinlaufes die Spitzen des Rauheitsprofils geschnitten werden. Auch ein Zwischenschritt oder eine Abfolge von Zwischenhonen und Plateauhonen ist möglich.

**[0044]** Zur Verbesserung der Homogenität der weitgehend formneutralen Bearbeitungsschritte können bekannte Systeme verwendet werden, bei denen mittels einer metallischen Feder oder dergleichen die Schneidstoffkörper an die Innenfläche der Bohrung angelegt werden. Bei üblichen Plateauhonwerkzeugen sind maximal 5 bis 7 separate Schneidstoffkörper vorhanden, welche auf einem metallischen Federsystem gestützt sind. Diese Systeme sind bei Formfehlern von weniger als ca. 10  $\mu\text{m}$  auch im Rahmen erfindungsgemäßer Verfahren einsetzbar. Sind jedoch die Formfehler (insbesondere Zylindrizitätsfehler) einer gezielten unrunder bearbeiteten Bohrung deutlich größer, so wird vorzugsweise bei der im Wesentlichen formneutralen Bearbeitungsoperation die Innenfläche mit einer Vielzahl von relativ zueinander beweglichen, elastisch gelagerten Schneidstoffkörpern bearbeitet, die in Umfangsrichtung des Honwerkzeuges eine maximale Ausdehnung von weniger als 3 % des Wirkumfanges des Honwerkzeuges haben. Die Schneidstoffkörper können auch in Axialrichtung sehr klein sein, ihre axiale Länge kann z.B. weniger als 10 % der Honwerkzeuflänge betragen. Durch ein Honwerkzeug mit derart stark segmentierten Schneidstoffgruppen ist eine flächige Anlage der kleinen Schneidstoffkörper auch an extrem unrunder formgehonte Bohrungsinnenflächen abgesichert, da die relativ kleinen, elastische gelagerten Schneidstoffkörper der Innenkontur der Bohrung unter Aufrechterhaltung der flächigen Anlage folgen können.

**[0045]** Es kann ein Werkstück hergestellt werden mit mindestens einer Bohrung, die eine gehonte Innenfläche aufweist, wobei die Bohrung in mindestens einem axialen Bohrungsabschnitt eine nicht-kreiszyklische Bohrungsform hat, die von einer bezogen auf die Bohrungsachse 2-zählig radialsymmetrischen Form signifikant abweicht und insbesondere einen Zylindrizitätsfehler von mehr als 20  $\mu\text{m}$  aufweist. Insbesondere kann es sich bei dem Werkstück um einen Zylinderblock für eine Brennkraftmaschine handeln, wobei die Bohrung eine Zylinderbohrung des Zylinderblockes ist und die Formabweichung so ausgelegt ist, dass die Zylinderbohrung im betriebsfertig montierten Zustand oder im Betriebszustand des Zylinderblockes mit auf dem Zylinderblock aufge-

schraubten Zylinderkopf einen Zylindrizitätsfehler von weniger als ca. 10  $\mu\text{m}$  aufweist.

**[0046]** Eine zur Durchführung des Verfahrens geeignete Honmaschine hat eine Zustellkraft-Steuerungseinrichtung zur Steuerung der Zustellkraft einer an einem Honwerkzeug angebrachten Schneidgruppe in Abhängigkeit von der der Winkelposition und ggf. von der Hublage des Honwerkzeuges in einer Bohrung, wobei die Zustellkraft-Steuerungseinrichtung derart konfiguriert oder konfigurierbar ist, dass die Bohrung zumindest in einem axialen Bohrungsabschnitt eine nicht-kreiszyklische Bohrungsform erhält, die von einer bezogen auf die Bohrungsachse 2-zählig radialsymmetrischen Form signifikant abweicht. Die Zustellkraft-Steuerungseinrichtung zur Steuerung der Zustellkraft einer einseitig an einem Honwerkzeug angebrachten Schneidgruppe kann dabei insbesondere so konfiguriert sein, dass die Zustellkraft bei einer vollen Umdrehung des Honwerkzeuges um die Werkzeugachse in einem vorgegebenen axialen Bohrungsbereich mehr als zwei, insbesondere mehr als vier lokale Maxima und Minima durchläuft.

**[0047]** Die vorstehenden und weiteren Merkmale gehen außer aus den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und den Zeichnungen hervor. Dabei können die einzelnen Merkmale jeweils für sich alleine oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen bei einer Ausführungsform der Erfindung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein und vorteilhafte sowie für sich schutzfähige Ausführungsformen darstellen. Bevorzugte Ausführungsformen werden an Hand der beigefügten Zeichnungen erläutert.

Fig. 1 zeigt eine schematische Perspektivansicht eines 4-Zylinder-Motorblockes bei der Bearbeitung mit einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Honwerkzeuges;

Fig. 2 zeigt eine schrägperspektivische Ansicht einer Ausführungsform eines Honwerkzeuges mit Führungsleisten und einer einseitig an dem Honwerkzeug angebrachten Schneidgruppe mit zwei leistenförmigen Schneidstoffkörpern;

Fig. 3 zeigt eine schrägperspektivische Ansicht einer anderen Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Honwerkzeuges mit einer einseitig angeordneten Schneidgruppe mit zwei leistenförmigen Schneidstoffkörpern und einer extern anbringbaren Axialführungseinrichtung;

Fig. 4 zeigt einen schematischen Querschnitt durch eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Honwerkzeuges mit Doppelaufweitung, bei dem das Schneidgruppen-Zustellsystem ein Basissystem zur Grobzustellung und ein dynamisches Feinzustellsystem umfasst;

Fig. 5 zeigt eine schematische schrägperspektivi-

sche Ansicht eines Schneidgruppen-Zustellsystems mit einem Basiszustellsystem für die Grobzustellung und einem dynamischen Feinzustellsystem;

Fig. 6 zeigt schematische Messdiagramme einer zylindrischen Bohrung mit geringem Zylindrizitätsfehler;

Fig. 7 zeigt schematische Messdiagramme einer Zylinderbohrung mit großem Zylindrizitätsfehler und signifikanter Abweichung von einer 2-zähligen Radialsymmetrie;

Fig. 8 zeigt schematische Diagramme zur Erläuterung des Zusammenhangs zwischen der Geometrie einer Bohrung mit großem Zylindrizitätsfehler und der zur Erzeugung der unrunder Bohrungsform erforderlichen Variation der Zustellkraft über die Winkelposition einer einseitig an einem Honwerkzeug angebrachten Schneidgruppe;

Fig. 9 zeigt eine schematische Draufsicht einer Ausführungsform einer Schneidgruppe für die Plateauhonbearbeitung einer unrunder Zylinderbohrung mit großem Zylindrizitätsfehler; und

Fig. 10 zeigt einen schematischen Querschnitt durch die Schneidgruppe in Fig. 9.

**[0048]** Fig. 1 zeigt in schematischer, schrägperspektivischer Ansicht einen Zylinderblock (Motorblock) 100 für eine 4-Zylinder-Brennkraftmaschine. In dem aus einem Gusswerkstoff oder aus einem Leichtmetall-Werkstoff bestehenden Zylinderblock sind vier achsparallele Zylinderbohrungen 101, 102, 103, 104 in gleichen Abständen in Reihe so nebeneinander angeordnet, dass ihre zentralen Bohrungachsen 111 in einer gemeinsamen Ebene (Zylinderebene 112) liegen. Von der Oberseite des Zylinderblockes her sind mit Innengewinde versehene Bohrungen 115 achsparallel zu den Zylinderkopfbohrungen so eingebracht, dass jeweils vier dieser Bohrungen gleichmäßig um den Umfang einer Zylinderbohrung verteilt sind. Die Bohrungen 115 dienen zur Aufnahme von Zylinderkopfschrauben, mit deren Hilfe nach Fertigstellung der Bearbeitung des Zylinderblockes der zugehörige Zylinderkopf auf den Zylinderblock 100 unter Zwischenlage einer Zylinderkopfdichtung aufgeschraubt wird.

**[0049]** Es ist erkennbar, dass es sich bei dem Zylinderblock 100 um ein strukturell uneinheitliches Werkstück handelt, bei dem insbesondere jede der Zylinderbohrungen 101-104 eine unterschiedliche Werkstückumgebung hat, insbesondere hinsichtlich der Wandstärke im Bereich der Zylinderbohrungen und auch durch unterschiedliche Anbindungen an die Kühlmittelkanäle des motorblockinternen Kühlsystems. Beispielsweise haben die innen liegenden Zylinderbohrungen 102 und 103 des zweiten und dritten Zylinders jeweils zwei in der

Zylinderebene liegenden Nachbar-Zylinderbohrungen, während die außenliegenden Zylinderbohrungen (Zylinder 1 und 4) nur eine jeweils innenliegende Nachbar-Zylinderbohrung haben und an der gegenüberliegenden Seite an dickere Wandabschnitte des Werkstückes grenzen.

**[0050]** Das durch den Zylinderblock gebildete Werkstück 100 ist auf einem nicht-gezeigten Werkstücktisch einer nicht näher dargestellten Honmaschine mit zwei Honspindeln aufgespannt, wobei nur eine Honspindel 120 gezeigt ist. Die durch die Innenflächen 130 der Zylinderbohrungen gebildeten Zylinderlaufflächen werden auf der Honmaschine einer qualitätsbestimmenden Endbearbeitung unterzogen, bei der sowohl die Makroform der Zylinderlaufflächen, als auch deren Oberflächentopographie durch geeignete Honprozesse erzeugt wird. Die Honmaschine umfasst für jede ihrer Honspindeln einen Spindelmotor zur Drehung der Honspindel um ihre Längsachse sowie einen Hubantrieb zur Erzeugung einer Vertikalbewegung der Honspindel beim Einführen des Honwerkzeuges in das Werkstück bzw. beim Herausziehen aus dem Werkstück. Der Hubantrieb wird während der Bearbeitung so angesteuert, dass das Honwerkzeug innerhalb der Bohrung eine vertikale Hin- und Herbewegung ausführt, die sich der Rotationsbewegung des Werkstückes überlagert (siehe Pfeile).

**[0051]** Am unteren Ende der Honspindel ist eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Honwerkzeuges 150 angekoppelt, bei dem es sich um ein kardanisch gelagertes Honwerkzeug mit Doppelaufweitung handelt. Das Honwerkzeug hat einen Werkzeugkörper 155, der an einer Seite seines Umfangs eine durch eine einzige Honleiste gebildete Schneidgruppe 160 trägt, die mit Hilfe eines nicht näher dargestellten Schneidgruppen-Zustellsystems in radialer Richtung zur Bohrungswand zugestellt bzw. zurückgezogen werden kann. Weiterhin ist am Werkzeugkörper ein Satz von um den Umfang des Honwerkzeuges ungleichmäßig verteilten Führungsleisten 170 vorgesehen, die mit Hilfe eines Führungsleisten-Zustellsystems unabhängig von der Schneidgruppe 160 in Richtung auf die Innenfläche der Bohrung zugestellt werden können. Bei Anliegen der im Wesentlichen nicht-schneidenden Führungsleisten an der Innenfläche der Bohrung ergibt sich eine im Wesentlichen starre Führung der Axialbewegung des Honwerkzeuges innerhalb der Bohrung parallel zur Bohrungsschse 113, so dass die Führungsleisten eine Axialführungseinrichtung für das Honwerkzeug bilden.

**[0052]** Die Zustellbewegung sowohl der Führungsleisten als auch der Schneidgruppe sowie die jeweils eingebrachte Zustellkraft werden mit Hilfe einer Zustellkraft-Steuerungseinrichtung 180 der Honmaschine unabhängig voneinander gesteuert, wobei insbesondere die Zustellkraft der Schneidgruppe 160 hochgradig dynamisch in Abhängigkeit von der Hubposition des Honwerkzeuges (gemessen entlang der Bohrungsschse) und der Winkelposition der Schneidgruppe (in Umfangsrichtung) in schnellem Wechseln gezielt variiert werden kann.

**[0053]** Die Fig. 2 bis 4 zeigen Elemente verschiedener Ausführungsformen erfindungsgemäßer Honwerkzeuge, die insbesondere für die Bearbeitung von Zylinderlaufflächen in Zylinderblöcken ausgelegt sind. Das Honwerkzeug 200 in Fig. 2 hat eine auf einer Seite der Werkzeugachse 201 angeordnete Schneidgruppe 260 mit zwei am Umfang des Werkzeugkörpers 255 umfangsversetzt angebrachten, durch Honleisten gebildeten Schneidstoffkörper 261, die während des Honens in einem Eingriffswinkelbereich 265 von ca. 45° an der Bohrungsinnenwand angreifen. Ihre axiale Länge beträgt zwischen 30% und 50% der axialen Länge 266 des Honwerkzeuges. Weiterhin umfasst das Honwerkzeug eine integrierte Axialführungseinrichtung, die im Beispielsfall durch eine Anzahl von gleichmäßig um den Umfang des Honwerkzeug verteilten Führungsleisten 270 gebildet wird, die unabhängig von den Honleisten 261 der Schneidgruppe 260 radial zustellbar sind. Die Führungsleisten erstrecken sich im Wesentlichen über die gesamte axiale Länge 266 des Honwerkzeuges, die Honleisten 261 sind im axialen Mittelbereich (bei anderen Ausführungsformen im unteren Endbereich) der durch die Führungsleisten definierten Abstützlänge angebracht.

**[0054]** Das Honwerkzeug 300 in Fig. 3 hat eine auf einer Seite der Werkzeugachse 301 angeordnete Schneidgruppe 360 mit zwei am Umfang des Werkzeugkörpers 355 umfangsversetzt angebrachten, durch Honleisten gebildeten Schneidstoffkörper 361, die während des Honens in einem Eingriffswinkelbereich von ca. 45° an der Bohrungsinnenwand angreifen. Ihre axiale Länge beträgt zwischen 60% und 80% der axialen Länge des Honwerkzeuges. Es gibt keine Führungsleisten. Die Axialführungseinrichtung 370 des Honwerkzeuges umfasst einen am spindelseitigen Ende des Werkzeugkörpers angebrachten Führungsabschnitt 371 mit kreiszylindrischer Aussenfläche, der in einer außerhalb des Werkstückes angeordneten und an der Honmaschine befestigten Führungseinheit 372 (obere Führung) axial und rotatorisch geführt ist.

**[0055]** Fig. 4 zeigt einen senkrecht zur Werkzeugachse 401 geführten Schnitt durch ein Honwerkzeug 400, bei dem es sich um eine Variante des in Fig. 2 gezeigten doppelt aufweitbaren Honwerkzeuges handelt. Die einseitig der Werkzeugachse 401 angebrachte Schneidgruppe 460 umfasst zwei um ca. 80° bis 90° winkelvesetzt angeordnete und separat ansteuerbare Schneidstoffkörper 461, 462, die einen Eingriffswinkelbereich 465 von ca. 90° definieren. Die integrierte Axialführungseinrichtung umfasst sechs um den Umfang des Werkzeugkörpers verteilte Führungsleisten 471-476, die mit Hilfe eines kraftbegrenzten Führungsleisten-Zustellsystems 480 in radialer Richtung auf die Bohrungsinnenwand zugestellt werden können, um das Werkzeug axial gleitbeweglich, aber in Querrichtung zur Bohrungssachse im Wesentlichen starr innerhalb der Bohrung zu führen. Die Führungsleisten bestehen aus einem harten, abriebsfesten Elastomer (hier Vulkollan®), haben eine im Wesentlichen glatte Andruckfläche und üben bei der axi-

al oszillierenden und rotierenden Bewegung des Honwerkzeuges in der Zylinderbohrung keinen Materialabtrag aus.

**[0056]** Die Schneidgruppe 460 ist einseitig an dem Honwerkzeug angebracht. Dies bedeutet insbesondere, dass alle bei der Honbearbeitung in materialabtragendem Eingriff mit der Bohrungsinnenwand stehenden Schneidstoffkörper auf der gleichen Seite der werkzeughalbierenden Werkzeugebene 490 liegen, die die Werkzeugachse 401 enthält und senkrecht auf der Winkelhalbierenden der Schneidgruppe 460 steht. Auf der Seite der Schneidgruppe befindet sich im Wesentlichen nur eine, zwischen den Schneidstoffkörper angebrachte Führungsleisten 471 sowie ein Teil der senkrecht dazu ausgerichteten Führungsleisten. Auf der der Schneidgruppe im Bezug auf die Werkzeugachse 401 diametral gegenüberliegenden Seite ist eine hohe räumliche Dichte von Führungsleisten entsprechend einer vergleichsweise großen Andruckfläche vorgesehen, so dass sich die bei Andruck der Schneidstoffkörper an die Bohrungsinnenwand entstehende, auf die gegenüberliegenden Führungsleisten 473 - 475 wirkende Gegenkraft in einen relativ niedrigen Anpressdruck dieser Führungsleisten an der Bohrungsinnenwand umsetzt, wodurch eine die Bohrungswand schonende, leichtgängig Axialführung des Honwerkzeuges innerhalb der Bohrung erreicht wird.

**[0057]** Die Zustellbewegung der Schneidstoffkörper 461 der Schneidgruppe 460 wird mit Hilfe eines Schneidgruppen-Zustellsystems 450 gesteuert, welches in zwei unabhängig voneinander betätigbare Teilsysteme unterteilt ist. Ein Basiszustellsystem 452 hat einen relativ großen Verstellweg von mehreren Millimetern und dient dazu, die radialen Außenflächen der Schneidstoffkörper 461, 462 nach Anlegen der Führungsleisten an die Bohrungsinnenwand bis auf wenige Mikrometer an die Bohrungsinnenwand zuzustellen. Die durch diese Verstellbewegung erreichte radiale Position von Trägerelementen 453 des Basiszustellsystems bleibt während der Honbearbeitung unverändert. Der mechanische Antrieb für das Basiszustellsystem sitzt in der Honmaschine, die Antriebsbewegung wird durch geeignete Zustellelemente inklusive einem koaxial in dem Werkzeugkörper sitzenden Zustellkonus (vgl. Fig. 5) bewirkt.

**[0058]** Weiterhin ist ein dynamisches Feinzustellsystem 454 vorgesehen, welches ausgehend von der durch das Basiszustellsystem vorgegebenen Radialposition eine radiale Zustellung bzw. ein radiales Zurückziehen der Schneidstoffkörper erlaubt. Als Antrieb des Feinzustellsystems dienen piezoelektrische Elemente 455, die zwischen den Trägerelementen 453 des Basiszustellsystems und den Schneidstoffkörpern angebracht sind und durch Anlegen einer elektrischen Spannung so angesteuert werden können, dass sie eine dynamische Abstandsänderung zwischen den Trägerelementen des Basiszustellsystems und den Schneidstoffkörpern ermöglichen. Das durch niedrige bewegte Massen gekennzeichnete Feinzustellsystem ist auf diese Weise hoch dynamisch ausgelegt und erlaubt während einer einzi-

gen Umdrehung des Honwerkzeuges mehrere, z.B zwischen zwei und zehn, periodische oder aperiodische Wechsel zwischen Anstieg und Abnahme der Zustellkraft, um auch komplex gekrümmte und mit einer Vielzahl von lokalen Maxima und Minima versehene Konturen der Bohrungsinnenwand mit hoher Genauigkeit erzeugen zu können.

**[0059]** Das piezoelektrisch oder auf andere Weise angetriebene Feinzustellsystem kann auch oberhalb des Zustellkonus zwischen diesem und dem Grobzustellsystem angeordnet sein. In dieser Position kann das Feinzustellsystem sowohl auf dem rotierenden Teil der Honspindel, als auch auf dem nicht-rotierenden Teil der Honmaschine angeordnet sein.

**[0060]** In Fig. 5 sind schematisch weitere Einzelheiten eines Basiszustellsystems und eines Feinzustellsystems gezeigt, die auch bei den Honwerkzeugen gemäß Fig. 2 oder Fig. 4 in der gezeigten oder entsprechend modifizierter Weise eingesetzt werden können. Die einseitig zur Werkzeugachse 501 an dem Honwerkzeug angebrachte Schneidgruppe 560 umfasst in diesem Beispielsfall fünf achsparallel ausgerichtete Honleisten 561, die auf einem gemeinsamen Träger 562 angebracht sind und insgesamt einen Eingriffswinkel von ca. 30° definieren. Das Basiszustellsystem 552 des Schneidgruppenzustellsystems 550 umfasst einen parallel zur Werkzeugachse axial verfahrbaren Konus 554. Dieser arbeitet mit einem im Werkzeugkörper radial beweglich gelagerten Trägerelement 553 zusammen, das eine dem Konus angepasste Schrägfläche besitzt, so dass nach Art eines Keilantriebes eine Axialbewegung des Konus 554 in eine Radialbewegung der Schneidgruppe umgesetzt wird. Mit Hilfe dieses Basiszustellsystems kann das Trägerelement 553 gegen die Kraft einer nach radial innen wirkenden Rückstellfeder auf eine vorgebbare Radialposition verstellt werden.

**[0061]** An der radialen Außenseite des Trägerelementes 553 ist ein piezoelektrisches Antriebselement 555 des Feinzustellsystems 556 befestigt, welches zwischen dem Trägerelement 553 und dem Trägerelement 562 für die Honleisten angeordnet ist. Die radiale Dicke des piezoelektrischen Antriebs 555 ist durch Anlegen geeigneter Steuerspannungen, die von der Steuereinrichtung 180 (Fig. 1) bereitgestellt werden, radial in einem Verstellbereich von ca. 20 µm bis ca. 60 µm verstellbar, um ggf. einen schnellen Wechsel des Zustelldruckes der Schneidstoffkörper zu ermöglichen.

**[0062]** Anhand der Fig. 6 bis 8 werden nun Anwendungsmöglichkeiten der Honwerkzeuge bzw. der Honmaschine am Beispiel der Bearbeitung der Zylinderlaufflächen eines Zylinderblockes erläutert. Zur Charakterisierung der Makroform einer Zylinderlauffläche zeigt Fig. 6 (a) einen schematischen Umfangsschrieb und Fig. 6 (b) einen schematischen Längsschrieb der Dimensionen einer Zylinderlauffläche. Für den Umfangsschrieb werden radiale Abstände der Bohrungsinnenwand von der Bohrungssachse BA in Abhängigkeit von der Umfangsposition entlang der Bohrungsinnenfläche gezeigt, wobei

der Nullpunkt der Umfangsrichtung sowie die 180°-Lage in der durch die Bohrungssachsen der Zylinder definierten Zylinderebene 112 (vgl. Fig. 1) liegen und die 90°- und 270°-Positionen die senkrecht dazu liegenden Bereiche in der Nähe der vorderen und hinteren Breitseite des Zylinderkopfes repräsentieren. Die Kurven  $R_O$ ,  $R_M$  und  $R_U$  repräsentieren jeweils den Radius in der Nähe der oberen Eintrittsöffnung der Zylinderbohrung ( $R_O$ ), im axialen Mittelbereich der Zylinderbohrung ( $R_M$ ) und in der Nähe des unteren Endes der Zylinderbohrung ( $R_U$ ). In der dem Fachmann bekannten Weise sind die umlaufenden Messkurven des Umfangsschriebes jeweils auf eine konzentrisch zur Bohrungssachse liegende Nulllinie bezogen, die bei der Darstellung in Fig. 8 jeweils gestrichelt gezeichnet ist. Für alle Messkurven dient der gleiche radiale Maßstab in Radialrichtung. Die Längsschriebe in Fig. 6 (b) zeigen jeweils den Verlauf der Mantellinien (parallel zur Bohrungssachse) in den ausgewählten Umfangsbereichen bei 0°, 90°, 180° und 270°.

**[0063]** Die schematischen Messschriebe in Fig. 6 repräsentieren bei der gewählten Auflösung eine im Wesentlichen kreiszylindrische Form der Bohrungsinnenfläche mit einem Zylindrizitätsfehler  $\Delta Z$  von etwa 10 µm. Ein solcher, relativ geringer Zylindrizitätsfehler wird bei manchen Anwendungen als ausreichend angesehen, um während des Betriebs der Brennkraftmaschine im Zusammenspiel mit im Wesentlichen kreisförmigen Kolbenringen über die gesamte Länge des Zylinders eine ausreichende Abdichtung zu gewährleisten.

**[0064]** Eine solche, im Wesentlichen kreiszylindrische Bohrungsform ist somit im Betriebszustand des Motors, d.h. im betriebswarmen Zustand mit aufgeschraubtem Zylinderkopf, anzustreben. Es hat sich jedoch gezeigt, dass dieses Ziel einer "einsatzoptimalen Bohrungsgeometrie" nicht mit ausreichender Präzision erreicht werden kann, wenn bei dem Honprozess, d.h. ohne aufgeschraubten Zylinderkopf und ggf. bei tieferen, von den Betriebstemperaturen deutlich abweichenden Temperaturen, eine im Wesentlichen kreiszylindrische Bohrungsform erzeugt wird. Vielmehr führen elastische Deformationen, die durch Verschraubung des Zylinderkopfes mit dem Zylinderblock und durch erhöhte Temperaturen im Betrieb entstehen, zu signifikanten Abweichungen von der gewünschten kreiszylindrischen Form. Zur Vermeidung dieser Probleme wird bei einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens wie folgt vorgegangen.

**[0065]** In einem ersten Verfahrensschritt wird ein Zylinderblock einer zu fertigenden Serie von Zylinderblöcken in die Honmaschine eingespannt. Dann wird der Zylinderblock mit Hilfe einer Spanneinrichtung verspannt, die im Wesentlichen die Spannkraften simuliert, die auf den Zylinderblock wirken, wenn ein Zylinderkopf auf den Zylinderblock aufgeschraubt ist. Dadurch kann der Verspannungszustand des Zylinderblockes im Betriebszustand annähernd eingestellt werden. Hierzu kann eine Spanneinrichtung gemäß der Patentschrift DE 28 10 322 C2 verwendet werden, deren Inhalt insoweit durch Be-

zunahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht wird. Alternativ kann auch eine Verspannung vorgenommen werden, wie sie in der japanischen Patentanmeldung JP 11 267960 beschrieben ist. Falls gewünscht kann der Zylinderblock noch deutlich über die Umgebungstemperatur hinaus erwärmt werden, um insgesamt die Bedingungen bei einem betriebswarmen, fertig montierten Rumpfmotor zu simulieren.

**[0066]** Im nächsten Verfahrensschritt werden die Zylinderbohrungen des verspannten und ggf. aufgeheizten Zylinderblockes in einem einstufigen oder mehrstufigen Honverfahren gehont, um eine möglich kreiszylindrische Bohrungsform zu erhalten. Bei typischen Verfahrensvarianten wird in dieser Phase der Bearbeitung ein Zylinderformfehler  $\Delta Z$  von weniger als  $10 \mu\text{m}$  erreicht. Typische Messschriebe bei der Ermittlung der Bohrungsform können die in Fig. 6 gezeigten Charakteristika zeigen. Eine typische bearbeitete Zylinderbohrung hat nach diesem Fertigungsschritt in allen Axialpositionen einen weitgehend kreisrunden Umfang mit einer Oberflächenkontur ohne ausgeprägte Maxima, Minima oder Wendepunkte sowie in Axialrichtung (Längsschrieb) an unterschiedlichen Positionen entlang des Umfanges praktisch keine oder nur eine sehr geringfügige, allmähliche Variation des Radius bzw. des Durchmessers (Fig. 6(b)).

**[0067]** Nach Abschluss dieser Phase der Bearbeitung wird die Spanneinrichtung abgenommen, so dass die durch die Spanneinrichtung und ggf. durch Temperatureinwirkung erzeugten elastischen Deformationen im Werkstück abgebaut werden und dieses einen entspannten Zustand einnimmt.

**[0068]** In diesem entspannten Zustand wird die Bohrungsgeometrie der gehonten Zylinderbohrungen vermessen, und zwar separat für jede der Zylinderbohrungen. Fig. 7 zeigt ein Beispiel für die entsprechend Fig. 6 aufgenommenen Messschriebe in Umfangsrichtung (Fig. 7 a) und in Axialrichtung (Fig. 7b) der randständigen vierten Zylinderbohrung 104 in Fig. 1. Es ist erkennbar, dass die Bohrung in der Nähe der zylinderkopfseitigen Eintrittsseite (repräsentiert durch die Kurve  $R_{\text{O}}$ ) eine annähernd 2-zählige Radialsymmetrie um die Bohrungsachse BA hat, bei der sich der größte Durchmesser schräg zur Zylinderebene im Bereich der Umfangswinkel  $135^\circ$  bzw.  $315^\circ$  ergibt, während sich senkrecht dazu (entsprechend Winkelpositionen  $45^\circ$  und  $225^\circ$ ) ebenfalls lokale Maxima des Radius ausbilden, die jedoch bei kleineren absoluten Radiuswerten liegen. Der annähernd 2-zählig symmetrischen Grundform sind kleinere Radiuschwankungen überlagert, beispielsweise im Bereich um  $180^\circ$ .

**[0069]** Im axialen Mittelbereich der Bohrung (Kurve  $R_{\text{M}}$ ) ergibt sich ein weitaus komplexerer Zusammenhang zwischen Umfangsposition und Bohrungsradius bzw. Bohrungsdurchmesser. Im gezeigten Beispiel ergeben sich in Umfangsrichtung etwa acht lokale Maxima des Innenradius, die durch lokale Minima des Innenradius getrennt sind. Tendenziell liegen die größten Radien weiterhin schräg zur Zylinderebene.

**[0070]** In dem der Zylinderkopfseite abgewandten Endbereich der Zylinderbohrung, repräsentiert durch die Kurve  $R_{\text{U}}$ , ist der Bohrungsquerschnitt ebenfalls unsymmetrisch, wobei jedoch die am zylinderkopfseitigen Ende noch angedeutete 2-zählige Radialsymmetrie nicht mehr dominiert und eine nahezu völlig irreguläre Bohrungsquerschnittsform vorherrscht.

**[0071]** In Axialrichtung der Bohrungsinnenwand ergeben sich ebenfalls erheblich Schwankungen des Bohrungsradius. Während entlang der Mantellinie bei  $0^\circ$  der Radius zum unteren Ende der Bohrung abnimmt, ist die Bohrungswand auf der gegenüberliegenden Seite (bei  $180^\circ$ ) erheblich in Axialrichtung verzogen, so dass sich ein starkes Radiusminimum in der Nähe der Eingangsöffnung ergibt sowie im unteren Drittel, während im Mittelbereich der Radius maximal wird. Legt man dagegen einen Schnitt senkrecht zur Zylinderebene (bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$ ) so ergeben sich minimale Radien in der Nähe der oberen Eintrittsöffnung, während im unteren Drittel der Bohrungsradius ein lokales Maximum einnimmt.

**[0072]** Die auf diese Weise charakterisierbare, unsymmetrisch verzogene Bohrungsform entspricht im Beispielfall einem Zylindrizitätsfehler  $\Delta Z$  zwischen  $30 \mu\text{m}$  und  $40 \mu\text{m}$ . Diese komplex und unsymmetrisch verformte Bohrungsgeometrie wird sich bei Aufsetzen und Verschrauben eines Zylinderkopfes sowie Erwärmung des dadurch entstandenen Rumpfmotors in den Bereich der Betriebstemperaturen wieder zu einer weitgehend zylindrischen Bohrungsform verformen, wie sie anhand von Fig. 6 erläutert wurde.

**[0073]** Bei der hier beschriebenen Verfahrensvariante wird nun die komplex verformte Bohrungsgeometrie nach Wegnahme der Spannvorrichtung vermessen, um auf diese Weise die lokalen Radien der verzerrten Form in Abhängigkeit von der Axialposition und der Umfangsposition zu ermitteln. Auf diese Weise wird ein Datensatz ermittelt, der die nach der Entspannung vorliegende, komplex und unsymmetrisch verformte Bohrungsgeometrie darstellt. Diese komplexe Bohrungsform entspricht einer "Negativform", die bei der Bearbeitung der anderen Zylinderblöcke der Serie durch formgebende Honbearbeitung erzielt werden soll, wenn die bearbeiteten Zylinderbohrungen im montierten Zustand des Motors eine weitgehend zylindrische Form mit geringem Zylindrizitätsfehler haben sollen.

**[0074]** Die Geometriedaten, die die komplex unsymmetrische Bohrungsform gesondert für jede Zylinderbohrung repräsentieren, werden in geeigneter Form in der Steuereinrichtung 180 gespeichert. Bei der Honbearbeitung können sie mit Messwerten eines Dimensionmesssystems mit werkzeuginternen Sensoren (z.B. Luftmesssystem) verglichen und in zugehörige Daten für den Zustelldruck umgerechnet werden, mit dem eine einseitige an einem Honwerkzeug angebrachte Schneidgruppe beaufschlagt werden muss, um bei axial starrer Führung des Honwerkzeuges und Steuerung der Zustellkraft der Schneidgruppe in Abhängigkeit von der Axialposition und der Winkelposition des Honwerkzeuges die komplex

unsymmetrisch geformte Bohrungsform zu erzielen.

**[0075]** Auf Basis des erhaltenen Datensatzes werden nun nachfolgende Zylinderblöcke der Serie mittels Formhonen bearbeitet. Bei der Serienbearbeitung ist kein Verspannen und/oder Aufheizen der einzelnen Zylinderblöcke für die Honbearbeitung mehr nötig. Vielmehr wird durch die Honbearbeitung an spannungsfreien Werkstücken die anhand Fig. 7 exemplarisch erläuterte Negativform der Zylinderbohrung mit Hilfe der in der Steuereinrichtung gespeicherten Daten erzeugt.

**[0076]** Fig. 8 zeigt exemplarisch für zwei Axialpositionen des Zylinders (repräsentiert durch die Kurven  $R_O$  und  $R_M$  in Fig. 8 (a)) den hub- und drehwinkelabhängigen Radienverlauf der Bohrung (in Fig. 8 (a)) und in Fig. 8 (b) den Verlauf der Zustellkraft  $F$  über den Drehwinkel  $\varphi$ , jeweils in die entsprechenden axialen Höhen. In Fig. 8 (b) repräsentiert die gestrichelte Kurve  $F_O$  diejenige Variation der Zustellkraft über den Drehwinkel, die erforderlich wäre, wenn ein Honwerkzeug, dessen Schneidgruppe im oberen Endbereich der Zylinderbohrung rotiert, die Innenfläche bearbeitet. Die durchgezogene Linie  $F_M$  entspricht der zeitlichen Variation bzw. Winkelvariation, die im Mittelbereich der Bohrung ( $R_M$ ) erforderlich wäre. Während die annähernd, aber nicht exakt 2-zählig radialsymmetrische Bohrungsquerschnittsform am oberen Ende im Wesentlichen durch eine Variation der Zustellkraft mit zwei lokalen Maxima und dazwischenliegenden lokalen Minima sowie eine kurzzeitige Zustellkraftspitze bei  $180^\circ$  erreicht werden kann, erfordert das Formhonen im Mittelbereich der Bohrung (Kurve  $R_M$ ) bei einer einzigen Umdrehung des Honwerkzeuges einen vielfachen, schnellen Wechsel zwischen Anstieg und Zurücknahme der Zustellkraft, der zu einer Ausbildung von sechs bis acht lokalen Minima und lokalen Maxima bei einer vollen Umdrehung führt. Einige lokalen Maxima sind in Fig. 8 (b) durch Pfeile gekennzeichnet und entsprechen im Wesentlichen den lokalen Radienmaxima der Kurve  $R_M$ .

**[0077]** Wird bei der Honbearbeitung das Honwerkzeug axial oszillierend bewegt und gleichzeitig um seine Werkzeugachse rotiert, so ergibt sich der tatsächliche zeitliche Verlauf der auf die Schneidgruppe wirkenden Zustellkraft aus einer Überlagerung der hier zur Vereinfachung erläuterten Verläufe, wobei sich auch die starke Variation in Axialrichtung (Fig. 7(b)) in einen Beitrag zur Variation der Zustellkraft umsetzt.

**[0078]** Nach der Durchführung des Formhonsens kann die Zylinderbohrung mit Hilfe eines Formmesssystems gemessen werden. Eine eventuell noch vorhandene, gemessene Differenz der Ist-Form zur Soll-Form kann zur Korrektur des Zustellsystems in Abhängigkeit von Hublage und Drehwinkel genutzt werden. Insbesondere kann somit während und/oder nach einer formerzeugenden Honoperation eine Vermessung der Bohrungsform zur Ermittlung von Form-Istwerten durchgeführt werden und eine Differenz zwischen den Form-Istwerten und der Sollform kann zur Korrektur der Steuerung der Zustellkraft verarbeitet werden. Durch diesen Regelkreis ist eine verbesserte Genauigkeit des Formhonnprozesses erzielbar.

**[0079]** In der Regel werden die materialabtragenden Bearbeitungsschritte zur Erzeugung der komplexen, ungerunden und ggf. unsymmetrischen Bohrungsformen mit Hilfe eines Honwerkzeuges (oder mit Hilfe mehrerer nacheinander verwendeter Honwerkzeuge) erzeugt, wobei die Schneidgruppe dieser Honwerkzeuge für einen substantiellen Materialabtrag ausgelegt sind, um die Makroform der Bohrung in der gewünschten Weise zu erzeugen. Dies führt dazu, dass die Mikrostruktur der bearbeiteten Bohrungsinnenfläche möglicherweise nicht den für den Betrieb vorgegebenen Vorgaben hinsichtlich Oberflächenrauheit und/oder Oberflächenstruktur genügt. Daher wird bei bevorzugten Verfahren nach den vorgehenden Bearbeitungsschritten mindestens eine im Wesentlichen formneutrale, d.h. die Makroform der Bohrung im Wesentlichen nicht verändernde Bearbeitungsoption durchgeführt. Dabei können Honwerkzeuge mit entsprechend an die Oberflächenanforderung angepasster Körnung der Schneidstoffkörper und/oder Bürst- oder Plateauhonwerkzeuge und/oder andere die Oberflächenstruktur verändernde Bearbeitungswerkzeuge eingesetzt werden, beispielsweise berührungslos arbeitende Werkzeuge, wie Laser und/oder Wasserstrahlzeuge, die die Oberflächenstruktur der Bohrungsinnenfläche ohne Beeinflussung der Makroform verändern können.

**[0080]** Die Fig. 9 und 10 zeigen in Draufsicht bzw. Querschnitt eine Schneidgruppe 960, die für eine "Plateauhonbearbeitung" unsymmetrischer Bohrungsformen optimiert ist, um die nach der formgebenden Honbearbeitung noch vorliegenden Spitzen des Rauheitsprofils zu schneiden und dadurch den Traganteil der Oberfläche zu erhöhen. Da in den vorangegangenen Bearbeitungsschritten eine Bohrungsform mit ggf. sehr kleinen lokalen Radien im Bereich von lokalen Minima oder Maxima erzeugt werden kann, wird ein Honwerkzeug bereitgestellt, dessen Schneidgruppe 960 in der Lage ist, die gewellte Oberfläche einer gezielt unrund bearbeiteten Bohrung mit einem Zylindritätsfehler von deutlich über  $10 \mu\text{m}$  weitgehend gleichmäßig zu bearbeiten. Hierzu ist ein stärker segmentiertes Honleistensystem vorgesehen, bei dem die durch Honleistensegmente gebildeten Schneidstoffkörper 961 auf einem in sich elastischen Grundkörper 965, beispielsweise einer Platte aus einem gummiartigen Werkstoff, aufgebracht sind. Dieser in sich elastische Grundkörper ist auf dem eigentlichen Grundmaterial 966 der Honleiste, beispielsweise einem Träger aus Stahl, Kupfer oder dergleichen durch Verkleben oder auf andere Weise aufgebracht. Im Beispielsfall haben die quadratischen Honleistensegmente 961 eine Ausdehnung von  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ . Damit ist bei der Plateauhonbearbeitung eine flächige Anlage der Segmente an die formgehonte Bohrung abgesichert, da sich die Schneidstoffkörper 961 unter lokaler elastischer Verformung des elastischen Grundkörpers 965 dem welligen Verlauf der Bohrungsinnenfläche anpassen können.

**[0081]** Honwerkzeuge mit einer oder mehreren derartigen Schneidgruppen können unabhängig von den son-

stigen Merkmalen der Erfindung und den hier beschriebenen Verfahren auch bei anderen Honverfahren zur abschließenden Bearbeitung von Bohrungen in Werkstücken eingesetzt werden.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Honen der Innenfläche einer Bohrung in einem Werkstück, insbesondere zum Honen einer Zylinderlauffläche bei der Herstellung von Zylinderblöcken für Brennkraftmaschinen, bei dem ein Honwerkzeug innerhalb der Bohrung axial beweglich und um seine Werkzeugachse rotierend angetrieben wird und eine an dem Honwerkzeug angebrachte Schneidgruppe mit mindestens einem Schneidstoffkörper zur materialabtragenden Bearbeitung der Innenfläche mit einer Zustellkraft an die Innenfläche angedrückt wird, eine im wesentlichen starre Führung der Axialbewegung des Honwerkzeuges zur Erzeugung einer Axialbewegung des Honwerkzeuges im wesentlichen parallel zur Bohrungsachse der Bohrung erfolgt und eine zeitlich asymmetrische Steuerung der Zustellkraft einer einseitig der Werkzeugachse an dem Honwerkzeug angebrachten Schneidgruppe in Abhängigkeit von der Winkelposition und ggf. von der Hublage des Honwerkzeuges derart durchgeführt wird, dass die Bohrung zumindest in einem axialen Bohrungsabschnitt eine nicht-kreiszyindrische Bohrungsform erhält, wobei die einseitig an dem Werkzeugkörper angebrachte Schneidgruppe mittels eines Basiszustellsystems bis in eine vorgebbare Radialposition zugestellt wird und ausgehend von der durch das Basiszustellsystem vorgegebenen Radialposition eine radiale Zustellung bzw. ein radiales Zurückziehen der Schneidgruppe mittels eines unabhängig von dem Basiszustellsystem betätigbaren dynamischen Feinzustellsystems erfolgt.

5  
10  
15  
20  
25  
30  
35  
40
2. Verfahren nach Anspruch 1, worin das Feinzustellsystem während einer einzigen Umdrehung des Honwerkzeuges mehrere, insbesondere zwischen zwei und zehn, periodische oder aperiodische Wechsel zwischen Anstieg und Abnahme der Zustellkraft erzeugt.

45
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, worin das Basiszustellsystem über einen außerhalb des Honwerkzeugs angeordneten Antrieb und das Feinzustellsystem über einen innerhalb des Honwerkzeugs angeordneten Antrieb betätigt wird, wobei der innerhalb des Honwerkzeugs angeordnete Antrieb vorzugsweise elektromechanisch oder piezoelektrisch arbeitet.

50  
55
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin die Schneidgruppe mittels des Basiszu-

5
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin das Honwerkzeug zur im Wesentlichen starren Führung der Axialbewegung innerhalb der Bohrung axial gleitbeweglich und quer zur Werkzeugachse im Wesentlichen unbeweglich abgestützt wird, wobei vorzugsweise ein Honwerkzeug verwendet wird, Führungsleisten zur axialen Führung des Honwerkzeuges in der Bohrung umfasst, die vorzugsweise unabhängig von der Schneidgruppe in Richtung auf die Innenfläche der Bohrung zugstellbar sind, wobei die im Wesentlichen starre Führung der Axialbewegung **dadurch** erreicht wird, dass die Führungsleisten während der Bewegung des Honwerkzeuges in der Bohrung an die Innenfläche der Bohrung angedrückt werden.

5  
10  
15  
20  
25  
30  
35  
40
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin eine nicht-kreiszyindrische Bohrungsform erzeugt wird, die von einer bezogen auf die Bohrungsachse 2-zählig radialsymmetrischen Form signifikant abweicht, wobei vorzugsweise an der Bohrung Formabweichungen erzeugt werden, die einem Zylindrizitätsfehler  $\Delta Z$  von mehr als 10  $\mu\text{m}$  entsprechen, wobei der Zylindrizitätsfehler  $\Delta Z$  vorzugsweise bei mehr als 20  $\mu\text{m}$ , insbesondere zwischen 20  $\mu\text{m}$  und ca. 60  $\mu\text{m}$  liegt, wobei der Zylindrizitätsfehler definiert ist als  $\Delta Z = (D_A - D_i)/2$ , wobei  $D_A$  der Durchmesser eines die Innenfläche der Bohrung außen berührenden Zylinders und  $D_i$  der Durchmesser eines die Innenfläche der Bohrung innen berührenden Zylinders ist.

45  
50
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin nach der formerzeugenden Honoperation zur Erzeugung der unrunder Bohrungsform mindestens eine im Wesentlichen formneutrale Bearbeitungsoperation zur Bearbeitung oberflächennaher Bereiche der Innenfläche durchgeführt wird, wobei die formneutrale Bearbeitungsoperation vorzugsweise eine Plateauhonbearbeitung ist, bei der Spitzen des durch die vorangegangenen Honoperationen erzeugten Rauheitsprofils geschnitten werden und/oder wobei vorzugsweise bei der im Wesentlichen formneutralen Bearbeitungsoperation die Innenfläche der Bohrung mit einer Vielzahl von relativ zueinander beweglichen, elastisch gelagerten Schneidstoffkörpern bearbeitet wird.

55
8. Honwerkzeug, insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden An-

5

sprüche, mit einem Werkzeugkörper, der eine Werkzeugachse (201, 401, 501) definiert, einer an dem Werkzeugkörper angebrachten Schneidgruppe (160, 260, 460, 560) mit mindestens einem Schneidstoffkörper zum materialabtragenden Bearbeiten der Innenfläche, und einem der Schneidgruppe zugeordneten Schneidgruppen-Zustellsystem (450, 550) zur Ausübung einer radial zur Werkzeugachse wirkenden Zustellkraft auf die Schneidstoffkörper der Schneidgruppe, wobei die Schneidstoffkörper der Schneidgruppe ausschließlich an einer Seite des Honwerkzeuges angeordnet sind und wobei dem Honwerkzeug eine Axialführungseinrichtung (170, 270, 470) zur im Wesentlichen starren Führung der Axialbewegung des Honwerkzeuges im Wesentlichen parallel zu der Bohrungsachse zugeordnet ist, wobei die Axialführungseinrichtung zur Aufnahme der durch die angedrückte Schneidgruppe erzeugten Reaktionskraft ausgelegt ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** das auf die Schneidgruppe wirkende Schneidgruppen-Zustellsystem (450, 550) eine Kombination eines Basiszustellsystems (452, 552) mit einem dynamischen Feinzustellsystem (454, 556) umfasst.

- 5  
10  
15  
20  
25
9. Honwerkzeug nach Anspruch 8, worin das Basiszustellsystem (452, 552) so ausgelegt ist, dass bei einer Grobzustellung die materialabtragenden Bereiche der Schneidstoffkörper mit Hilfe des Basiszustellsystems der Innenfläche der Bohrung über einen großen ersten Verstellweg bis auf einen geringen Abstand oder bis zur Berührung angenähert werden können und das dynamische Feinzustellsystem (454, 556) für die Erzeugung kurzzeitiger Wechsel des Zustelldruckes und relativ zu dem ersten Verstellweg kurze zweite Verstellwege ausgelegt ist. 30
10. Honwerkzeug nach Anspruch 9, worin der erste Verstellweg des Basiszustellsystems (452, 552) mindestens einen Millimeter, vorzugsweise mindestens 4 mm, beträgt und der zweite Verstellweg des Feinzustellsystems (454, 556) im Bereich unterhalb 100  $\mu\text{m}$  liegt, insbesondere im Bereich zwischen 20  $\mu\text{m}$  und 60  $\mu\text{m}$  im Radius. 45
11. Honwerkzeug nach einem der Ansprüche 8 bis 10, worin das Basiszustellsystem (452, 552) des Honwerkzeuges zur Übertragung der Zustellkraft eines außerhalb des Honwerkzeuges angeordneten, vorzugsweise mechanischen oder hydraulischen, Antriebes ausgebildet ist und das Feinzustellsystem (454, 556) mindestens einen innerhalb des Honwerkzeuges angeordneten, vorzugsweise elektromechanischen oder piezoelektrischen, Antrieb (455, 555) besitzt. 50  
55
12. Honwerkzeug nach einem der Ansprüche 8 bis 11,

worin die Axialführungseinrichtung Führungsleisten (170, 270, 471 - 476) zur axialen Führung des Honwerkzeuges in der Bohrung umfasst, wobei die Führungsleisten mittels einer Führungsleisten-Zustell-einrichtung (480), vorzugsweise unabhängig von der Schneidgruppe, in Richtung auf die Innenfläche der Bohrung zustellbar sind.



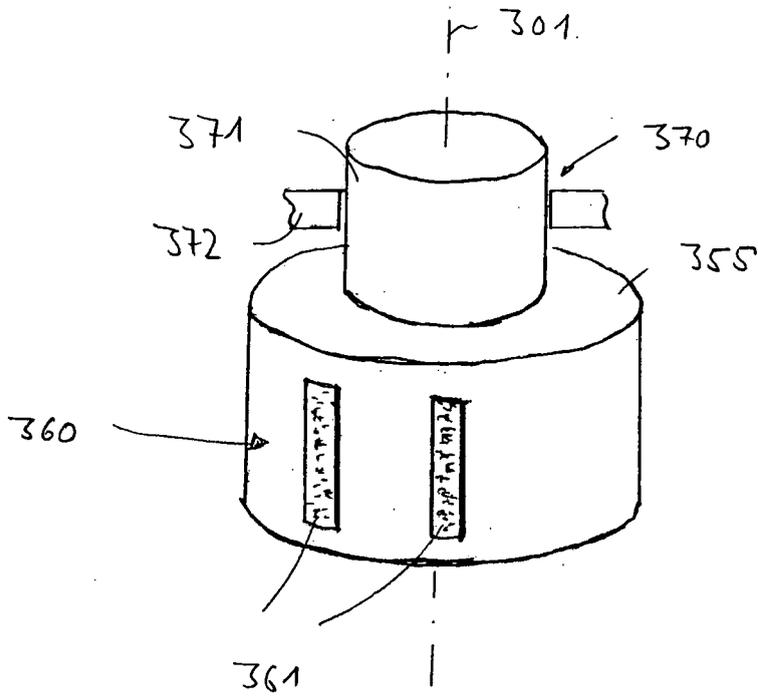
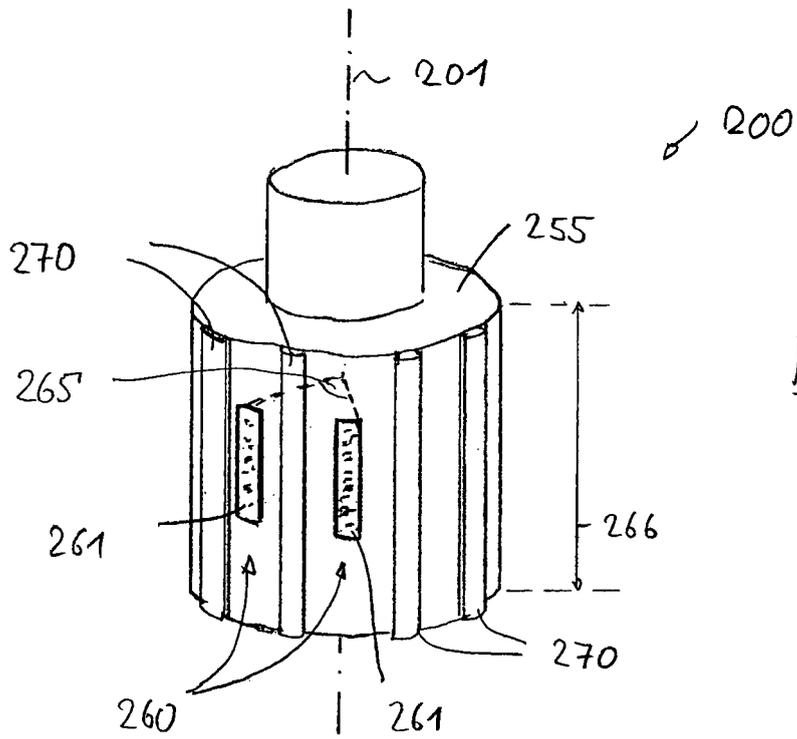
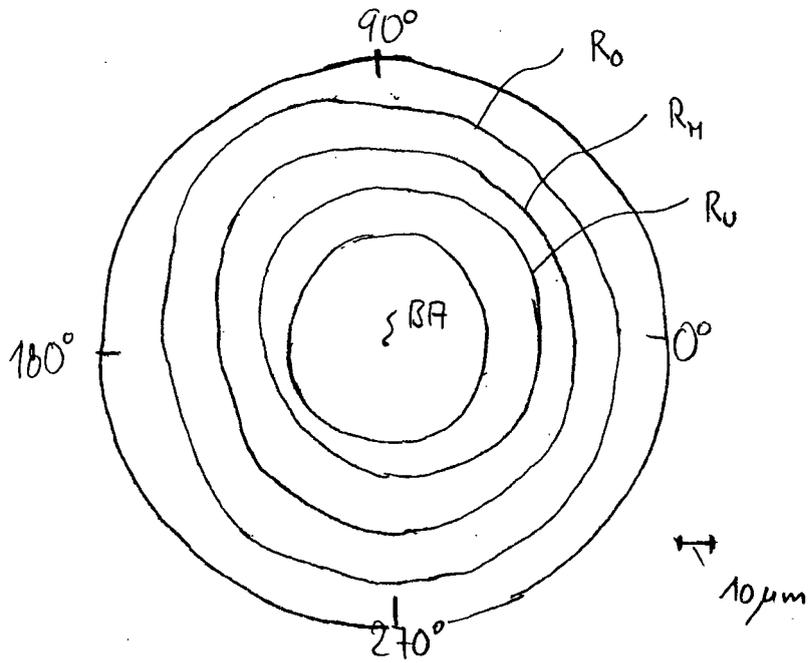
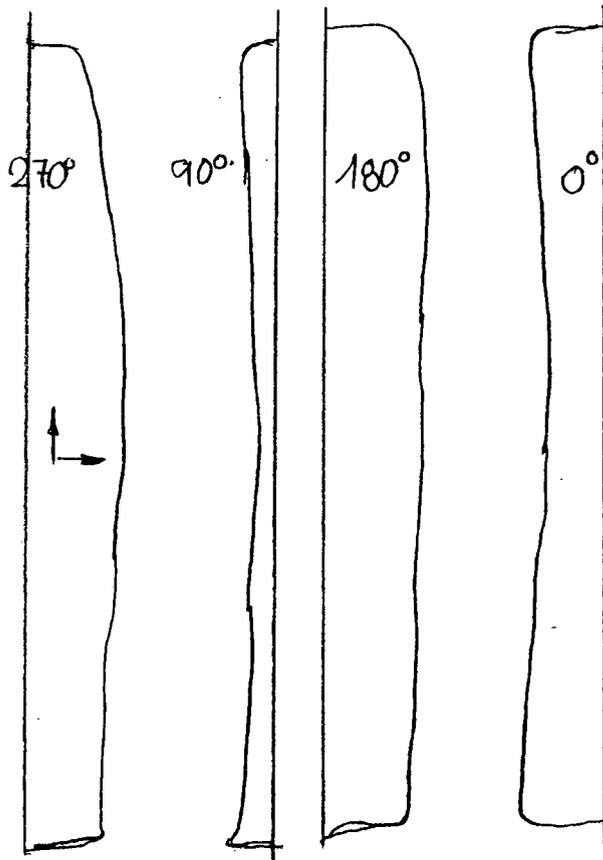




Fig. 6

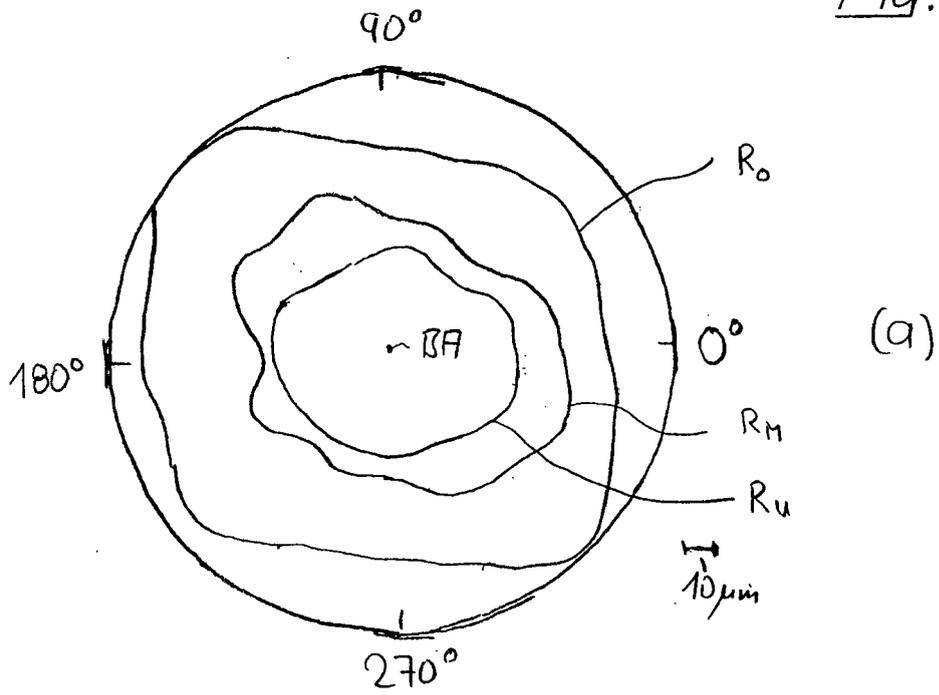


(a)

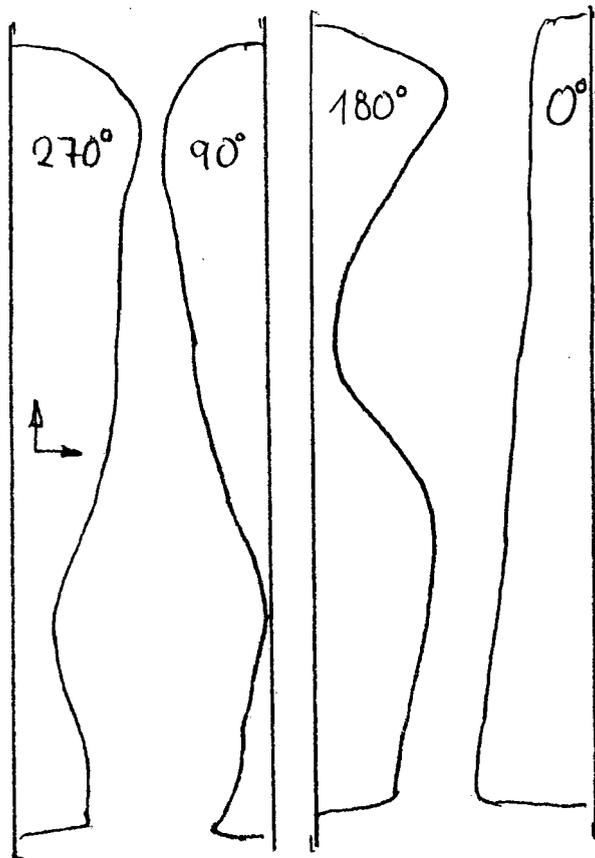


(b)

Fig. 7

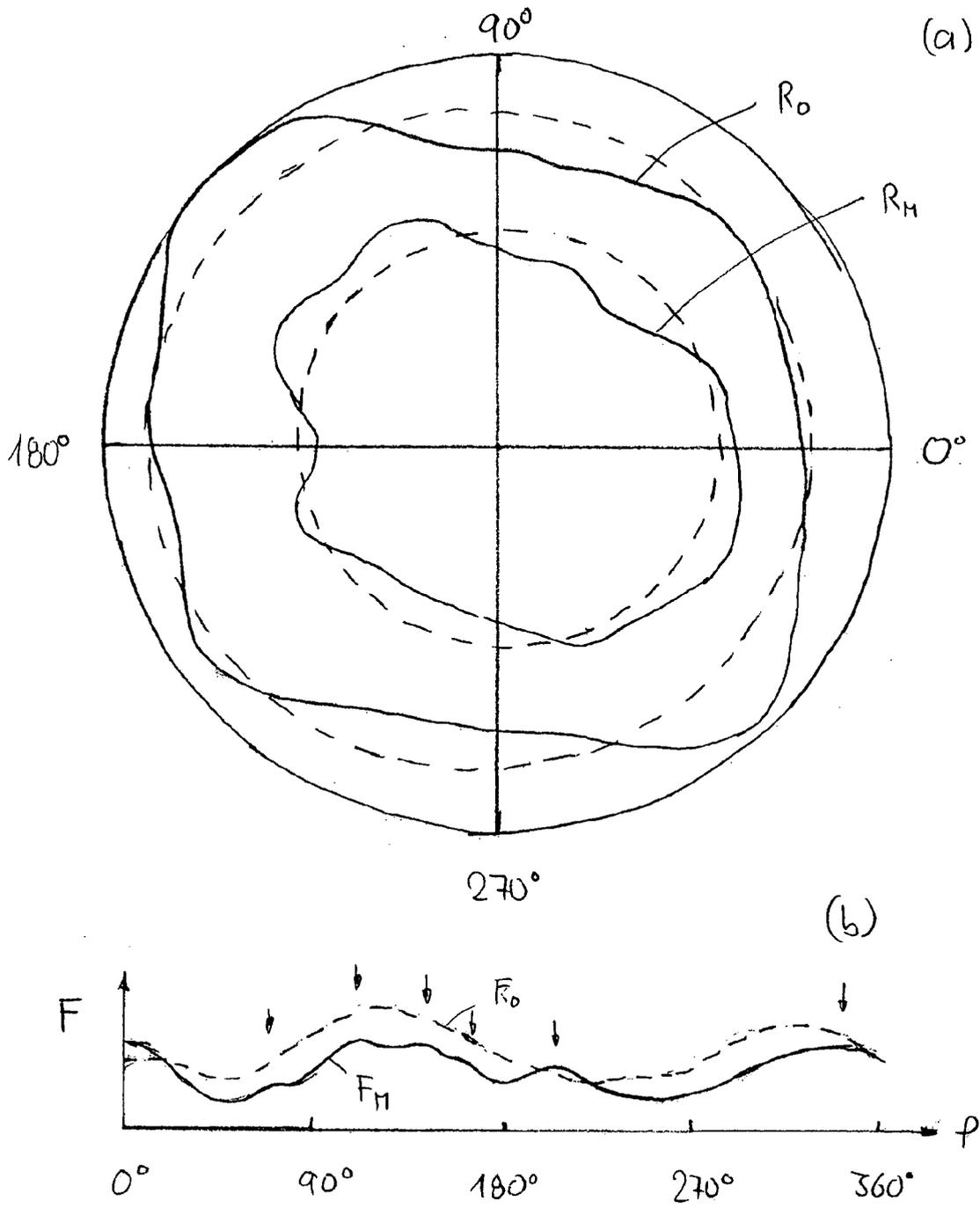


(a)



(b)

Fig. 8



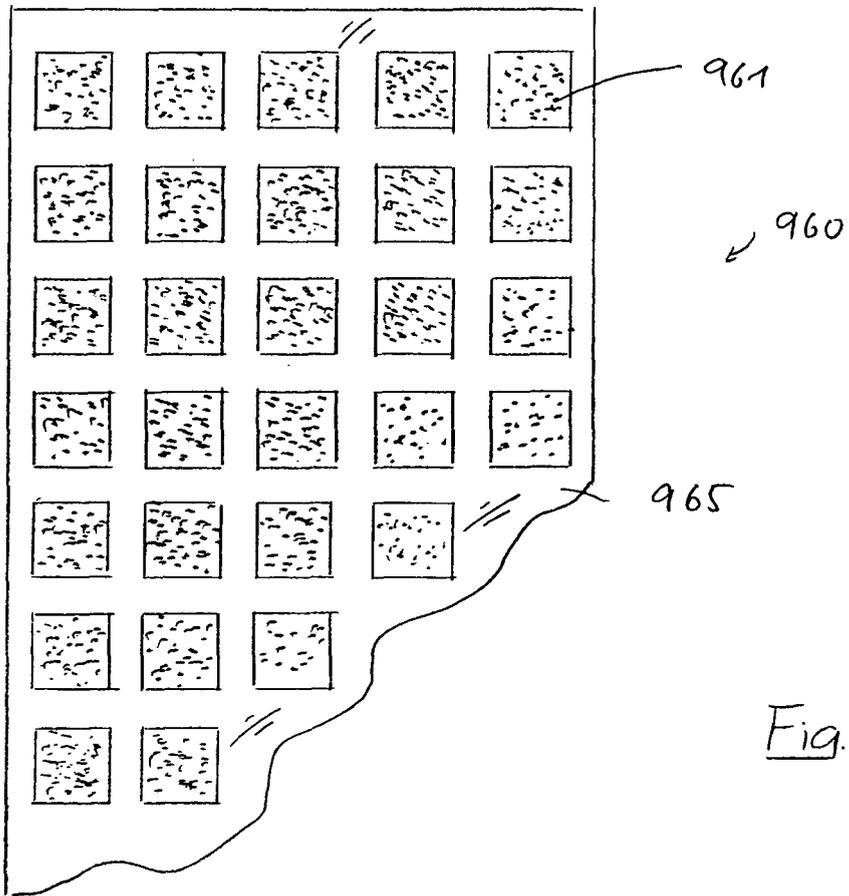


Fig. 9

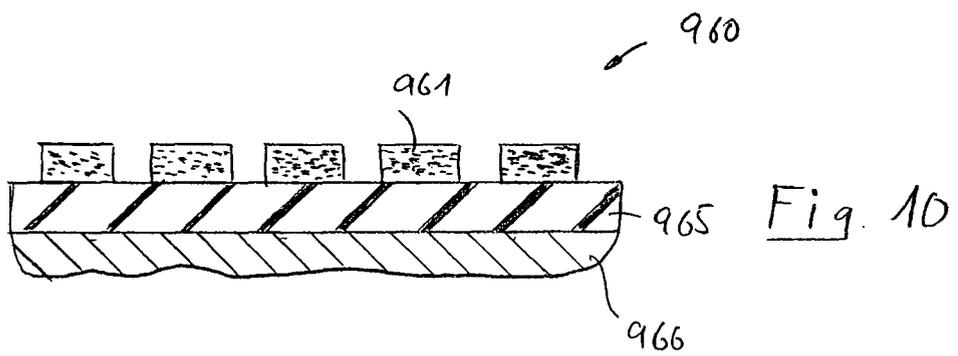


Fig. 10



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 09 00 9260

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A,D	EP 1 321 229 A (MASCHINENFABRIK GEHRING GMBH & CO) 25. Juni 2003 (2003-06-25) * Absätze [0009], [0010], [0012] - [0017] * -----	1-12	INV. B24B33/02 B24B33/08
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			B24B
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 8. September 2009	Prüfer Gelder, Klaus
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentedokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument ..... & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

2  
EPO FORM 1503 03 82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT  
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 09 00 9260

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.  
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am  
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

08-09-2009

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 1321229	A	25-06-2003	JP 2003200340 A
-----		US 2003120374 A1	15-07-2003
			26-06-2003
-----			

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

**IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente**

- DE 2810322 C2 [0004] [0065]
- EP 1321229 A1 [0006]
- JP 11267960 A [0004] [0065]

**In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur**

- **R. Zurin.** Variables Formhonen durch rechnergestützte Honprozesssteuerung. *wbk - Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik*, 1990, vol. 26 [0007]