



(10) **DE 10 2011 077 568 A1** 2012.12.20

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2011 077 568.4**

(22) Anmeldetag: **15.06.2011**

(43) Offenlegungstag: **20.12.2012**

(51) Int Cl.: **B23P 25/00 (2011.01)**

B23Q 11/00 (2011.01)

B23B 1/00 (2011.01)

B23B 37/00 (2011.01)

B23C 1/00 (2011.01)

B23D 1/00 (2011.01)

(71) Anmelder:

Sauer Ultrasonic GmbH, 55758, Stipshausen, DE

(72) Erfinder:

Hessenkämper, Axel, 33330, Gütersloh, DE

(74) Vertreter:

**BEETZ & PARTNER Patent- und Rechtsanwälte,
80538, München, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

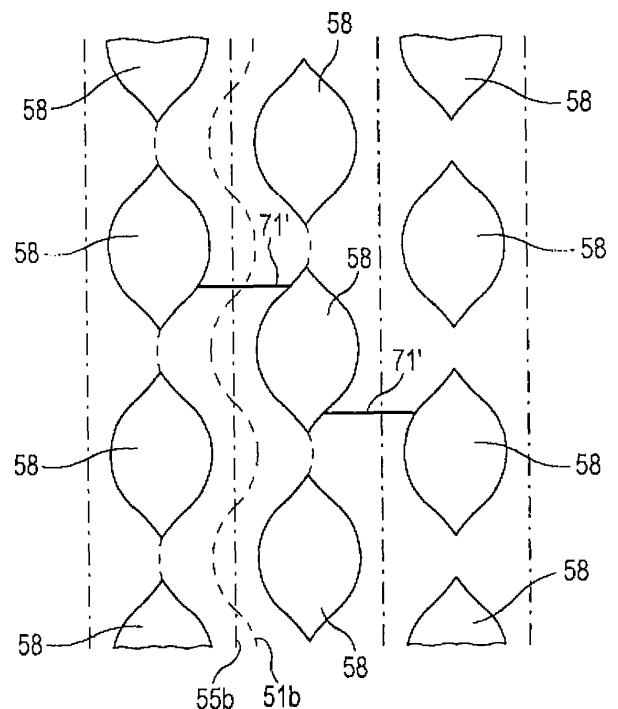
DE 10 2008 022 993 A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Werkzeugmaschine, Werkstückbearbeitungsverfahren**

(57) Zusammenfassung: Bei einem Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks mit einem Werkzeug steht das Werkzeug am Werkstück in Eingriff, und zwischen beiden wird eine Schneidbewegung hervorgerufen. Außerdem wird eine der Schneidbewegung überlagerte relative erste Vibrationsbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug in der Weise hervorgerufen, dass ein oder mehrere Kennwerte der ersten Vibrationsbewegung und ein oder mehrerer Kennwerte der Schneidbewegung in Bezug aufeinander eingestellt werden. Auch kann die überlagerte Vibrationsbewegung in der Weise hervorgerufen werden, dass unterscheidbare Oberflächenbereiche des Werkstücks entstehen.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Werkzeugmaschine und ein Werkstückbearbeitungsverfahren nach den Oberbegriffen der unabhängigen Patentansprüche.

[0002] Es ist bekannt, Werkstücke mit Werkzeugen mit definierter Schneide spanabhebend zu bearbeiten. Die bekanntesten Verfahren sind hierbei das Bohren, das Drehen, das Fräsen und das Hobeln. Die zugehörigen Werkzeuge haben eine oder einige deutlich definierte, klar beschreibbare Schneidkanten. Durch eine Relativbewegung zwischen Werkzeug, insbesondere Schneidkante desselben, und Werkstück (Schneidbewegung) wird die spanabhebende Bearbeitung bewirkt. Sie erfolgt mit einer gewissen Abtragsleistung unter einem gewissen Werkzeugverschleiß und hinterlässt Oberflächen mit in gewissen Grenzen vorhersehbaren Eigenschaften. Beim Bohren wird in der Regel das Werkzeug bewegt, beim Drehen das Werkstück. Beim Fräsen dreht sich in der Regel das Fräs Werkzeug, während es oder das Werkstück selbst verfahren wird. Beim Hobeln können das Werkzeug oder das Werkstück verfahren werden.

[0003] Es ist weiterhin bekannt, Werkstücke mittels vibrierender Werkzeuge ohne definierte Schneide zu bearbeiten. Die vibrierenden Werkzeuge sind rau, arbeiten schleifend und vibrieren vergleichsweise hochfrequent (Vibrationsbewegung), beispielsweise mit Frequenzen über 5 kHz oder über 10 kHz oder über 20 kHz. Wegen der hohen Vibrationsfrequenzen, die jenseits des menschlichen Gehörs liegen können, werden die Bearbeitung häufig als Ultraschallbearbeitung und die Maschine als Ultraschallmaschine bezeichnet. Die Vibration des Werkzeugs kann eine translatorische oder eine rotatorische Vibration sein. Das Werkzeug kann flächenparallel am Werkstück entlangfahren und dann quasi feilend Material abtragen. Es kann aber auch stoßend auf das Werkstück (senkrecht zu seiner Oberfläche) einwirken.

[0004] Ein Nachteil der bekannten Bearbeitungsverfahren mit Werkzeugen mit definierter Schneide ist es, dass bei bestimmten Bearbeitungssituationen, insbesondere bei bestimmten Werkstückmaterialien, die Abtragsleistung relativ gering oder der Werkzeugverschleiß relativ hoch oder die Oberflächengüte des bearbeiteten Werkstücks relativ schlecht ist. Es zeigte sich, dass das Ausbrechen der Späne bei der Bearbeitung mit herkömmlichen Werkzeugen mit definierter Schneide vergleichsweise raue und aufgerissene Oberflächen hinterlässt, die mechanisch nicht optimal widerstandsfähig und anfällig gegenüber Umwelteinflüssen (Korrosion, Rost) sind.

[0005] Ein weiterer Nachteil ist es, dass gefertigte Werkstückoberflächen in ihren Feinstruktur häufig nur unzureichend an Verwendungsspezifikationen des Werkstücks angepasst sind und entweder so verwendet werden oder nachbearbeitet werden müssen.

[0006] Die Aufgabe der Erfindung ist es, eine Werkzeugmaschine und ein Werkstückbearbeitungsverfahren anzugeben, die eine gewünschte Feinstrukturierung einer gefertigten Werkstückoberfläche ermöglichen.

[0007] Diese Aufgabe wird mit den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Abhängige Patentansprüche sind auf bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung gerichtet.

[0008] Bei einem Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks mit einem Werkzeug wird relativ zwischen beiden eine Schneidbewegung und ihr überlagert eine erste Vibrationsbewegung in der Weise hervorgerufen, dass ein oder mehrere Kennwerte der ersten Vibrationsbewegung nach Maßgabe eines oder mehrerer Kennwerte der Schneidbewegung eingestellt werden. Auch umgekehrt können ein oder mehrere Kennwerte der Schneidbewegung nach Maßgabe eines oder mehrerer Kennwerte der ersten Vibrationsbewegung eingestellt werden. Die Kennwerte der Vibrationsbewegung und/oder die der Schneidbewegung können während der Werkstückbearbeitung veränderlich sein.

[0009] Bei einem Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks mit einem Werkzeug, insbesondere wie oben, wird relativ zwischen beiden eine Schneidbewegung und ihr überlagerte eine erste Vibrationsbewegung in der Weise hervorgerufen, dass unterscheidbare Oberflächenbereiche des Werkstücks entstehen. Die erste Vibrationsbewegung kann nach Maßgabe der Position des Werkzeugs und vorzugsweise auch nach Maßgabe von Daten, die das zu fertigende Werkstück beschreiben, gesteuert werden.

[0010] Bei einem Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks mit einem Werkzeug, insbesondere wie oben, wird relativ zwischen beiden eine Schneidbewegung und ihr überlagerte eine erste Vibrationsbewegung in der Weise hervorgerufen, dass die hinterlassene Oberfläche gegenüber einer Bearbeitung ohne erste Vibrationsbewegung verändert ist.

[0011] Es können angepasste Werkzeuge verwendet werden, insbesondere solche, deren Schneide(n) Strukturierungen in der Größenordnung der Amplitude der ersten Vibrationsbewegung aufweisen.

[0012] Nachfolgend werden Bezug nehmend auf die Zeichnung einzelne Ausführungsformen der Erfindung beschrieben. Es zeigen:

[0013] **Fig. 1** schematisch die Ansicht einer Werkzeugmaschine,

[0014] **Fig. 2** schematisch eine Steuerung der Werkzeugmaschine,

[0015] **Fig. 3** schematisch ein Werkzeug,

[0016] **Fig. 4** schematisch Richtungsangaben,

[0017] **Fig. 5** Darstellungen zur abgestimmten Bestimmung von Bewegungsparametern,

[0018] **Fig. 6** Darstellungen zur Herstellung unterscheidbarer Oberflächenbereiche, und

[0019] **Fig. 7** angepasste Werkzeuge.

Erste Ausführungsform

[0020] Eine Werkzeugmaschine hat ein Schneidwerkzeug zur Werkstückbearbeitung mit einer Schneidbewegung des Werkzeugs relativ zum Werkstück und eine Vibrationseinheit zum Erzeugen einer Vibrationsbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück. Bei einem Werkstückbearbeitungsverfahren werden relativ zwischen einem Schneidwerkzeug und einem Werkstück eine Schneidbewegung und gleichzeitig oder abwechselnd dazu eine Vibrationsbewegung hervorgerufen.

[0021] Die Kombination von schneidender und vibrierender Bearbeitung hat den Vorteil, dass das Herauslösen der Späne aus dem Werkstück mit der definierten Schneide des Werkzeugs mit variablen Relativbewegungen zwischen Werkstück und Schneidkante erfolgt. Das Herauslösen der Späne geschieht dadurch weniger reißen, sondern verstärkt schneidend. Dadurch entstehen weniger raue Oberflächen, und die Werkstückoberfläche hat nach der Bearbeitung eine relativ hohe Druckeigenspannung und ist nach der Bearbeitung weniger zerrissen und gefurcht, was im Hinblick auf Härte und Widerstandsfähigkeit der Oberfläche gegenüber Umwelteinflüssen und mechanischer Beanspruchung wünschenswert ist.

[0022] Die Vibrationseinheit befindet sich vorzugsweise nahe am Werkzeug. Sie kann einen oder mehrere Piezo-Aktoren oder elektromagnetische Aktoren aufweisen. Die Vibrationsfrequenz kann über 5 kHz, über 10 kHz, über 20 kHz oder über 40 kHz liegen. Die Werkzeugmaschine kann eine Bohrmaschine, eine Fräsmaschine, eine Drehmaschine, eine Hobelmaschine oder Ähnliches sein. Die Richtung der Vibrationsbewegung kann parallel und/oder rechtwinklig zur Schneidbewegung des Werkzeugs sein oder einen Winkel dazwischen haben. Sie kann parallel zur lokalen momentanen Werkstückoberfläche sein oder einen bestimmten Winkel relativ dazu größer 0°

haben. Sie kann rechtwinklig zur Werkstückoberfläche sein.

[0023] Das Werkzeug kann auf die mögliche Vibrationsbewegung hin angepasst sein, etwa indem bestimmte Flächen oder Kanten desselben aufgeraut, gezahnt oder sonst wie gegenüber herkömmlichen Werkzeugen modifiziert sind. Die Modifikation kann so sein, dass das Werkzeug bestimmte Resonanzfrequenzen hat oder vermeidet.

[0024] Die Vibrationseinheit kann Teil eines schnellwechselbaren (automatisch wechselbaren) Werkzeugs sein und dann durch geeignete Einrichtungen Energie empfangen. Beispielsweise kann eine drahtlose (induktive) Energieübertragung vorgesehen sein.

[0025] Eine Steuerung/Regelung kann die Schneidbewegung und die Vibrationsbewegung steuern bzw. regeln.

[0026] Es kann Sensorik zur Ermittlung von Prozessparametern vorgesehen sein, wobei die Prozessparameter zur Steuerung zurückgeführt werden können. Die Steuerungen von Schneidbewegung und Vibrationsbewegung können unabhängig voneinander oder verschränkt miteinander folgen. Die eine kann nach Maßgabe von Ansteuer- oder Messparametern der anderen gesteuert bzw. geregelt werden.

[0027] Schneidbewegung und Vibrationsbewegung können gleichzeitig miteinander oder wahlweise unabhängig voneinander jeweils einzeln eingesteuert werden.

[0028] **Fig. 1** zeigt schematisch eine Werkzeugmaschine **10**. Sie weist einen Maschinenrahmen **1** auf. Im Betrieb sind über verschiedene Zwischenglieder am Maschinenrahmen **1** einerseits das Werkstück **6** und andererseits das Werkzeug **7** befestigt. Es können mehrere Stellachsen **2a**, **2b** zur statischen Einstellung der translatorischen und/oder rotatorischen Positionen des Werkzeugs und/oder des Werkstücks vorgesehen sein. Es können Stellachsen **2a** zwischen Maschinenrahmen **1** und Werkzeuggestisch **4** vorgesehen sein und/oder Stellachsen **2b** zwischen Maschinenrahmen **1** und Werkzeug **7**.

[0029] Weiterhin ist mindestens ein Antrieb **3a**, **3b** für das Schneidwerkzeug oder den Werkstücktisch oder die Werkstückeinspannung vorgesehen. Allgemein kann der Antrieb elektrisch sein und eine mechanische Übersetzung oder Untersetzung aufweisen. Das Werkzeug kann eine Fräse, insbesondere ein Schafffräser sein, der bei der Werkstückbearbeitung elektrisch angetrieben in Drehbewegung versetzt wird. Im Falle eines Bohrers kann der Antrieb **3b** beispielsweise ein Elektromotor mit Getriebe sein, der den Bohrer **7** oder das Bohrfutter in Drehbewe-

gung versetzt. Im Falle einer Drehmaschine kann der Antrieb **3a** ein Elektromotor mit Getriebe sein, der das Drehfutter in Drehung versetzt. Allgemein kann ein Antrieb **3a** zwischen Maschinenrahmen **1** und Werkstück **6** liegen, und/oder es kann ein Antrieb **3b** zwischen Maschinenrahmen **1** und Werkzeug **7** liegen.

[0030] Das Werkzeug **7** kann über eine Schnellkupplung **5**, **5a** und/oder über eine Werkzeugschnittstelle **5b** austauschbar sein, so dass es schnell und gegebenenfalls auch automatisch gewechselt werden kann. Die Schnellkupplung **5**, **5a** kann eine übliche Kegelkupplung mit einem werkzeugseitigen Kegel **5a** und einer entsprechenden maschinenseitigen Aufnahme oder Ähnliches sein. Die Werkzeugschnittstelle **5b** kann unmittelbar am eigentlichen Werkzeug liegen und eine Aufnahme für einen Werkzeugschaft aufweisen und kann eine Spannzange oder ähnliches aufweisen. Das Werkstück **6** kann auf einem Werkstücktisch **4** liegen und kann dort festgespannt sein.

[0031] Es ist eine Vibrationseinheit **11** vorgesehen, die zusätzlich zur herkömmlichen Schneidbewegung zwischen Werkzeug **7** und Werkstück **6** eine Vibrationsbewegung relativ zwischen ihnen hervorruft. In **Fig. 1** ist schematisch eine Ausführungsform gezeigt, bei der sich die Vibrationseinheit **11** am maschinenrahmenseitigen Ende einer Schnellkupplung **5a** befindet. Es sind aber auch andere Positionen der Vibrationseinheit **11** im Kraftfluss möglich. Die Vibrationseinheit kann sich auch näher am Werkzeug befinden, etwa werkzeugseitig der Schnellkupplung **5**, wobei sich dann zwischen Vibrationseinheit **11** und Werkzeug noch die genannte weitere Werkzeugschnittstelle **5b** befinden kann. Die Vibrationseinheit **11** kann sich auch in der Nähe des Werkstücktischs **4** befinden, etwa zwischen Werkstücktisch **4** und Antrieb **3a** oder bei den Stellgliedern **2a** oder am Maschinenrahmen **1**.

[0032] In der gezeigten Ausführungsform ist die Vibrationseinheit **11** dazu ausgelegt, das Werkzeug **7** vibrierend zu betätigen. Die Vibration kann eine lineare Vibration oder eine Drehvibration sein.

[0033] Eine lineare Vibration kann Richtungskomponenten parallel und/oder senkrecht zur lokalen Werkstückebene haben. Im Falle einer Bohrmaschine kann die Vibration längs der Bohrerachse erfolgen. Im Falle einer Bohrmaschine kann die Vibration längs der Bohrerachse erfolgen. Bei einer Drehmaschine kann der Drehmeißel in Vibration versetzt werden. Bei einer Fräse kann das Fräswerkzeug oder das Werkstück in Vibration versetzt werden.

[0034] Eine Drehvibration kann um eine in der Maschine schon vorhandene Drehachse herum erfolgen und durch eine geeignet angebrachte und angesteuerte Vibrationseinheit eingebracht werden. Sie kann allgemein in die schon mit der Drehbewegung be-

aufschlagte Komponente der Maschine (z. B. bei einer Bohrmaschine Bohrfutter bzw. Bohrer) eingeleitet werden. Sie kann aber auch – um die gleiche Achse herum – allgemein in das jeweilige Gegenüber der mit der Drehbewegung beaufschlagten Komponente eingeleitet werden (im Falle einer Bohrmaschine also in den Werkstücktisch bzw. in das Werkstück). Bei einer Drehmaschine kann das Drehfutter mit einer Drehvibration um die Drehachse herum beaufschlagt sein. Bei einer Fräsmaschine kann das Fräswerkzeug mit einer Drehvibration um seine Drehachse herum beaufschlagt sein.

[0035] Mehrere Vibrationen, und insbesondere Drehvibration und lineare Vibration, können gleichzeitig und sich überlagernd über mehrere Vibrationseinheiten eingebracht werden. Wenn mehrere Vibrationseinheiten vorgesehen sind, können sie teils am Werkstück bzw. am Werkstücktisch und teils am Werkzeug bzw. an der Werkzeughalterung angreifen.

[0036] Eine Vibrationseinheit kann ein oder mehrere Vibratoren, z. B. Piezoelemente, aufweisen. Sie können gleiche oder unterschiedliche Signale empfangen. Der Unterschied kann ein Phasenversatz sein oder eine Invertierung.

[0037] Die Vibrationsfrequenz kann über 5 kHz oder über 10 kHz oder über 20 kHz oder über 40 kHz liegen. Vibrationseinheit **11** und Antrieb **3a**, **3b** können gleichzeitig betätigbar oder jeweils einzeln abwechselnd betätigbar sein. Die Steuerung kann für beide Betriebsmoden (gemeinsam, abwechselnd) ausgelegt sein.

[0038] Die Werkzeugmaschine **10** kann allgemein Sensorik **14** zur Erfassung von Prozessparametern aufweisen. Die Sensorik kann einen oder mehrere Sensoren verteilt über die Werkzeugmaschine aufweisen. Über Leitungen **16** werden die Signale zur Steuerung/Regelung **12** zurückgeführt und dort protokolliert und/oder ausgegeben und/oder ihrerseits zur Ansteuerung der diversen Maschinenkomponenten berücksichtigt. Die Steuerung **12** hat Ansteuerleitungen **15** hin zu den einzelnen Komponenten der Maschine, also insbesondere hin zu den Antrieben **3a**, **3b**, Stellachsen **2a**, **2b** und zur Vibrationseinheit **11**.

[0039] Daneben kann eine nicht gezeigte Ausgabeeinheit für Bedienpersonal vorhanden sein. **13** symbolisiert einen Datenspeicher (z. B. Halbleiter und/oder Platte), der einerseits beispielweise ein Bearbeitungsprogramm für das Werkstück enthält, andererseits aber auch Kennwerte für die Schneidbewegung, für die Vibrationsbewegungen oder für die Abhängigkeiten von Ansteuerparametern, insbesondere für die Schneidbewegung und für die Vibrationsbewegung von Eingabeparametern oder ermittelten/gemessenen Parametern (tabellarisch, formelmäßig).

Die Steuerung kann Zugriff auf den Speicher haben und dort beispielsweise auf zwei- oder mehrdimensionale Tabellen zur Ermittlung von Stellgrößen aus Eingangsgrößen zugreifen.

[0040] Bei der Vibrationseinheit **11** können die einzelnen Parameter einstellbar/ansteuerbar sein, insbesondere Vibrationsfrequenz, Vibrationsamplitude, Wellenform der ansteuernden Signale, Vibrationsrichtung, und Ähnliches. Einzelne oder mehrere Parameter können regelbar sein, also nach Maßgabe von erfassten, rückgeführten Werten korrigiert werden.

[0041] [Fig. 2](#) zeigt schematisch den regelungstechnischen Teil einer Steuerung. **12** symbolisiert den Regler der [Fig. 1](#). Nicht gezeigt ist der programmtechnische Teil, der ebenso vorhanden sein kann. Er kann ein Bearbeitungsprogramm gespeichert haben, das die einzelnen Maschinenkomponenten steuert und jeweils Ansteuerparameter und Sollwerte für Steuerungen und Regelungen vorgibt. Die Steuerung **12** kann digital aufgebaut sein und kann an der Schnittstelle hin zum Prozess nicht gezeigte Analog-/Digitalwandler aufweisen. Abhängig vom jeweiligen Betriebszustand kann die Steuerung **12** bzw. Regelung **12** jeweils Vorgabewerte erhalten, die beispielsweise einem Speicher **13** entnommen sind oder vom genannten Steuerungsprogramm ermittelt werden.

[0042] In [Fig. 2](#) ist die Steuerung **12** schematisch als aus zwei Teilen bestehend gezeigt, nämlich einerseits einem Regler **21** für den herkömmlichen Antrieb **3b** des Schneidwerkzeugs **7**, also beispielsweise eines Elektromotors für einen Bohrer. Der reale Prozess ist insoweit durch Kasten **3b** symbolisiert. **14a** symbolisiert Sensorik betreffend die herkömmliche Schneidbewegung, die über Leitung **16a** zurückgeführt wird.

[0043] Es ist ein weiterer Regler **22** vorgesehen, der die erfindungsgemäße Vibrationsbewegung steuert bzw. regelt. Er gibt über Leitung **15b** Signale an den realen Prozess ab, insbesondere an die Vibrationseinheit **11**. **14b** symbolisiert Sensorik für vibrations-spezifische Werte, die über Leitung **16b** zurückgeführt werden können.

[0044] Grundsätzlich können Vibrationsbewegung und Schneidbewegung gleichzeitig eingesteuert werden oder abwechselnd eingesteuert werden. Die Steuerungen der einzelnen Bewegungen können auf Steuerungs- bzw. Regelungsebene unabhängig voneinander nach Maßgabe jeweiliger individueller Vorgaben erfolgen, oder sie kann verschränkt erfolgen, indem beispielsweise Ausgabesignale **15a** für den herkömmlichen Schneidbewegungsantrieb auch in den Regler **22** für den Vibrationsantrieb eingeführt werden (Leitung **23**) und/oder umgekehrt, indem Ausgabesignale **15b** für den Vibrationsantrieb **11** in den

Regler **21** für den Schneidtrieb eingegeben werden (Leitung **24**). Auch kann die Rückführung von Signalen **16a**, **16b**, wenn sie vorgesehen ist, auch „über Kreuz“ erfolgen, also indem der Regler **22** für den Vibrationsantrieb Prozesssignale betreffend die Schneidbewegung erhält (Leitung **16a**) und/oder umgekehrt, indem der Regler **21** für die Schneidbewegung Prozesssignale betreffend die Vibrationsbewegung erhält (Leitung **16b**). Die Verknüpfung und Verschränkung der einzelnen Parameter kann formelmäßig oder anhand von Tabellen erfolgen, die geeignet hinterlegt sind und vorgehalten werden.

[0045] Es kann aber auch eine vergleichsweise einfache Steuerung vorgesehen sein, die gegebenenfalls auch völlig ohne Rückführung die Schneidbewegung und die Vibrationsbewegung einfach nach Maßgabe von Vorgabewerten steuert, wobei aber natürlich die Vorgabewerte in Bezug aufeinander ermittelt worden sein können.

[0046] Es können eine oder mehrere Vibrationseinheiten **11** vorgesehen sein. Es kann zum Beispiel eine erste Vibrationseinheit **11** nahe am Werkzeug **7** vorgesehen sein und eine zweite Vibrationseinheit **11** nahe am Werkstück **6** oder Werkstücktisch **4**. Sie können einzeln steuerbar/regelbar oder in Bezug aufeinander steuerbar/regelbar ausgelegt sein, ähnlich wie dies bezugnehmend auf Schneidbewegungssteuerung **21** und Vibrationsbewegungssteuerung **22** Bezug nehmend auf [Fig. 2](#) erläutert wurde. Es kann eine einzelne Vibrationseinheit **11** auch für die Vibration längs mehrerer Achsen ausgelegt sein, wobei die einzelnen Achsen unabhängig voneinander ansteuerbar sein können.

[0047] Es sei darauf verwiesen, dass [Fig. 2](#) nur Teile der Gesamtsteuerung zeigt. Nicht gezeigt sind die Ansteuerung herkömmlicher Komponenten (z. B. Stellachsen, Werkzeugwechsler), die aber ebenso vorhanden sein können. Die Steuerung **12** kann Teil eines Prozessrechners sein, der entsprechend den Anforderungen ausgestattet ist.

[0048] Die Sensorik in der Werkzeugmaschine **10** kann einen oder mehrere der folgenden Sensoren aufweisen, wobei insoweit der Begriff „Sensor“ auch komplexere Auswertungsmechanismen mit enthalten kann: Sensor für Vibrationsamplitude oder Vibrationsamplitudenänderung im Bereich der Frequenz der Vibrationseinheit **11**, Sensor für Spannung und/oder Strom an einem der Antriebe, insbesondere am Vibrationsantrieb **11**, gegebenenfalls auch für die Phasenlage zwischen Spannung an Strom am jeweiligen Antrieb, und gegebenenfalls die Änderungen der jeweiligen Werte (Strom, Spannung, Phase), Sensor für die Vorschubgeschwindigkeit der Schneidbearbeitung. Weitere Sensoren können vorgesehen sein.

[0049] **Fig. 3** zeigt schematisch eine Ausführungsform einer schnell wechselbaren Werkzeugeinheit **30**. Sie weist das eigentliche Werkzeug **7** auf, beispielsweise einen Schafffräser. Darüber hinaus weist sie die Vibrationseinheit **11** auf. Sie weist weiter eine Energiezuführung **31** auf und ein Kupplungsteil **5a**, um die Werkzeugeinheit **30** mit der Werkzeugmaschine verbinden zu können. Die Kupplungsteil **5a** kann eine übliche Kegelkupplung oder Ähnliches sein. Zwischen Vibrationseinheit **11** und Werkzeug **7** kann die Werkzeugschnittstelle **5b** vorgesehen sein, die den Austausch des Werkzeugs **7** erlaubt.

[0050] Die Vibrationseinheit **11** kann eine elektromechanisch betätigte Vibrationseinheit sein oder eine piezoelektrisch betätigte Vibrationseinheit. In beiden Fällen ist elektrische Energie von Nöten. Sie kann über eine herkömmliche elektrische Verbindung zugeführt werden, die im Falle von sich drehenden Werkzeugen dann allerdings schleifend und damit relativ kompliziert ausgelegt sein müsste. Die Energiezuführung kann aber auch drahtlos erfolgen, beispielsweise induktiv, indem in der Werkzeugeinheit zum Beispiel eine Induktionsspule **32** vorgesehen ist, relativ zu der sich ein externes Magnetfeld, angedeutet durch Pfeil **33**, ändert. Bspw. kann die Spule **32** in einer Ebene senkrecht zur Drehachse eines rotierenden Werkzeugs liegen und von einem sich mit einer bestimmten Frequenz ändernden äußeren Magnetfeld durchsetzt sein. Sie kann aber auch so ausgerichtet sein, dass sie in einem statischen äußeren Magnetfeld schon aufgrund der Drehbewegung des Werkzeugs ein sich änderndes Magnetfeld durch die Spulenfläche hindurch erfährt. Es entsteht eine induzierte Wechselspannung, die direkt auf die Aktoren gegeben werden kann. Es können aber auch weitere (nicht gezeigte) elektrische oder elektronische Elemente zur Spannungsformung.

[0051] Der Vorteil der Ausführungsform der **Fig. 3** ist es, dass eine so ausgebildete Werkzeugeinheit **30** relativ einfach in einer herkömmlichen Werkzeugmaschine **10** verwendet werden kann. Insbesondere müssen nicht elektrische Kontakte vorgesehen werden. Zur Sicherung der hinreichenden Wirksamkeit der induktiven Kopplung kann es allerdings notwendig sein, lokal ein geeignetes Magnetfeld zu erzeugen.

[0052] **Fig. 4a** zeigt schematisch eine Darstellung zur Erläuterung von Richtungsangaben bei einem Fräser als Werkzeug **7**. Gezeigt ist schematisch ein sich von links nach rechts über eine Werkstückoberfläche voranarbeitender Schafffräser (Pfeil **74**). Er dreht sich gemäß Pfeil **42** gegen den Uhrzeigersinn um Achse **43**. **71** sind die Schneidkanten des Schafffräasers. Die relative Schneidbewegung zwischen Fräser **7** und Werkstück **6** verläuft auch in Richtung des Pfeils **74** (x-Richtung). Die Vibrationsbewegung kann rechtwinklig dazu sein, etwa senk-

recht zur Zeichnungsebene (y-Richtung). Die Vibrationsrichtung kann aber auch anders als gezeigt sein, etwa längs x-Richtung oder längs z-Richtung oder kann schräg zu diesen Richtungen liegen.

[0053] **Fig. 4b** zeigt schematisch eine Darstellung zur Erläuterung von Richtungsangaben bei einem Bohrer als Werkzeug **7**. Gezeigt ist schematisch ein in einem Werkstück **6** steckender Bohrer **7**. **71** symbolisiert eine Schneidkante des Bohrers. Im herkömmlichen Betrieb dreht sich der Bohrer **7** um seine Achse **73** wie durch Pfeil **74** angedeutet. Jeder Punkt auf der Schneidkante **71** führt dann eine kreisförmige Schneidbewegung wie durch Pfeil **74** angedeutet aus. Der Schneidbewegung, symbolisiert durch Pfeil **74**, kann erfindungsgemäß eine Vibrationsbewegung **75** überlagert werden, oder die Bewegungen **75**, **74** werden abwechselnd vollzogen. **Fig. 4b** zeigt eine Ausführungsform, in der die Vibrationsbewegung längs Pfeil **75** erfolgt, also in Richtung der Bohrerachse **73** (z-Richtung). Die Vibrationsbewegung **75** ist nicht parallel zur Schneidbewegungsrichtung **74**. Sie kann in etwa rechtwinklig dazu sein oder insbesondere in Richtung der Bohrerachse. Sie ist in der gezeigten Ausführungsform nicht parallel zur lokalen Werkstückoberfläche unter der Bohrerschneidkante. Vielmehr stößt sie ansatzweise in die Oberfläche hinein.

[0054] Das Werkzeug kann im Vergleich zu herkömmlichen Werkzeugen auf die auch vibrierende Bewegung hin ausgelegt sein. Beispielsweise können bestimmte Flächen oder Kanten des Werkzeugs aufgeraut oder in bestimmter Weise im Vergleich zu herkömmlichen Werkzeugen modifiziert sein. Insbesondere kann beispielsweise die Spanfläche eines Werkzeugs oder die Schneidkante eines Werkzeugs oder die Freifläche eines Werkzeugs aufgeraut oder gezahnt sein, zumindest bereichsweise, um die Wirksamkeit der Vibrationsbewegung in gewünschter Weise einstellen zu können. Das Werkzeug kann auch so gestaltet sein, dass im Hinblick auf die gewünschte Vibrationsanregung bestimmte Resonanzfrequenzen des Werkzeugs gegeben oder in bestimmten Frequenzbereichen vermieden sind. Es kann eine vorgegebene Verstimmung (Unterschied) zwischen Resonanzfrequenz des Werkzeugs und Anregungsfrequenz der Vibration vorliegen, die gesteuert sein und ggf. auch regelungstechnisch gehalten werden kann. Die Werkzeuggestaltung kann durch gezielte Materialhinzufügungen oder Materialwegnahmen am Werkzeug erfolgen.

[0055] Die bisher beschriebenen Merkmale der Erfindung können wie folgt zusammengefasst und aufgezählt werden:

1. Werkzeugmaschine (**10**) mit einem Werkzeug (**7**) mit einer definierten Schneide (**71**) zur Werkstückbearbeitung mit einer Schneidbewegung (**74**) des Werkzeugs (**7**) relativ zum Werk-

stück (6), und mit einer Vibrationseinheit (11) zum Erzeugen einer Vibrationsbewegung (75) zwischen Werkzeug (7) und Werkstück (6).

2. Werkzeugmaschine nach oben 1, bei der die Vibrationseinheit (11) dazu ausgelegt ist, das Werkzeug (7) oder den Werkstücktisch (6) in vibrierende Bewegung (75) zu versetzen.

3. Werkzeugmaschine nach oben Anspruch 1 oder 2, bei der die Vibrationseinheit (11) zur Erzeugung einer längs einer Richtung reversierenden Vibration (75) ausgelegt ist, wobei die Richtung parallel oder rechtwinklig zur Richtung der Schneidbewegung (74) ist oder unter einem bestimmten Winkel dazu verläuft.

4. Werkzeugmaschine nach oben 1 bis 3, bei der das Werkzeug (7) ein Bohrer, ein Fräser, insbesondere ein Schafffräser, ein Hobel oder ein Drehmeißel ist.

5. Werkzeugmaschine nach oben 1 bis 4, bei der das Werkzeug (7) ein Schafffräser oder ein Bohrer ist und die Vibrationseinheit (11) zum Vibrieren des Schafffräasers bzw. des Bohrers (7) in einer Richtung (75) parallel oder senkrecht zu seiner Drehachse (73) oder unter einem bestimmten Winkel dazu ausgelegt ist.

6. Werkzeugmaschine nach oben 1 bis 5, mit mehreren abhängig oder unabhängig voneinander ansteuerbaren Vibrationseinheiten (11).

7. Werkzeugmaschine nach oben 1 bis 6, bei der die Vibrationseinheit (11) einen elektromagnetischen oder einen piezoelektrischen Antrieb aufweist und vorzugsweise mit einer Vibrationsfrequenz größer 5 kHz oder größer 10 kHz oder größer 20 kHz arbeitet.

8. Werkzeugmaschine nach oben 1 bis 7, mit einer Steuerung (12) zur Steuerung der Schneidbewegung (74) und zur Steuerung der Vibrationsbewegung (75).

9. Werkzeugmaschine nach oben 8, mit einer Einrichtung (21) zur Steuerung eines oder mehrerer einstellbarer Parameter der Schneidbewegung (74) nach Maßgabe eines oder mehrerer einstellbarer oder ermittelter Parameter der Vibrationsbewegung (75), und/oder mit einer Einrichtung (22) zur Steuerung eines oder mehrerer einstellbarer Parameter der Vibrationsbewegung (75) nach Maßgabe eines oder mehrerer einstellbarer oder ermittelter Parameter der Schneidbewegung.

10. Werkzeugmaschine nach oben 8 oder 9, mit einem oder mehreren Sensoren (14) zur Erfassung eines oder mehrerer Parameter betreffend die Schneidbewegung (74) und/oder betreffend die Vibrationsbewegung (75), insbesondere von Vibrationsamplitude und/oder Spannung und/oder Strom an einem oder mehreren der Aktoren und/oder Phasenlage zwischen zweien von mechanischer Vibration, Spannung und Strom der Vibrationseinheit (11), und/oder von Vorschubgeschwindigkeit (77) der Schneidbearbeitung.

11. Werkzeugmaschine nach oben 8 bis 10, bei der die Steuerung (12) die Schneidbewegung (74) und die Vibrationsbewegung (75) gleichzeitig oder mit dem gleichen Werkzeug jeweils einzeln hervorrufen kann.

12. Werkzeugmaschine nach oben 1 bis 11, bei der das Werkzeug (7) eine zumindest bereichsweise aufgeraute Spanfläche oder Freifläche oder Schneidkante aufweist.

13. Werkzeugmaschine nach oben 1 bis 12, bei der das Werkzeug (7) auswechselbar ist und die Vibrationseinheit (11) im auswechselbaren Werkzeug vorgesehen ist, wobei die Vibrationseinheit (11) vorzugsweise eine Einrichtung (31–35) zum drahtlosen Empfangen von Energie aufweist.

14. Werkstückbearbeitungsverfahren, bei dem relativ zwischen einem Werkzeug mit einer definierten Schneide und einem Werkstück eine Schneidbewegung und eine Vibrationsbewegung hervorgerufen wird, wobei die Schneidbewegung und die Vibrationsbewegung sowohl gleichzeitig als auch jeweils einzeln verwendet werden können.

15. Verfahren nach oben 14, bei dem die Vibration längs einer translatorischen und/oder um eine rotatorische Achse herum erfolgt.

Zweite Ausführungsform

[0056] Bei einem Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks mit einem Werkzeug wird relativ zwischen beiden eine Schneidbewegung und ihr überlagert eine erste Vibrationsbewegung in der Weise hervorgerufen, dass ein oder mehrere Kennwerte der ersten Vibrationsbewegung nach Maßgabe eines oder mehrerer Kennwerte der Schneidbewegung eingestellt werden.

[0057] Die Kennwerte der Schneidbewegung wie auch die der Vibrationsbewegung können während der Werkstückbearbeitung mindestens zeitweise konstant, können aber auch veränderlich sein.

[0058] Bei einem Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks mit einem Werkzeug, insbesondere wie oben, wird relativ zwischen beiden eine Schneidbewegung und ihr überlagert eine erste Vibrationsbewegung in der Weise hervorgerufen, dass die Vibrationsbewegung unterscheidbare Oberflächenbereiche und/oder Feinstrukturierungen der Oberfläche des Werkstücks bewirkt. Die erste Vibrationsbewegung kann nach Maßgabe der Position des Werkzeugs und vorzugsweise auch nach Maßgabe von Daten, die das zu fertigende Werkstück beschreiben, gesteuert werden.

[0059] Bei einem Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks mit einem Werkzeug, insbesondere wie oben, wird relativ zwischen beiden eine Schneidbewegung und ihr überlagert eine erste Vibrationsbewegung in der Weise hervorgerufen, dass die hinter-

lassene Oberfläche gegenüber einer Bearbeitung ohne erste Vibrationsbewegung verändert ist.

[0060] Die überlagerte erste Vibrationsbewegung kann sich in einer Raumdimension erstrecken oder in zwei Raumdimensionen (beispielsweise in Ebene parallel zur momentanen Werkstückoberfläche) oder in allen dreien.

[0061] Die Vibrationsbewegung kann moduliert sein. Die Modulation kann nach Maßgabe von Größen der Schneidbewegung und/oder nach Maßgabe von Werkstückdaten und/oder nach Maßgabe des Bearbeitungsfortschritts und/oder nach Maßgabe externer Größen wie etwa Zeit oder externe Eingaben erfolgen.

[0062] Es kann ein angepasstes Werkzeug verwendet werden, insbesondere eines, das eine oder mehrere geometrisch definierte Schneiden hat und dessen Schneide(n) an die Amplitude der Vibrationsbewegung angepasst ist, insbesondere derart, dass ein Schneidenbereich eine Strukturierung aufweist, deren Abmessung in der Größenordnung der Amplitude der ersten Vibrationsbewegung liegt. Die Strukturierung des Schneidenbereichs kann beispielsweise so sein, dass eine Schneidkante eine Länge hat, die der genannten Dimensionierung entspricht. Bei einem Werkzeug kann auch eine eigentlich kontinuierliche Schneidkante durch eine oder mehrere Unterbrechungen in mehrere Bereiche unterteilt sein, wobei dann die Längen der Unterbrechungen und/oder die Längen der Schneidkantenbereiche und/oder die Schrittweite von Bereich zu Bereich der genannten Dimensionierung entsprechen. Die Unterbrechungen können selbst wieder als Schneidkanten ausgebildet sein, so dass sich insoweit ein Werkzeug mit stufiger Schneidkante ergibt.

[0063] Mit den oben und auch den nachfolgend genannten Aspekten können die Merkmale der ersten Ausführungsform weitergebildet werden, sie sind miteinander kombinierbar, soweit dies technisch nicht ausgeschlossen ist.

[0064] Soweit von Bewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück angesprochen sind, sind dies Relativbewegungen zwischen beiden, ohne dass damit zwingend eine Aussage dahingehend verknüpft sein soll, welche der beiden Komponenten tatsächlich (gegenüber dem Maschinenrahmen als Bezugssystem) bewegt wird. Dies kann separat definiert werden.

[0065] Fig. 5 zeigt beispielhaft eine Möglichkeit der Einstellung eines oder mehrerer Parameter der Vibrationsbewegung und eines oder mehrerer Parameter der Schneidbewegung in Bezug aufeinander. Fig. 5a ist eine schematisch/perspektivische Ansicht der Anordnung, während Fig. 5b eine schematische

Draufsicht auf eine hinterlassene Werkstückoberfläche nach der Bearbeitung ist. Es wird angenommen, dass die Maschine eine Drehmaschine und dementsprechend das Werkzeug 7 ein Drehmeißel mit einer Schneidkante 71 ist. Das Werkstück 6 dreht sich längs Pfeil 52 um Achse 59, die sich in z-Richtung streckt. Der Drehmeißel selbst wird linear längs Pfeil 53 vorgeschoben. Auf der Werkstückoberfläche ergibt sich damit prinzipiell eine durch die Spirale 51 angedeutete Spiralbahn als Schneidbewegung des Werkzeugs 7 auf dem Werkstück 6.

[0066] Der Vorschubbewegung 53 der Schneidbewegung ist eine Vibrationsbewegung 54 überlagert. In der gezeigten Ausführungsform ist es eine lineare Vibrationsbewegung, die sich parallel zur Vorschubbewegung 53 erstreckt. Längs Richtung 54 (parallel zu 53 und Achse 59 und z-Achse) vibriert der Drehmeißel, beispielsweise indem er durch einen entsprechenden Antrieb in Vibration versetzt wird. Die Vibration des Drehmeißels ist neben der Qualität (translatorisch oder rotatorisch) und der Richtung (Pfeil 54) durch Frequenz, Amplitude und gegebenenfalls auch Wellenform der Vibrationsbewegung gekennzeichnet. Einer oder mehrerer dieser Parameter kann im Bezug auf einen oder mehrere Parameter der Schneidbewegung (Drehung 52, Vorschub 53) festgelegt werden. Auch Kennwerte des Werkzeugs können zur Dimensionierung eines oder mehrerer Kennwerte der Vibrationsbewegung herangezogen werden.

[0067] So können beispielsweise die Frequenz f_v der ersten Vibrationsbewegung und die Umlauffrequenz des Werkstücks f_s der Formel $f_v = (n + k_1) \cdot f_s$ genügen, wobei n eine ganze Zahl ist und k_1 ein Versatz zwischen 0 und 1 ist. Wenn beispielsweise $n = 100$ und $k_1 = 0,5$ gilt, dann finden pro Umlauf des Werkstücks 100,5 Vibrationen des Werkstücks statt, sodass in Umfangsrichtung betrachtet im späteren Umlauf ein Minimalwert der Vibrationsauslenkung auf einen Maximalwert der Vibrationsauslenkung im früheren Umlauf trifft. Wenn dann noch die Vorschubgeschwindigkeit v_s (Schneidbewegung gemäß Pfeil 53) und die Schneidkantenlänge l_s geeignet dimensioniert sind, ergeben sich bestimmte Muster auf der hinterlassenen Werkstückoberfläche. Fig. 5b zeigt ein Beispiel hierzu.

[0068] In Fig. 5b zeigen die gestrichpunkteten Linien 51a, 51b, 51c, ... einzelne Windungen der in Fig. 5a gezeigten Spirale. Es sei darauf hingewiesen, dass selbstverständlich diese Strukturen nicht als solche auf der Werkstückoberfläche zu sehen sind, sondern nur Markierungen idealer Verläufe sind, die real in der gezeigten Weise nicht zu sehen sind. Die Linien 55a, 55b, 55c, ... zeigen eine überlagerte Bewegung, die sich aus der Überlagerung von Schneidbewegung (Pfeile 52, 53) einerseits und Vibrationsbewegung (Pfeil 54) andererseits ergibt. Auch die Lini-

en **55a** sind ideale Widergaben idealer Verläufe. Es zeigt sich aber, dass Maxima und Minima benachbarter Spuren **55** eine feste Phasenlage Δ zueinander haben, sodass sich beispielsweise Makrostrukturen herausbilden können, wie sie durch Linien **56a**, **56b**, **56c**, ... angedeutet sind.

[0069] **Fig. 5c** zeigt schematisch eine Struktur, wie sie tatsächlich von einem vibrierenden Werkzeug auf der Werkstückoberfläche hinterlassen sein kann. **51** und **55** bezeichnen abermals die makroskopische Spiralbahn beziehungsweise die vibrierende Bahn des Werkzeugs. **71'** bezeichnet an zwei Stellen die Länge der Schneidkante **71** des Werkzeugs **7**. Die Striche **71'** sind insoweit lediglich als schematische Lageangaben der Schneidkante zu einem bestimmten Zeitpunkt des Bearbeitungsvorgangs zu verstehen. Die Schneidkanten räumen die Furchen aus, die bei bestimmter Wahl der Arbeitsparameter zu Überlappungen der Maxima und Minima in den einzelnen Umläufen führen, so dass, beispielsweise wie gezeigt, Inseln **58** stehen bleiben können. Es entsteht auf diese Weise eine strukturierte Oberfläche mit Mustern, die nicht zufällig entstanden sind.

[0070] Die Größe und die absolute und relative Lage der Strukturen zueinander hängt von den einzelnen Parametern der Vibrationsbewegung einerseits und der Schneidbewegung andererseits ab. Die verschiedenen Parameter können mindestens zeitweise konstant einer oder mehreren der folgenden Formeln genügen und dementsprechend gewählt oder gesetzt oder eingestellt werden:

$$f_v = (n_1 + k_1) \cdot f_s \quad (1)$$

$$a_v = k_2 \cdot v_s / f_s = k_2 \cdot s_s \quad (2)$$

$$l_s = k_3 \cdot a_v = k_4 \cdot s_s \quad (3)$$

[0071] Die Größe f_v ist die Vibrationsfrequenz der ersten Vibrationsbewegung, f_s ist die Umlauffrequenz (Drehzahl) des Drehteils, a_v ist die Amplitude der Vibrationsbewegung, die senkrecht zur Drehbewegung und senkrecht oder parallel zur Werkstückoberfläche gerichtet sein kann, v_s ist die Vorschubgeschwindigkeit des Drehmeißels, s_s ist die Schrittweite des Vorschubs pro Umlauf, l_s ist die Länge der Schneidkante **71** bzw. von Schneidkantensegmenten **71a**, **71b**, n_1 ist eine ganze Zahl, und k_1 bis k_3 sind reelle Anpassparameter. Mit k_1 zwischen 0 und 1 kann ein Phasenversatz entsprechend Δ in **Fig. 5a** zwischen 0° und 360° bewirkt werden. Wenn $k_2 = 0,5$ ist, berühren sich die Mittellinien der Maxima der einzelnen Umläufe gerade. Wenn k_4 kleiner 1 ist, räumt der Drehmeißel eine Spur aus, die weniger breit ist als die Schrittweite s_s , so dass Material stehen bleibt. Wenn dagegen k_4 größer 1 ist, bleibt kein Material stehen. Insgesamt kann k_4 ein Faktor sein, dessen Untergrenze 0,01 oder 0,02 oder 0,05 oder 0,1 oder

0,2 oder 0,5 sein kann und/oder dessen Obergrenze 0,1 oder 0,2 oder 0,5 oder 1 oder 2 sein kann.

[0072] Vorstehend wurde eine Ausführungsform beschrieben, bei der die Vibrationsbewegung **54** parallel zur Werkstückebene liegt. Es kann aber auch Ausführungsformen geben, bei der die überlagerte Vibrationsbewegung **54** senkrecht zur Werkstückebene liegt. In **Fig. 5a** wäre dies eine Vibration auf die Drehachse **59** zu und von ihr wieder weg. Es ergeben sich dann unterschiedlich tiefe Ausräumungen auf der Werkstückoberfläche durch die Schneidkante **71** des Drehmeißels **7**. Bei geeigneter Phasenlage Δ können auf diese Weise beispielsweise Kanäle entstehen, die bei $\Delta = 0$ parallel zur Drehachse **59** laufen und bei $\Delta \neq 0$ schräg zur Drehachse laufen können. Die Schneidkantenlänge l_s kann dann größer als die Schrittweite s_s pro Umlauf sein.

[0073] Bei einer fräsenden Bearbeitung eines Werkstücks können Parameter mindestens zeitweise konstant wie folgt nach einer oder mehreren der folgenden Gleichungen gewählt oder gesetzt oder eingestellt werden:

$$f_v = v_s / l_w \quad (4)$$

$$\varphi = k_5 \cdot \pi \quad (5)$$

[0074] Die Größe f_v ist die Vibrationsfrequenz der ersten Vibrationsbewegung, v_s ist die Vorschubgeschwindigkeit der Schneidkante auf der Werkstückoberfläche und l_w ist die Wellenlänge des sich auf der Werkstückoberfläche abbildenden Musters der Vibration. φ ist der Phasenversatz in Vorschubrichtung der Schneidkante zwischen mehreren Paaren von Mustern in benachbarten Frässpuren, und k_5 ist ein Faktor, der zwischen -1 und 1 liegen kann. Damit kann ein über mehrere Spuren hinweg konstanter Phasenversatz zwischen benachbarten Frässpuren eingestellt werden, der auch 0 sein kann.

[0075] Beim Bohren können Parameter mindestens zeitweise konstant wie folgt nach einer oder mehreren der folgenden Gleichungen gewählt oder gesetzt oder eingestellt werden:

$$f_v = (n_2 + k_6) \cdot f_s \quad (6)$$

$$a_v = k_7 \cdot v_v / f_s \quad (7)$$

$$l_s = k_8 \cdot a_v \quad (8)$$

[0076] Die Größe f_v ist die Vibrationsfrequenz der ersten Vibrationsbewegung, f_s ist die Umlauffrequenz (Drehzahl) des Bohrers, a_v ist die Amplitude der Vibrationsbewegung, die senkrecht zur Drehbewegung und senkrecht oder parallel zur Werkstückoberfläche gerichtet sein kann, v_v ist die Vorschubgeschwindigkeit des Bohrers längs der Bohrerachse,

Is ist die Länge von Schneidkantensegmenten **71a**, **71b** an der den Drallwinkel bestimmenden Seitenkante des Bohrers, n_2 ist eine ganze Zahl, und k_6 bis k_8 sind reelle Anpassparameter mit $0 < k_6, k_7, k_8 < 1$.

[0077] Wenn die Schneidbewegung eine zweite Vibrationsbewegung eines über die Werkzeugoberfläche vorgeschobenen Werkzeugs ist, können Parameter mindestens zeitweise konstant nach einer oder mehreren der folgenden Gleichungen gewählt oder gesetzt oder eingestellt werden:

$$fv_1 = k_6 \cdot fv_2 \quad (9)$$

$$\varphi_2 = k_7 \cdot \pi \quad (10)$$

$$fv_1 = v_s / lw_1 \quad (11)$$

$$fv_2 = v_s / lw_2 \quad (12)$$

$$lw_1 = k_8 \cdot lw_2 \quad (13)$$

[0078] Die Größen fv_1 , fv_2 sind die Vibrationsfrequenzen der ersten bzw. der zweiten Vibrationsbewegung, φ ist ein einstellbarer Phasenversatz zwischen den beiden Vibrationen, wenn sie gleiche Frequenz oder ein rationales Frequenzverhältnis haben, der auch 0 sein kann. Die Größe v_s ist die Vorschubgeschwindigkeit des Werkzeugs auf der Werkstückoberfläche und lw_1 und lw_2 sind die Wellenlängen der sich auf der Werkstückoberfläche abbildenden Musters der ersten bzw. zweiten Vibration. k_6 ist ein Faktor, der ganzzahlig oder reziprok zu ganzzahlig sein kann. Er kann auch rational mit niedrigen Zahlen im Zähler und Nenner sein (etwa $1/2$, $1/3$, $1/4$, $1/5$, $2/3$, $2/5$, $3/4$, $3/5$, $4/5$) oder reziprok dazu, so dass sich entsprechende kombinierte Lissajous-Schwingungsmuster des Werkzeugs auf der Werkstückoberfläche ergeben. k_8 ist ein Faktor, der ganzzahlig oder reziprok zu ganzzahlig sein kann. Er kann auch rational mit niedrigen Zahlen im Zähler und Nenner wie oben angegeben sein.

[0079] Allgemein können ein oder mehrere Kennwerte der ersten Vibrationsbewegung nach Maßgabe eines oder mehrerer Kennwerte der Schneidbewegung eingestellt werden. Es können auch umgekehrt ein oder mehrere Kennwerte der Schneidbewegung nach Maßgabe eines oder mehrerer Kennwerte der ersten Vibrationsbewegung eingestellt werden. In den oben genannten Formeln (1) bis (13) kann der Wert auf der linken Seite der jeweiligen Formel nach Maßgabe der Werte auf der rechten Seite bestimmt und dann gesetzt werden. Die Formeln können aber auch nach einem Wert auf der rechten Seite aufgelöst werden, so dass dieser dann bestimmt und gesetzt werden kann.

[0080] Die vorstehenden Ausführungsformen wurden Bezug nehmend auf ein Werkzeug mit geome-

trisch definierter Schneide (Drehmeißel, Bohrer, Fräse, ...) beschrieben. Sie können qualitativ und quantitativ auch auf Werkzeuge mit geometrisch nicht definierter Schneide angewendet werden, beispielsweise Ultraschallwerkzeuge.

[0081] Bisher beschrieben wurden Abstimmungen von Schneidbewegung und erster Vibrationsbewegung, die getroffen wurden, um bestimmte Strukturierungen zu erreichen. Es kann aber auch gewünscht sein, das Entstehen bestimmter Strukturierungen zu vermeiden, so dass die Parameter von Schneid- und Vibrationsbewegung unter diesem Aspekt gesetzt werden. Dies kann das (quasi-)zufallsbedingte und auch zeitveränderliche Setzen Setzen und/oder das kontinuierliche Verändern eines oder mehrerer Parameter der Schneid- und der Vibrationsbewegung umfassen. Es können hierbei bei Parametern (z. B. Amplitude und/oder Frequenz der ersten Vibrationsbewegung, Drehzahl = Umlauffrequenz des Werkzeugs, Vorschubgeschwindigkeit) bestimmte Wertebereiche eingehalten oder vermieden werden.

[0082] Es können Steuerungs- oder Regelungseinrichtungen vorgesehen sein, die sicherstellen, dass die vorgegebenen Bewegungsparameter eingehalten werden. Für einen oder mehrere der jeweils gesetzten Bewegungsparameter kann geeignete Sensorik vorgesehen sein, so dass der Parameter rückführend geregelt werden kann. Es können aber auch Präzisionssteuerungen verwendet werden, die mit festlegbarer Genauigkeit die gewünschten Parameter einstellen.

[0083] Bezug nehmend auf **Fig. 6** wird eine Ausführungsform beschrieben, bei der die Vibrationsbewegung in der Weise hervorgerufen wird, dass unterscheidbare Oberflächenbereiche entstehen. Gezeigt ist in **Fig. 6b** ein schematischer Schnitt durch ein Werkstück **6** und ein Werkzeug **7**. Das Werkzeug **7** kann ein Werkzeug mit geometrisch nicht definierter Schneide sein, beispielsweise ein Ultraschallwerkzeug, mit dem komplexe Geometrien gefertigt werden können. **61** symbolisiert den Vorschub des Werkzeugs **7** relativ zum Werkstück **6** durch einen nicht gezeigten Mechanismus. **62** symbolisiert eine als Rotationsvibration ausgelegte Schneidbewegung um eine Achse senkrecht zur Zeichenebene. Statt einer Rotationsvibration **62** kann auch eine herkömmliche Rotation um die genannte Achse herum erfolgen. **61** und **62** bilden zusammen die Schneidbewegung.

[0084] Ihr zeitweise überlagert werden kann eine weitere Vibrationsbewegung **63**, die beispielsweise eine translatorische Vibration senkrecht zur Zeichenebene sein kann. Wenn sich das Werkzeug **7** innerhalb der gepunkteten Bereiche **64a** der Oberfläche des Werkstücks befindet, wird die Vibrationsbewegung **63** zugeschaltet, während sie dann, wenn sich

das Werkzeug in den Oberflächenbereichen **64b** befindet, abgeschaltet wird. Es ergeben sich dadurch unterschiedliche Bearbeitungsmuster auf der Oberfläche, die zu unterscheidbaren Oberflächenbereichen führen. Die Unterscheidbarkeit kann schon mit dem bloßen Auge gegeben sein, oder sie kann sich durch Untersuchung der Oberfläche mittels Apparaten ergeben.

[0085] Das Zu- und Abschalten der Vibrationsbewegung **63** zur Schneidbewegung **61**, **62** kann nach Maßgabe von Werkstückdaten erfolgen. Es kann aber auch nach Maßgabe von Werkzeugpositionen relativ zu früheren oder zukünftigen Werkzeugpositionen oder abstrakten Positionen im Raum (definierte Raumbereiche, definiert über Bereiche von Koordinaten in einem Koordinatensystem) erfolgen.

[0086] Die Mindestabmessung der einzelnen Bereiche **64** (in **Fig. 6** die Breite der Streifen, sonst ggf. Mindestdurchmesser einzelner/isolierter Bereiche („Inseln“)) kann ein Mehrfaches der Wellenlänge des Abbilds der ersten Vibrationsbewegung **63** auf der Werkstückoberfläche sein, etwa mindestens das Fünffache oder mindestens das Zehnfache.

[0087] Wenngleich die Ausführungsform der **Fig. 6** Bezug nehmend auf ein Werkzeug mit geometrisch nicht definierter Schneide beschrieben wurde, ist die gleiche Vorgehensweise (Zuschalten bzw. Abschalten bzw. Modulieren einer Vibrationsbewegung **63**) auch bei einem Werkzeug mit definierter Schneide (Bohrer, Drehmeißel, Fräser, ...) möglich.

[0088] In einer weiteren Ausführungsform kann eine einer Schneidbewegung eines Werkzeugs überlagerte relative erste Vibrationsbewegung zwischen Werkstück und Werkstück so hervorgerufen werden, dass die hinterlassene Oberfläche gegenüber einer Oberflächenbearbeitung ohne die erste Vibrationsbewegung verändert ist. Die erste Vibrationsbewegung kann hierbei die Auswirkung haben, dass die Oberflächengüte mit ihr besser ist als sie es ohne sie wäre. Die Rauigkeit mit überlagerter Vibration kann gegenüber der Bearbeitung ohne überlagerte Vibration verringert sein.

[0089] Ganz allgemein kann die Abtragsleistung des Werkzeugs von der überlagerten Vibrationsbewegung **54**, **63** relativ unbeeinflusst sein (Änderung $< 20\%$ oder $< 10\%$ oder $< 5\%$), sodass die überlagerte Vibrationsbewegung **54**, **63** vorrangig der Oberflächenstrukturierung und weniger dem Abtrag von Material dient.

[0090] Die erste Vibrationsbewegung und die Schneidbewegung können vom gleichen oder von unterschiedlichen Antrieben hervorgerufen werden. Der gleiche Antrieb kann insbesondere dann verwendet werden, wenn die Schneidbewegung ihrerseits

eine Vibrationsbewegung ist. Es kann dann ein Vibrationsantrieb mit überlagerten elektrischen Signalen entsprechend der Schneidbewegung und der Vibrationsbewegung angesteuert werden.

[0091] Wenn verschiedene Antriebe verwendet werden, können sie beide auf Seiten des Werkzeugs oder beide auf Seite des Werkstücks vorgesehen sein, oder sie können verteilt auf Werkzeug einerseits und Werkstück andererseits einwirken, jeweils relativ zum Maschinenrahmen.

[0092] Die erste Vibrationsbewegung kann eine Bewegungskomponente haben, die parallel zur lokalen Werkstückoberfläche liegt, und/oder eine Bewegungskomponente, die senkrecht zur lokalen Werkstückoberfläche liegt. Die erste Vibrationsbewegung kann eine translatorische oder eine rotatorische Vibration sein.

[0093] Die Schneidbewegung kann eine zweite Vibrationsbewegung und/oder eine fortschreitende lineare und/oder rotatorische Bewegung des Werkzeugs gegenüber dem Werkstück aufweisen. Die Schneidbewegung kann sich zusammensetzen aus einer Vorschubbewegung und einer weiteren Bewegung, insbesondere einer Drehbewegung. Bei einem Bohrer erfolgt die Vorschubbewegung längs der Bohrerachse, und die weitere Bewegung ist eine Drehung um die Bohrerachse herum. Bei einer Drehbearbeitung kann die Vorschubbewegung ein Verschieben des Drehmeißels längs einer Achse sein, während die weitere Bewegung eine Drehung des Werkstücks um eine Achse herum sein kann. Bei einer Fräsbewegung kann die Vorschubbewegung ein relatives translatorisches Verschieben zwischen Werkzeug und Werkstück sein, während die weitere Bewegung eine Drehbewegung des Fräswerkzeugs um eine Achse herum ist.

[0094] Ganz allgemein kann die erste Vibrationsbewegung zeitveränderlich sein und insoweit als modulierte Schwingung aufgefasst werden. Die Modulation kann die Veränderung der Frequenz, der Amplitude (Sonderfall An/Aus-Tastung), der Wellenform oder der Phasenlage der ersten Vibrationsbewegung umfassen. Die Modulation kann nach Maßgabe von aus einem Speicher **13** abgerufenen oder gemessenen Werkstückdaten erfolgen oder nach Maßgabe lediglich von Positionsdaten des Werkzeugs relativ zum Werkstück oder nach Maßgabe bestimmter gemessener oder sonst wie erhaltener Prozessparameter, beispielsweise Parameter der Schneidbewegung.

[0095] Nach Maßgabe der Dimensionierungsvorschriften können die Parameter der einzelnen Bewegungen (erste Vibrationsbewegung, Schneidbewegung) einerseits und andererseits der Schneidkantengeometrie (insbesondere Schneidkantenlänge) gewählt und gesetzt werden. Verbleibende Frei-

heitsgrade können zur Optimierung des gesamten Vorgangs verwendet werden.

[0096] Die Vibrationsfrequenzen der ersten Vibrationsbewegung können über 100 Hz oder über 1000 Hz oder über 10.000 Hz liegen. Die Amplituden der ersten Vibrationsbewegung können über 1 Mikrometer oder über zwei Mikrometer oder über 5 Mikrometern oder über 10 Mikrometern liegen und können unter einem Millimeter oder unter 500 Mikrometern oder unter 200 Mikrometern liegen.

[0097] Die Steuerung **12** kann die in der zweiten Ausführungsform beschriebenen Verfahren und Verfahrensschritte steuern bzw. regeln. Es kann geeignete Sensorik für die Signalerückführung vorgesehen sein. Die Steuerung kann demnach auch Vorgaben für die Einstellung der genannten Bewegungsparameter geben, die sie beispielsweise wiederum dem Speicher **13** entnehmen kann.

[0098] Ganz allgemein können Werkzeuge verwendet werden, die an die Beaufschlagung des Werkzeugs mit der überlagerten ersten Vibrationsbewegung angepasst sind. **Fig. 7** zeigt hierfür Beispiele. Es wird darauf hingewiesen, dass solche Werkzeuge als eigenständiger Teil der Erfindung angesehen werden.

[0099] **Fig. 7a** zeigt eine Ausführungsform eines Drehmeißels **7**, bei dem die Schneidkantenlänge l_s der Schneidkante **71** kürzer ist als die Schrittweite s pro Umdrehung. Die Vibrationsamplitude a_v ist relativ klein und insbesondere kleiner als die Schneidkantenlänge, aber doch ein merklicher Anteil davon, beispielsweise $> 2\%$ oder $> 5\%$, aber $< 50\%$ oder $< 25\%$ der Schneidkantenlänge l_s .

[0100] **Fig. 7b** zeigt ein Werkzeug mit geometrisch definierter Schneide (im gezeigten Beispiel einen Drehmeißel), dessen Schneidkante **71** unterbrochen beziehungsweise segmentiert ist. Die Schneidkante **71** ist unterteilt in Segmente **71a**, **71b**, **71c** und **71d**, die jeweils für sich geschärfte Schneidkanten sein können, aber beispielsweise unterschiedliche Abschnitte zur Drehachse **59** des Werkstücks haben. Gezeigt ist ein Beispiel bei dem Schneidkantenabstände abwechselnd einen oder einen anderen von zwei möglichen Abständen zur Drehachse **59** haben. Die Schneidkantenlängen l_{sa} , l_{sb} , l_{sc} , l_{sd} der einzelnen Schneidkanten **71a**, **71b**, **71c**, **71d** können zueinander gleich oder voneinander unterschiedlich sein. Sie können jeweils für sich der Dimensionierungsvorschrift der obigen Formel (3) in Bezug auf die Amplitude der Vibrationsbewegung oder der Schrittweite genügen. Es kann aber auch die Gesamtlänge l_s über alle Teile hinweg in die Dimensionierungsvorschrift eingesetzt werden.

[0101] Ein angepasster Bohrer kann an einer oder mehreren seiner Seitenkanten ein oder mehrere, ggf. längs der Kante beabstandete Schneidkantensegmente **71a** aufweisen. Schneidkantensegmente **71a** auf der einen Seitenkante können axial an anderer Position liegen als Schneidkantensegmente an einer anderen Seitenkante.

[0102] Gegenstand der Erfindung ist auch ein Datenträger mit computerlesbarem Code darauf, der bei Verwendung in einer geeigneten, digital von einem Programm gesteuerten Werkzeugmaschine diese zur Implementierung der beschriebenen Verfahren als Ganzes bzw. der einzelnen Verfahrensschritte veranlasst. Der Code kann ausführbarer Code sein oder Datencode oder ein Hybrid aus beiden sein.

[0103] Merkmale, die in dieser Beschreibung zum Stand der Technik oder zur Erfindung dargestellt sind, sollen auch dann miteinander kombinierbar sein, wenn dies nicht ausdrücklich gesagt ist, soweit die Kombination technisch möglich ist, auch über die verschiedenen Ausführungsformen hinweg. Beschreibungen zu Verfahrensschritten sollen auch als Beschreibung von diese Schritte implementierenden Einrichtungen verstanden werden, und Beschreibungen zu bestimmten Einrichtungen und Komponenten sollen auch als Beschreibung von von diesen Einrichtungen und Komponenten implementierten Verfahrensschritten verstanden werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks mit einem Werkzeug, bei dem das Werkzeug am Werkstück in Eingriff steht und zwischen beiden eine Schneidbewegung hervorgerufen wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine der Schneidbewegung überlagerte relative erste Vibrationsbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug in der Weise hervorgerufen wird, dass ein oder mehrere Kennwerte der ersten Vibrationsbewegung und ein oder mehrerer Kennwerte der Schneidbewegung in Bezug aufeinander eingestellt werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Kennwerte der Schneidbewegung und die Kennwerte der ersten Vibrationsbewegung während der Werkstückbearbeitung veränderlich sind.

3. Verfahren nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei einem Drehvorgang die Frequenz f_v der ersten Vibrationsbewegung und die Umlauffrequenz des Werkstücks f_s der Formel $f_v = (n + k1) \cdot f_s$ genügen, wobei n eine ganze Zahl und $k1$ ein Phasenversatz zwischen 0 und 1 sind, und/oder die Vibrationsamplitude a_v und die Vorschubgeschwindigkeit v_s des Drehmeißels der Formel $a_v =$

k_2 -vs/ f_s genügen, wobei k_2 ein gewählter reeller Faktor ist, und/oder

die Schneidkantenlänge l_s der Formel $l_s = k_3 \cdot a_v$ genügt, wobei k_3 ein gewählter reeller Faktor ist.

4. Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks mit einem Werkzeug, insbesondere nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche, bei dem das Werkzeug am Werkstück in Eingriff steht und zwischen beiden eine Schneidbewegung hervorgerufen wird, dadurch gekennzeichnet, dass eine der Schneidbewegung überlagerte relative erste Vibrationsbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug in der Weise hervorgerufen wird, dass unterscheidbare Oberflächenbereiche des Werkstücks entstehen.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass während der Werkstückbearbeitung die erste Vibrationsbewegung nach Maßgabe der Position des Werkzeugs und vorzugsweise auch nach Maßgabe von Daten, die das zu fertigende Werkstück beschreiben, gesteuert wird.

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Amplitude und/oder die Vibrationsrichtung und/oder die Frequenz und/oder die Wellenform der ersten Vibrationsbewegung nach Maßgabe der Position des Werkzeugs gesteuert wird.

7. Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks mit einem Werkzeug, insbesondere nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche, bei dem das Werkzeug am Werkstück in Eingriff steht und zwischen beiden eine Schneidbewegung hervorgerufen wird, dadurch gekennzeichnet, dass eine der Schneidbewegung überlagerte relative erste Vibrationsbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug in der Weise hervorgerufen wird, dass die hinterlassene Oberfläche gegenüber einer Bearbeitung ohne erste Vibrationsbewegung verändert wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Vibrationsbewegung den Materialabtrag nur geringfügig, insbesondere um weniger als 20%, vorzugsweise weniger als 10% oder weniger als 5%, gegenüber dem der Schneidbewegung, ändert.

9. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Schneidbewegung und die erste Vibrationsbewegung vom gleichen Antrieb oder von unterschiedlichen Antrieben hervorgerufen werden.

10. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Schneidbewegung und die erste Vibrationsbewegung von unterschiedlichen Antrieben hervorgerufen werden, die beide das Werkzeug oder beide das Werkstück an-

treiben, oder wobei einer das Werkzeug und einer das Werkstück antreibt.

11. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Vibrationsbewegung eine Bewegungskomponente hat, die parallel zur lokalen Werkstückoberfläche liegt, und/oder eine Bewegungskomponente hat, die senkrecht zur lokalen Werkstückoberfläche liegt.

12. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Schneidbewegung eine zweite Vibrationsbewegung und/oder eine fortschreitende lineare und/oder rotatorische Bewegung des Werkstücks gegenüber dem Werkzeug umfasst.

13. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, gekennzeichnet durch eines oder mehrere der folgenden Merkmale:

- die erste Vibrationsbewegung weist eine translatorische und/oder eine rotatorische Vibration auf,
- die erste Vibrationsbewegung erstreckt sich in einer Raumdimension oder in zwei Raumdimensionen oder in allen dreien,
- die Schneidbewegung weist eine zweite Vibrationsbewegung auf, die eine translatorische und/oder eine rotatorische Vibration aufweisen kann, oder sie weist eine fortschreitende Rotation auf,
- die Schneidbewegung weist eine längs einer Werkstückoberfläche fortschreitende Vorschubbewegung auf,
- die Steuerung der ersten Vibrationsbewegung weist eine An/Aus-Tastung oder eine analoge Modulation eines oder mehrerer Kennwerte der ersten Vibrationsbewegung auf,
- die Steuerung der ersten Vibrationsbewegung erfolgt nach Maßgabe der momentanen Position des Werkzeugs am Werkstück und/oder nach Maßgabe der momentanen relativen Position des Werkzeugs gegenüber einer früheren oder zukünftigen Position des Werkzeugs,
- das Werkzeug ist ein Werkzeug mit definierter Scheide oder ein Werkzeug mit nicht definierter Schneide.

14. Werkzeugmaschine zur Werkstückbearbeitung, insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorherigen Ansprüche, mit

- einem Maschinenrahmen,
- einer am Maschinenrahmen angebrachten Werkzeugaufnahme,
- einem am Maschinenrahmen angebrachten Werkstückaufnahme,
- Stellgliedern zur Einstellung der Relativposition zwischen Werkzeug und Werkstück,
- Antrieben zum Erzeugen einer Schneidbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück, und
- einer Steuerung zur Steuerung und/oder Regelung von Komponenten der Maschine,

dadurch gekennzeichnet, dass die Steuerung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorherigen Ansprüche ausgelegt ist.

15. Werkzeug zur Verwendung in einer Werkzeugmaschine, insbesondere einer nach Anspruch 14, und/oder in einem Werkstückbearbeitungsverfahren, insbesondere einem nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dessen Schneide an die Amplitude der ersten Vibrationsbewegung angepasst ist, insbesondere derart, dass ein Schneidenbereich eine Strukturierung aufweist, deren Abmessung in der Größenordnung der Amplitude der ersten Vibrationsbewegung liegt.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

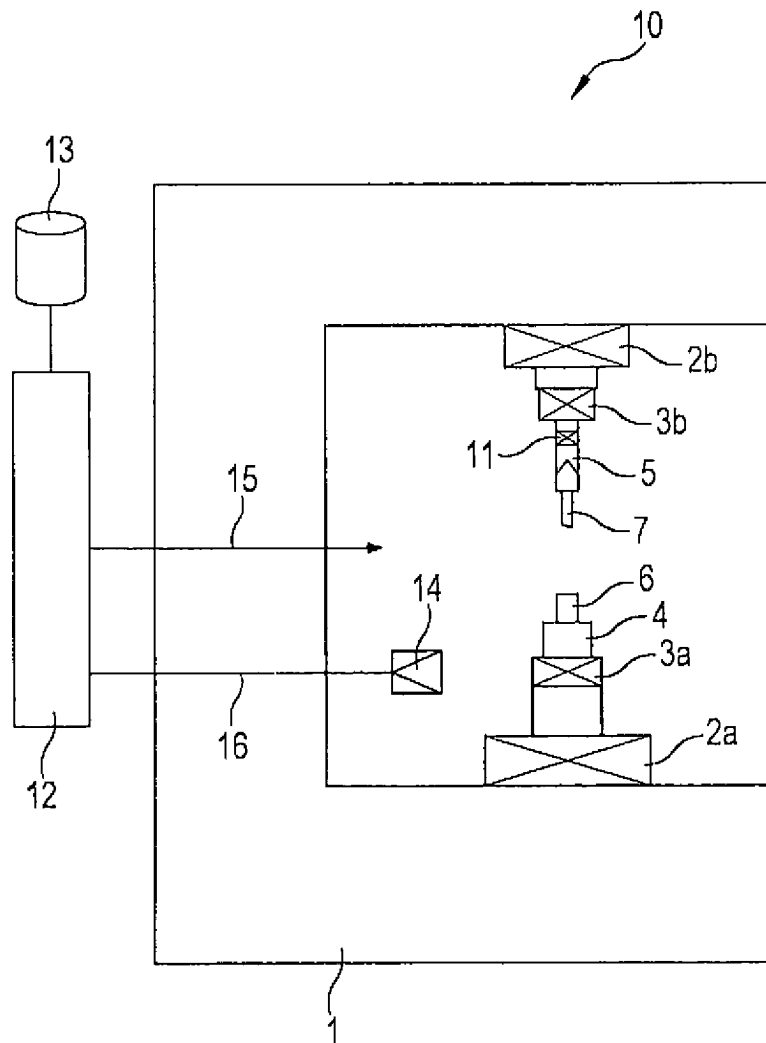


Fig. 1

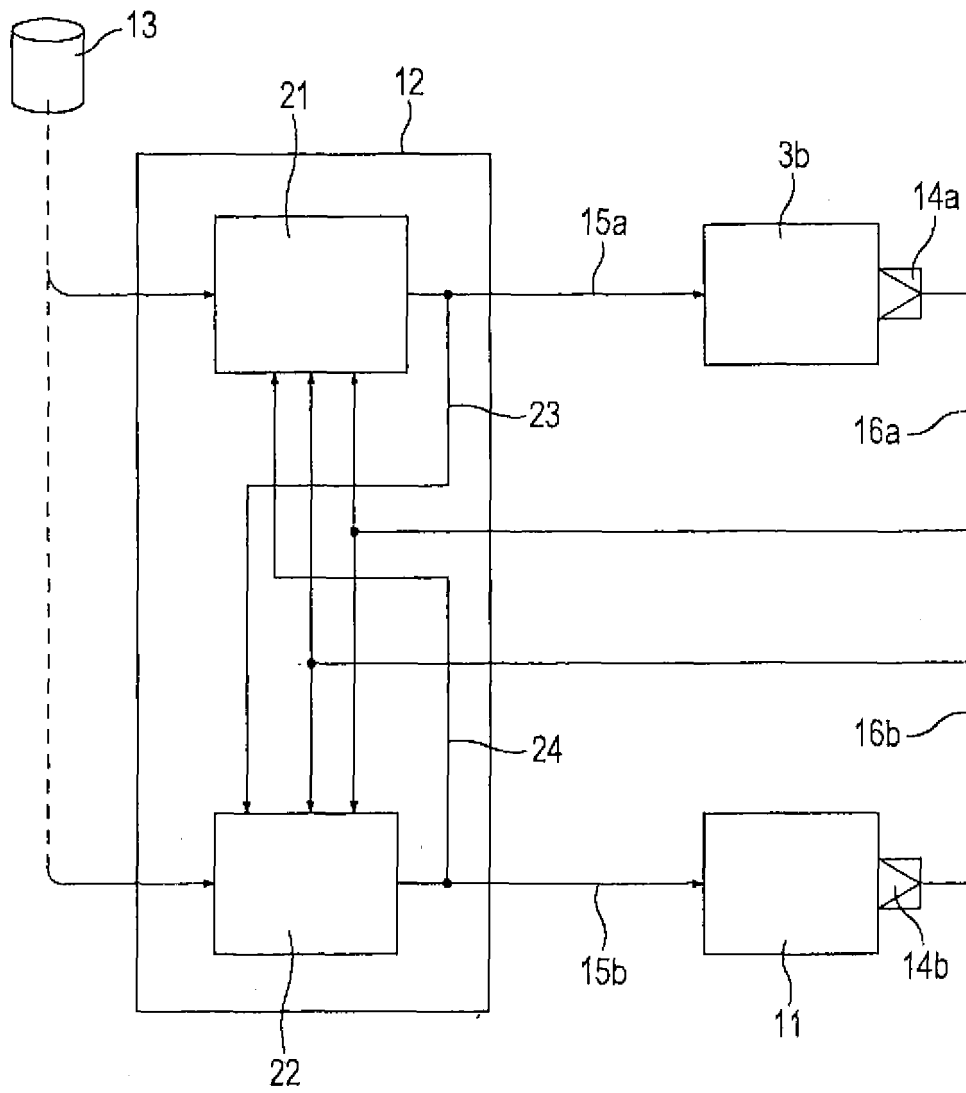


Fig. 2

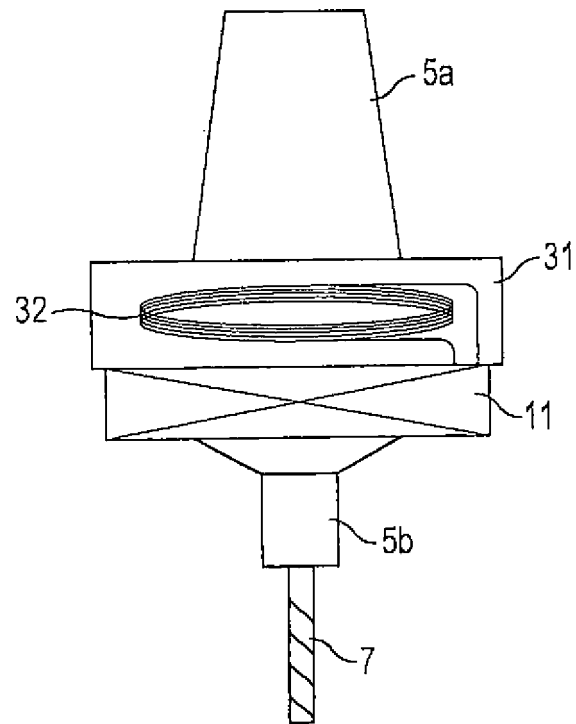


Fig. 3

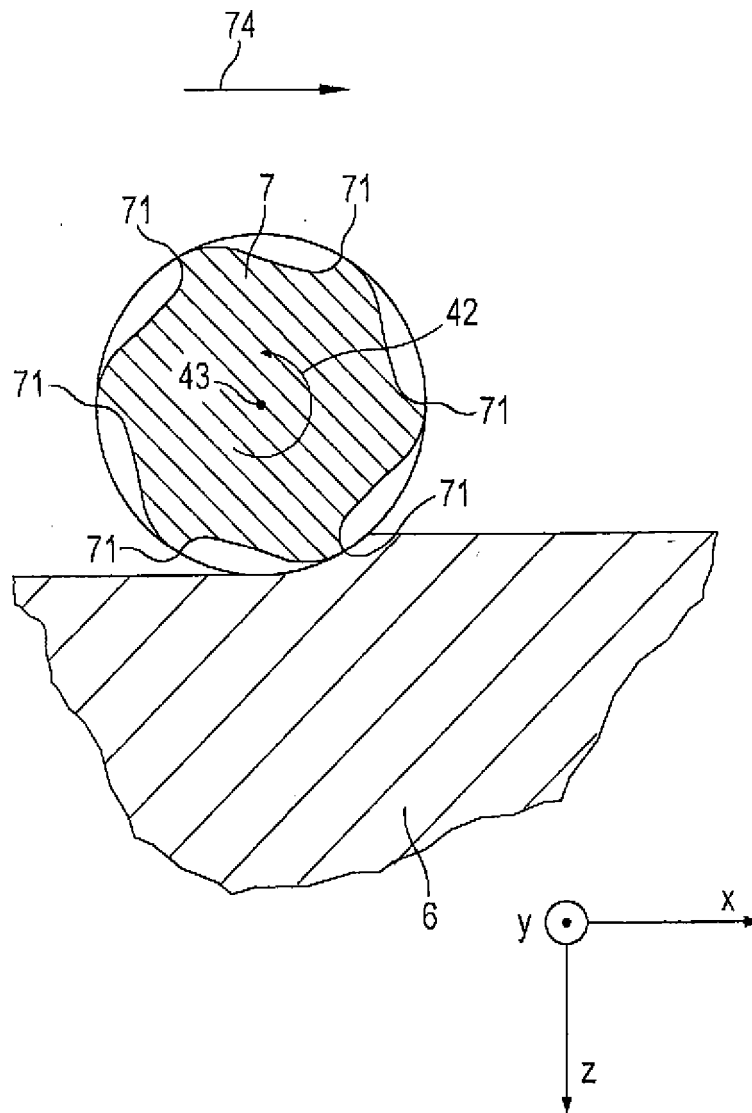


Fig. 4a

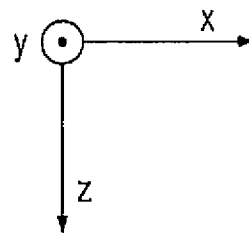
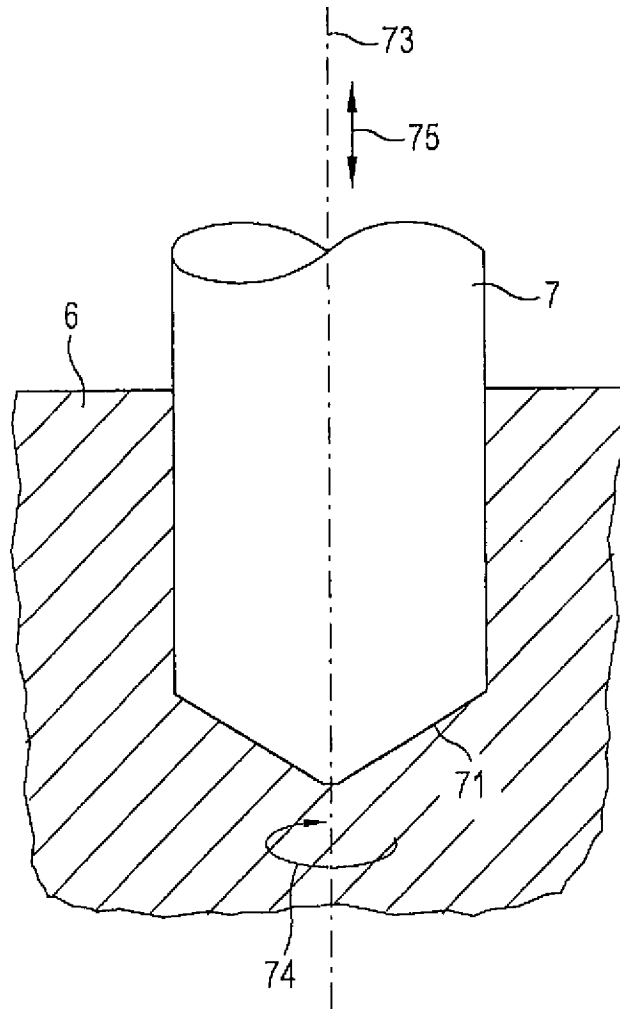
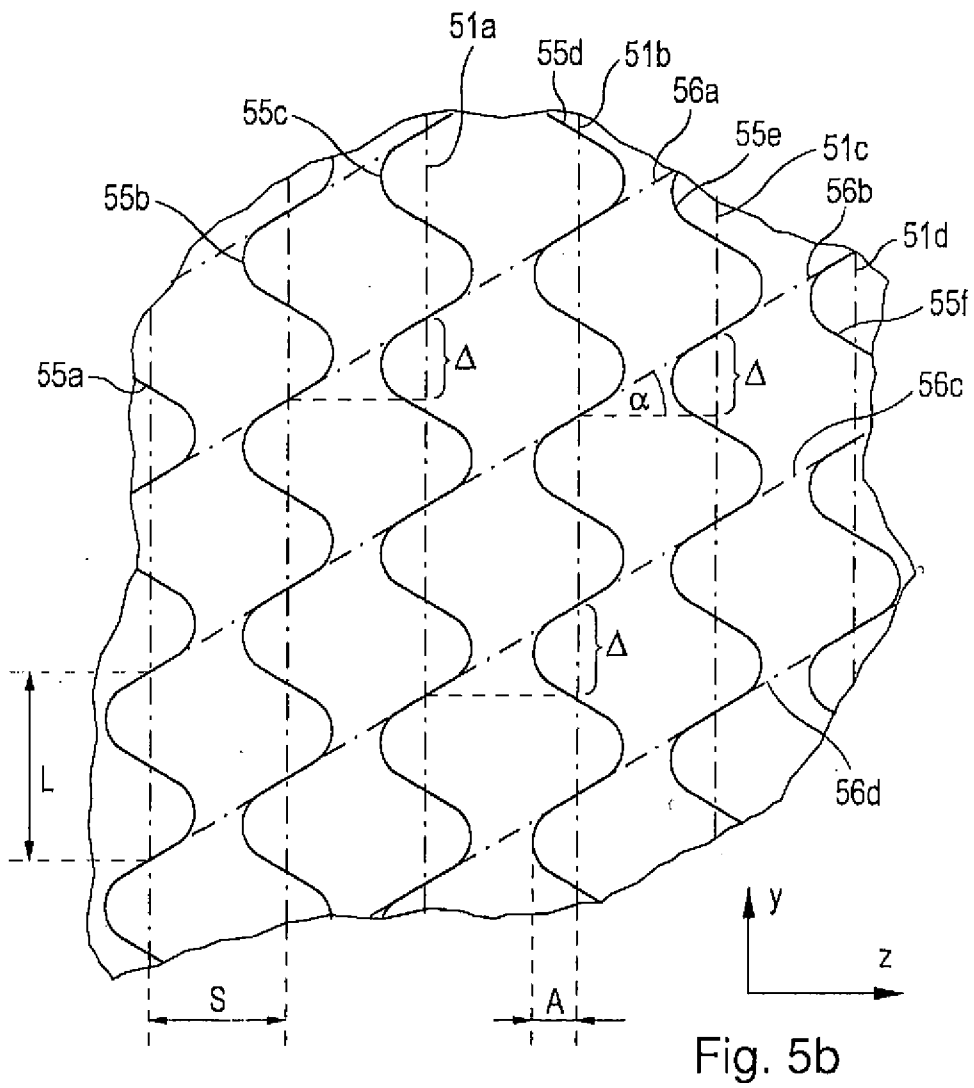
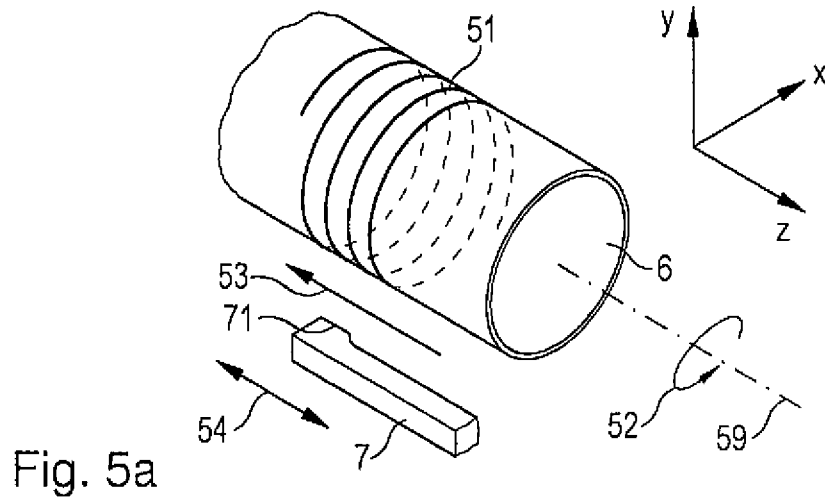
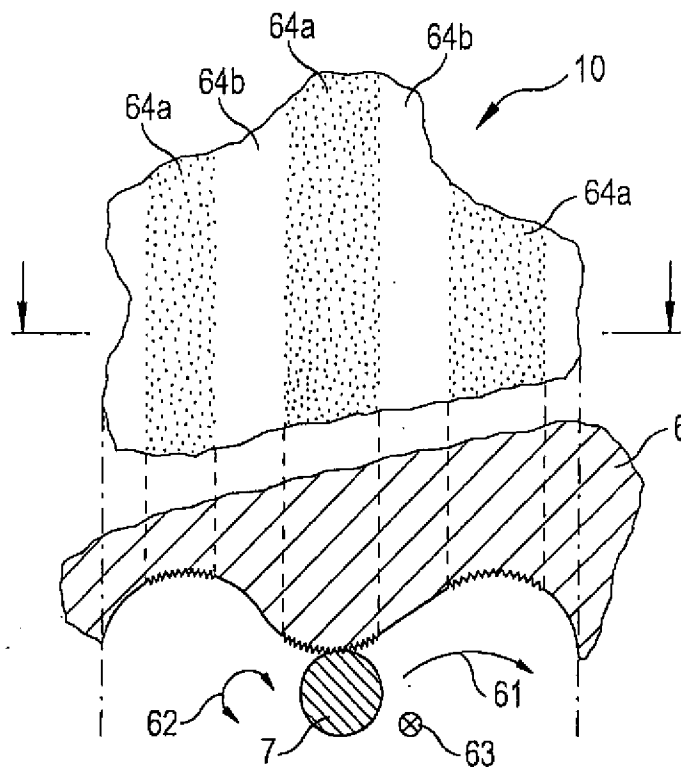
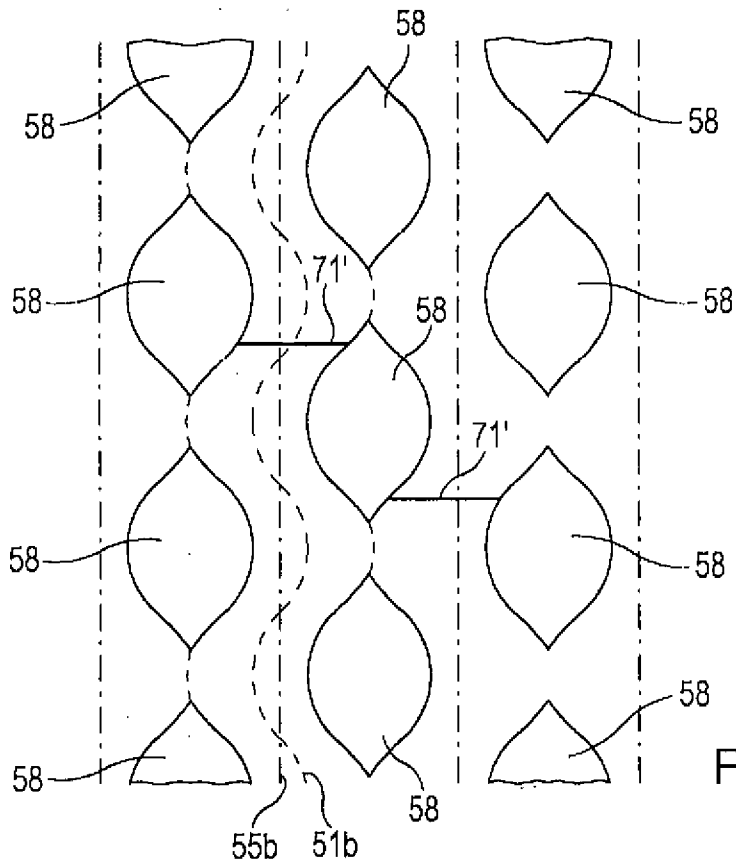


Fig. 4b





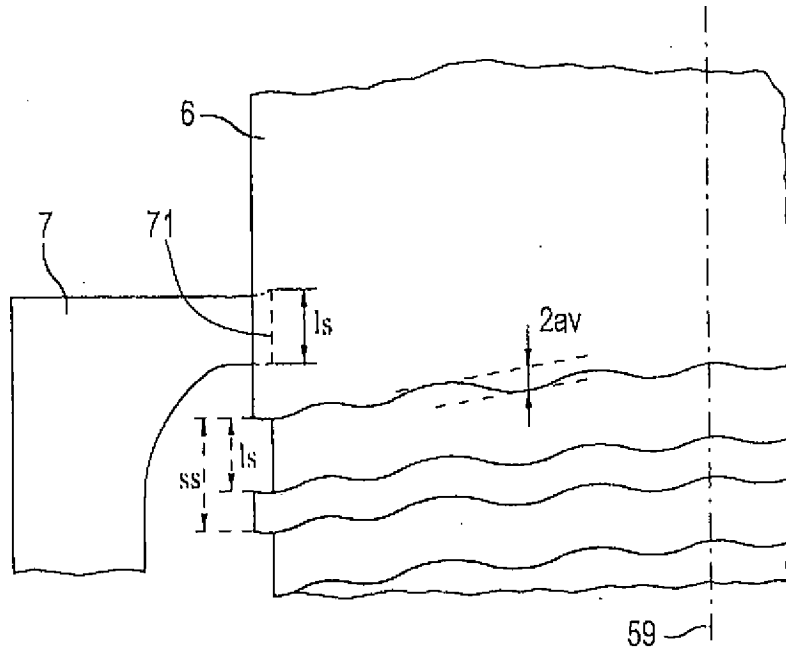


Fig. 7a

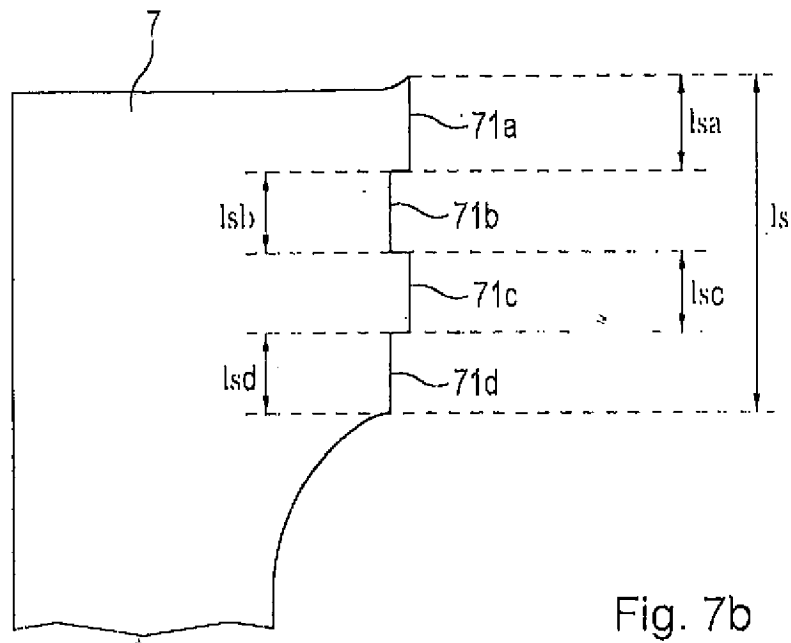


Fig. 7b