



(11) **EP 1 757 405 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Patenterteilung:
07.10.2009 Patentblatt 2009/41

(51) Int Cl.:
B24B 19/14 ^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **06017125.3**

(22) Anmeldetag: **17.08.2006**

(54) **Verfahren zum spanabhebenden Bearbeiten von Werkstücken mit gekrümmten Oberflächen, insbesondere zum Schleifen von Turbinenschaufeln, Werkzeugmaschine**

Method for machining of workpieces with curved surfaces, in particular for turbine blades, machine tool

Procédé d'usinage d'objets avec des surfaces courbées, en particulier des pelles de turbine, machine-outil

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI
SK TR**

(30) Priorität: **24.08.2005 DE 102005041031**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
28.02.2007 Patentblatt 2007/09

(73) Patentinhaber: **Blohm Jung GmbH
21033 Hamburg (DE)**

(72) Erfinder: **Mushardt, Heinrich Dr.
21039 Börnsen (DE)**

(74) Vertreter: **Witte, Weller & Partner
Postfach 10 54 62
70047 Stuttgart (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:
WO-A-93/15877 DE-A1- 3 625 565

EP 1 757 405 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum spanabhebenden Bearbeiten von Werkstücken mit gekrümmter Oberfläche, bei dem das Werkstück entlang einer ersten Achse verfahren und gleichzeitig um eine zweite Achse gedreht wird, die mit der ersten Achse einen endlichen Winkel einschließt, und bei dem ein Bearbeitungswerkzeug entlang einer dritten Achse zustellbar ist, die mit der ersten Achse und mit der zweiten Achse ebenfalls einen endlichen Winkel einschließt.

[0002] Die Erfindung betrifft ferner eine Werkzeugmaschine zum spanabhebenden Bearbeiten von Werkstücken mit gekrümmter Oberfläche, mit einem entlang einer ersten Achse verfahrbaren und gleichzeitig um eine zweite Achse verdrehbaren Werkzeughalter, wobei die zweite Achse mit der ersten Achse einen endlichen Winkel einschließt, und mit einem Bearbeitungswerkzeug, das entlang einer dritten Achse zustellbar ist, die mit der ersten Achse und mit der zweiten Achse ebenfalls einen endlichen Winkel einschließt.

[0003] Die Erfindung betrifft schließlich ein Programmersystem.

[0004] Ein Verfahren und eine Werkzeugmaschine der vorstehend genannten Art sind aus der DE 36 25 565 C2 bekannt.

[0005] Die vorliegende Erfindung betrifft allgemein Verfahren und Maschinen zum spanabhebenden Bearbeiten von Werkstücken mit gekrümmten Oberflächen. Nur beispielhaft - und keinesfalls einschränkend zu verstehen - wird dies nachstehend am Beispiel des Schleifens von Turbinenschaufeln erläutert. Daneben sind auch Anwendungen bei vielen anderen Werkstücken, auch mit beliebig räumlich gekrümmter Oberfläche (Freiformfläche) zu verstehen, beispielsweise bei künstlichen Gelenken.

[0006] Turbinenlaufschaufeln bestehen aus einem Schaufelblatt und einem Fuß, der an einem Ende des Schaufelblatts befestigt ist und zur Befestigung der Schaufel am Rotor dient. Am entgegen gesetzten Ende können Turbinenlaufschaufeln eine sog. Plattform aufweisen, die mit Abdichtprofilen versehen ist, um Strömungsverluste zu vermeiden.

[0007] Turbinenleitschaufeln hingegen weisen am inneren und am äußeren Ende des Schaufelblatts Plattformen auf, die zur Befestigung und zur Abdichtung dienen.

[0008] Turbinenschaufeln nehmen üblicherweise einen Kreissektor von 6 bis 15° ein. Die Plattformen weisen einen großen Radius auf, der dem Radius der jeweiligen Turbine entspricht.

[0009] Zum Schleifen von deren Anlageflächen hat man im Stand der Technik früher die Turbinenschaufeln auf einem drehbaren, kreisförmigen Werkstücktisch montiert, dessen Radius etwa dem Krümmungsradius der Anlageflächen entsprach, wobei die Anlageflächen längs des Umfanges des Werkstücktisches angeordnet waren. Dann konnten diese Anlageflächen mittels eines ebenfalls am Umfang des Werkstücktisches angeordne-

ten, stationären Schleifwerkzeugs mit dem gewünschten Radius geschliffen werden. Diese Vorgehensweise hatte jedoch den Nachteil, dass sehr große Schleifmaschinen entstanden, die sehr umständlich zu handhaben waren und nur einen geringen Durchsatz ermöglichten.

[0010] Im Zuge der Entwicklung von numerisch gesteuerten, mehrachsigen Werkzeugmaschinen sind dann später zahlreiche derartige Maschinen zum Schleifen von Turbinenschaufeln vorgeschlagen worden.

[0011] In der DE 32 46 168 C2 ist eine solche Schleifmaschine beschrieben, bei der ein Werkstückhalter an einem vertikal an einem Ständer verfahrbaren Schlitten angeordnet ist, während eine Schleifspindel vor dem Ständer entlang von zwei senkrecht zueinander verlaufenden horizontalen Richtungen verfahrbar und zusätzlich um eine Vertikalachse verschwenkbar ist. Mit dieser Schleifmaschine kann man zwar auch kreisförmig gekrümmte Anlageflächen von Turbinenschaufeln schleifen, jedoch nur unter sehr eingeschränkten Bedingungen, weil die Einstellmöglichkeiten der Schleifmaschine begrenzt sind und nur eine geringe Variation erlauben. Die Maschine ist auch nicht für diesen Anwendungsbereich vorgesehen.

[0012] Eine aus der DE 36 11 103 A1 bekannte, siebenachsige Schleifmaschine ist speziell für das Schleifen von Turbinenschaufeln vorgesehen. Die Maschine weist einen Werkstückhalter auf, der ebenfalls in einer vertikalen Richtung an einem Ständer verfahrbar, zusätzlich aber auch um eine horizontale Achse verdrehbar und ferner zusammen mit dem Ständer entlang einer horizontalen Achse verfahrbar ist. Die Schleifspindel ihrerseits ist entgegen dem Ständer sowie quer dazu in horizontaler Richtung verfahrbar und um eine Vertikalachse drehbar. Durch eine geeignete CNC-Bahnsteuerung können auf diese Weise die gewünschten Anlageflächen geschliffen werden.

[0013] Eine weitere Schleifmaschine für diese Anwendung ist in der EP 0 254 526 B1 beschrieben. Bei dieser bekannten, sechsachsigen Maschine ist der Werkstückhalter wiederum an einem Ständer in Vertikalrichtung verfahrbar sowie am Ständer um eine Horizontalachse verdrehbar. Der Ständer als ganzes kann um eine Horizontalachse verfahren sowie um eine Vertikalachse verdreht werden. Die Schleifspindel ist um zwei zueinander senkrechte, horizontale Achsen verfahrbar. Auch bei dieser Werkzeugmaschine ist eine CNC-Bahnsteuerung vorgesehen.

[0014] Eine weitere ähnliche Maschine für den selben Einsatzzweck ist aus der EP 0 666 140 B1 bekannt. Diese bekannte Maschine besitzt fünf Achsen und gestattet die abwechselnde Bearbeitung von zwei Turbinenschaufeln, für die zwei Werkstückhalter vorgesehen sind. Diese Werkstückhalter sind entlang einer ersten Horizontalachse verfahrbar sowie um eine Vertikalachse verdrehbar. Die Schleifspindel kann entlang einer zweiten, zur ersten quer verlaufenden Horizontalachse sowie entlang einer Vertikalachse verfahren und um diese Vertikalachse verdreht werden.

[0015] Ein etwas anderes Konzept ist bei einer Maschine zum Schleifen von Turbinenschaufeln vorgesehen, die in der eingangs genannten DE 36 25 565 C2 beschrieben ist. Bei dieser bekannten Maschine wird die gewünschte Kreisbahn des Wirkpunktes der Schleifscheibe am Werkstück nicht durch eine CNC-Bahnsteuerung, sondern durch eine Überlagerung von zwei Einzelbewegungen erzielt, nämlich einer Horizontalbewegung sowie einer Schwenkbewegung des Werkstückträgers. Die Zustellung wird durch eine Vertikalbewegung der Schleifspindel erzielt.

[0016] Die vorstehend beschriebenen bekannten Maschinen haben gemeinsam, dass der Schleifprozess im sog. Tiefschleifverfahren stattfindet, d.h. dass das gesamte Aufmaß in einem einzigen Durchgang der Schleifscheibe abgetragen wird. Das schließt natürlich nicht aus, dass nacheinander beispielsweise ein Schruppvorgang und ein Schlichtvorgang mit jeweils eigenem Gesamtaufmaß stattfinden.

[0017] Das Tiefschleifen hat jedoch den Nachteil, dass die Kontaktlänge der Schleifscheibe am Werkstück wegen der großen Eingriffsdicke ebenfalls sehr groß ist. Dies führt zu hohen Schleifkräften und -temperaturen, zu einem hohen Verschleiß an der Schleifscheibe sowie zu einer nicht unerheblichen Formabweichung. Hält man diese Größen durch einen entsprechend kleineren Vorschub in Grenzen, beschränkt dies wiederum das erreichbare Zeitspannvolumen.

[0018] Aus der EP 0 981 419 B1 ist eine so genannte Pendelschleifmaschine bekannt. Diese Maschine ist eine Flachsleifmaschine, bei der ein flaches Werkstück auf einem Werkstückschlitten angeordnet wird, der in Richtung einer Horizontalachse periodisch hin und her verfahrbar ist, typischerweise mit Hubzeiten von einigen Sekunden. Eine oberhalb des Werkstücks angeordnete Schleifspindel bringt eine Schleifscheibe in Eingriff an dem vorbei bewegten Werkstück. Sinn dieses Vorgehensweise ist es, bei einem erforderlichen sehr großen Gesamtaufmaß eines Schleifvorganges dieses Gesamtaufmaß in mehrere Durchgänge aufzuteilen. Pendelschleifmaschinen werden beispielsweise zum Schleifen von Führungsleisten eingesetzt.

[0019] Aus der WO 93/15877 ist eine Vorrichtung zum Schleifen von Werkstücken bekannt. Bei der bekannten Vorrichtung oszilliert das Werkstück während des Schleifvorganges mit in einem als Ultraschall bezeichneten Frequenzbereich von 50 Hz bis 40 MHz. Eine Schleifscheibe pendelt am Werkstück mit vorgegebenem Hub. Die Oszillationsamplitude soll einerseits gleich dem halben Pendelhub sein, andererseits soll sie bei einer Oszillationsfrequenz von 1 MHz 0,023 mm betragen.

[0020] Der Erfindung liegt demgegenüber die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren sowie eine Schleifmaschine der eingangs genannten Art dahingehend weiterzubilden, dass die oben genannten Nachteile herkömmlicher Schleifverfahren bzw. -maschinen vermieden werden. Insbesondere soll es möglich werden, auf einer kompakten Maschine Werkstücke mit gekrümmten Oberflächen,

insbesondere Turbinenschaufeln, in hoher Formtreue mit hohem Zeitspannvolumen bei geringem Verschleiß der Schleifscheibe zu schleifen, indem die Schleifkräfte und -temperaturen vermindert werden.

[0021] Bei einem Verfahren der eingangs genannten Art wird diese Aufgabe erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass das Werkstück entlang der ersten Achse in einer schnell oszillierenden Bewegung verfahren wird, wobei die oszillierende Bewegung mit einer Geschwindigkeit von mehr als 20 m/min, vorzugsweise von mehr als 50 m/min, und einer Umkehrbeschleunigung von mehr als 3 m/s², vorzugsweise von mehr als 10 m/s², mit einer einstellbaren variablen Hublänge ausgeführt wird, wobei die Hublänge im Wesentlichen gleich dem bei der jeweiligen oszillierenden Bewegung vom Bearbeitungswerkzeug durchfahrenen Weg im Werkstück ist.

[0022] Bei einer Werkzeugmaschine der eingangs genannten Art wird diese Aufgabe erfindungsgemäß dadurch gelöst, der Werkzeughalter mit einem ersten Schlitten verbunden ist, der das Werkstück entlang der ersten Achse in einer schnell oszillierenden Bewegung verfährt, wobei die oszillierende Bewegung mit einer Geschwindigkeit von mehr als 20 m/min, vorzugsweise von mehr als 50 m/min, und einer Umkehrbeschleunigung von mehr als 3 m/s², vorzugsweise von mehr als 10 m/s², mit einer einstellbaren variablen Hublänge ausgeführt wird, wobei die Hublänge im Wesentlichen gleich dem bei der jeweiligen oszillierenden Bewegung vom Bearbeitungswerkzeug durchfahrenen Weg im Werkstück ist.

[0023] Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe wird auf diese Weise vollkommen gelöst.

[0024] Erfindungsgemäß wird nämlich durch die schnell oszillierende Bewegung des Werkstücks, d.h. durch dessen schnelle Hubbewegung in einer zum Bearbeitungswerkzeug im Wesentlichen tangentialen Richtung erreicht, dass das Material mit wesentlich kürzerer Kontaktlänge und geringeren Bearbeitungskräften abgespannt wird, wodurch sich die Bearbeitungstemperatur und die Formabweichung vermindern. Im Vergleich zum herkömmlichen Flach-Pendelschleifen ergibt sich der Vorteil von kürzeren Überlaufzeiten und damit von einem größeren Zeitspannvolumen und einer insgesamt kürzeren Schleifzeit.

[0025] Die Werte für die oszillierende Bewegung liegen wesentlich höher als vergleichbare Werte beim herkömmlichen Flach-Pendelschleifen, haben sich zur Lösung der oben angegebenen Aufgabe in Versuchen für heute verfügbare Bearbeitungswerkzeuge als optimal erwiesen.

[0026] Die Erfindung hat durch die speziell eingestellte Hublänge ferner den Vorteil, dass die Gesamt-Schleifzeit minimiert wird, weil die Hublänge auf den für einen vollständigen Materialabtrag notwendigen Betrag begrenzt ist.

[0027] Für Werkstücke der hier interessierenden Art, insbesondere für Turbinenschaufeln, wird infolge deren Abmessungen die oszillierende Bewegung (ΔX) mit einer Frequenz zwischen 200 und 500 min⁻¹ ausgeführt.

[0028] Weiterhin ist bevorzugt, wenn die erste Achse, die zweite Achse und die dritte Achse jeweils senkrecht aufeinander stehen.

[0029] Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass insoweit herkömmliche Steuerungen für Dreiachsen-Werkzeugmaschinen verwendet werden können, bei denen die drei Achsen ein kartesisches Koordinatensystem bilden.

[0030] Eine besonders einfache Steuerung wird erreicht, wenn die zweite Achse mit dem Krümmungsradius der Oberfläche in einem Eingriffspunkt des Bearbeitungswerkzeugs an der Oberfläche einen rechten Winkel einschließt.

[0031] Bei Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens wird berücksichtigt, dass beim Bearbeiten einer konkav gekrümmten Oberfläche ein Restaufmaß mittels Bahnsteuerung von Werkstück und Bearbeitungswerkzeug mit verminderter Bahngeschwindigkeit entfernt wird.

[0032] Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass für den wesentlichen Anteil des Gesamtaufmaßes nach dem erfindungsgemäßen Verfahren mit den bereits angegebenen Vorteilen gearbeitet wird, während nur ein bei konkaven Oberflächen unvermeidbares Restaufmaß in herkömmlicher Weise abgetragen wird.

[0033] Bei weiteren Ausführungsbeispielen der Erfindung wird das Werkstück beim Bearbeiten zusätzlich oszillierend um die zweite Achse verschwenkt.

[0034] Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass während des Hubes des Werkstücks das Material entlang von sichelförmigen Bögen abgetragen wird, was bei konvexen Oberflächen eine Verbesserung der Formtreue sowie eine Verkürzung der Bearbeitungszeit mit sich bringt.

[0035] Wenn in diesem Zusammenhang der oszillierende Bewegung des Werkstücks eine Bahnsteuerung zwischen Werkstück und Bearbeitungswerkzeug überlagert wird, hat dies den Vorteil, dass auch konkave Oberflächen mit den vorstehend genannten Vorteilen bearbeitet werden können.

[0036] Um hinsichtlich der Bearbeitung ein noch höheres Maß an Flexibilität zu erhalten und um auch Oberflächen mit Krümmungen höherer Ordnung bearbeiten zu können, ist bei weiteren Ausführungsbeispielen der Erfindung vorgesehen, das Bearbeitungswerkzeug ferner entlang einer vierten Achse zu verfahren, die vorzugsweise parallel zur zweiten Achse verläuft und/oder das Bearbeitungswerkzeug ferner um eine fünfte Achse zu verdrehen, die vorzugsweise parallel zur ersten Achse verläuft.

[0037] Im letztgenannten Fall können bevorzugt durch Verdrehen des Bearbeitungswerkzeugs um die fünfte Achse alternativ zwei unterschiedliche Werkzeuge in Eingriff mit dem Werkstück gebracht werden.

[0038] Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren lassen sich nicht nur einfach gekrümmte Oberflächen, also zylindrische Oberflächen, sondern ganz allgemein beliebig im Raum gekrümmte Oberflächen, so genannte Freiformflächen, bearbeiten.

[0039] Obwohl die vorliegende Erfindung bei einer Vielzahl von spanabhebenden Bearbeitungsprozessen einsetzbar ist, wird sie bevorzugt dann eingesetzt, wenn die Werkstücke geschliffen werden.

[0040] Bevorzugt handelt es sich bei den Werkstücken um Turbinenschaufeln, wobei die Oberflächen insbesondere zylindrische Oberflächen an einer Plattform der Turbinenschaufel sind.

[0041] Darüber hinaus lassen sich das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Schleifmaschine aber auch, wie bereits erwähnt, bei räumlich beliebig gekrümmten Flächen, den so genannten Freiformflächen, einsetzen. Als Beispiel dazu seien hier künstliche Gelenke, beispielsweise Kniegelenke, genannt, deren Form entlang einhüllender Schnitte zu schleifen ist. Eine schnell oszillierende Bewegung reduziert auch hier die thermische Einwirkung der Schleifscheibe auf das Werkstück. Eine hohe Maschinendynamik verkürzt die Schleifzeit pro Hüllschnitt und damit die Bearbeitungszeit.

[0042] Bei Ausführungsbeispielen der erfindungsgemäßen Werkzeugmaschine können für das Ausführen der oszillierenden Hubbewegung unterschiedliche Antriebe verwendet werden. Bevorzugt ist, wenn der erste Schlitten mit einem Linearmotor, einem Gewinde- oder Spindeltrieb, oder mit einem Kurbeltrieb gekoppelt ist.

[0043] Bei Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Werkzeugmaschine läuft der erste Schlitten auf einem Maschinenbett entlang der ersten Achse, und das Bearbeitungswerkzeug läuft auf einem zweiten Schlitten an einem Querträger eines das Maschinenbett überspannenden Portals entlang der dritten Achse.

[0044] Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass für die schnell zu bewegenden Achsen die leichteren Komponenten, nämlich der Werkzeugträger mit seinem Drehantrieb, unmittelbar am Maschinenbett laufen, während für die langsamer zu bewegenden Achsen eine schwere und hochstabile Portalbauweise zur Verfügung steht.

[0045] Weitere Vorteile ergeben sich aus der Beschreibung und der beigefügten Zeichnung.

[0046] Es versteht sich, dass die vorstehend genannten und die nachstehend noch zu erläuternden Merkmale nicht nur in der jeweils angegebenen Kombination, sondern auch in anderen Kombinationen oder in Alleinstellung verwendbar sind, ohne den Rahmen der vorliegenden Erfindung zu verlassen.

[0047] Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in der Zeichnung dargestellt und werden in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigen:

Figur 1: eine perspektivische Ansicht eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Schleifmaschine;

Figur 2: eine schematisierte Vorderansicht der Schleifmaschine von Figur 1;

Figur 3: eine schematisierte Vorderansicht auf

- einen Werkstückschlitten der Schleifmaschine von Figur 1 und 2;
- Figur 4: eine Draufsicht auf den Werkstückschlitten von Figur 3;
- Figur 5: ein Diagramm zur Veranschaulichung eines Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Verfahrens;
- Figur 6 bis 8: in vergrößerter Darstellung drei Diagramme zur weiteren Erläuterung des in Figur 5 veranschaulichten Verfahrens für die Bearbeitung einer konvex gekrümmten Fläche;
- Figur 9 bis 12: in weiter vergrößerter Darstellung vier Diagramme zur weiteren Erläuterung des in Figur 5 veranschaulichten Verfahrens für die Bearbeitung einer konkav gekrümmten Fläche; und
- Figur 13: eine Darstellung ähnlich Figur 5 zur Erläuterung eines weiteren Verfahrensschritts bei der Bearbeitung einer konkav gekrümmten Oberfläche.

[0048] In Figur 1 bezeichnet 10 als Ganzes ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Werkzeugmaschine, dargestellt am Fall einer Schleifmaschine, die zum Schleifen von Werkstücken mit gekrümmten Oberflächen geeignet ist. Obwohl die Erfindung nachstehend anhand des Anwendungsbeispiels eines Schleifvorganges an Turbinenschaufeln beschrieben wird, versteht sich, dass die Erfindung weder auf diese Art der spanabhebenden Bearbeitung, noch auf diesen Anwendungsfall bzw. diese Werkstückart beschränkt ist.

[0049] Die Schleifmaschine 10 weist einen Maschinenfuß 12 auf, der ein Maschinenbett 14 trägt. Auf der Vorderseite des Schleifmaschine 10 ist eine Spänewanne 16 vorgesehen. Im hinteren Bereich trägt das Maschinenbett 14 ein Portal 18 mit einem Querträger 20.

[0050] An dem Querträger 20 sind zueinander parallele, horizontale Führungsleisten 22 und 24 angeordnet, die eine erste Achse 26, die sog. Z-Achse, darstellen. Entlang der Führungsleisten 22, 24 ist ein erster Schlitten 30 in Z-Richtung verfahrbar.

[0051] An dem ersten Schlitten 30 sind zueinander parallele, vertikale Führungsleisten 32 und 34 angeordnet, die eine zweite Achse 36, die sog. Y-Achse, darstellen. Entlang der Führungsleisten 32, 34 ist ein zweiter Schlitten 40 verfahrbar.

[0052] Der zweite Schlitten 40 trägt eine Schleifspindel 42. Die Schleifspindel 42 ist auf der in Figur 1 linken Seite mit einer ersten Schleifscheibe 44 versehen. Auf der rechten Seite der Schleifspindel 42 ist in Figur 1 ein Wellenstummel 46 zu erkennen, der eine zweite Schleifscheibe 48 tragen kann (vgl. Figur 2). Die Schleifspindel

ist optional an dem zweiten Schlitten 40 um eine dritte, horizontale Achse 50, die sog. A-Achse, drehbar gelagert.

[0053] Im vorderen Bereich des Maschinenbetts 14 ist auf diesem eine Führung 52 angeordnet, die sich nach hinten bis in den Bereich unterhalb des Portals 18 erstreckt. Die Führung 52 weist zueinander parallele, horizontale Führungsleisten 54 und 56 auf, die eine vierte Achse 58, die sog. X-Achse darstellen.

[0054] Die vierte Achse 58 (X) bildet bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel zusammen mit der ersten Achse 26 (Z) und der zweiten Achse 36 (Y) ein kartesisches Koordinatensystem.

[0055] Entlang der Führungsleisten 54, 56 ist ein dritter Schlitten 60 verfahrbar. Der dritte Schlitten 60 trägt einen Drehtisch oder Drehteller 62, der um eine fünfte Achse 64, die sog. B-Achse verdrehbar ist. Auf dem Drehteller 62 befindet sich ein Werkstückhalter 66, in dem Werkstücke einspannbar sind. Der dritte Schlitten 60 mit seinen darauf befindlichen Komponenten ist in Leichtbauweise ausgeführt. Das Werkstück ist somit nur in X-Richtung verfahrbar und um die B-Achse verdrehbar. Diese Beschränkung auf zwei Achsen kommt einer hohen Dynamik der Schleifmaschine 10 zugute, wie noch erläutert werden wird.

[0056] Die Linearantriebe des ersten Schlittens 30 und des zweiten Schlittens 40 sind, ebenso wie die Drehantriebe für die Schleifspindel 42 und den Drehteller 62 vorzugsweise von herkömmlicher Bauart, wie sie für Supporte in Werkzeugmaschinen verwendet werden. Sie bedürfen daher für den Fachmann keiner näheren Erläuterung.

[0057] Der Linearantrieb des dritten Schlittens 60 hingegen ist besonderer Bauart. Neben einer herkömmlichen Steuerung ist dieser Antrieb in der Lage, den dritten Schlitten 60 zusammen mit dem Werkzeugträger 66 und dem darin eingespannten Werkstück in schneller Oszillations- oder Hubbewegung entlang der vierten Achse 58 (X) hin und her zu bewegen.

[0058] Unter einer "schnellen" Bewegung sind dabei Geschwindigkeiten von mehr als 20 m/min, vorzugsweise von mehr als 50 m/min zu verstehen sowie Umkehrbeschleunigungen im Bereich von mehr als 3 m/s², vorzugsweise von mehr als 10 m/s². Bei den im Ausführungsbeispiel dargestellten und beschriebenen Werkstücken (Turbinenschaufeln) führt dies infolge von deren Abmessungen zu Hubfrequenzen zwischen 200 und 500 min⁻¹. Dabei versteht sich, dass die vorstehend genannten Werte nur als Anhalt zu verstehen sind. So kann es durchaus sein, dass als Folge von neuen Werkstoffen, sowohl im Bereich der bewegten Komponenten als auch im Bereich der Werkzeuge (Schleifmittel) oder neuen Antriebstechniken zukünftig auch andere, insbesondere höhere Werte der Geschwindigkeit und/oder der Beschleunigung erzielbar sind. Andererseits sind bei sehr großen Werkstücken auch kleinere Werte möglich, ohne den Rahmen der vorliegenden Erfindung zu verlassen.

[0059] Die Vorderansicht in Figur 2 zeigt, dass an den

beiden Enden der Schleifspindel 42 zwei unterschiedliche Schleifscheiben 44 und 48 angeordnet sein können, um das dargestellte Werkstück, nämlich eine Turbinenschaufel 68, insbesondere deren so genannte Plattformen 69a und 69b zu schleifen. In der strichpunktierten Darstellung ist zu erkennen, dass die Schleifspindel 42 unter Beibehaltung ihrer Drehlage (A-Achse 50) mit der ersten Schleifscheibe 44' in Eingriff mit der linken Plattform 69a der Turbinenschaufel 68 gebracht werden kann. Wenn die Schleifspindel 42 hingegen um 180° um die A-Achse 50 gedreht und entsprechend in Z-Richtung sowie ggf. auch in Y-Richtung verfahren wird, kann nun die zweite Schleifscheibe 48' die rechte Plattform 69b bearbeiten.

[0060] In Figur 1 ist schließlich auf der rechten Seite der Schleifmaschine 10 noch ein Magazin 70 zu erkennen, in dem unterschiedliche Schleifscheiben und/oder Werkstücke und/oder Abrichtwerkzeuge enthalten sind, um je nach Bedarf ein- und ausgewechselt werden zu können. Die dazu erforderlichen Wechsler und Förderer sind dem Fachmann ebenfalls bekannt und daher nicht dargestellt.

[0061] Ebenfalls nicht dargestellt sind die notwendigen Einrichtungen zum Abrichten der Schleifscheiben 44 und 48. Diese Einrichtungen sind vorzugsweise rotierende Abrichtspindeln mit Diamantabrichtrollen. Sie können auf dem Maschinenbett 14 fest installiert sein, so dass sich bei dem gewählten Maschinenkonzept die bewegten Massen nicht erhöhen

[0062] Die Figuren 3 und 4 zeigen in zwei Ansichten weitere Einzelheiten des dritten Schlittens 60.

[0063] Man erkennt, dass der dritte Schlitten 60 über einen ersten Antrieb 72 entlang der Führung 52 in X-Richtung antreibbar ist. Der erste Antrieb 72 ist vorzugsweise ein Linearmotor, kann aber auch ein Kurbeltrieb oder dergleichen sein. Wichtig ist, dass der erste Antrieb 72 in der Lage ist, den gesamten dritten Schlitten 60 mit Aufbauten und eingespanntem Werkstück mit hoher Hubfrequenz und Lagegenauigkeit schnell oszillierend entlang der vierten Achse 58 (X-Achse) zu bewegen.

[0064] Auf dem ersten Schlitten 60 sitzt ein zweiter Antrieb 74, nämlich ein Dreh- bzw. Schwenkantrieb, für die fünfte Achse (B-Achse). Der zweite Antrieb 74 dreht den Drehteller 62 um vorgegebene Winkel bzw. Winkelinkremente. Die Drehung des Werkstücks 68 Auf dem Drehteller 62 kann durch einen Rundtisch bekannter Art ausgeführt werden, wie in Figur 2 angedeutet, oder - wie alternativ in den Figuren 3 und 4 dargestellt - durch eine Schwenkeinrichtung.

[0065] Der Drehteller 62 ist in Figur 3 in einer dort angedeuteten bogenförmigen Drehführung 78 geführt und abgestützt. Der zweite Antrieb 74 kann eine langsame Dreh- bzw. Schwenkbewegung, bei Ausführungsbeispielen der Erfindung aber auch eine schnelle Oszillationsbewegung, vorzugsweise der langsamen Drehbewegung überlagert, ausführen. In beiden Fällen kommen in vorteilhafter Weise so genannte Direktantriebe zum Einsatz, die aus elektromotorischen Rotoren und Statoren

bestehen, keine weiteren mechanischen Getriebeteile benötigen und hohe Winkelbeschleunigungen ermöglichen.

[0066] Das erfindungsgemäße Maschinenkonzept ist somit insgesamt gekennzeichnet durch die folgende Verteilung der für das Bahnschleifen erforderlichen Maschinenachsen X, Y, Z und B sowie der zum Positionieren der Schleifspindel 42 erforderlichen Schwenkachse A:

[0067] Das Werkstück 68 wird im Werkstückhalter 66 auf dem Drehteller 62 (B-Achse) gespannt, der seinerseits auf dem X-Schlitten 60 angeordnet ist. Die Schleifspindel 42 ist optional auf einer Schwenkvorrichtung (A-Achse) angeordnet und auf einem Kreuzschlitten 22, 24, 26, 30, 32, 34, 36, 40 in Y- und Z-Richtung verfahrbar.

[0068] Der Bahnvorschub tangential zur Werkstückoberfläche, der besonders schnell erfolgen soll, wird durch den verhältnismäßig leichten X-Schlitten 60 ausgeführt, der mit starken Antriebselementen ausgerüstet und steif gegen das massereiche Maschinenbett 14 abgestützt ist. Der X-Schlitten 60 trägt lediglich den Drehteller 62 (B-Achse) mit dem Werkstückhalter 66.

[0069] Die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren der anderen Schlitteneinheiten können etwa um den Faktor 3 bis 10 kleiner sein. Diesen Schlitteneinheiten sind die massereichen Bauelemente zugeordnet. Die Schleifspindel 42 ist auf dem Kreuzschlitten 22, 24, 26, 30, 32, 34, 36, 40 in Y- und in Z-Richtung verfahrbar. Die Elemente des Kreuzschlittens 22, 24, 26, 30, 32, 34, 36, 40, die Schleifspindel 42, sowie eine optional installierte Schwenkvorrichtung (A-Achse) sind in der Regel erheblich schwerer als der Werkstückhalter 66 und der damit verbundene Drehteller 62. Außerdem wird deren Dynamik durch die in der Regel größere Auskragung begrenzt. Die zahlreichen Versorgungs- und Steuerleitungen, die zur Schleifspindel zu führen und bei deren Bewegungen mitzuschleppen sind, schränken deren Beschleunigungsvermögen weiter ein.

[0070] Das im Rahmen der vorliegenden Erfindung entwickelte Konzept stellt somit eine besonders vorteilhafte Anordnung der Maschinenachsen dar. Keine andere Achsfolge böte vergleichbar günstige Voraussetzungen für hohe Bahngeschwindigkeiten und Bahnbeschleunigungen sowie schnelle Oszillationshübe.

[0071] Die Portalbauweise der Schleifmaschine 10 gemäß Figur 1 stellt eine aus Sicht der Maschinendynamik vorteilhafte Ausführungsform dar. Sie ist jedoch nicht die einzig denkbare Bauweise, weil im Rahmen der vorliegenden Erfindung auch Alternativen dazu möglich sind.

[0072] Ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens, wie es auf der Schleifmaschine gemäß den Figuren 1 bis 4 ausführbar ist, soll nun anhand der Figuren 5 bis 8 erläutert werden.

[0073] In Figur 5 ist durchgezogen ein (hier beliebiges) Werkstück 79 in einer ersten Stellung gezeigt. Das Werkstück 80 hat bereichsweise eine konvex geformte Oberfläche 80. Mit 81 ist ein Eingriffspunkt der Schleifscheibe 44 an der konvexen Oberfläche 80 bezeichnet, wo auch ein Krümmungsradius bei R_K eingezeichnet ist. Wenn

die konvex gekrümmte Oberfläche eine zylindrische Oberfläche ist, hat der Krümmungsradius R_K eine konstanten Größe und schließt mit der fünften Achse 64 (B-Achse) einen rechten Winkel ein. Bei einer kegelig geformten Oberfläche ist dieser Winkel endlich, und bei einer Oberfläche mit einer Krümmung höherer Ordnung ist der Winkel endlich und abhängig vom Eingriffspunkt.

[0074] Um die konvexe Oberfläche 80 zu schleifen, wird das Werkstück 79 schnell oszillierend und mit vorbestimmtem Hub entlang der vierten Achse 58 (X-Achse) bewegt. Diese Hubbewegung ist in Figur 5 mit einem Doppelpfeil und dem Symbol ΔX bezeichnet. Die Endlagen des Werkstücks innerhalb der Hubbewegung sind durch die Bezugszeichen 79 (durchgezogen) und 79' (gestrichelt) dargestellt.

[0075] Man erkennt aus Figur 5 deutlich, dass die oszillierende Bewegung des Werkstücks 79, 79' derart bewirkt wird, dass das Werkstück 79, 79' und die Schleifscheibe 44 im wesentlichen tangential aneinander vorbeigeführt werden. Das Material des Werkstücks 79, 79' wird somit in streifenförmigen Bereichen abgetragen. Als Alternative kann das Werkstück 79, 79' zusätzlich oszillierend um die fünfte Achse (B-Achse) verschwenkt werden, wie mit einem Doppelpfeil 82 angedeutet. Dann ergibt sich ein Materialabtrag in sichelförmigen Bereichen, was der konvexen Form der Oberfläche 80, 80' näher kommt und größere Hublängen ΔX ermöglicht.

[0076] Gleichzeitig wird die Schleifscheibe 44 entlang der ersten Achse 26 (Z-Achse) zugestellt, wie mit dem Symbol ΔZ angedeutet. Dadurch wird das gewünschte Teilaufmaß für jeden Hub eingestellt, aber auch die Form der bearbeiteten Oberfläche 80, 80' bestimmt, weil gleichzeitig das Werkstück 79, 79' langsam um die fünfte Achse 64, 64' gedreht wird, wie mit einem Pfeil B gezeigt. Die Form der Oberfläche 80, 80', die in der Darstellung von Figur 5 von links nach rechts erzeugt wird, ergibt sich somit aus einer Überlagerung der Zustellung (Z) und der langsamen Drehbewegung (B).

[0077] Die Figuren 6 bis 8 veranschaulichen anhand der Bearbeitung einer Turbinenschaufel 68 eine Möglichkeit, die Hublänge ΔX zu optimieren. Man erkennt dort in vergrößertem Maßstab die konvex gekrümmte Oberfläche 80 im Bereich der Plattform 69a sowie das gewünschte Gesamtaufmaß 83, das in einer vorbestimmten Anzahl von Hübten abgetragen werden soll.

[0078] In der Darstellung von Figur 6 befindet sich die Turbinenschaufel 68 in einer ersten Drehlage, bei der eine Mittellinie 84 der Turbinenschaufel 68 um einen Winkel B_1 im Uhrzeigersinn gegenüber einer Senkrechten verdreht ist. In dieser ersten Drehlage kann die Schleifscheibe 44 nur einen Materialbereich von einem ersten Eingriffspunkt 85a bis zu einem zweiten Eingriffspunkt 85b abtragen. Daher wird eine Hublänge $\Delta_1 X$ eingestellt, die gerade der Strecke zwischen den beiden Eingriffspunkten 85a und 85b entspricht, um einen darüber hinaus gehenden Leerhub zu vermeiden, der Zeit kosten würde.

[0079] Figur 7 zeigt eine zweite Drehstellung, bei der

die Turbinenschaufel 68' um den Winkel B_1 im Gegen-
uhrzeigersinn verdreht wurde, so dass nunmehr die Mit-
tellinie 84' mit der Senkrechten zusammenfällt. Die
Schleifscheibe kann jetzt über die gesamte Breite der
Plattform 69a geführt werden, d.h. von einem dritten Ein-
griffspunkt 85c zu einem vierten Eingriffspunkt 85d. Der
Abstand dieser beiden Eingriffspunkte 85c, 85d be-
stimmt nun auch hier die Hublänge $\Delta_2 X$.

[0080] In Figur 8 ist eine dritte Drehlage gezeigt, bei
der die Turbinenschaufel gegenüber der zweiten Drehla-
ge um einen Winkel B_2 weiter im Gegen-
uhrzeigersinn verdreht wurde. Die mögliche Strecke der Materialab-
nahme zwischen einem fünften Eingriffspunkt 85e und
einem sechsten Eingriffspunkt 85f ist jetzt durch das Er-
reichen der Grenze des Gesamtaufmaßes 83 begrenzt
und damit entsprechend auch die Länge des nunmehr
einzustellenden Hubs $\Delta_3 X$.

[0081] Eine den Figuren 6 bis 8 entsprechende Dar-
stellung ist, in nochmals leicht vergrößertem Maßstab,
den Figuren 9 bis 12 für den Fall einer konkav gekrümm-
ten Oberfläche 86 an der gegenüberliegenden Plattform
69b der Turbinenschaufel 68 zu entnehmen, die mit ei-
nem Gesamtaufmaß 88 abgetragen werden soll.

[0082] In Figur 9 ist, analog zu Figur 6, eine erste
Drehlage der Turbinenschaufel 68 dargestellt. Auch hier
haben wir zunächst nur eine verhältnismäßig kurze
Strecke zwischen einem ersten und einem zweiten Ein-
griffspunkt 89a, 89b, die den Hub $\Delta_1 X$ in dieser Drehlage
bestimmt.

[0083] In Figur 10 ist, analog zu Figur 7, eine zweite
Drehlage eingezeichnet, bei der ein dritter und ein vierter
Eingriffspunkt 89c, 89d an den Rändern der Plattform
69b liegen und damit eine maximale Strecke bzw. einen
maximalen Hub $\Delta_2 X$ definieren.

[0084] Der Materialabtrag kann nun mit jeweils maxi-
malen Hub fortgesetzt werden, der sich infolge der sich
in Z-Richtung erweiternden Form der Plattform 69b noch
geringfügig bis zu einem Wert $\Delta_3 X$ vergrößert, bis die
Grenze des Gesamtaufmaßes 88 erreicht ist, wie Figur
11 zeigt.

[0085] Figur 12 zeigt, dass die beschriebene Vorge-
hensweise an konkaven Formelementen des Werk-
stücks 68" an Grenzen stößt, wenn die Dynamik der Li-
nearachsen nicht ausreicht, engen Krümmungen mit der
gewünschten hohen Geschwindigkeit zu folgen. Man
kann derartige sichelförmige Abschnitte 90 mit reduzier-
ter Bahngeschwindigkeit und dementsprechend vermin-
deter Abtragsleistung fertig bearbeiten. Diese Bewe-
gung ist in Figur 12 mit einem Pfeil 91 angedeutet.

[0086] Alternativ kann an solchen konkaven Abschnit-
ten eine höhere Bahngeschwindigkeit erreicht werden,
wenn das Werkstück eine zusätzliche Schwenkbewe-
gung ausführt, wie in Figur 13 in einer zu Figur 5 analogen
Weise für das allgemeine Werkstück 79 skizziert. Aus
einer Ausgangs-Drehlage wird das Werkstück 79 (durch-
gezogen gezeichnet) in Uhrzeigerichtung um die fünfte
Achse 64 (B-Achse) um einen Winkel ΔB verdreht und
gleichzeitig entlang der vierten Achse 58 (X-Achse) um

eine Strecke ΔX nach links verfahren, bis es eine Drehlage 79" einnimmt (gestrichelt gezeichnet). Die Schleifscheibe 44 wird gleichzeitig entlang der ersten Achse 26 (Z-Achse) um eine Strecke ΔZ nach unten verfahren, bis sie die Stellung 44" einnimmt. Durch diese überlagerten Bewegungen wandert der Eingriffspunkt 89 entlang der konkaven Oberfläche 86, 86" nach 89". Es ist aus Figur 13 ersichtlich, dass sich der Kontaktpunkt zwischen der Schleifscheibe 44 und dem Werkstück 79 bei der Drehung des Werkstücks 79 um den Winkel ΔB von 89 nach 89" bewegt, während gleichzeitig die schnelle vierte Achse 58 (X-Achse) die Strecke ΔX und die erste Achse 26 (Z-Achse) die erheblich kleinere Strecke ΔZ zurücklegen müssen.

[0087] Zur Optimierung der Bahngeschwindigkeit ist die Komponente "Drehung" auf die Werkstückkrümmung, den Schleifscheibendurchmesser und das Beschleunigungsvermögen der Linearachsen abzustimmen. Dabei ist es für den Schleifprozess aus Sicht der Genauigkeit günstig, wenn sich der Eingriffspunkt 89, 89' relativ zu den Schleifscheibenkoordinaten nur geringfügig verlagert, wie in Figur 13 als ΔU eingetragen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum spanabhebenden Bearbeiten von Werkstücken (68; 79) mit gekrümmter Oberfläche (80, 86), bei dem das Werkstück (68; 79) entlang einer ersten Achse (58; X) verfahren und gleichzeitig um eine zweite Achse (64; B) gedreht wird, die mit der ersten Achse (58; X) einen endlichen Winkel einschließt, und bei dem ein Bearbeitungswerkzeug entlang einer dritten Achse (26; Z) zustellbar ist, die mit der ersten Achse (58; X) und mit der zweiten Achse (64; B) ebenfalls einen endlichen Winkel einschließt, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Werkstück (68; 79) entlang der ersten Achse (58; X) in einer schnell oszillierenden Bewegung (ΔX) verfahren wird, wobei die oszillierende Bewegung (ΔX) mit einer Geschwindigkeit von mehr als 20 m/min, vorzugsweise von mehr als 50 m/min, und einer Umkehrbeschleunigung von mehr als 3 m/s², vorzugsweise von mehr als 10 m/s², mit einer einstellbaren variablen Hublänge ($\Delta_1 X$, $\Delta_2 X$, $\Delta_3 X$) ausgeführt wird, wobei die Hublänge ($\Delta_1 X$, $\Delta_2 X$, $\Delta_3 X$) im Wesentlichen gleich dem bei der jeweiligen oszillierenden Bewegung (ΔX) vom Bearbeitungswerkzeug durchfahrenen Weg im Werkstück (68; 79) ist.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die oszillierende Bewegung (ΔX) mit einer Frequenz zwischen 200 und 500 min⁻¹ ausgeführt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste Achse (58; X), die zweite Achse (64; B) und die dritte Achse (26; Z)

jeweils senkrecht aufeinander stehen.

4. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die zweite Achse (64; B) mit dem Krümmungsradius (R_K) der Oberfläche (80; 86) in einem Eingriffspunkt (81; 89) des Bearbeitungswerkzeugs an der Oberfläche (80; 86) einen rechten Winkel einschließt.
5. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** beim Bearbeiten einer konkav gekrümmten Oberfläche (86) ein Restaufmaß (90) mittels Bahnsteuerung von Werkstück (68) und Bearbeitungswerkzeug bei verminderter Bahngeschwindigkeit entfernt wird.
6. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Werkstück (68; 79) beim Bearbeiten zusätzlich oszillierend um die zweite Achse (64; B) verschwenkt wird.
7. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** der oszillierenden Bewegung (ΔX) des Werkstücks (68, 79) eine Bahnsteuerung zwischen Werkstück (68, 79) und Bearbeitungswerkzeug überlagert wird.
8. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Bearbeitungswerkzeug ferner entlang einer vierten Achse (36; Y) verfahren wird, die vorzugsweise parallel zur zweiten Achse (64; B) verläuft.
9. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Bearbeitungswerkzeug ferner um eine fünfte Achse (50; A) verdreht wird, die vorzugsweise parallel zur ersten Achse (58; X) verläuft.
10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** durch Verdrehen des Bearbeitungswerkzeugs um die fünfte Achse (50; A) alternativ zwei unterschiedliche Werkzeuge in Eingriff mit dem Werkstück (68) gebracht werden.
11. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** Oberflächen mit beliebiger Krümmung an den Werkstücken (68; 79) bearbeitet werden.
12. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Werkstücke (68; 79) geschliffen werden.
13. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Werkstücke Turbinenschaufeln (68) sind.

14. Verfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Oberflächen (80, 86) zylindrische Oberflächen an einer Plattform der Turbinenschaufel (68) sind.
15. Werkzeugmaschine zum spanabhebenden Bearbeiten von Werkstücken (68; 79) mit gekrümmter Oberfläche (80, 86), mit einem entlang einer ersten Achse (58; X) verfahrbaren und gleichzeitig um eine zweite Achse (64; B) verdrehbaren Werkzeughalter (66), wobei die zweite Achse (64; B) mit der ersten Achse (58; X) einen endlichen Winkel einschließt, und mit einem Bearbeitungswerkzeug, das entlang einer dritten Achse (26; Z) zustellbar ist, die mit der ersten Achse (58; X) und mit der zweiten Achse (64; B) ebenfalls einen endlichen Winkel einschließt, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Werkzeughalter (66) mit einem ersten Schlitten (30) verbunden ist, der das Werkstück (68; 79) entlang der ersten Achse (58; X) in einer schnell oszillierenden Bewegung (ΔX) verfährt, wobei die oszillierende Bewegung (ΔX) mit einer Geschwindigkeit von mehr als 20 m/min, vorzugsweise von mehr als 50 m/min, und einer Umkehrbeschleunigung von mehr als 3 m/s², vorzugsweise von mehr als 10 m/s², mit einer einstellbaren variablen Hublänge ($\Delta_1 X$, $\Delta_2 X$, $\Delta_3 X$) ausgeführt wird, wobei die Hublänge ($\Delta_1 X$, $\Delta_2 X$, $\Delta_3 X$) im Wesentlichen gleich dem bei der jeweiligen oszillierende Bewegung (ΔX) vom Bearbeitungswerkzeug durchfahrenen Weg im Werkstück (68; 79) ist.
16. Werkzeugmaschine nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie oszillierende Bewegung (ΔX) mit einer Frequenz zwischen 200 und 500 min⁻¹ ausführt.
17. Werkzeugmaschine nach Anspruch 15 oder 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** der erste Schlitten (30) mit einem Linearmotor (72) gekoppelt ist.
18. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 15 bis 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** der erste Schlitten mit einem Kurbeltrieb gekoppelt ist.
19. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 15 bis 18, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste Achse (58; X), die zweite Achse (64; B) und die dritte Achse (26; Z) jeweils senkrecht aufeinander stehen.
20. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 15 bis 19, **dadurch gekennzeichnet, dass** die zweite Achse (64; B) mit dem Krümmungsradius (R_K) der Oberfläche (80; 86) in einem Eingriffspunkt (81; 89) des Bearbeitungswerkzeugs an der Oberfläche (80; 86) einen rechten Winkel einschließt.

21. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 15. bis 20, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Werkzeughalter (66) mit einem Drehantrieb (76) versehen ist, der wahlweise kontinuierlich oder oszillierend betreibbar ist.
22. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 15 bis 21, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Bearbeitungswerkzeug ferner entlang einer vierten Achse (36; Y) verfahrbar ist, die vorzugsweise parallel zur zweiten Achse (64; B) verläuft.
23. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 15 bis 22, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Bearbeitungswerkzeug ferner um eine fünfte Achse (50; A) verdrehbar ist, die vorzugsweise parallel zur ersten Achse (58; X) verläuft.
24. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 15 bis 23, **dadurch gekennzeichnet, dass** der erste Schlitten (60) auf einem Maschinenbett (14) entlang der ersten Achse (58; X) läuft, und dass das Bearbeitungswerkzeug auf einem zweiten Schlitten (30) an einem Querträger (20) eines das Maschinenbett (14) überspannenden Portals (18) entlang der dritten Achse (26; Z) läuft.
25. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 15 bis 24, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Bearbeitungswerkzeug mindestens eine Schleifscheibe (44, 48) ist, mit der die Werkstücke (68; 79) geschliffen werden.
26. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 15 bis 25, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Werkstücke Turbinenschaufeln (68) sind.
27. Werkzeugmaschine nach Anspruch 26, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Oberflächen (80, 86) im Wesentlichen zylindrische Oberflächen an einer Plattform der Turbinenschaufel (68) sind.

Claims

1. Method for machining of workpieces (68; 79) with a curved surface (80, 86), in which the workpiece (68; 79) is moved along a first axis (58; X) and at the same time is rotated about a second axis (64; B) which encloses a finite angle with the first axis (58; X), and in which a machining tool can be advanced along a third axis (26; Z) which likewise encloses a finite angle with the first axis (58; X) and with the second axis (64; B), **characterized in that** the workpiece (68; 79) is moved along the first axis (58; X) in a rapidly oscillating movement (ΔX), the oscillating movement (ΔX) being executed at a speed of more than 20 m/min, preferably of more than 50 m/min,

and a reverse acceleration of more than 3 m/s^2 , preferably of more than 10 m/s^2 , with an adjustable, variable stroke length ($\Delta_1 X$, $\Delta_2 X$, $\Delta_3 X$), the stroke length ($\Delta_1 X$, $\Delta_2 X$, $\Delta_3 X$) being substantially identical to the path traversed in the workpiece (68; 79) by the machining tool during the respective oscillating movement (ΔX).

2. Method according to Claim 1, **characterized in that** the oscillating movement (ΔX) is executed at a frequency of between 200 and 500 min^{-1} .
3. Method according to Claim 1 or 2, **characterized in that** the first axis (58; X), the second axis (64; B) and the third axis (26; Z) are each perpendicular to one another.
4. Method according to one or more of Claims 1 to 3, **characterized in that** the second axis (64; B) encloses a right angle with the radius of curvature (R_K) of the surface (80; 86) in an engagement point (81; 89) of the machining tool on the surface (80; 86).
5. Method according to one or more of Claims 1 to 4, **characterized in that**, during the machining of a concavely curved surface (86), a residual oversize (90) is removed at a reduced path speed by means of continuous-path control of the workpiece (68) and machining tool.
6. Method according to one or more of Claims 1 to 5, **characterized in that**, during the machining, the workpiece (68; 79) is additionally pivoted in an oscillating manner about the second axis (64; B).
7. Method according to one or more of Claims 1 to 6, **characterized in that** a continuous-path control between the workpiece (68, 79) and machining tool is superimposed on the oscillating movement (ΔX) of the workpiece (68, 79).
8. Method according to one or more of Claims 1 to 7, **characterized in that** the machining tool is furthermore moved along a fourth axis (36; Y) which preferably runs parallel to the second axis (64; B).
9. Method according to one or more of Claims 1 to 8, **characterized in that** the machining tool is furthermore rotated about a fifth axis (50; A) which preferably runs parallel to the first axis (58; X).
10. Method according to Claim 9, **characterized in that**, by rotation of the machining tool about the fifth axis (50; A), two different tools are alternatively brought into engagement with the workpiece (68).
11. Method according to one or more of Claims 1 to 10, **characterized in that** surfaces having any curva-

ture on the workpieces (68; 79) are machined.

12. Method according to one or more of Claims 1 to 11, **characterized in that** the workpieces (68; 79) are ground.
13. Method according to one or more of Claims 1 to 12, **characterized in that** the workpieces are turbine blades (68).
14. Method according to Claim 13, **characterized in that** the surfaces (80, 86) are cylindrical surfaces on a platform of the turbine blades (68).
15. Machine tool for machining of workpieces (68; 79) with a curved surface (80, 86), with a tool holder (66) which is movable along a first axis (58; X) and at the same time is rotatable about a second axis (64; B), wherein the second axis (64; B) encloses a finite angle with the first axis (58; X), and with a machining tool which can be advanced along a third axis (26; Z) which likewise encloses a finite angle with the first axis (58; X) and with the second axis (64; B), **characterized in that** the tool holder (66) is connected to a first slide (30) which moves the workpiece (68; 79) along the first axis (58; X) in a rapidly oscillating movement (ΔX), the oscillating movement (ΔX) being executed at a speed of more than 20 m/min , preferably of more than 50 m/min , and a reverse acceleration of more than 3 m/s^2 , preferably of more than 10 m/s^2 , with an adjustable, variable stroke length ($\Delta_1 X$, $\Delta_2 X$, $\Delta_3 X$), the stroke length ($\Delta_1 X$, $\Delta_2 X$, $\Delta_3 X$) being substantially identical to the path traversed in the workpiece (68; 79) by the machining tool during the respective oscillating movement (ΔX).
16. Machine tool according to Claim 15, **characterized in that** it executes an oscillating movement (ΔX) at a frequency of between 200 and 500 min^{-1} .
17. Machine tool according to Claim 15 or 16, **characterized in that** the first slide (30) is coupled to a linear motor (72).
18. Machine tool according to one or more of Claims 15 to 17, **characterized in that** the first slide is coupled to a crank drive.
19. Machine tool according to one or more of Claims 15 to 18, **characterized in that** the first axis (58; X), the second axis (64; B) and the third axis (26; Z) are each perpendicular to one another.
20. Machine tool according to one or more of Claims 15 to 19, **characterized in that** the second axis (64; B) encloses a right angle with the radius of curvature (R_K) of the surface (80; 86) in an engagement point (81; 89) of the machining tool on the surface (80; 86).

21. Machine tool according to one or more of Claims 15 to 20, **characterized in that** the tool holder (66) is provided with a rotary drive (76) which can be operated continuously or in an oscillating manner selectively.
22. Machine tool according to one or more of Claims 15 to 21, **characterized in that** the machining tool can furthermore be moved along a fourth axis (36; Y) which preferably runs parallel to the second axis (64; B).
23. Machine tool according to one or more of Claims 15 to 22, **characterized in that** the machining tool can furthermore be rotated about a fifth axis (50; A) which preferably runs parallel to the first axis (58; X).
24. Machine tool according to one or more of Claims 15 to 23, **characterized in that** the first slide (60) runs along the first axis (58; X) on a machine bed (14), and **in that** the machining tool runs along the third axis (26; Z) on a second slide (30) on a transverse support (20) of a portal (18) spanning the machine bed (14).
25. Machine tool according to one or more of Claims 15 to 24, **characterized in that** the machining tool is at least one grinding wheel (44, 48) with which the workpieces (68; 79) are ground.
26. Machine tool according to one or more of Claims 15 to 25, **characterized in that** the workpieces are turbine blades (68).
27. Machine tool according to Claim 26, **characterized in that** the surfaces (80; 86) are substantially cylindrical surfaces on a platform of the turbine blades (68).

Revendications

1. Procédé d'usinage par enlèvement de copeaux de pièces (68 ; 79) avec une surface courbe (80, 86), dans lequel la pièce (68 ; 79) est déplacée le long d'un premier axe (58 ; X) et est simultanément tournée autour d'un deuxième axe (64 ; B), qui forme avec le premier axe (58 ; X) un angle fini, et dans lequel un outil d'usinage peut être avancé le long d'un troisième axe (26 ; Z), qui forme avec le premier axe (58 ; X) et avec le deuxième axe (64 ; B) également un angle fini, **caractérisé en ce que** la pièce (68 ; 79) est déplacée le long du premier axe (58 ; X) suivant un mouvement d'oscillation rapide (ΔX), le mouvement d'oscillation (ΔX) étant réalisé à une vitesse de plus de 20 m/min, de préférence de plus de 50 m/min, et avec une accélération d'inversion de plus de 3 m/s², de préférence de plus de 10 m/s²,

avec une longueur de course variable ajustable ($\Delta_1 X$, $\Delta_2 X$, $\Delta_3 X$), la longueur de course ($\Delta_1 X$, $\Delta_2 X$, $\Delta_3 X$) étant essentiellement égale à la distance parcourue par l'outil d'usinage dans la pièce (68 ; 79) lors du mouvement d'oscillation respectif (ΔX).

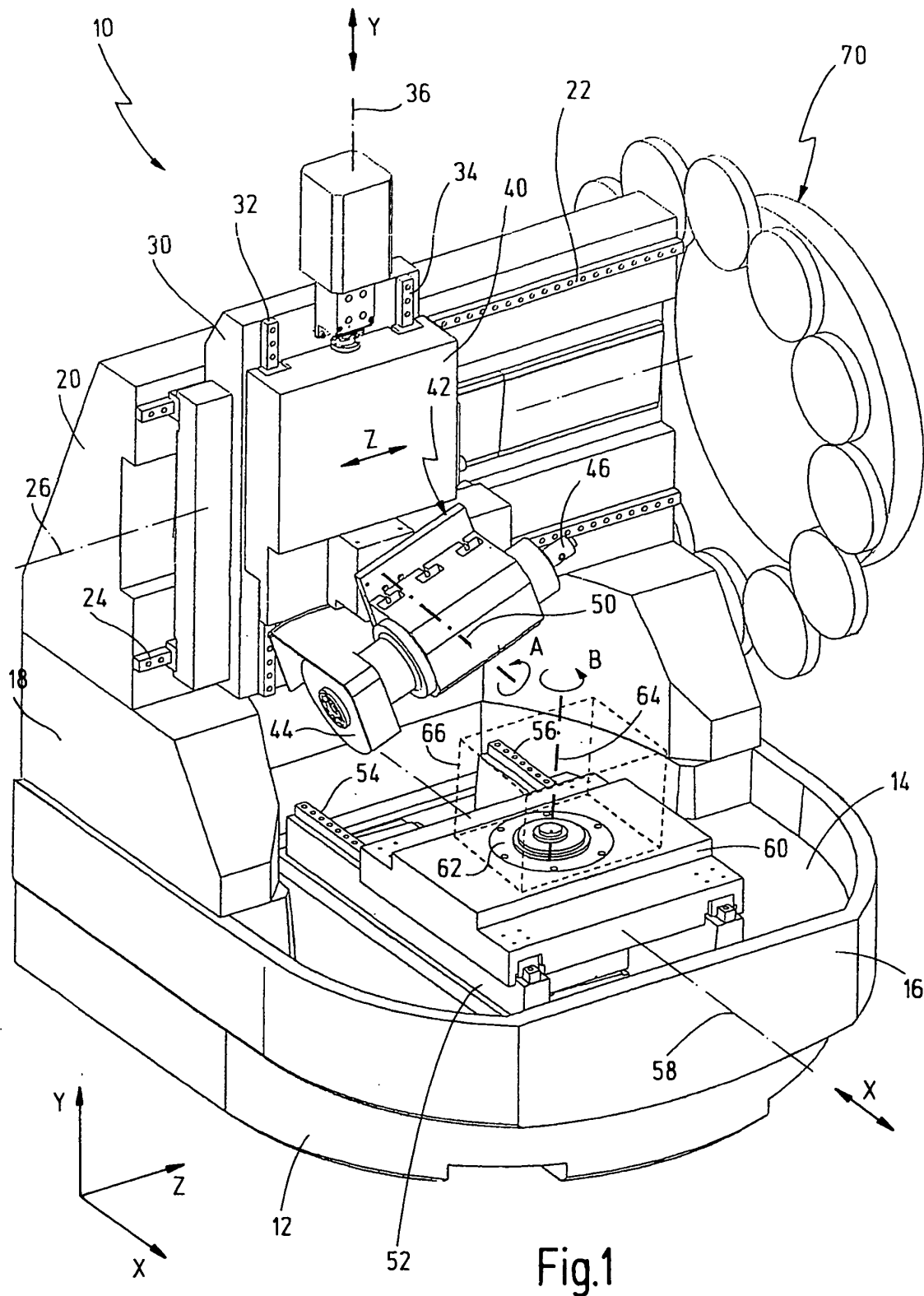
2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** le mouvement d'oscillation (ΔX) est réalisé à une fréquence comprise entre 200 et 500 min⁻¹.
3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** le premier axe (58 ; X), le deuxième axe (64 ; B) et le troisième axe (26 ; Z) sont à chaque fois perpendiculaires les uns aux autres.
4. Procédé selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** le deuxième axe (64 ; B) forme un angle droit avec le rayon de courbure (R_K) de la surface (80 ; 86) dans un point d'engagement (81 ; 89) de l'outil d'usinage sur la surface (80 ; 86).
5. Procédé selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 1 à 4, **caractérisé en ce que** lors de l'usinage d'une surface de courbure concave (86), une mesure résiduelle (90) est enlevée au moyen d'une commande de bande de la pièce (68) et de l'outil d'usinage, avec une vitesse de bande réduite.
6. Procédé selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 1 à 5, **caractérisé en ce que** la pièce (68 ; 79) est en outre pivotée autour du deuxième axe (64 ; B) de manière oscillante lors de l'usinage.
7. Procédé selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 1 à 6, **caractérisé en ce que** le mouvement d'oscillation (ΔX) de la pièce (68, 79) est superposé à une commande de bande entre la pièce (68, 79) et l'outil d'usinage.
8. Procédé selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce que** l'outil d'usinage est en outre déplacé le long d'un quatrième axe (36 ; Y), qui s'étend de préférence parallèlement au deuxième axe (64 ; B).
9. Procédé selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 1 à 8, **caractérisé en ce que** l'outil d'usinage est en outre tourné autour d'un cinquième axe (50 ; A), qui s'étend de préférence parallèlement au premier axe (58 ; X).
10. Procédé selon la revendication 9, **caractérisé en ce que** par rotation de l'outil d'usinage autour du cinquième axe (50 ; A), deux outils différents sont amenés en alternance en prise avec la pièce (68).
11. Procédé selon l'une quelconque ou plusieurs des

revendications 1 à 10, **caractérisé en ce que** des surfaces de courbure quelconque sont usinées sur les pièces (68 ; 79).

12. Procédé selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 1 à 11, **caractérisé en ce que** les pièces (68 ; 79) sont meulées. 5
13. Procédé selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 1 à 12, **caractérisé en ce que** les pièces sont des aubes de turbine (68). 10
14. Procédé selon la revendication 13, **caractérisé en ce que** les surfaces (80, 86) sont des surfaces cylindriques sur une plate-forme de l'aube de turbine (68). 15
15. Machine-outil pour l'usinage par enlèvement de copeaux de pièces (68 ; 79) avec une surface courbe (80, 86), avec un porte-outil (66) déplaçable le long d'un premier axe (58 ; X) et pouvant tourner simultanément autour d'un deuxième axe (64 ; B), le deuxième axe (64 ; B) formant avec le premier axe (58 ; X) un angle fini, et avec un outil d'usinage qui peut être avancé le long d'un troisième axe (26 ; Z), qui forme avec le premier axe (58 ; X) et avec le deuxième axe (64 ; B) également un angle fini, **caractérisée en ce que** le porte-outil (66) est connecté à un premier chariot (30), qui déplace la pièce (68 ; 79) le long du premier axe (58 ; X) suivant un mouvement d'oscillation rapide (ΔX), le mouvement d'oscillation rapide (ΔX) étant réalisé à une vitesse de plus de 20 m/min, de préférence de plus de 50 m/min, et avec une accélération d'inversion de plus de 3 m/s², de préférence de plus de 10 m/s², avec une longueur de course variable ajustable ($\Delta_1 X$, $\Delta_2 X$, $\Delta_3 X$), la longueur de course ($\Delta_1 X$, $\Delta_2 X$, $\Delta_3 X$) étant essentiellement égale à la distance parcourue par l'outil d'usinage dans la pièce (68 ; 79) lors du mouvement d'oscillation respectif (ΔX). 20
25
30
35
40
16. Machine-outil selon la revendication 15, **caractérisée en ce qu'elle** effectue le mouvement d'oscillation (ΔX) à une fréquence comprise entre 200 et 500 min⁻¹. 45
17. Machine-outil selon la revendication 15 ou 16, **caractérisée en ce que** le premier chariot (30) est accouplé à un moteur linéaire (72). 50
18. Machine-outil selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 15 à 17, **caractérisée en ce que** le premier chariot est accouplé à une transmission à bielle. 55
19. Machine-outil selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 15 à 18, **caractérisée en ce que** le premier axe (58 ; X), le deuxième axe (64 ; B) et

le troisième axe (26 ; Z) sont à chaque fois perpendiculaires les uns aux autres.

20. Machine-outil selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications précédentes 15 à 19, **caractérisée en ce que** le deuxième axe (64 ; B) forme un angle droit avec le rayon de courbure (R_K) de la surface (80 ; 86) dans un point d'engagement (81 ; 89) de l'outil d'usinage sur la surface (80 ; 86).
21. Machine-outil selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 15 à 20, **caractérisée en ce que** le porte-outil (66) est pourvu d'un entraînement en rotation (76), qui peut être entraîné de manière sélective en continu ou de manière oscillante.
22. Machine-outil selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 15 à 21, **caractérisée en ce que** l'outil d'usinage peut en outre être déplacé le long d'un quatrième axe (36 ; Y), qui s'étend de préférence parallèlement au deuxième axe (64 ; B).
23. Machine-outil selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 15 à 22, **caractérisée en ce que** l'outil d'usinage peut en outre être déplacé autour d'un cinquième axe (50 ; A), qui s'étend de préférence parallèlement au premier axe (58 ; X).
24. Machine-outil selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 15 à 23, **caractérisée en ce que** le premier chariot (60) glisse sur un lit de machine (14) le long du premier axe (58 ; X), et **en ce que** l'outil d'usinage glisse sur un deuxième chariot (30) sur une traverse (20) d'un portique (18) surmontant le lit de la machine (14) le long du troisième axe (26 ; Z).
25. Machine-outil selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 15 à 24, **caractérisée en ce que** l'outil d'usinage est au moins un disque de meulage (44, 48), avec lequel les pièces (68 ; 79) sont meulées.
26. Machine-outil selon l'une quelconque ou plusieurs des revendications 15 à 25, **caractérisée en ce que** les pièces sont des aubes de turbine (68).
27. Machine-outil selon la revendication 26, **caractérisée en ce que** les surfaces (80, 86) sont essentiellement des surfaces cylindriques sur une plate-forme de l'aube de turbine (68).



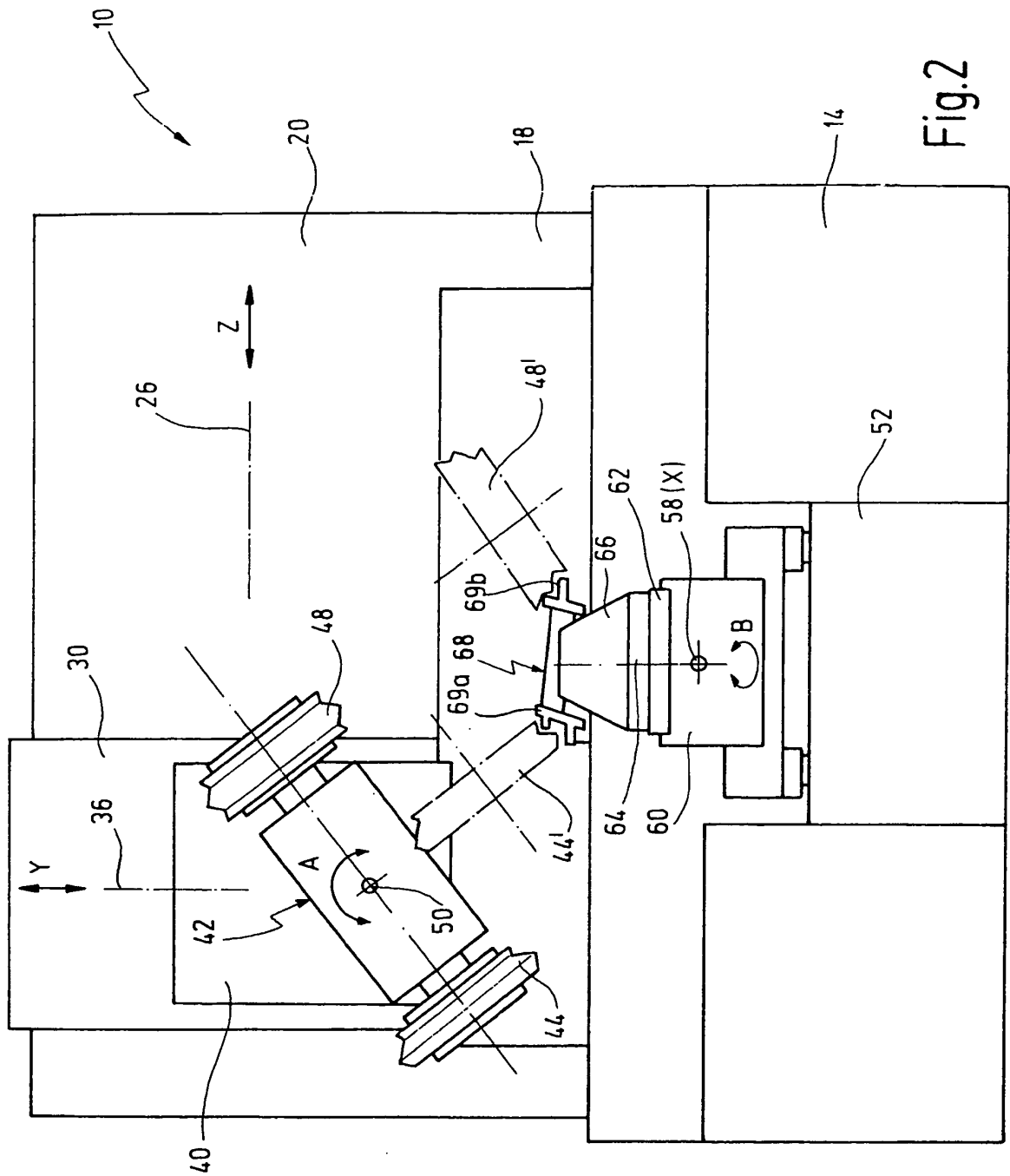


Fig. 2

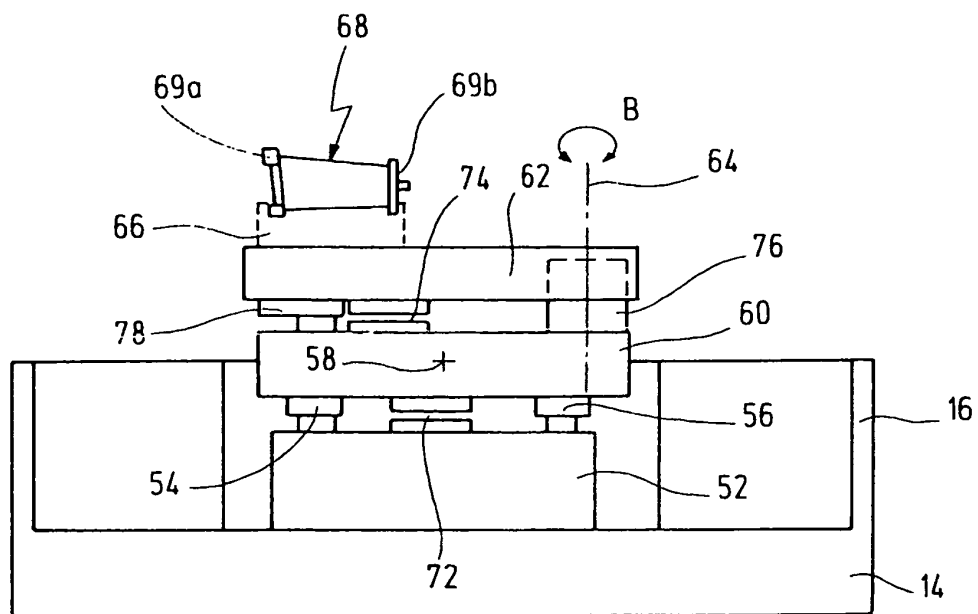


Fig.3

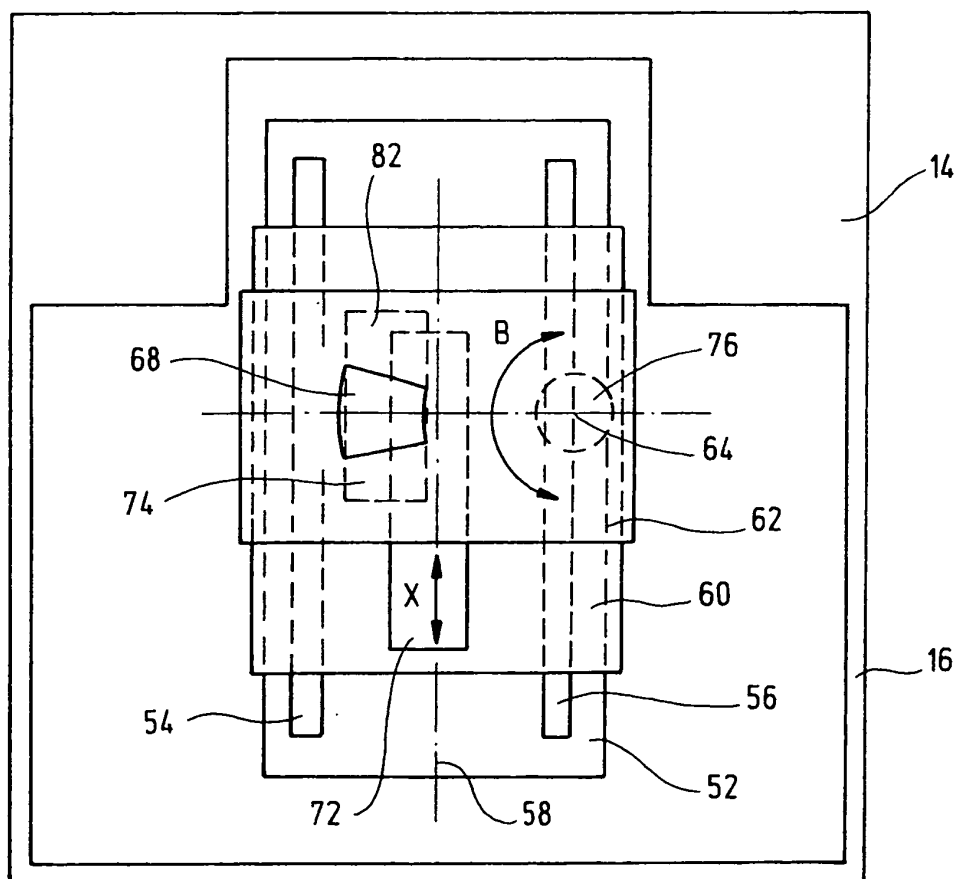


Fig.4

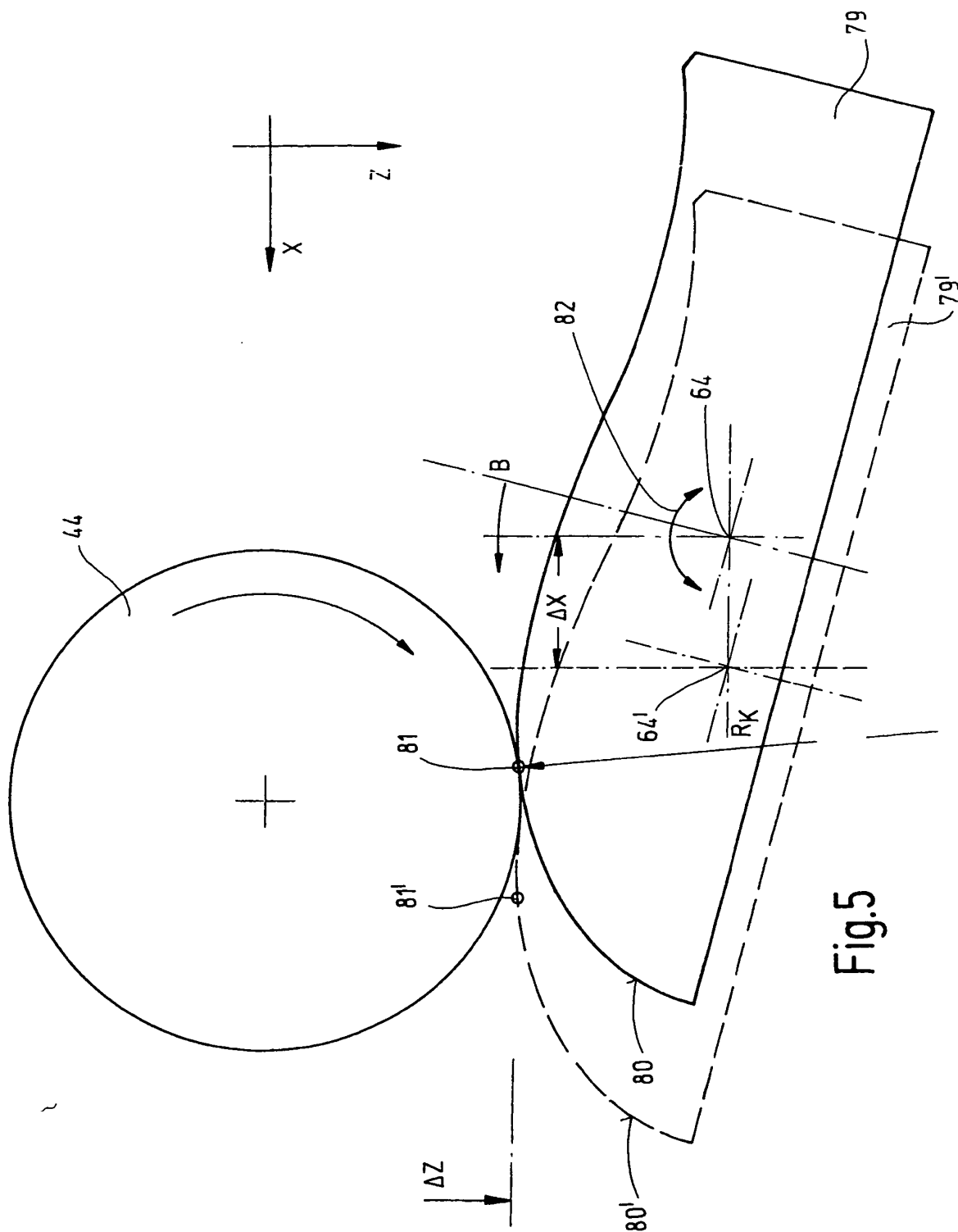
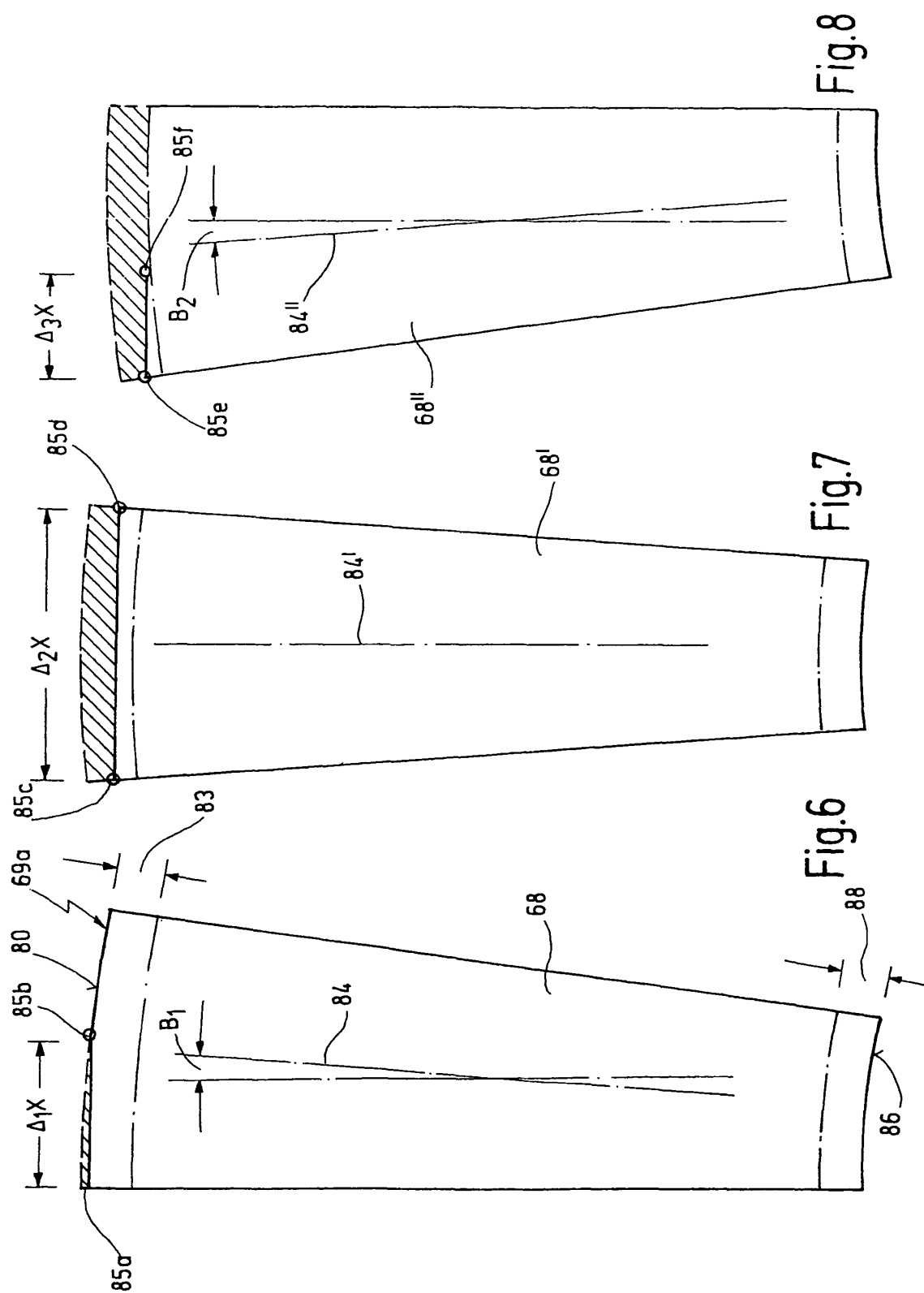


Fig.5



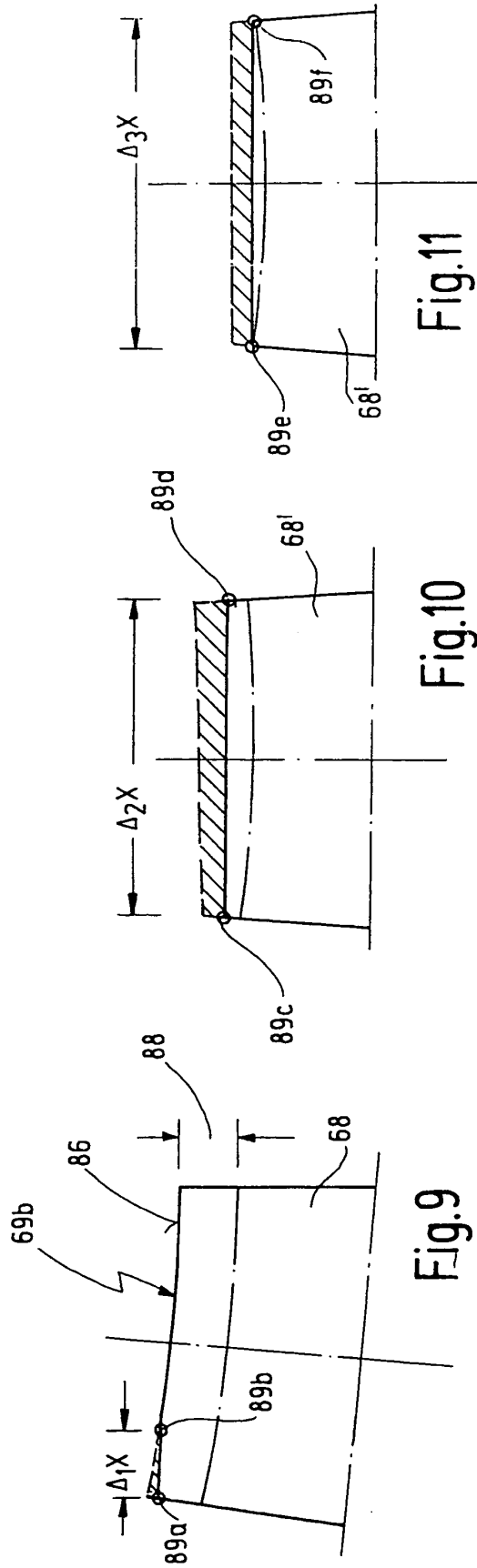


Fig. 9

Fig. 10

Fig. 11

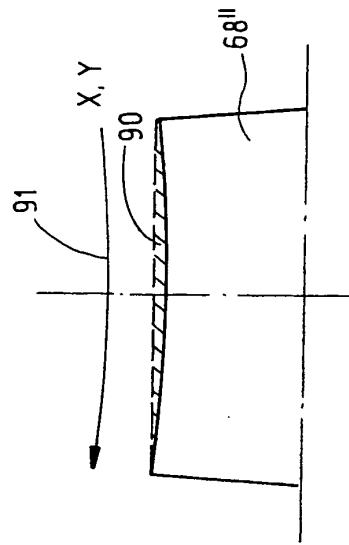


Fig. 12

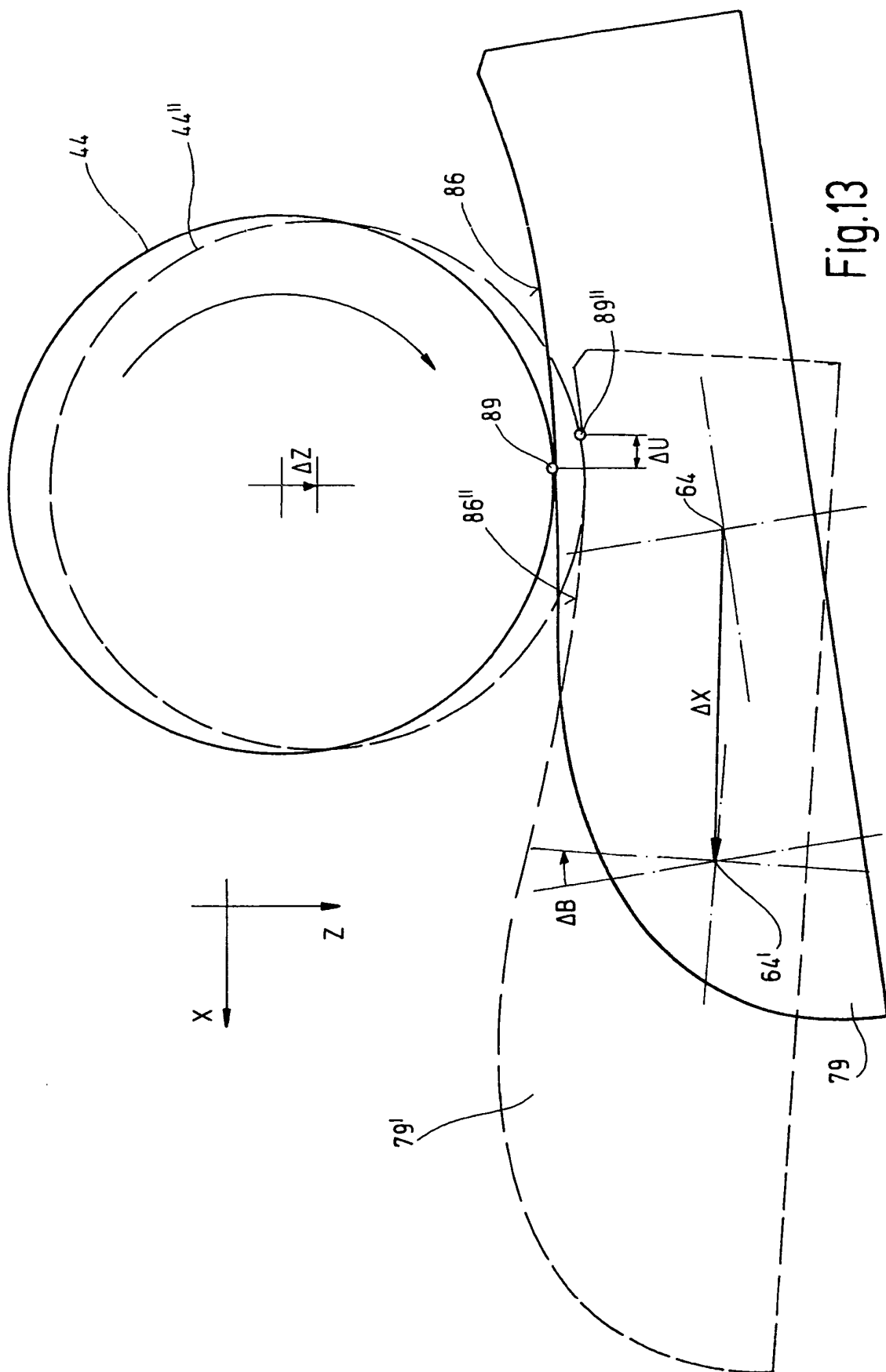


Fig.13

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 3625565 C2 [0004] [0015]
- DE 3246168 C2 [0011]
- DE 3611103 A1 [0012]
- EP 0254526 B1 [0013]
- EP 0666140 B1 [0014]
- EP 0981419 B1 [0018]
- WO 9315877 A [0019]