



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
**28.02.2007 Patentblatt 2007/09**

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

(21) Anmeldenummer: **06017125.3**

(22) Anmeldetag: **17.08.2006**

(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**  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
**AL BA HR MK YU**

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

(74) Vertreter: **Witte, Alexander et al**  
**Witte, Weller, Gahlert, Otten & Steil,**  
**Patentanwälte,**  
**Postfach 105 462**  
**70047 Stuttgart (DE)**

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

(71) Anmelder: **Blohm Maschinenbau GmbH**  
**21033 Hamburg (DE)**

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

(57) Ein Verfahren und eine Werkzeugmaschine dienen zum spanabhebenden Bearbeiten von Werkstücken mit gekrümmter Oberfläche, insbesondere zum Schleifen von Turbinenschaufeln. Das Werkstück wird entlang einer ersten Achse (58; X) verfahren und gleichzeitig um eine zweite Achse (64; B) gedreht, die mit der ersten Achse (58; X) einen endlichen Winkel einschließt. Ein Bearbeitungswerkzeug ist entlang einer dritten Achse (26; Z) zustellbar, die mit der ersten Achse (58; X) und mit der zweiten Achse (64; B) ebenfalls einen endlichen Winkel einschließt. Das Werkstück (68; 79) wird entlang der ersten Achse (58; X) in einer oszillierenden Bewegung ( $\Delta X$ ) verfahren (Figur 1).

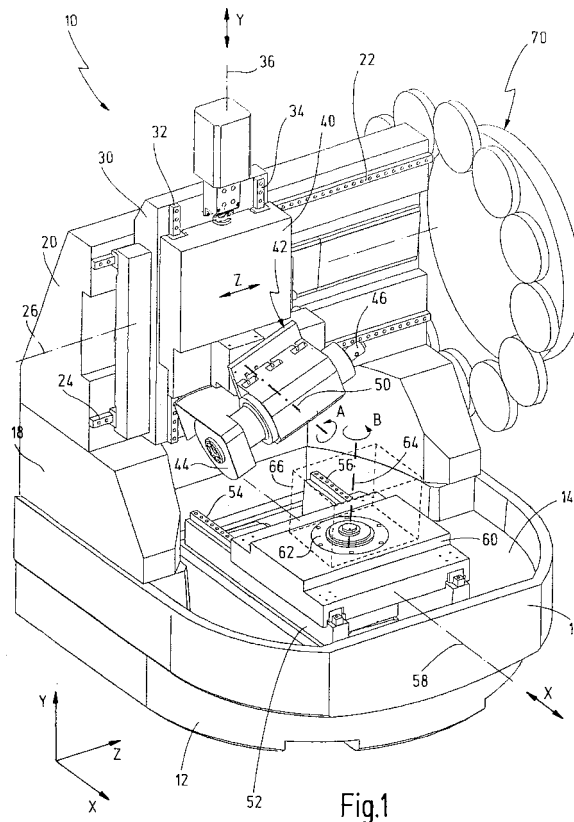


Fig.1

## 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 Zeitspanvolumen.

**[0018]** Aus der EP 0 981 419 B1 ist eine sog. Pendelschleifmaschine bekannt. Diese Maschine ist eine Flachschleifmaschine, 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 vorbeibewegten Werkstück. Sinn dieser Vorgehensweise ist es, bei einem erforderlichen sehr großem Gesamtaufmaß eines Schleifvorganges dieses Gesamtaufmaß in mehrere Durchgänge aufzuteilen. Pendelschleifmaschinen werden beispielsweise zum Schleifen von Führungsleisten eingesetzt.

**[0019]** 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 Zeitspanvolumen bei geringem Verschleiß der Schleifscheibe zu schleifen, indem die Schleifkräfte und -temperaturen vermindert werden.

**[0020]** 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.

**[0021]** Bei einer Werkzeugmaschine der eingangs ge-

nannten 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.

**[0022]** Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe wird auf diese Weise vollkommen gelöst.

**[0023]** 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 Zeitspanvolumen und einer insgesamt kürzeren Schleifzeit.

**[0024]** Bei einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird die schnell oszillierende Bewegung mit einer Geschwindigkeit von mehr als 20 m/min, vorzugsweise von mehr als 50 m/min und einer Umkehrbeschleunigung von mehr als  $3 \text{ m/s}^2$ , vorzugsweise von mehr als  $10 \text{ m/s}^2$  ausgeführt.

**[0025]** Diese Werte, die wesentlich höher liegen 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]** Daraus folgt, dass für Werkstücke der hier interessierenden Art, insbesondere für Turbinenschaufeln, infolge deren Abmessungen die oszillierende Bewegung ( $\Delta X$ ) mit einer Frequenz zwischen 200 und  $500 \text{ min}^{-1}$  ausgeführt wird.

**[0027]** Weiterhin ist bevorzugt, wenn die erste Achse, die zweite Achse und die dritte Achse jeweils senkrecht aufeinander stehen.

**[0028]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass insoweit herkömmliche Steuerungen für Dreiachsen-Werkzeugmaschinen verwendet werden können, bei denen die drei Achsen ein kartesisches Koordinatensystem bilden.

**[0029]** 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.

**[0030]** Von besonderem Vorteil ist, wenn die oszillierende Bewegung mit einer einstellbaren variablen Hublänge ausgeführt wird, insbesondere wenn die Hublänge im wesentlichen gleich dem bei der jeweiligen oszillierenden Bewegung vom Bearbeitungswerkzeug durchfahrenen Weg im Werkstück ist.

**[0031]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass die Gesamt-Schleifzeit minimiert wird, weil die Hublänge auf den für einen vollständigen Materialabtrag notwendigen Betrag begrenzt ist.

**[0032]** Bei Ausführungsformen des erfindungsgemä-

ßen Verfahrens wird berücksichtigt, dass beim Bearbeiten einer konkav gekrümmten Oberfläche ein Restaufmaß mittels Bahnsteuerung von Werkstück und Bearbeitungswerkzeug mit verminderter Bahngeschwindigkeit entfernt wird.

**[0033]** 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.

**[0034]** Bei weiteren Ausführungsbeispielen der Erfindung wird das Werkstück beim Bearbeiten zusätzlich oszillierend um die zweite Achse verschwenkt.

**[0035]** 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.

**[0036]** Wenn in diesem Zusammenhang der oszillierenden 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.

**[0037]** 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.

**[0038]** Im letztgenannten Fall können bevorzugt durch Verdrehen des Bearbeitungswerkzeugs um die fünfte Achse alternativ zwei unterschiedliche Werkzeuge in Eingriff mit dem Werkstück gebracht werden.

**[0039]** 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.

**[0040]** Obwohl die vorliegende Erfindung bei einer Vielzahl von spanabhebenden Bearbeitungsprozessen einsetzbar ist, wird sie bevorzugt dann eingesetzt, wenn die Werkstücke geschliffen werden.

**[0041]** Bevorzugt handelt es sich bei den Werkstücken um Turbinenschaufeln, wobei die Oberflächen insbesondere zylindrische Oberflächen an einer Plattform der Turbinenschaufel sind.

**[0042]** 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 künstli-

che 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.

**[0043]** 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.

**[0044]** 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.

**[0045]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass für die schnell zu bewegendenden Achsen die leichteren Komponenten, nämlich der Werkzeugträger mit seinem Drehantrieb, unmittelbar am Maschinenbett laufen, während für die langsamer zu bewegendenden Achsen eine schwere und hochstabile Portalbauweise zur Verfügung steht.

**[0046]** Weitere Vorteile ergeben sich aus der Beschreibung und der beigefügten Zeichnung.

**[0047]** 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.

**[0048]** 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 Verfah- |

rens 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 gekrümmter Oberfläche.

**[0049]** 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.

**[0050]** 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.

**[0051]** 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.

**[0052]** 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.

**[0053]** 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.

**[0054]** 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.

**[0055]** 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.

**[0056]** 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.

**[0057]** 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.

**[0058]** 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.

**[0059]** 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/s<sup>2</sup>, vorzugsweise von mehr als 10 m/s<sup>2</sup>. Bei den im Ausführungsbeispiel dargestellten und beschriebenen Werkstücken (Turbinenschaufeln) führt dies infolge von deren Abmessungen zu Hubfrequenzen zwischen 200 und 500 min<sup>-1</sup>. 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.

**[0060]** 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.

**[0061]** 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.

**[0062]** 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

**[0063]** Die Figuren 3 und 4 zeigen in zwei Ansichten weitere Einzelheiten des dritten Schlittens 60.

**[0064]** 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.

**[0065]** 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.

**[0066]** 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.

**[0067]** 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:

**[0068]** 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.

**[0069]** 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.

**[0070]** 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 Auskrantung begrenzt. Die zahlreichen Versorgungs- und Steuerleitungen, die zur Schleifspindel zu führen und bei deren Bewegungen mitzuschleppen sind, schränken deren Beschleunigungsvermögen weiter ein.

**[0071]** 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.

**[0072]** 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.

**[0073]** 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.

**[0074]** 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.

**[0075]** 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  $\Delta X$  bezeichnet. Die Endlagen des Werkstücks innerhalb der Hubbewegung sind

durch die Bezugszeichen 79 (durchgezogen) und 79' (gestrichelt) dargestellt.

**[0076]** 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  $\Delta X$  ermöglicht.

**[0077]** Gleichzeitig wird die Schleifscheibe 44 entlang der ersten Achse 26 (Z-Achse) zugestellt, wie mit dem Symbol  $\Delta Z$  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).

**[0078]** Die Figuren 6 bis 8 veranschaulichen anhand der Bearbeitung einer Turbinenschaufel 68 eine Möglichkeit, die Hublänge  $\Delta X$  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.

**[0079]** 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.

**[0080]** Figur 7 zeigt eine zweite Drehstellung, bei der die Turbinenschaufel 68' um den Winkel  $B_1$  im Gegenuhrzeigersinn verdreht wurde, so dass nunmehr die Mittellinie 84' mit der Senkrechten zusammenfällt. Die Schleifscheibe kann jetzt über die gesamte Breite der Plattform 69a geführt werden, d.h. von einem dritten Eingriffspunkt 85c zu einem vierten Eingriffspunkt 85d. Der Abstand dieser beiden Eingriffspunkte 85c, 85d bestimmt nun auch hier die Hublänge  $\Delta_2 X$ .

**[0081]** In Figur 8 ist eine dritte Drehlage gezeigt, bei der die Turbinenschaufel gegenüber der zweiten Drehlage um einen Winkel  $B_2$  weiter im Gegenuhrzeigersinn verdreht wurde. Die mögliche Strecke der Materialabnahme zwischen einem fünften Eingriffspunkt 85e und

einem sechsten Eingriffspunkt 85f ist jetzt durch das Erreichen der Grenze des Gesamtaufmaßes 83 begrenzt und damit entsprechend auch die Länge des nunmehr einzustellenden Hubs  $\Delta_3 X$ .

**[0082]** Eine den Figuren 6 bis 8 entsprechende Darstellung ist, in nochmals leicht vergrößertem Maßstab, den Figuren 9 bis 12 für den Fall einer konkav gekrümmten Oberfläche 86 an der gegenüberliegenden Plattform 69b der Turbinenschaufel 68 zu entnehmen, die mit einem Gesamtaufmaß 88 abgetragen werden soll.

**[0083]** 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 Eingriffspunkt 89a, 89b, die den Hub  $\Delta_1 X$  in dieser Drehlage bestimmt.

**[0084]** 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.

**[0085]** Der Materialabtrag kann nun mit jeweils maximalem 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.

**[0086]** Figur 12 zeigt, dass die beschriebene Vorgehensweise an konkaven Formelementen des Werkstücks 68" an Grenzen stößt, wenn die Dynamik der Linienachsen nicht ausreicht, engen Krümmungen mit der gewünschten hohen Geschwindigkeit zu folgen. Man kann derartige sichelförmige Abschnitte 90 mit reduzierter Bahngeschwindigkeit und dementsprechend verminderter Abtragsleistung fertig bearbeiten. Diese Bewegung ist in Figur 12 mit einem Pfeil 91 angedeutet.

**[0087]** Alternativ kann an solchen konkaven Abschnitten eine höhere Bahngeschwindigkeit erreicht werden, wenn das Werkstück eine zusätzliche Schwenkbewegung 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 (durchgezogen gezeichnet) in Uhrzeigerrichtung um die fünfte Achse 64 (B-Achse) um einen Winkel  $\Delta B$  verdreht und gleichzeitig entlang der vierten Achse 58 (X-Achse) um eine Strecke  $\Delta X$  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  $\Delta Z$  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  $\Delta B$  von 89 nach 89" bewegt, während gleichzeitig die schnelle vierte Achse 58 (X-Achse) die Strecke  $\Delta X$  und die erste Achse 26 (Z-Achse) die erheblich kleinere Strecke  $\Delta Z$  zurücklegen

müssen.

**[0088]** 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  $\Delta U$  eingetragen.

**[0089]** Erfindungsgemäß ist noch ein Programmiersystem zum Berechnen von Programmparametern für die Ausführung des oben beschriebenen Verfahrens vorgesehen. Das Programmiersystem wählt die Programmparameter aus der Gruppe: Hublänge ( $\Delta X$ ), Hublage und Schwenkwinkel ( $\Delta B$ ) aus und optimiert diese im Rahmen der maschinenseitig verfügbaren Beschleunigungen und Geschwindigkeiten.

### 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 ( $\Delta X$ ) verfahren wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die oszillierende Bewegung ( $\Delta X$ ) mit einer Geschwindigkeit von mehr als 20 m/min, vorzugsweise von mehr als 50 m/min und einer Umkehrbeschleunigung von mehr als 3 m/s<sup>2</sup>, vorzugsweise von mehr als 10 m/s<sup>2</sup> ausgeführt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die oszillierende Bewegung ( $\Delta X$ ) mit einer Frequenz zwischen 200 und 500 min<sup>-1</sup> ausgeführt.
4. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste Achse (58; X), die zweite Achse (64; B) und die dritte Achse (26; Z) jeweils senkrecht aufeinander stehen.
5. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 4, **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.

6. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die oszillierende Bewegung ( $\Delta X$ ) mit einer einstellbaren variablen Hublänge ( $\Delta_1 X$ ,  $\Delta_2 X$ ,  $\Delta_3 X$ ) ausgeführt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Hublänge ( $\Delta_1 X$ ,  $\Delta_2 X$ ,  $\Delta_3 X$ ) im wesentlichen gleich dem bei der jeweiligen oszillierenden Bewegung ( $\Delta X$ ) vom Bearbeitungswerkzeug durchfahrenen Weg im Werkstück (68; 79) ist.
8. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 7, **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.
9. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Werkstück (68; 79) beim Bearbeiten zusätzlich oszillierend um die zweite Achse (64; B) verschwenkt wird.
10. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** der oszillierenden Bewegung ( $\Delta X$ ) des Werkstücks (68, 79) eine Bahnsteuerung zwischen Werkstück (68, 79) und Bearbeitungswerkzeug überlagert wird.
11. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Bearbeitungswerkzeug ferner entlang einer vierten Achse (36; Y) verfahren wird, die vorzugsweise parallel zur zweiten Achse (64; B) verläuft.
12. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Bearbeitungswerkzeug ferner um eine fünfte Achse (50; A) verdreht wird, die vorzugsweise parallel zur ersten Achse (58; X) verläuft.
13. Verfahren nach Anspruch 12, **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.
14. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** Oberflächen mit beliebiger Krümmung an den Werkstücken (68; 79) bearbeitet werden.
15. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** die

Werkstücke (68; 79) geschliffen werden.

16. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 15, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Werkstücke Turbinenschaufeln (68) sind. 5
17. Verfahren nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Oberflächen (80, 86) zylindrische Oberflächen an einer Plattform der Turbinenschaufel (68) sind. 10
18. 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 ( $\Delta X$ ) verfährt. 15
19. Werkzeugmaschine nach Anspruch 18, **dadurch gekennzeichnet, dass** die oszillierende Bewegung ( $\Delta X$ ) mit einer Geschwindigkeit von mehr als 20 m/min, vorzugsweise von mehr als 50 m/min und einer Umkehrbeschleunigung von mehr als 3 m/s<sup>2</sup>, vorzugsweise von mehr als 10 m/s<sup>2</sup> ausgeführt wird. 20
20. Werkzeugmaschine nach Anspruch 19, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie oszillierende Bewegung ( $\Delta X$ ) mit einer Frequenz zwischen 200 und 500 min<sup>-1</sup> ausführt. 25
21. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 18 bis 20, **dadurch gekennzeichnet, dass** der erste Schlitten (30) mit einem Linearmotor (72) gekoppelt ist. 30
22. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 18 bis 21, **dadurch gekennzeichnet, dass** der erste Schlitten mit einem Kurbeltrieb gekoppelt ist. 35
23. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 18 bis 22, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste Achse (58; X), die zweite Achse (64; B) und die dritte Achse (26; Z) jeweils senkrecht aufeinander stehen. 40
24. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 18 bis 23, **dadurch gekennzeichnet,** 45

**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.

25. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 18 bis 24, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Hublänge ( $\Delta_1 X$ ,  $\Delta_2 X$ ,  $\Delta_3 X$ ) der oszillierenden Bewegung ( $\Delta X$ ) einstellbar ist. 50
26. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 18 bis 25, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Werkzeughalter (66) mit einem Drehantrieb (76) versehen ist, der wahlweise kontinuierlich oder oszillierend betreibbar ist. 55
27. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 18 bis 26, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Bearbeitungswerkzeug ferner entlang einer vierten Achse (36; Y) verfahrbar ist, die vorzugsweise parallel zur zweiten Achse (64; B) verläuft.
28. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 18 bis 27, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Bearbeitungswerkzeug ferner um eine fünfte Achse (50; A) verdrehbar ist, die vorzugsweise parallel zur ersten Achse (58; X) verläuft.
29. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 18 bis 28, **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. 40
30. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 18 bis 29, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Bearbeitungswerkzeug mindestens eine Schleifscheibe (44, 48) ist, mit der die Werkstücke (68; 79) geschliffen werden. 45
31. Werkzeugmaschine nach einem oder mehreren der Ansprüche 18 bis 30, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Werkstücke Turbinenschaufeln (68) sind. 50
32. Werkzeugmaschine nach Anspruch 31, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Oberflächen (80, 86) im wesentlichen zylindrische Oberflächen an einer Plattform der Turbinenschaufel (68) sind. 55
33. Programmiersystem zum Berechnen von Programmparametern für die Ausführung des Verfahrens nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 17.

34. Programmiersystem nach Anspruch 33, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Programmparameter aus der Gruppe: Hublänge ( $\Delta X$ ), Hublage und Schwenkwinkel ( $\Delta B$ ) ausgewählt sind.

5

35. Programmiersystem nach Anspruch 33 oder 34, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Programmparameter im Rahmen der maschinenseitig verfügbaren Beschleunigungen und Geschwindigkeiten optimiert werden.

10

15

20

25

30

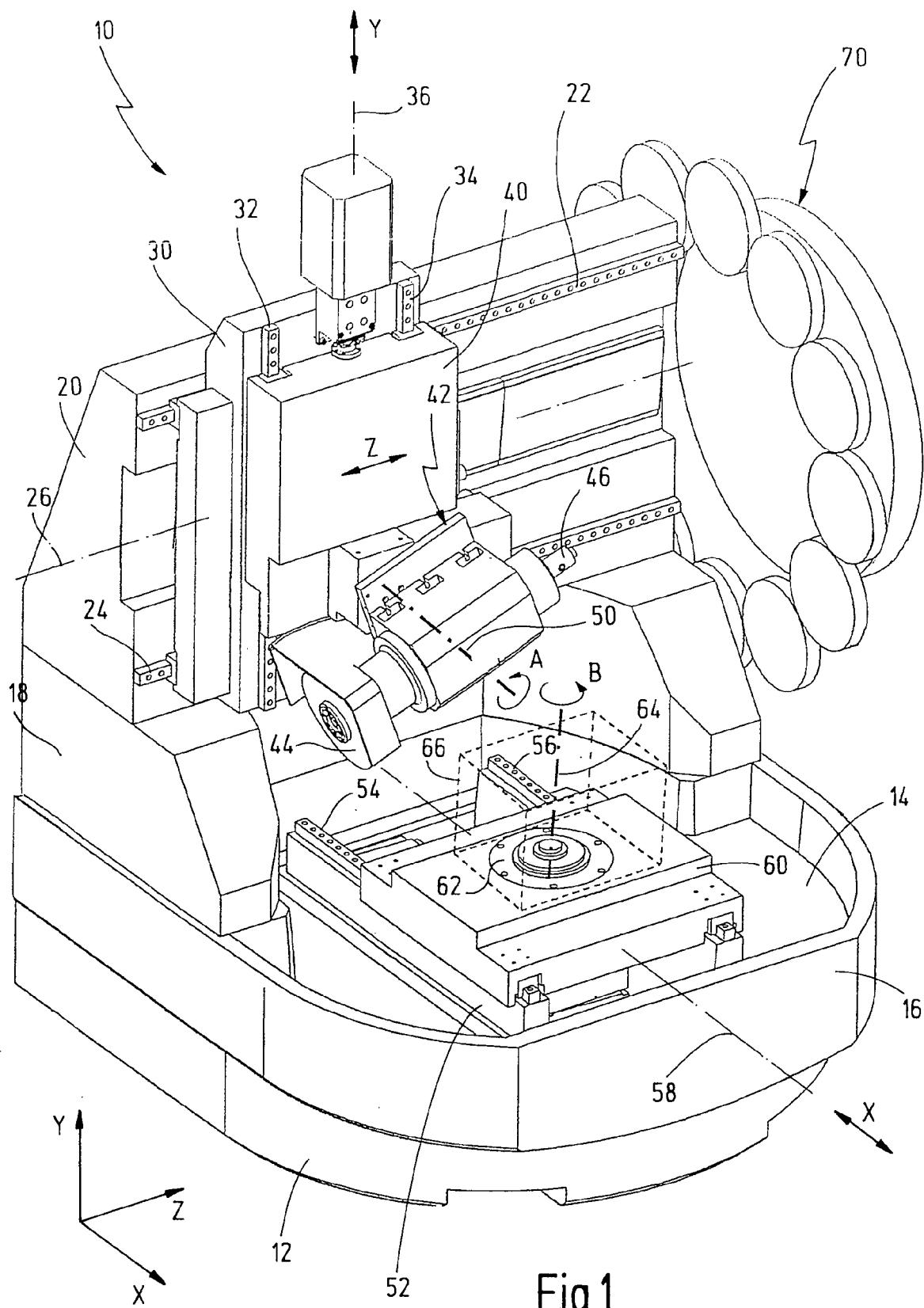
35

40

45

50

55



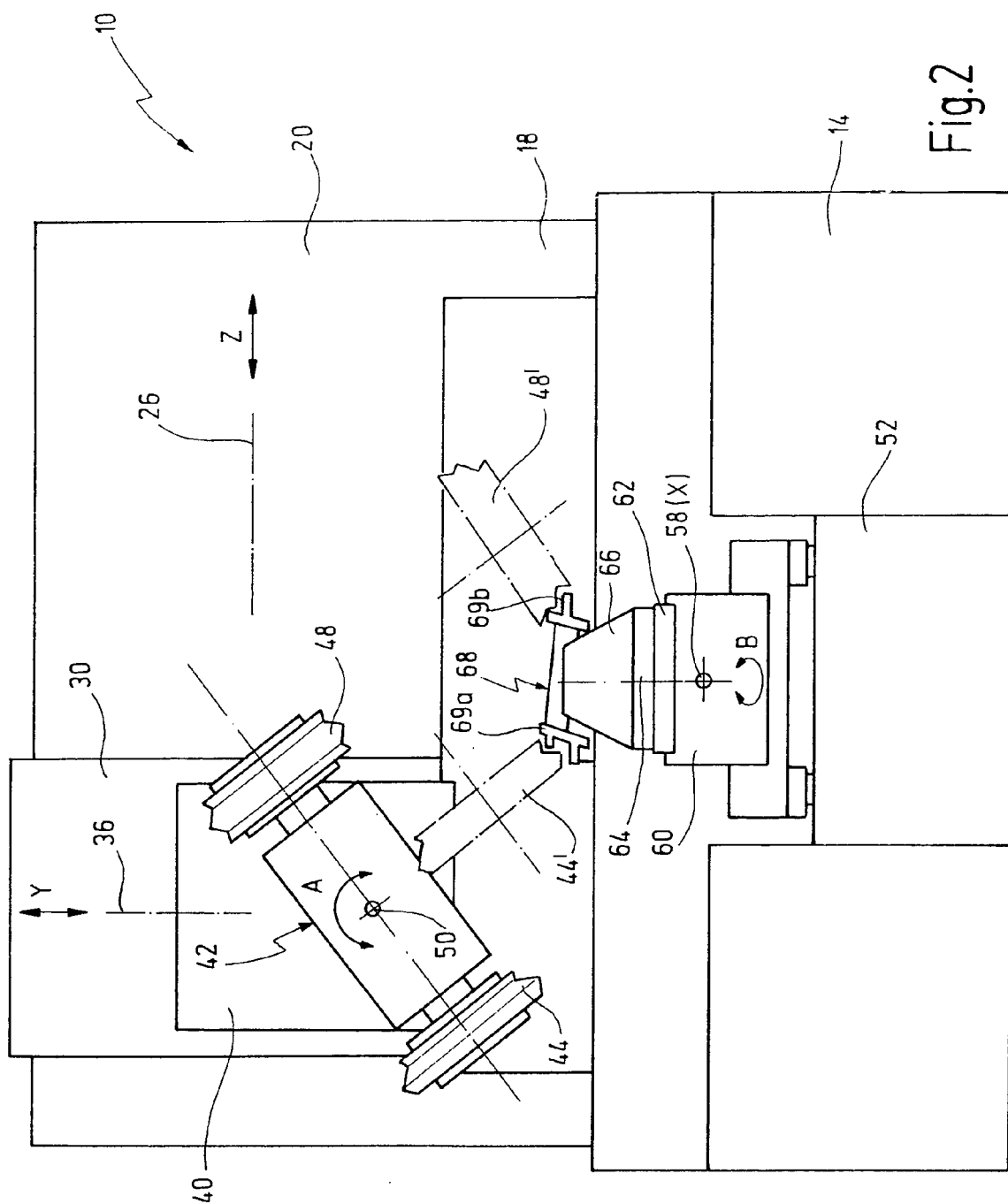


Fig. 2

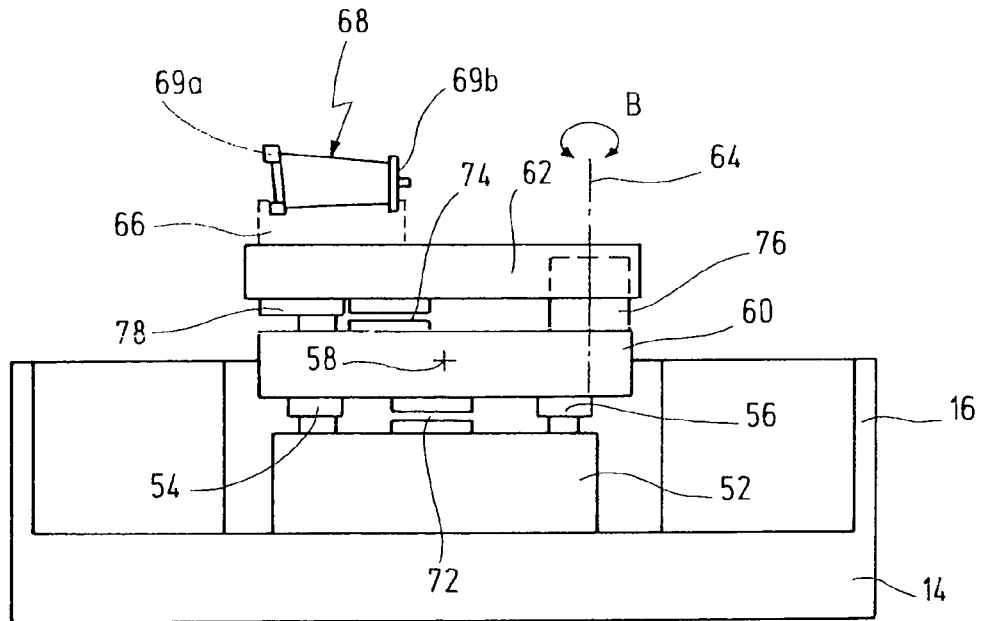


Fig.3

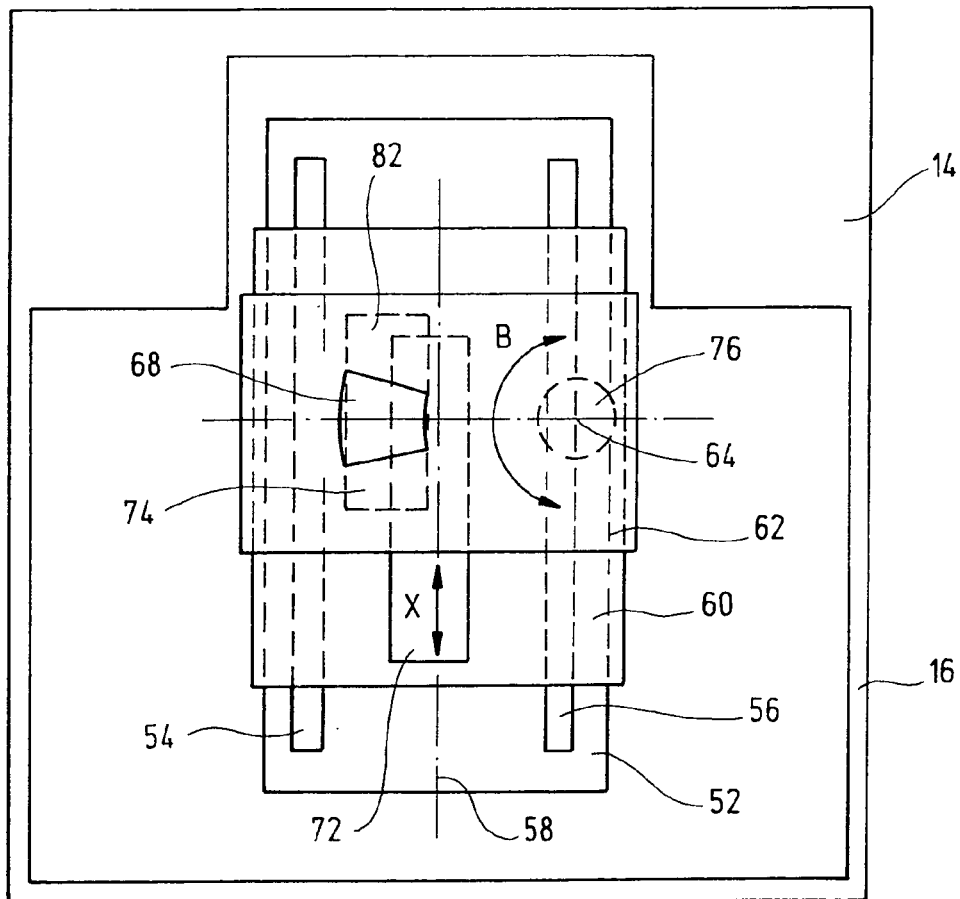


Fig.4

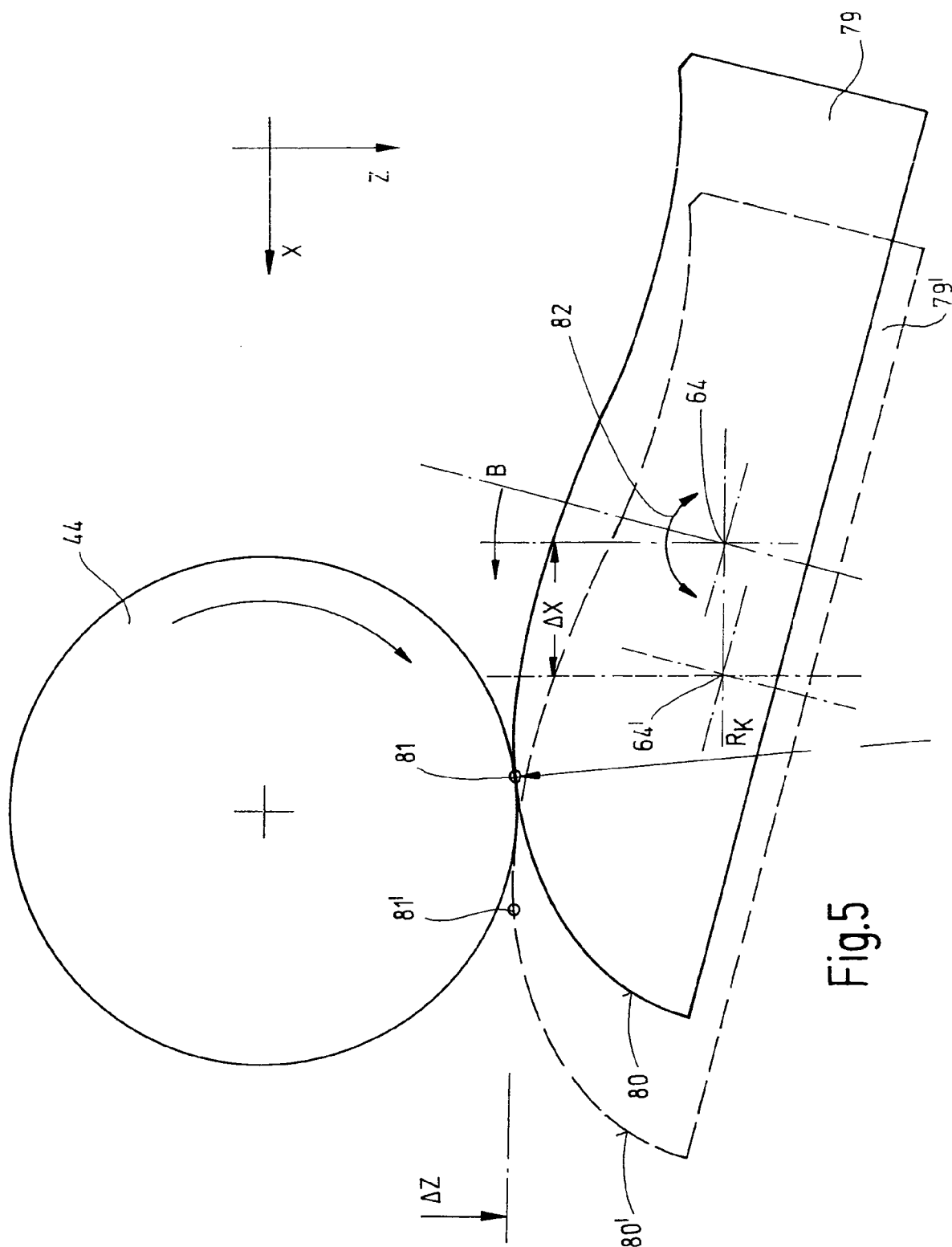
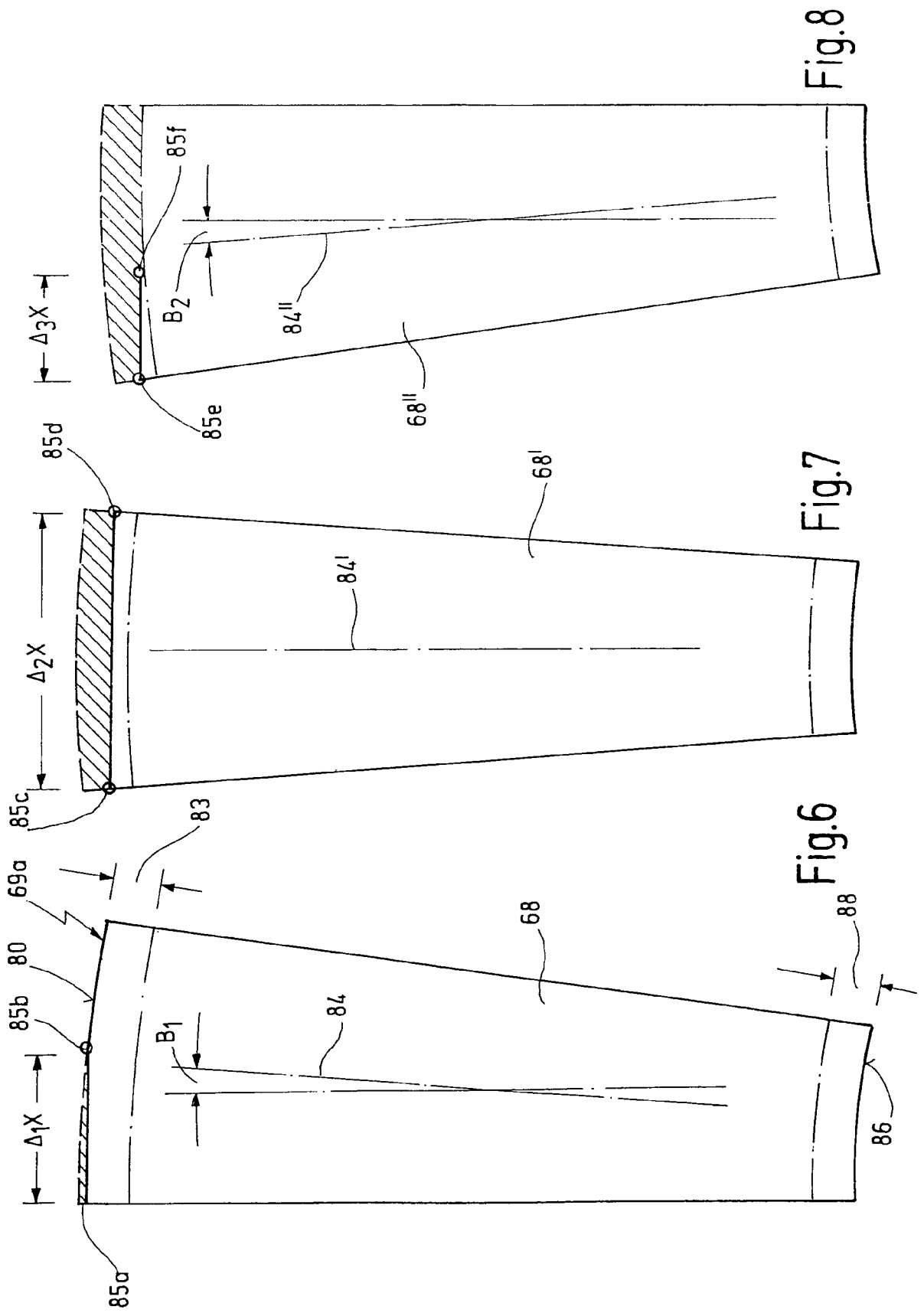
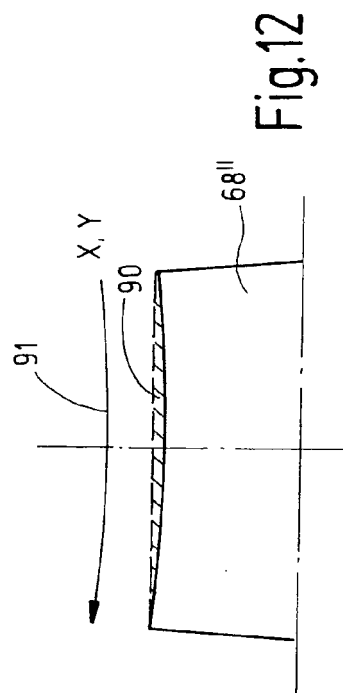
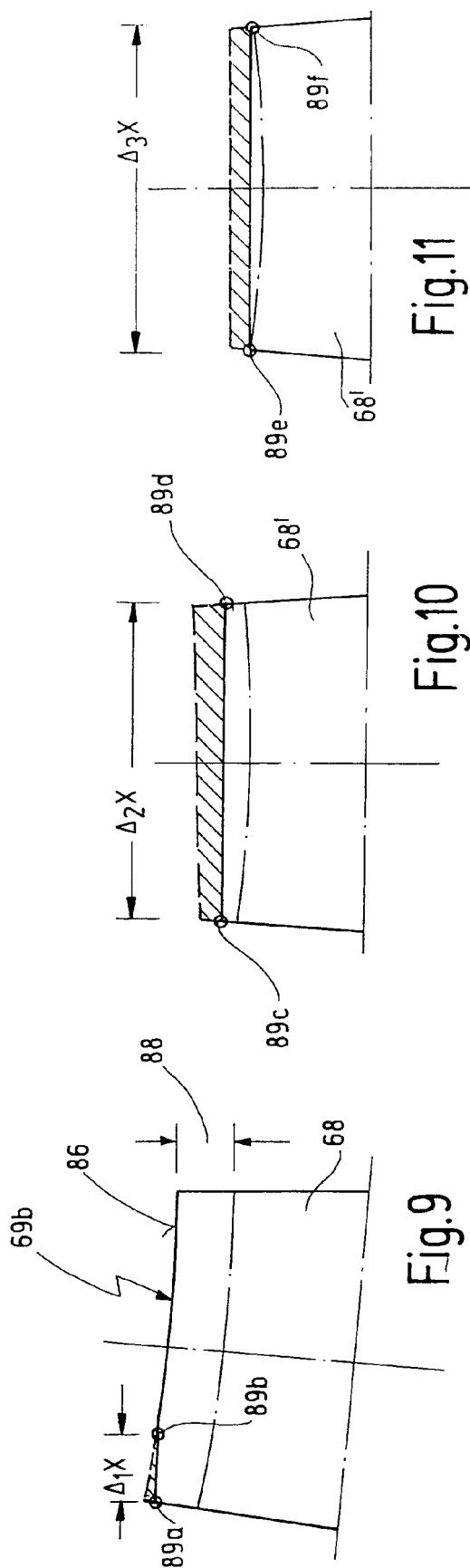


Fig.5





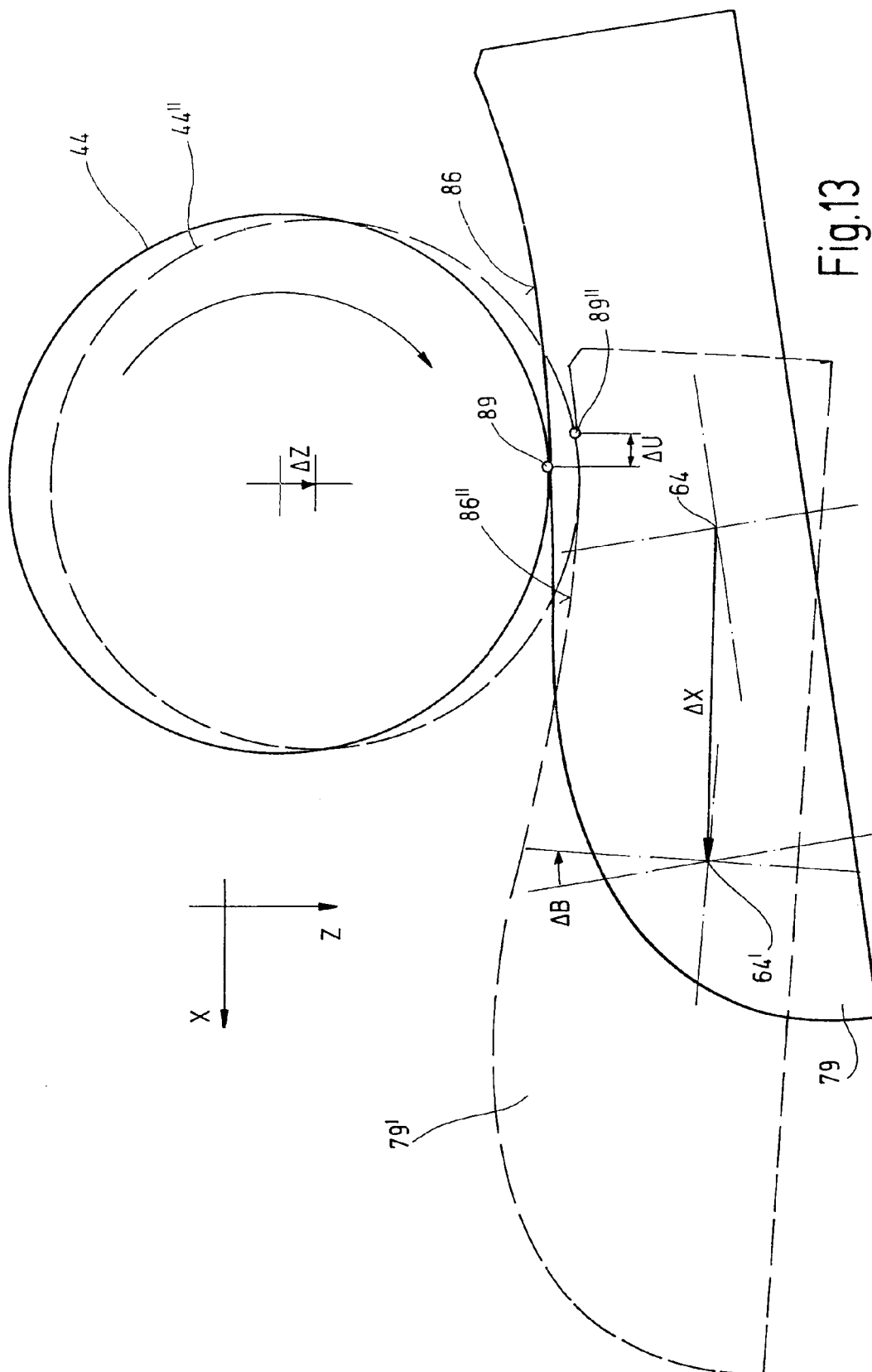


Fig.13



Europäisches  
Patentamt

# EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 06 01 7125

| EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                           |                                                 |                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|
| Kategorie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile                                       | Betrifft Anspruch                               | KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC) |
| D,A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | DE 36 25 565 A1 (HAUNI WERKE KOERBER & CO KG [DE]) 3. März 1988 (1988-03-03)<br>* Zusammenfassung; Abbildungen *<br>----- | 1,18,33                                         | INV.<br>B24B19/14                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                           |                                                 | RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                           |                                                 | B24B                               |
| Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                           |                                                 |                                    |
| Recherchenort<br>Den Haag                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                           | Abschlußdatum der Recherche<br>17. Oktober 2006 | Prüfer<br>Garella, Mario           |
| <p>KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE</p> <p>X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet<br/>Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie<br/>A : technologischer Hintergrund<br/>O : mündliche Offenbarung<br/>P : Zwischenliteratur</p> <p>T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze<br/>E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist<br/>D : in der Anmeldung angeführtes Dokument<br/>L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument<br/>&amp; : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument</p> |                                                                                                                           |                                                 |                                    |

2  
EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

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

EP 06 01 7125

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentedokumente angegeben.

Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

17-10-2006

| Im Recherchenbericht<br>angeführtes Patentdokument | Datum der<br>Veröffentlichung | Mitglied(er) der<br>Patentfamilie | Datum der<br>Veröffentlichung |
|----------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| DE 3625565 A1                                      | 03-03-1988                    | CH 672902 A5                      | 15-01-1990                    |
|                                                    |                               | GB 2193455 A                      | 10-02-1988                    |
|                                                    |                               | JP 2672304 B2                     | 05-11-1997                    |
|                                                    |                               | JP 63047054 A                     | 27-02-1988                    |
|                                                    |                               | US 4813187 A                      | 21-03-1989                    |
| -----                                              |                               |                                   |                               |

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

**IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE**

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

**In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente**

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