

19



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



11 Veröffentlichungsnummer: **0 335 255 B1**

12

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

45

Veröffentlichungstag der Patentschrift: **15.09.93**

51

Int. Cl.⁵: **B24B 19/08**

21

Anmeldenummer: **89105211.0**

22

Anmeldetag: **23.03.89**

54

Verfahren zum Schleifen eines Polygon-Kegels auf einer numerisch gesteuerten Schleifmaschine.

30

Priorität: **26.03.88 DE 3810422**

43

Veröffentlichungstag der Anmeldung:
04.10.89 Patentblatt 89/40

45

Bekanntmachung des Hinweises auf die
Patenterteilung:
15.09.93 Patentblatt 93/37

84

Benannte Vertragsstaaten:
AT CH DE FR GB IT LI SE

56

Entgegenhaltungen:
FR-A- 2 227 089

**WERKSTATTSTECHNIK, ZEITSCHRIFT FÜR IN-
DUSTRIELLE FERTIGUNG. vol. 77, no. 7, 01
Juli 1987, BERLIN DE Seiten 363 - 366; Alois
Schmid: "CNC-Unrundschleifen im Schräge-
instechverfahren"**

73

Patentinhaber: **Fortuna-Werke Maschinenfa-
brik GmbH
Pragstrasse 140
D-70376 Stuttgart(DE)**

72

Erfinder: **Wedeniowski, Horst Josef
Beutelsbachstrasse 8/1
D-7064 Remshalden-Grunbach(DE)**

74

Vertreter: **Witte, Alexander, Dr.-Ing. et al
Witte, Weller, Gahlert & Otten Patentanwälte
Augustenstrasse 14
D-70178 Stuttgart (DE)**

EP 0 335 255 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Schleifen eines Kegelstumpfs, dessen radiale Querschnittsfläche die Gestalt eines n-eckigen Polygon-Profils mit vorgegebener Exzentrizität und vorgegebenem arithmetischem Mittelwert der Durchmesser des Umkreises und des Inkreises des Polygon-Profils aufweist, bei dem eine um eine erste Achse drehbare Schleifscheibe entlang einer gemeinsamen Mantellinie an einem um eine zweite Achse drehbaren Werkstückrohling angreift, wobei die Achsen sich unter einem spitzen Winkel schneiden, und bei dem ferner die Schleifscheibe eine oszillierende Bewegung ausführt, bei der die Mantellinie mit der n-fachen Frequenz der Drehbewegung des Werkstückrohlings und mit einer bestimmten Amplitude parallelverschoben wird.

Ein derartiges Verfahren ist aus der Firmenschrift "Fortuna Polygon-System - Arbeitsunterlagen über Wellen-Naben-Verbindungen" bekannt.

Polygon-Verbindungen von Wellen und Naben sind bekanntlich eine Art einer formschlüssigen Mitnehmerverbindung zum Übertragen von Drehmomenten. Neben zylindrischen Polygonen werden dabei auch kegelige Polygone eingesetzt. Es ist bekannt, bei einer kegeligen Polygon-Verbindung zwischen einer Welle und einer Nabe zusätzlich eine geringe axiale Spannkraft aufzubringen, um neben dem Formschluß der Polygon-Flächen auch einen Kraftschluß zu erreichen. Auf diese Weise kann man Verbindungen herstellen, die eine wesentlich kürzere axiale Baulänge als krei-kegelförmige Verbindungen mit gleichem übertragbarem Drehmoment aufweisen.

Die bei bekannten Polygon-Verbindungen verwendeten Polygon-Formen sind nach DIN 32 711 und DIN 32 712 genormt. Die Polygon-Profile mit der Bezeichnung P3G nach DIN 32 711 sind sogenannte Gleichdick-Profile, weil die durch die Achse des Profils laufenden Durchmesser alle gleich lang sind. Dies ist von besonderem Vorteil, weil auf diese Weise die Drehmomentübertragung mit äußerst gleichmäßiger Spannungsverteilung möglich ist.

Polygon-Profile in zylindrischer oder kegelstumpfförmiger Gestalt werden herkömmlich mittels kinematischer Polygon-Schleifmaschinen hergestellt, bei denen die Schleifscheibe in einer gemeinsamen Mantellinie am Werkstückrohling anliegt. Die Schleifscheibe wird mittels eines Exzentrers und einer Schubstange in zwei Achsen oszillierend ausgelenkt, die zueinander und zur Schleifscheibenachse senkrecht stehen. Die Schleifscheibenachse beschreibt damit eine Mantelfläche eines elliptischen Zylinders. Durch synchrones Drehen des Werkstückrohlings wird an dessen Oberfläche dann das Polygon-Profil erzeugt. Durch Einstellen der Hauptachsen der Ellipse und des Grundvorschubs der Schleifscheibe in Richtung auf den Werkstückrohling kann auf diese Weise ein Polygon-Profil mit frei wählbarer Exzentrizität und frei wählbarem mittlerem Durchmesser geschliffen werden, wobei man unter dem mittleren Durchmesser den arithmetischen Mittelwert der Durchmesser des Inkreises und des Umkreises des Polygon-Profils versteht.

Während auf die geschilderte Weise zylindrische Polygon-Profile ohne Probleme als Gleichdick nach DIN 32 711 geschliffen werden können, ist man beim Schleifen kegeliger Polygone auf Schwierigkeiten gestoßen.

Es hat sich nämlich gezeigt, daß beim Schleifen einer kegeligen Polygon-Verbindung erhebliche Schwierigkeiten hinsichtlich der Paßgenauigkeit von Welle und Nabe entstehen und daß eine Gleichdick-Form für alle radialen Querschnitte entlang der Achse des Polygon-Kegelstumpfs nicht erreichbar ist.

Aus diesem Grunde haben sich kegelige Polygon-Verbindungen in der Praxis nicht durchsetzen können, weil infolge von Formunregelmäßigkeiten lokale Spannungsspitzen an den Berührungsf lächen von Welle und Nabe auftreten, die zu schnellem Verschleiß und zu Dejustierungen der Verbindung führen können.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der eingangs genannten Art dahingehend weiterzubilden, daß eine kegelige Polygon-Verbindung zur Verfügung gestellt wird, die höchsten Ansprüchen an Paßgenauigkeit genügt und bei der die Spannungsverteilung so gleichmäßig wie möglich ist, so daß die Vorteile von Polygon-Verbindungen, insbesondere der Vorteil der Selbstzentrierung, auch im Langzeitbetrieb bei großen Drehmomentwerten, erhalten bleiben.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die Amplitude mit dem Doppelten eines modifizierten Exzentrizitätswertes eingestellt wird, der der Beziehung

$$e' = D_{m2} \frac{\tan \beta_{\max}}{2n}$$

gehört, wobei D_{m2} der arithmetische Mittelwert der Durchmesser des Polygon-Profils am dünneren Ende des Kegelstumpfs und β_{max} ein vorgegebener maximaler Tangentenanlagewinkel des zu schleifenden Kegelstumpfs ist, wobei der Tangentenanlagewinkel so vorzugeben ist, daß für den modifizierten Exzentrizitätswert e' folgende Randbedingungen:

- 5 a) $e' < e$ und
b)

$$10 \quad \rho_2 \geq \frac{D_{m2}}{2} - 8e'$$

eingehalten werden, wobei ρ_2 der praktisch minimal mögliche Krümmungsradius des Polygon-Profils am dünneren Ende des Kegelstumpfs ist.

15 Die der Erfindung zugrundeliegende Aufgabe wird auf diese Weise vollkommen gelöst. Es hat sich nämlich gezeigt, daß es aus grundsätzlichen mathematischen Gründen nicht möglich ist, mit einer gerade Mantellinie aufweisenden Schleifscheibe, d.h. einer zylindrischen oder kegelförmigen Schleifscheibe, einen Polygon-Kegelstumpf zu schleifen, dessen radiale Querschnittsflächen an jeder Position der Längsachse eine Gleichdick-Form aufweisen. Die Bemessung des Exzentrizitätswertes in der oben angegebenen
20 Weise hat demgegenüber den Vorteil, daß eine real schleifbare Polygon-Kegelstumpfform entsteht, die gleichwohl hinsichtlich der Spannungsverteilung nahezu dieselben Werte ergibt wie ein theoretisch definierbarer Gleichdick-Polygon-Kegelstumpf. Die Unterschiede zu diesem theoretischen Optimum sind bei der oben bezeichneten Dimensionierung des Exzentrizitätswertes praktisch nicht mehr meßbar.

Auf diese Weise ist es somit möglich, Polygon-Kegelverbindungen neue Anwendungsbereiche zu
25 eröffnen, weil nunmehr in einfacher Weise herstellbare und auch Langzeitanprüchen genügende Drehmoment-Übertragungsverbindungen zur Verfügung stehen, mit denen die theoretisch unbestrittenen Vorteile von Polygon-Verbindungen nun auch bei kegelförmigen Verbindungen in die Praxis umgesetzt werden können. Dies eröffnet vor allem im Bereich des Werkzeughalter-Baues ganz neue Möglichkeiten, weil gegenüber herkömmlichen Werkzeughaltern mit Kreiskegeln eine deutliche Reduzierung der
30 axialen Baulänge möglich ist.

Bei einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung beträgt der Winkel β_{max} 14° .

Es hat sich gezeigt, daß dieser Winkel einen optimalen Wert darstellt, bei dem sich die Drehmoment-Übertragung einerseits und die Spannungsverteilung andererseits in nahezu demselben Ausmaße einstellt, wie dies bei einem theoretisch definierten Gleichdick-Polygon-Kegelstumpf der Fall ist. Der Winkel β steht
35 dabei für den Schnittwinkel der Tangente in einem Punkt des Polygon-Profils mit einer Tangente an einen Kreis durch den Punkt, wobei der Mittelpunkt des Kreises mit dem Mittelpunkt des Polygons zusammenfällt. Der Winkel β ist somit beispielsweise bei einem drei-eckigen Polygon-Profil an den drei Punkten kleinster Krümmung und an den drei Punkten größter Krümmung, d.h. alle 60° über den Umfang Null. Zwischen diesen Null-Werten nimmt der Tangentenanlagewinkel β jeweils ein Maximum an, und es hat sich gezeigt,
40 daß die geschilderten optimalen Verhältnisse dann vorliegen, wenn das Winkelmaximum auf 14° eingestellt wird.

Bei einer besonders bevorzugten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens werden die Schleifscheibe entlang einer rechtwinklig zur Mantellinie verlaufenden X-Achse in vorgegebenen Schritten und der Werkstückrohling um die zweite Achse mit vorgegebenen Winkelschritten verstellt.

45 Diese Maßnahme hat den Vorteil, daß das erfindungsgemäße Verfahren mittels einer NC-gesteuerten Schleifmaschine ausgeführt werden kann, bei der die Kinematik herkömmlicher Polygon-Schleifmaschinen mit Exzenter und Schubstange durch eine NC-Koordinatensteuerung ersetzt wird. Dies ermöglicht eine präzise Fertigung beim Innen- oder Außenschleifen von Außen- oder Innen-Polygon-Kegelstümpfen mit serienmäßigen Schleifmaschinen, wie sie z.B. auch zum Nockenschleifen verwendet werden.

50 Bei einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung wird die Zustellung der Schleifscheibe entlang der X-Achse ihrer Bahnbewegung entlang der X-Achse entsprechend dem Polygon-Profil überlagert.

Diese Maßnahme hat den Vorteil, daß durch die Überlagerung des sogenannten Zustellbetriebes und Bahnbetriebes auch große Aufmaße entlang einer spiralförmigen Bahn getragen werden können.

55 Bei einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung erfolgt die Verstellung des Werkstückrohlings mit vorgegebenen Winkelschritten um die zweite Achse mit einer Winkelgeschwindigkeit, derart, daß das bezogene Zeitspanvolumen Q' konstant ist.

Diese Maßnahme hat den Vorteil, daß lokale Überlastungen bzw. Überhitzungen sicher vermieden werden können.

Bei einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung wird die Bewegung der Schleifscheibe in der X-Achse nach der Beziehung:

5

$$X = \sqrt{(R_s + r_1 + s)^2 + (s')^2} - (R_s + r_1)$$

eingestellt mit:

- R_s = Radius der Schleifscheibe
- 10 r_1 = Innenradius des Polygon-Profiles am dünneren Ende des Kegelstumpfs;
- s (Profilerrhebungswert) = $e(1 - \cos(n\theta))$ mit θ = Drehwinkel um die zweite Achse
- s' = $ds/d\theta$

Diese Maßnahmen haben den Vorteil, daß eine einfache Bahnsteuerung der Schleifscheibe mit einer herkömmlich numerisch gesteuerten Schleifmaschine möglich ist.

15

Bei einer weiter bevorzugten Ausgestaltung dieses Ausführungsbeispiels wird die Schleifscheibe um eine zu ihrer Drehachse senkrechte Achse verschwenkt, und zwar vorzugsweise nach der Beziehung:

20

$$\Delta\lambda = \arctan \frac{D_1 - D_2}{2L} - \arctan \frac{D_{m1} - D_{m2}}{2L}$$

mit:

- D_1 = der größere Umkreis-Durchmesser des Polygon-Profiles am dickeren Ende des Kegelstumpfs;
- 25 D_{m1} = der arithmetische Mittelwert des Umkreis- und des Inkreis-des Polygon-Profiles am dickeren Ende des Kegelstumpfs;
- L = axiale Länge des Kegelstumpfs.

Diese Maßnahmen haben den Vorteil, daß eine Schwankung des Neigungswinkels der Mantellinien des Polygon-Kegelstumpfs ausgeglichen wird.

30

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

- Fig. 1 eine perspektivische Ansicht eines Polygon-Kegelstumpfs als Teil eines Werkzeughalters mit zugehöriger Spindelaufnahme;
- Fig. 2 ein ebenes Polygon-Profil mit den zugehörigen Parametern;
- 35 Fig. 3 zwei Koordinatensysteme zur Erläuterung der Definition von Gleichdick-Polygonen;
- Fig. 4 eine perspektivische Darstellung zur Erläuterung der Unterschiede beim Herstellen von Polygon-Zylindern und Polygon-Kegelstümpfen;
- Fig. 5 ein Diagramm zur Erläuterung eines Tangentenanlagewinkels;
- Fig. 6 eine grafische Darstellung eines Verlaufes des Tangenten-Anlagewinkels gemäß Fig. 5 über dem Umfangswinkel eines Polygon-Profiles;
- 40 Fig. 7 eine perspektivische Darstellung eines nach dem erfindungsgemäßen Verfahren definierten Polygon-Kegelstumpfs;
- Fig. 8 bis 11 vier Prinzipdarstellungen zur Erläuterung von Geometriefehlern nach dem Stand der Technik bzw. zur Vermeidung von Geometriefehlern bei Polygon-Kegelstümpfen nach der Erfindung;
- 45 Fig. 12 eine perspektivische Darstellung, ähnlich Fig. 4, zur Erläuterung einer ersten Variante eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum Außenschleifen;
- Fig. 13 eine Darstellung, ähnlich Fig. 12, jedoch zum Innenschleifen;
- Fig. 14 eine äußerst schematisierte Draufsicht auf eine numerisch gesteuerte Schleifmaschine, mit der die in den Fig. 12 und 13 illustrierten Verfahren durchgeführt werden können;
- 50 Fig. 15 eine Darstellung, ähnlich Fig. 12, für eine andere Variante eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum Außenschleifen;
- Fig. 16 eine Darstellung, ähnlich Fig. 13, jedoch für die in Fig. 15 dargestellte Verfahrensvariante, jedoch beim Innenschleifen;
- 55 Fig. 17 eine Darstellung, ähnlich Fig. 14, für eine numerisch gesteuerte Schleifmaschine, mit der das in den Fig. 15 und 16 illustrierte Verfahren durchgeführt werden kann.
- Fig. 18 eine schematisierte Darstellung zur Erläuterung der Verhältnisse beim Eingriff einer

Schleifscheibe in ein Werkstück;
 Fig. 19 und 20 Diagramme zur Erläuterung der Geometrie- bzw. Bearbeitungsparameter bei der Konfiguration gemäß Fig. 18;

Fig. 21 eine perspektivische Darstellung zur Erläuterung von Schleifscheibenparametern, wie sie zur Durchführung des Verfahrens gemäß den Fig. 18 bis 20 eingestellt werden.

In Fig. 1 bezeichnet 10 insgesamt einen Werkzeughalter, der an seinem unteren Ende ein Werkzeug, beispielsweise einen Bohrer 11 oder einen Fräser oder ein anderes Werkzeug tragen kann. Das Werkzeug sitzt mit dem vom Bearbeitungsende abgewandten Ende in einem üblicherweise zylindrischen Flansch 12. Oberhalb des Flansches 12 befindet sich eine form- und/oder kraftschlüssige Mitnehmerverbindung, die bei dem in Fig. 1 dargestellten Beispiel aus einem Polygon-Zylinder 13 sowie einem darauf aufgesetzten Polygon-Kegelstumpf 14 besteht. Eine komplementäre Spindelaufnahme 15 einer Werkzeugmaschine weist einen entsprechend geformten Polygon-Innenzylinder 16 sowie einen Polygon-Innenkegelstumpf 17 auf. Die Dimensionierung der Paarungen 13/16 und 14/17 ist so gewählt, daß die Oberflächen der Zylinder bzw. Kegelstümpfe dicht aneinanderliegen, wenn der Werkzeughalter 10 in die Spindelaufnahme 15 eingesetzt ist.

Mit einem Pfeil 18 ist angedeutet, in welche Richtung der Werkzeughalter 10 in die Spindelaufnahme 15 eingesetzt bzw. wieder aus dieser entnommen werden kann. Außerdem symbolisiert der Pfeil 18 eine axiale Zugkraft, die auf den in die Spindelaufnahme 15 eingespannten Werkzeughalter 10 ausgeübt werden kann. Hierzu kann der Polygon-Kegelstumpf 14 in seiner oberen Stirnfläche mit einer Bohrung 19 versehen sein, die sich nach innen weitet und in die eine Anordnung aus Zugstange und Spannzange der Werkzeugmaschine eingreifen kann, um den eingesetzten Werkzeughalter 10 nach oben in die Spindelaufnahme 15 zu ziehen, wie dies an sich bekannt ist.

Fig. 2 zeigt einen Radialschnitt durch einen Polygon-Kegelstumpf, der ein umlaufendes Polygon-Profil 30 zeigt. Das Polygon-Profil 30 wird von einem Umkreis 31 und einem Inkreis 31 begrenzt. Der Umkreis 31 hat dabei einen Durchmesser D und der Inkreis 32 hat einen Durchmesser d . Der effektive Durchmesser D_m des Polygon-Profils 30 ist gleich dem arithmetischen Mittelwert der Durchmesser D und d von Umkreis 31 und Inkreis 32. Die Differenz der Durchmesser D und d beträgt $2e$, wobei e die sogenannte Exzentrizität des Polygon-Profils 30 ist.

Wenn es sich bei dem Polygon-Profil 30 um ein Gleichdick nach DIN 32 711 handelt, so bedeutet dies, daß jeder durch den Mittelpunkt M des Polygon-Profils 30 laufende Durchmesser D_m dieselbe Länge aufweist, unabhängig vom Winkel Φ , den der Durchmesser D_m zu einer gedachten y - oder x -Achse einnimmt.

Polygon-Profile sind bekanntlich Epizykloiden, die dadurch entstehen, daß ein Rollkreis auf einem Festkreis abrollt und die Ortskurve eines Punktes betrachtet wird, der sich innerhalb des Rollkreises im Abstand von dessen Peripherie befindet.

Wenn das Verhältnis der Durchmesser von Rollkreis und Festkreis eine ganze Zahl ist, so entstehen geschlossene Epizykloiden-Kurvenzüge. In der einschlägigen Literatur ist nachzulesen, daß die hier interessierenden Gleichdick-Polygon-Profile dann entstehen, wenn der Abstand zwischen Festkreis und Rollkreis unendlich groß wird und die dann entstehende Epizykloide in endliche Abmessungen abgebildet wird.

Fig. 3 zeigt ein Koordinatensystem y - x , in dem Punkte P eines im vorliegenden Zusammenhang interessierenden Polygons dargestellt werden sollen. Aus der Literatur ist zu entnehmen, daß man sich hierzu eines rotierenden Hilfs-Koordinatensystems y_1 - x_1 bedienen kann, dessen Ursprung O_1 auf einer Ellipse 35 liegt und dessen Neigung zum y - x -Koordinatensystem mit dem Ursprung O einem Winkel γ entspricht. Die Ellipse 35 hat dabei eine Hauptachse, deren halbe Länge dem Produkt der Eckenzahl n und der Exzentrizität e des Polygon-Profils entspricht, während die halbe Länge der Nebenachse gleich der Exzentrizität e ist. Um einen Punkt P des Polygon-Profils, dessen Polarkoordinaten im y/x -Koordinatensystem einen Erhebungswinkel θ aufweisen, in der Ebene der Fig. 3 zu konstruieren, wählt man eine Parameterdarstellung nach dem Winkel γ , die den folgenden Beziehungen gehorcht:

$$x_1 = \frac{D_m}{2} \cos \gamma - 2e \cos 2\gamma - e \cos 4\gamma$$

$$y_1 = \frac{D_m}{2} \sin \gamma + 2e \sin 2\gamma + e \sin 4\gamma$$

Zur Definition des Hilfs-Koordinatensystems y_1-x_1 zeichnet man zunächst eine Hilfsgerade durch den Ursprung O des Koordinatensystems $y-x$, und zwar unter einem Winkel 3γ zur x -Achse. Der Schnittpunkt dieser Hilfsgeraden mit der Ellipse 35 ergibt den Ursprung O_1 des Hilfs-Koordinatensystems y_1-x_1 . Mit Hilfe der oben angegebenen Gleichungen bestimmt man nun die Koordinaten x_1 und y_1 im Hilfs-Koordinatensystem und gelangt so zur Lage des Punktes P.

Aus den oben angegebenen Formeln lassen sich durch entsprechende Umrechnungen auch Polarkoordinaten für den Punkt P im $y-x$ -Koordinatensystem ableiten.

Das auf diese Weise erhaltene Polygon-Profil weist eine Gleichdick-Form gemäß DIN 32 711 auf.

In Fig. 4 ist eine Schleifscheibe 40 zu erkennen, die von zylindrischer oder kegelliger Gestalt sein kann. In beiden Fällen weist die Schleifscheibe 40 eine gerade Mantellinie 41 auf. Die Schleifscheibe 40 ist um eine Schleifscheibenachse 42 drehbar, die in Fig. 4 nicht maßstäblich eingezeichnet ist. Die Mantellinie 41 kann zur Schleifscheibenachse 42 parallel verlaufen, wenn eine zylindrische Schleifscheibe 40 verwendet wird, sie kann aber auch zur Schleifscheibenachse 42 geneigt verlaufen, wenn die Schleifscheibe 40 eine kegelige Gestalt hat.

Es sei zunächst der Fall betrachtet, daß um eine Werkstückachse 43, die zur Mantellinie 41 parallel verläuft, ein erster Werkstückrohling 45 drehbar ist. Synchronisiert man die Drehbewegung des ersten Werkstückrohlings 45 mit einer oszillierenden Hubbewegung $H_{S(\phi)}$ der Schleifscheibe 40, so erhält man einen Polygon-Zylinder, wenn die Frequenz der Hubbewegung z.B. gerade das Dreifache der Drehfrequenz des ersten Werkstückrohlings 45 beträgt und die Amplitude der Hubbewegung dem Betrag $2e$ entspricht. Die Achse der Hubbewegung $H_{S(\phi)}$ der Schleifscheibe 40 wird in der Fachsprache der Schleifmaschinenteknik als X-Achse bezeichnet.

Wenn man nun die Werkstückachse 43 um einen Winkel λ in eine Lage 43' neigt, so erhält man bei sonst nicht veränderten Bedingungen einen zweiten Werkstückrohling 46, der die Form eines Polygon-Kegelstumpfs aufweist.

In Fig. 4 sind die Werkstückachsen mit Z und Z' gekennzeichnet, und die Länge des Polygon-Kegelstumpfs ist mit L bezeichnet. In der Fachsprache der Schleifmaschinenteknik wird die Werkstückachse 43 als "C-Achse" bezeichnet. Der Werkstückrohling 45 dreht sich um die C-Achse mit einer Winkelgeschwindigkeit $d\theta/dt$, so daß bei einer inkrementalen Hubbewegung $H_{S(\phi)}$ der Schleifscheibe 40 in der X-Achse ein Winkelinkrement $\Delta \theta$ durchgemessen wird.

Da bei zylindrischen oder kegeligen Mantelflächen die einzigen geraden Oberflächenlinien die Mantellinien sind, müssen die Achsen 42 und 43 bzw. 42 und 43' in einer Ebene liegen, dürfen also nicht windschief verlaufen. Im Falle der geneigten Werkstückachse 43' schneiden sich die Achsen 42 und 43' außerhalb der Darstellung der Fig. 4.

Die oszillierende Bewegung der Schleifscheibe 40 erfolgt in der Weise, daß sie in einer zur Erstreckung der Mantellinie 41 senkrechten Richtung mit vorgegebener Amplitude und vorgegebener Frequenz ausgelenkt wird. Wenn ein Polygon-Zylinder (Werkstückrohling 45) geschliffen wird, beträgt die Amplitude der Auslenkung gerade das Doppelte der Exzentrizität e , während im Falle der geneigten Werkstückachse 43' dieser Betrag noch mit dem Faktor $\cos \lambda$ zu multiplizieren ist.

Es läßt sich nun durch analytische Betrachtung beweisen, daß ein gemäß Fig. 4 geschliffener Polygon-Kegelstumpf so beschaffen ist, daß seine radialen Querschnittsflächen über die axiale Länge betrachtet keine Gleichdick-Profile sind. Bei einem Gleichdick-Profil muß nämlich die relative Exzentrizität, d.h. der Quotient aus der Exzentrizität e und dem mittleren Durchmesser D_m über die axiale Länge konstant sein. Bei Polygon-Kegelstümpfen, die mit einer geraden Mantellinie 41 einer Schleifscheibe 40 geschliffen werden, ist dies jedoch nicht der Fall, weil die relative Exzentrizität sich über die axiale Länge stetig ändert.

Dies bedeutet, daß bei einem gemäß Fig. 4 geschliffenen Polygon-Kegelstumpf bestenfalls eine der radialen Querschnittsflächen ein Gleichdick-Profil aufweist, während alle anderen radialen Querschnittsflächen von dieser Idealform abweichen. Anders ausgedrückt bedeutet dies, daß bei einer Werkstatt-

Dimensionierung eines Polygon-Kegelstumpfs mit einer oberen und einer unteren Stirnfläche, die jeweils die Form eines Gleichdick-Profiles aufweisen, eine Herstellung gemäß Fig. 4 nicht möglich ist, weil die "Mantellinien" eines solchen Polygon-Kegelstumpfs keine Geraden wären, die mit einer Mantellinie 41 einer Schleifscheibe 40 als Angriffslinie des Bearbeitungswerkzeuges geschliffen werden könnten. Man kann vielmehr durch analytische Betrachtung zeigen, daß bei einem solchen werkstatt-dimensionierten Polygon-Kegelstumpf sowohl die untere Stirnfläche wie auch die obere Stirnfläche, die jeweils als Gleichdick-Profil ausgebildet sind, einen eigenen Kegel zugeordnet haben, deren Spitzen auf der Achse des Polygon-Kegelstumpfs nicht zusammenfallen.

Anhand der nachstehenden Betrachtungen soll daher eine Näherungslösung aufgezeigt werden, mit der nicht-ideale Polygon-Kegelstümpfe erzeugt werden können, die dem idealen Polygon-Kegelstumpf mit durchgehendem Gleichdick-Profil über die axiale Länge möglichst nahe kommen, andererseits aber mittels einer geraden Mantellinie 41 geschliffen werden können.

Fig. 5 zeigt hierzu einen Ausschnitt aus der Darstellung der Fig. 2, wo in einen Quadranten des y-x-Koordinatensystems ein Abschnitt des Polygon-Profils 30 eingetragen ist. Ein beliebiger Punkt auf dem Polygon-Profil 30 ist mit P bezeichnet.

Man zeichnet nun einen Durchmesser D_m ein, der durch den Punkt P sowie definitionsgemäß durch den Mittelpunkt M des Polygon-Profils 30 geht, der zugleich Ursprung des y-x-Koordinatensystems ist. Mit dem sich ergebenden Radius MP zeichnet man nun einen Kreis K um M in Fig. 5 ein. Die Tangente an den Kreis K im Punkte P ist mit T_K in Fig. 5 ebenfalls eingezeichnet.

Man zeichnet nun ferner an den Punkt P den zugehörigen Krümmungsradius ρ sowie die auf dem Krümmungsradius ρ senkrecht stehende Tangente T_p an das Polygon-Profil 30 im Punkte P.

Da der Krümmungsradius im allgemeinen nicht durch den Mittelpunkt M des Polygon-Profils 30 läuft, ergibt sich ein Tangenten-anlagewinkel β zwischen den Tangenten T_K und T_p .

Betrachtet man nun den Punkt P_1 des Polygon-Profils 30, der auch auf der y-Achse liegt, so folgt durch einfache Überlegung, daß der im Punkte P_1 vorliegende minimale Krümmungsradius ρ_{min} durch den Mittelpunkt M geht. Der Tangenten-anlagewinkel β ist im Punkte P_1 also Null. Dasselbe gilt für einen Punkt P_2 , der gegenüber dem Punkt P_1 um 60° auf dem Polygon-Profil 30 versetzt ist. Im Punkt P_2 hat das Polygon-Profil 30 bekanntlich seinen größten Krümmungsradius ρ_{max} , der ebenfalls durch den Mittelpunkt M geht. Auch im Punkte P_2 ist der Tangenten-anlagewinkel β daher Null.

Diese Verhältnisse sind aus dem Diagramm der Fig. 6 ersichtlich, wo der Tangenten-anlagewinkel β über dem Winkel Φ aufgetragen ist, den der Durchmesser D_m mit der y-Achse einschließt. Bei $\Phi = 0^\circ$ und $\Phi = 60^\circ$ sowie bei allen weiteren Vielfachen von 60° ist der Tangenten-anlagewinkel β Null, wie aus dem Verlauf 50 deutlich zu entnehmen ist. Zwischen 0° und 60° befindet sich ein ausgeprägtes Maximum 51, das einem maximalen Tangenten-anlagewinkel β_{max} entspricht.

Man kann theoretisch zeigen, daß dieser maximale Tangenten-anlagewinkel β_{max} ein Maß für den weiter oben erläuterten Kompromiß zwischen einem technisch herstellbaren und einem nach der Festigkeitslehre optimalen Gleichdick-Polygon-Kegelstumpf darstellt.

Durch theoretische Überlegungen hat man gefunden, daß die hier interessierenden dreieckigen Polygon-Kegelstumpf mit einer radialen Querschnittsfläche, die möglichst nahe an das Polygon-Profil P3G nach DIN 32 711 angenähert ist, in technisch realisierbarer Weise erhalten werden, wenn der maximale Tangenten-anlagewinkel β_{max} zu etwa 14° gemacht wird. Weiterhin kann man zeigen, daß für diesen Fall eine modifizierte Exzentrizität e' angesetzt werden muß, die der Beziehung:

$$e' = D_{m2} \frac{\tan \beta_{max}}{2n}$$

gehört. Für ein dreieckiges Polygon-Profil und den bereits erläuterten optimalen maximalen Tangenten-anlagewinkel β_{max} von 14° ergibt dies:

$$e' = 0,04156 D_{m2}.$$

Diese modifizierte Exzentrizität e' ist über die axiale Länge L des Polygon-Kegelstumpfs konstant anzusetzen.

Dabei müssen die Bedingungen:

$$e' < e$$

$$\rho_2 \geq \frac{D_{m2}}{2} - 8e'$$

5

$$\rho_2 > 2,5 \text{ mm}$$

beachtet werden, wobei ρ_2 der praktisch minimal mögliche Krümmungsradius ρ min des P3-Polygon-Profils am dünneren Ende des Kegelstumpfs ist, weil bei Polygon-Profilen der hier interessierenden Art stets ein Polygon-Außenprofil und ein zugehöriges Polygon-Innenprofil geschliffen werden muß und sich eine praktische Begrenzung der Abmessungen dadurch ergibt, daß Polygon-Innenprofile nicht mit beliebig dünnen Schleifscheiben geschliffen werden können. Eine praktische Grenze liegt hier typischerweise bei einem Schleifscheibendurchmesser von 5 Millimetern, so daß als Randbedingung bei dem erfindungsgemäßen Verfahren darauf zu achten ist, daß keine Polygon-Profile bestimmt werden, bei denen sich minimale Krümmungsradien von weniger als 2,5 Millimetern ergeben.

Fig. 7 zeigt einen praktischen Berechnungsfall mit allen hier interessierenden Parametern.

Es solle ein dreieckiger Polygon-Kegelstumpf 14 hergestellt werden, dessen untere, größere Stirnfläche ein Polygon-Profil 30/1 und dessen obere, kleinere Stirnfläche ein Polygon-Profil 30/2 ist.

In dem gegebenen Beispielfall solle ein Polygon-Wellenkegelstumpf 40 g 6/1,4 x 30 mit einem Polygon-Nabenkegel 40 H 7/1,4 x 30 mit einer Kegelverjüngung von 1:10 und einem Neigungswinkel von $\lambda = 2,8624^\circ$ geschliffen werden.

Zur Veranschaulichung sei zunächst eine Geometriebetrachtung nach dem Stand der Technik vorangestellt. Aus der vorstehend genannten Norm für das Polygon-Profil ergeben sich zunächst die Werte:

$$D_{m1} = 40 \text{ mm}$$

$$e = 1,4 \text{ mm}$$

Hieraus errechnen sich die geometrischen Größen des Kegels nach den oben angegebenen Formeln wie folgt:

30

$$D_1 = D_{m1} + 2 \cdot e = 40 + 2 \cdot 1,4 = 42,8 \text{ mm}$$

$$d_1 = D_{m1} - 2 \cdot e = 40 - 2 \cdot 1,4 = 37,2 \text{ mm}$$

$$D_{m2} = D_{m1} - 2 \cdot L \tan \lambda = 40 - 2 \cdot 30 \tan(2,8624^\circ) = 37,0 \text{ mm}$$

$$D_2 = D_{m2} + 2 \cdot e = 37,0 + 2 \cdot 1,4 = 39,8 \text{ mm}$$

$$35 \quad d_2 = D_{m2} - 2 \cdot e = 37,0 - 2 \cdot 1,4 = 34,2 \text{ mm}$$

40

45

50

55

$$\tan \lambda' = \frac{D_1 - D_2}{2 \cdot L} = \frac{42,8 - 39,8}{2 \cdot 30} = 0,05$$

5

$$\tan \lambda'' = \frac{d_1 - d_2}{2 \cdot L} = \frac{37,2 - 34,2}{2 \cdot 30} = 0,05$$

10

$$\tan \lambda = \frac{D_{m1} - D_{m2}}{2 \cdot L} = \frac{40 - 37,0}{2 \cdot 30} = 0,05$$

15

$$\tan (\beta_{\max}) = \frac{2 \cdot n \cdot e}{D_{m1}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 1,4}{40} = 0,21$$

20

25

$$\tan (\beta_{\max})' = \frac{2 \cdot n \cdot e}{D_{m2}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 1,4}{37} = 0,227027$$

30

$$\beta_{\max}' = 12,79^\circ$$

$$\beta_{\max} = 11,86^\circ$$

35

Aus der Geometriebetrachtung des Polygon-Kegelstumpfs ist somit erkennbar, daß der Tangentenanlagewinkel des kleinen Kegelstumpfdurchmessers größer als der Tangentenanlagewinkel des großen Kegelstumpfdurchmessers ist. Das bedeutet, daß der beschriebene Kegelstumpf nicht homogen ist im Sinne der Kegeldefinition.

40

Betrachtet man hierzu Fig. 8, so erkennt man, daß der Kegelstumpf definitionsgemäß aus einer Leitkurve D besteht, die in der Direktrixebene $\pi\Delta$ senkrecht zur Z-Achse in der Entfernung L vom Koordinatenursprung 0 liegt, und jede Erzeugende G trifft sich im Scheitelpunkt Z.

Unter diesem Aspekt kann präzisiert werden, daß durch die Neigung der Schleifscheibe mit dem Winkel λ kein geometrischer Polygon-Kegelstumpf entstehen kann, da kein Scheitelpunkt als Kegelspitze ermöglicht wird.

45

Berechnet man nämlich die jeweiligen axialen Längen der Kegel entsprechend Fig. 9, so ergibt sich:

$$l = \frac{D_{m1}}{2 \cdot \tan \lambda} = \frac{40}{2 \cdot 0,05} = 400,0 \text{ mm}$$

50

$$l' = \frac{D_1}{2 \cdot \tan \lambda} = \frac{42,8}{2 \cdot 0,05} = 428,0 \text{ mm}$$

55

$$l'' = \frac{d_1}{2 \cdot \tan \lambda} = \frac{37,2}{2 \cdot 0,05} = 372,0 \text{ mm}$$

5

bzw. als Differenz der axialen Längen der Kegel

$$\Delta L = l' - l = 428,0 - 400,0 = 28,0 \text{ mm}$$

$$10 \quad \Delta L = l - l'' = 400,0 - 372,0 = 28,0 \text{ mm}$$

Wie aus Fig. 9 ersichtlich ist, hat die Kegelstumpferzeugende der Polygonflanke den Scheitel in Z und die Polygonspitze in Z₂. In der Übergangsstelle von der Flanke zur Spitze entsteht eine Kegelstumpferzeugende, die dem Neigungswinkel λ entspricht. Alle anderen Erzeugenden haben einen versetzten Scheitelpunkt, der dem Abstand $\pm \Delta L$ entspricht. Es ist zu erkennen, daß innerhalb der Mantelfläche in den Flanken, Spitzen und im Übergangsbereich der beschriebene Polygon-Kegelstumpf eine unterschiedliche Geometrie aufweist.

15

Die erzeugten Polygon-Profile in der Direktrixebene $\pi\Delta$, als orthogonaler Schnitt zur Drehachse OZ innerhalb der Erzeugenden G, sind nicht gleich dick. Ein Polygon-Kegelstumpf im geometrischen Sinne ist nur dann erstellbar, wenn die Bedingung hinsichtlich des Tangentenanlagewinkels $\tan \beta_{\max}' = \tan \beta_{\max}$ erfüllt ist. Das bedeutet, daß entlang der Kegelerzeugenden die relative Exzentrizität $E_i = e_i/D_{mi}$ konstant bleiben muß.

20

Betrachtet man nun noch die oben angegebene Randbedingung für den Schleifscheibendurchmesser D_{si} beim Innenschleifen, so ergibt sich:

25

$$D_{si} = 0,8 (d_2 - 16 \cdot e) = 0,8 (34,2 - 16 \cdot 1,4) = 9,44 \text{ mm}$$

berträgt man nun die vorstehenden Überlegungen bei unveränderter Wellen-/Nabenverbindung auf das erfindungsgemäße Verfahren, so ist aus den oben berechneten Größen zunächst die modifizierte Exzentrizität e' zu bestimmen:

30

$$e' = \frac{\tan \beta_{\max} \cdot D_{m2}}{2 \cdot 3} = \frac{0,21 \cdot 37,0}{2 \cdot 3} = 1,295 \text{ mm}$$

35

Daraus berechnen sich die Durchmesser D_2 , d_2 am dünnen Ende des Polygon-Kegelstumpfs wie folgt:

40

$$D_2 = D_{m2} + 2 \cdot e' = 37,0 + 2 \cdot 1,295 = 39,59 \text{ mm}$$

$$d_2 = D_{m2} - 2 \cdot e' = 37,0 - 2 \cdot 1,295 = 34,41 \text{ mm}$$

45

$$\tan \lambda' = \frac{D_1 - D_2}{2 \cdot L} = \frac{42,8 - 39,59}{2 \cdot 30} = 0,0535$$

$$\lambda'' = \arctan(0,0535) = 3,0624^\circ$$

50

$$\tan \lambda''' = \frac{d_1 - d_2}{2 \cdot L} = \frac{37,2 - 34,41}{2 \cdot 30} = 0,0535$$

55

$$\lambda'' = \arctan(0,0465) = 2,6623^\circ$$

$$5 \quad \tan \lambda' = \frac{D_{m1} - D_{m2}}{2 \cdot L} = \frac{40 - 37,00}{2 \cdot 30} = 0,0535$$

$$\lambda = \arctan(0,05) = 2,8624^\circ$$

10

Aus der vorstehenden Betrachtung erkennt man, daß die Neigungswinkel des Kegelstumpfs an den Stellen des größten Durchmessers D , des kleinsten Durchmessers d und des mittleren Durchmessers D_m variieren, und zwar im Bereich:

$$15 \quad \Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 3,0624 - 2,8624 = 0,2^\circ$$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda'' = 2,8624 - 2,6623 = 0,2^\circ$$

20

Diese Variation des Neigungswinkel der Mantellinien des Polygon-Kegelstumpfs ist bei bevorzugter Ausgestaltung der Erfindung durch entsprechendes Verschwenken der Schleifscheibe bzw. des Werkstücks zu kompensieren.

Die gestellte geometrische Bedingung zum Tangentenanlagewinkel ist erfüllt. Der Tangentenanlagewinkel des kleinen Kegelstumpfdurchmessers ist gleich dem Tangentenanlagewinkel des großen Kegelstumpfdurchmessers.

25

Das bedeutet, daß durch eine ständige Veränderung des Neigungswinkels λ ein geometrischer Polygon-Kegelstumpf in Abhängigkeit von der Werkstückdrehbewegung erzeugt werden kann, wie in Fig. 10 veranschaulicht.

Als Kontrolle seien nun nochmals die Längen der jeweiligen gedachten Kegel bestimmt, und es ergibt sich, wie auch in Fig. 11 dargestellt:

30

$$l = \frac{d_{m1}}{2 \cdot \tan \lambda} = \frac{40}{2 \cdot \tan(2,8624)} = 400,00 \text{ mm}$$

35

$$l' = \frac{D_1}{2 \cdot \tan \lambda} = \frac{42,8}{2 \cdot \tan(3,0624)} = 400,00 \text{ mm}$$

40

$$45 \quad l'' = \frac{d_1}{2 \cdot \tan \lambda} = \frac{37,2}{2 \cdot \tan(2,6623)} = 400,00 \text{ mm}$$

50

Wie man also erkennt, gibt es jetzt einen gemeinsamen Scheitelpunkt Z , weil alle Längen l , l' und l'' gleich lang sind.

Bei den in Fig. 11 dargestellten geometrischen Verhältnissen entsteht somit ein gemeinsamer Scheitelpunkt Z , der der Kegelspitze entspricht. Die erzeugten Polygon-Profile in der Direktrixebene $\pi\Delta$ in einem orthogonalen Schnitt zur Drehachse OZ innerhalb der Erzeugenden D sind gleich dick. Die analytische Bedingung zur relativen Exzentrizität $E_i = e_i/D_{mi}$ ist erfüllt, da der Exzenterwert bei der Geometriebetrachtung des Polygon-Kegelstumpfs kein konstanter Parameter ist.

55

In der Praxis können die Polygon-Kegelstümpfe in unterschiedlicher Weise hergestellt werden.

In Fig. 12 ist ein erstes Herstellverfahren veranschaulicht, bei dem wiederum dieselben Bezugszeichen verwendet werden, jedoch unter Hinzufügung eines "a".

Der Polygon-Kegelstumpf 14a wird aus einem Werkstückrohling 46a dadurch hergestellt, daß man die Werkstückachse 43a um den Winkel λ gegenüber der Achse 42a der Schleifscheibe 40a anstellt. Es ergibt sich dann eine Mantellinie 41a. Die Schleifscheibe 40a bleibt also bei dieser Verfahrensvariante in ihrer unveränderten Position, während der Werkstückrohling 46a mit seiner Achse 43a um den Winkel λ geschwenkt wurde.

Während Fig. a den Vorgang des Außenschleifens darstellt, ist der komplementäre Vorgang des Innenschleifens in Fig. 13 mit dem Zusatz "b" bei den Bezugszeichen veranschaulicht.

Eine kleine walzenförmige Schleifscheibe 40b dreht sich dabei um die in ihrer Richtung unveränderte Achse 42b, während ein Werkstückrohling 46b mit seiner Achse 43b um den Winkel λ gegenüber der Schleifscheibenachse 42b angestellt ist. Auf diese Weise wird ein Polygon-Innenkegelstumpf 17b erhalten.

Fig. 14 veranschaulicht die für die Verfahren nach den Fig. 12 und 13 erforderliche Schleifmaschine, die insgesamt mit 60 bezeichnet ist.

Ein Werkstückfutter 61 hält den Werkstückrohling 46a bzw. 46b eingespannt, wobei ggf. noch ein Reitstock 62 als Gegenlagerung verwendet wird. Eine Schleifspindel 63 ist in der bekannten Weise in Richtung der sogenannten x-Achse unter 90° zur Achse des Werkstückfutters 61 bzw. des Reitstocks 62 verfahrbar, wobei die letztgenannte Achse als sogenannte C-Achse in definierten Winkelschritten einstellbar ist, und zwar mittels eines im Werkstückfutter 61 enthaltenen Antriebes.

Das Werkstückfutter 61 ist zusammen mit der gesamten Werkstückhalterung um eine Hochachse 64, die sogenannte U-Achse, verdrehbar. Auf diese Weise läßt sich der Werkstückrohling 46a bzw. 46b mit seiner Achse 43a bzw. 43b um den Winkel λ gemäß Fig. 12 und 13 gegenüber der unveränderten Ausrichtung 42a bzw. 42b der Schleifscheibe 40a bzw. 40b anstellen.

Die Schleifscheibe 40a bzw. 40b vollzieht nun während der Drehung des Werkstückrohlings 46a bzw. 46b eine oszillierende Bewegung in Richtung der x-Achse, und zwar mit einer Frequenz, die in dem geschilderten Anwendungsfall des dreieckigen Polygon-Kegelstumpfs 14 dreimal so groß ist wie die Drehfrequenz des Werkstückrohlings 46a bzw. 46b im Werkstückfutter 61. Die Amplitude der oszillierenden Bewegung ΔX beträgt in diesem Falle $2e' \cos \lambda$.

Fig. 15 zeigt eine weitere Verfahrensvariante des Außenschleifens, bei deren Bezugszeichen der Buchstabe "c" hinzugesetzt wurde.

Bei dieser Verfahrensvariante wird die Achse 43c des Werkstückrohlings 46c unverändert gelassen, die Achse 42c der Schleifscheibe 40c hingegen gegenüber ihrer Ausgangslage um den Winkel λ angestellt. Entsprechendes gilt für das Innenschleifen, das in Fig. 16 dargestellt ist, wobei den Bezugszeichen der Buchstabe "d" hinzugesetzt wurde.

Auch hier gilt, daß die Achse 42d der Schleifscheibe 40d um den Winkel λ angestellt wurde, während die Achse 43d des Werkstückrohlings 46d unverändert blieb.

Während im erstgenannten Fall ein Polygon-Kegelstumpf 14c erhalten wird, entsteht im zweitgenannten Fall wiederum ein Polygon-Innenkegelstumpf 17d.

In Fig. 16 ist mit einem Pfeil 70 noch veranschaulicht, daß die Schleifscheibe 40d, ebenso wie die Schleifscheibe 40b gemäß Fig. 13 oder auch wie die Schleifscheiben 40a und 40c gemäß Fig. 12 und 15, falls sehr lange Mantellinien 41a bzw. 41c zu schleifen sind, noch in Richtung ihrer Achse verschoben werden kann, falls dies im Einzelfall erforderlich sein sollte.

Fig. 17 zeigt wiederum eine schematisierte Darstellung der Schleifmaschine 60, die nun zur Durchführung der Verfahren gemäß Fig. 15 und 16 eingestellt wird.

Das Werkstückfutter 61 verbleibt in Fig. 17 in der ursprünglichen Lage, während die Schleifspindel 63 um eine Hochachse 65, die sogenannte B-Achse, verdrehbar ist.

Auch im Falle der Fig. 17 gelten die weiter oben festgestellten Angaben für die Frequenz und die Amplitude der oszillierenden Bewegung der Schleifscheibe 40c bzw. 40d in Richtung der X-Achse der Fig. 17.

Zum Einstellen all dieser Verfahrensparameter dient ein in Fig. 14 und 17 gezeigtes numerisches Steuergerät 66 von an sich bekannter Bauart. Im numerischen Steuergerät 66 befindet sich eine Rechenstufe, die aus den oben ermittelten Werten D_{m1} , D_{m2} , e' , D_1 , D_2 , d_1 , d_2 und den vorgegebenen Werten L und λ die Bahnpunkte der Polygon-Profile 30/1 und 30/2 ermittelt, und zwar vorzugsweise in Polarkoordinaten, so daß die oszillierende Bewegung der Schleifscheiben 40a bis 40d nach Bahnpunkten eingestellt werden kann, bei denen sich schlußendlich die gewünschten Polygon-Kegelstümpfe 14a, 14c bzw. 17b, 17d ergeben.

Die oszillierende Bewegung der Schleifscheiben 40a bis 40d an sich wird als sogenannter "Bahnbetrieb" bezeichnet, dem zum Abtragen eines Aufmaßes naturgemäß noch eine Zustellbewegung als sogenannter "Zustellbetrieb" überlagert werden muß.

Es ist zwar bereits vorgeschlagen worden, beim Schleifen von nicht-rotationssymmetrischen Werkstücken, beispielsweise zum Schleifen von Nocken einer Nockenwelle, eine zeitliche Trennung von Zustellbetrieb und Bahnbetrieb vorzunehmen, indem zunächst die Schleifscheibe im reinen Zustellbetrieb auf die Tiefe der Fertig-Oberfläche eintaucht und dann im reinen Bahnbetrieb den Nocken fertig schleift, im hier vorliegenden Falle des Schleifens von Polygon-Kegelstümpfen ist jedoch eine Ausführungsform bevorzugt, bei der der Bahnbetrieb und der Zustellbetrieb überlagert werden. Dies bedeutet in der Praxis, daß auch zum Abtragen großer Aufmaße die Schleifscheibe sich auf einer spiralig gewundenen Bahn an die Fertig-Oberfläche heranarbeitet, wobei die Schleifscheiben 40a bis 40d stets eine überlagerte Bewegung ausführen, die sowohl Komponenten des reinen Bahnbetriebes wie auch des reinen Zustellbetriebes enthält.

Zur Drehung der Werkstückrohlinge kann entweder eine konstante Winkelgeschwindigkeit oder eine über dem Umfang der Werkstückrohlinge variierende Winkelgeschwindigkeit eingestellt werden.

Variiert man die Winkelgeschwindigkeit über dem Umfang, so kann man dann, wenn die erste Ableitung des Exzentrizitätswertes e' nach dem Drehwinkel θ berücksichtigt wird, den Fall erhalten, daß das sogenannte bezogene Zeitspanvolumen Q' während des gesamten Schleifvorganges konstant ist. Dies führt zu einer gleichmäßigen thermischen Belastung des Werkstückes und damit zu einer hohen Oberflächengüte.

Anhand der Fig. 18 bis 21 soll nun erläutert werden, wie die Schleifmaschine bei dem weiter oben anhand der Fig. 7 bis 11 beschriebenen Zahlenbeispiel eingestellt werden kann.

So soll ein Polygon-Kegelstumpf mit möglichst gleich dickem Profil entlang der Erzeugenden für eine gegebene Kegelverjüngung auf einer CNC-Schleifmaschine mittels drei Achsen im Bahnbetrieb bei Verwendung einer Steuerung zur Bestimmung der X-, C- und B-Koordinaten und in Verbindung mit einer profilierten Schleifscheibe (kegelige Form) erzeugt werden.

Zur Beschreibung der Polygon-Kurve beim Schleifen im Bahnbetrieb zwischen der X- und C-Achse wird die Konturgleichung in der Parameterform benutzt.

In Fig. 18 sind die Konturparameter s als Profilerhebungswert und s' als Höhenversatzwert eingezeichnet. Der Höhenversatzwert s' ist dabei die erste Ableitung des Konturparameters s nach dem Drehwinkel θ . In Abhängigkeit von dem Drehwinkel θ lassen sich die Werte s und s' in einem kartesischen Koordinatensystem mit den folgenden Gleichungen darstellen:

$$s = e (1 - \cos (n \cdot \theta))$$

$$s' = n e \sin (n \cdot \theta)$$

In Fig. 18 ist $p'p''$ der X-Weg als oszillierende Bewegung der X-Achse bei einem Höhenversatz PP'' auf der Tangente T in dem Anlagepunkt P , entsprechend einem Schleifscheibenradius R_s bzw. R_s' . Dann ergibt sich für den Verfahrensweg X der Schleifscheibe:

$$X = \sqrt{(R_s + r_1 + s)^2 + (s')^2} - (R_s + r_1)$$

Bezeichnet man α als den Fertigungsdrehwinkel, so ergibt sich für diesen:

$$\alpha = \arctan \frac{s'}{R_s + r_1 + s}$$

Das Polygon-Profil K für den Exzenterwert e , das dem großen Kegelstumpfdurchmesser entspricht, und das Polygon-Profil k , das den kleinen Kegelstumpfdurchmesser bei einem Exzenterwert e' bestimmt, müssen während der Oberflächenerzeugung gleichzeitig hergestellt werden, um einen gleich dicken Polygon-Kegelstumpf zu bearbeiten.

In dieser Hinsicht wird während der Bearbeitung der B-Achse im Bahnbetrieb zu den X-C-Achsen mit einem Winkel $\pm \Delta\lambda$ verstellt, so daß die konisch abgerichtete Schleifscheibe unter einem Winkel δ einen Anlagepunkt P_1 auf dem Polygon-Profil k bei einem Höhenversatzwert H' ermöglicht, der vom Höhenversatzwert H des Polygon-Profils K abweicht.

Der Abrichtwinkel δ wird nach folgenden Parametergleichungen beschrieben:

$$H = R_s \cdot \sin \alpha$$

$$H' = H - (e - e') \cdot n$$

$$R_s' = \frac{H'}{\sin \alpha}$$

5

$$\delta = \arctan \frac{R_s - R_s'}{L}$$

10

Wendet man die vorstehenden Überlegungen nun auf das bereits oben bezifferte Anwendungsbeispiel an, so ergibt sich bei einem Schleifscheibendurchmesser D_s von 600 Millimetern folgendes:

$$s = e \cdot (1 - \cos 3\theta)$$

$$s' = 3 \cdot e \cdot \sin 3\theta$$

15

Fig. 19 zeigt in einem Diagramm die Verhältnisse für s , s' und $\Delta\lambda$ in folgenden Punkten:

$$\begin{array}{llll} 20 & \theta = 0^\circ & s = 0 \text{ mm} & s' = 0 \text{ mm} & \Delta\lambda = -0,2^\circ \\ & \theta = 30^\circ & s = 1,4 \text{ mm} & s' = 4,2 \text{ mm} & \Delta\lambda = 0^\circ \\ & \theta = 60^\circ & s = 2,8 \text{ mm} & s' = 0 \text{ mm} & \Delta\lambda = +0,2^\circ \\ & \theta = 90^\circ & s = 1,4 \text{ mm} & s' = -4,2 \text{ mm} & \Delta\lambda = 0^\circ \\ & \theta = 120^\circ & s = 0 \text{ mm} & s' = 0 \text{ mm} & \Delta\lambda = -0,2^\circ \end{array}$$

25

Überträgt man diese Geometriewerte nun auf einen Bahnbetrieb für die Schleifmaschine bei Bewegung der C-, X- und B-Achsen, so ergibt sich unter Berücksichtigung der Formel:

$$X = \sqrt{(300 + 18,6 + s)^2 + (s')^2} - (300 + 18,6)$$

30

unter Verwendung der in der vorstehenden Tabelle angegebenen Werte folgende Wertetabelle für die Achsen C, X und B:

$$\begin{array}{lll} C = 0^\circ & X = 0,0000 \text{ mm} & B = -0,2^\circ \\ 35 & C = 30^\circ & X = 1,4276 \text{ mm} & B = 0^\circ \\ & C = 60^\circ & X = 2,8000 \text{ mm} & B = +0,2^\circ \\ & C = 90^\circ & X = 1,4276 \text{ mm} & B = 0^\circ \\ & c = 120^\circ & X = 0,0000 \text{ mm} & B = -0,2^\circ \end{array}$$

40 Die vorstehend in der Tabelle genannten Werte sind in Fig. 20 aufgetragen.

Schließlich sei noch das erforderliche Schleifscheibenprofil für den vorstehend bezifferten Beispielfall angegeben. Mit den Werten:

$$\begin{array}{l} \theta = 30^\circ \\ 45 & s = 1,4 \text{ mm} \\ & s' = 4,2 \text{ mm} \\ & R_s = 300 \text{ mm} \\ & r_1 = 18,6 \text{ mm} \\ & L = 30 \text{ mm} \end{array}$$

50

ergibt sich mit der Formel

55

$$\alpha = \arctan \frac{s'}{R_s + r_1 + s}$$

5

$$\alpha = \arctan \frac{4,2}{300 + 18,6 + 1,4} = 0,7519639^\circ$$

10

Die Werte:

$$H = R_s \cdot \sin \alpha = 300 \cdot \sin 0,752^\circ = 3,937 \text{ mm}$$

$$H' = H - (e - e') \cdot n = 3,937 - (1,4 - 1,295) \cdot 3 = 3,622 \text{ mm}$$

15

$$R_s' = \frac{H'}{\sin \alpha} = \frac{3,622}{\sin 0,752^\circ} = 275,998 \text{ mm}$$

20

25

$$\delta = \arctan \frac{R_s - R_s'}{L} = \arctan \frac{300 - 276}{30} = 38,66^\circ$$

30

Diese Größen sind nochmals in Fig. 21 zur Veranschaulichung dargestellt.

Patentansprüche

- 35 1. Verfahren zum Schleifen eines Kegelstumpfes (14; 17) auf einer numerisch gesteuerten Schleifmaschine, dessen radiale Querschnittsfläche die Gestalt eines n-eckigen Polygon-Profiles (30) mit vorgegebener Exzentrizität (e) und vorgegebenem arithmetischem Mittelwert (D_m) der Durchmesser (D, d) des Umkreises (31) und des Inkreises (32) des Polygon-Profiles (30) aufweist, bei dem eine um eine erste Achse (42) drehbare Schleifscheibe (40) entlang einer gemeinsamen Mantellinie (41) an einem um eine zweite Achse (43) drehbaren Werkstückrohling (46) angreift, wobei die Achsen (42, 43) sich unter einem spitzen Winkel (λ) schneiden, und bei dem ferner die Schleifscheibe (40) eine oszillierende Bewegung ausführt, bei der die Mantellinie (41) mit der n-fachen Frequenz der Drehbewegung des Werkstückrohlings (46) und mit einer bestimmten Amplitude parallelverschoben wird, dadurch gekennzeichnet, daß die Amplitude mit dem Doppelten eines modifizierten Exzentrizitätswertes (e') eingestellt wird, der der Beziehung:

45

$$e' = D_{m2} \frac{\tan \beta_{\max}}{2n}$$

50

gehört, wobei D_{m2} der arithmetische Mittelwert der Durchmesser (D_2, d_2) am dünneren Ende des Kegelstumpfes (14; 17) und β_{\max} ein vorgegebener maximaler Tangentenanlagewinkel des zu schleifenden Kegelstumpfes (14; 17) ist, wobei der Tangentenanlagewinkel β_{\max} so vorzugeben ist, daß für den modifizierten Exzentrizitätswert (e') folgende Randbedingungen:

55

- a) $e' < e$

b)

$$\rho_2 \geq \frac{D_{m2}}{2} - 8e'$$

eingehalten werden, wobei ρ_2 der praktisch minimal mögliche Krümmungsradius des Polygon-Profiles (30/2) am dünneren Ende des Kegelstumpfs (14; 17) ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Winkel β_{\max} 14° beträgt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Schleifscheibe (40) entlang einer rechtwinkelig zur Mantellinie (41) verlaufenden X-Achse in vorgegebenen Schritten und der Werkstückrohling (46) um die zweite Achse (43) mit vorgegebenen Winkelschritten verstellt werden.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Zustellung der Schleifscheibe (40) entlang der X-Achse ihrer Bahnbewegung entlang der X-Achse entsprechend dem Polygon-Profil (30) überlagert wird.
5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Verstellung des Werkstückrohlings (46) mit vorgegebenen Winkelschritten um die zweite Achse (43) mit einer Winkelgeschwindigkeit ($d\theta / dt$) derart erfolgt, daß das bezogene Zeitspannvolumen (Q') konstant ist.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Bahnbewegung der Schleifscheibe (40) in der X-Achse nach der Beziehung:

$$X = (R_s + r_1 + s)^2 + (s')^2 - (R_s + r_1)$$

eingestellt wird, mit:

- R_s = Radius der Schleifscheibe (40)
- r_1 = Innenradius des Polygon-Profiles (30/2) am dünneren Ende des Kegelstumpfs (14; 17);
- s (Profilerhebungswert) = $e (1 - \cos(n\theta))$ mit θ = Drehwinkel um die zweite Achse (43)
- s' = $ds/d\theta$

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Schleifscheibe (40) um eine zu ihrer Drehachse senkrechte Achse (B) verschwenkt wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Schwenkwinkel $\Delta\lambda$ nach der Beziehung:

$$\Delta\lambda = \arctan \frac{D_1 - D_2}{2L} - \arctan \frac{D_{m1} - D_{m2}}{2L}$$

eingestellt wird, mit

- D_1 = der größere Umkreis-Durchmesser des Polygon-Profiles (30/1) am dickeren Ende des Kegelstumpfs (14; 17);
- D_{m1} = der arithmetische Mittelwert des Umkreis- und des Inkreis-Durchmessers (D_1, d_1) des Polygon-Profiles (30/1) am dickeren Ende des Kegelstumpfs (14; 17);
- L = axiale Länge des Kegelstumpfs (14; 17).

Claims

1. Process for grinding a truncated cone (14; 17) on a numerically controlled grinder, the radial cross-sectional surface of which truncated cone exhibits the form of an n-cornered polygonal profile (30) having a pre-defined eccentricity (e) and having a pre-defined arithmetic mean (D_m) of the diameters

(D, d) of the circumcircle (31) and incircle (32) of the polygonal profile (30), in which process a grinding disc (40), which is rotatable about a first axis (42), acts along a common contacting line (41) upon a workpiece blank (46) which is rotatable about a second axis (43), the axes (42, 43) intersecting at an acute angle (λ), and in which process the grinding disc (40) additionally performs an oscillating motion in which the contacting line (41) is parallel-displaced at n times the frequency of the rotary motion of the workpiece blank (46) and at a specific amplitude, characterised in that the amplitude is set at double a modified eccentricity value (e') conforming to the equation:

$$e' = D_{m2} \frac{\tan \beta_{\max}}{2n},$$

D_{m2} constituting the arithmetic mean of the diameters (D_2, d_2) at the thinner end of the truncated cone (14; 17) and β_{\max} constituting a pre-defined maximum tangential contact angle of the truncated cone (14; 17) to be ground, the tangential contact angle β_{\max} having to be pre-defined such that, for the modified eccentricity value (e'), the following marginal conditions are met:

- a) $e' < e$
- b)

$$\rho_2 \geq \rho - \frac{D_{m2}}{2} - 8e'$$

ρ_2 constituting the virtually minimum possible radius of curvature of the polygonal profile (30/2) at the thinner end of the truncated cone (14; 17).

2. Process according to Claim 1, characterised in that the angle β_{\max} measures 14° .
3. Process according to Claim 1 or 2, characterised in that the grinding disc (40) is adjusted in predefined steps along an X-axis running at right-angles to the contacting line (41) and the workpiece blank (46) is adjusted at pre-defined angular steps about the second axis (43).
4. Process according to Claim 3, characterised in that the advance of the grinding disc (40) along the X-axis, in accordance with its linear motion along the X-axis, is superimposed on the polygonal profile (30).
5. Process according to Claim 3 or 4, characterised in that the adjustment of the workpiece blank (46) at pre-defined angular steps about the second axis (43) is realised at an angular velocity ($d\theta / dt$) in such a way that the related rate of metal removal (Q') is constant.
6. Process according to one of Claims 3 to 5, characterised in that the linear motion of the grinding disc (40) in the X-axis is set according to the equation:

$$X = (R_s + r_1 + s)^2 + (s')^2 - (R_s + r_1)$$

where

- R_s = the radius of the grinding disc (40)
- r_1 = the inner radius of the polygonal profile (30/2) at the thinner end of the truncated cone (14; 17)
- s (profile elevation value) = $e (1 - \cos(n \theta))$ where θ = the angle of rotation about the second axis (43)
- s' = $ds/d\theta$.

7. Process according to Claim 6, characterised in that the grinding disc (40) is pivoted about an axis (B) lying perpendicular to its rotational axis.

8. Process according to Claim 7, characterised in that the angle of pivot $\Delta\lambda$ is set according to the equation:

$$\Delta\lambda = \text{arc tan } \frac{D_1 - D_2}{2L} - \text{arc tan } \frac{D_{m1} - D_{m2}}{2L}$$

where

- D_1 = the greater circumcircle diameter of the polygonal profile (30/1) at the thicker end of the truncated cone (14; 17);
 D_{m1} = the arithmetic mean of the circumcircle diameter and the incircle diameter (D_1, d_1) of the polygonal profile (30/1) at the thicker end of the truncated cone (14; 17);
 L = the axial length of the truncated cone (14; 17).

Revendications

1. Procédé de rectification d'un tronc de cône (14 ; 17) sur une rectifieuse à commande numérique, dont l'aire de section radiale présente la forme d'un profil (30) polygonal à n sommets, à excentricité (e) donnée et moyenne arithmétique (D_m) donnée des diamètres (D, d) du cercle circonscrit (31) et du cercle inscrit (32) du profil polygonal (30), dans lequel une meule (40) pouvant tourner autour d'un premier axe (42) agit, selon une génératrice (41) commune, sur une ébauche de pièce (46) pouvant tourner autour d'un deuxième axe (43), les axes (42, 43) se coupant selon un angle aigu (λ), et dans lequel, en outre, la meule (40) décrit un mouvement oscillant, selon lequel la génératrice (41) est déplacée de façon parallèle, à la fréquence n -uple du mouvement rotatif de l'ébauche de pièce (46) et selon une amplitude donnée, caractérisé en ce que l'amplitude est réglée sur le double d'une valeur d'excentricité (e') modifiée, obéissant à la relation :

$$e' = D_{m2} \frac{\tan \beta_{\max}}{2n}$$

D_{m2} étant la moyenne arithmétique des diamètres (D_2, d_2) à l'extrémité la plus fine du tronc de cône (14 ; 17), et β_{\max} étant un angle d'application maximal, par rapport à la tangente, donné, du tronc de cône (14 ; 17) à rectifier, l'angle par rapport à la tangente β_{\max} devant être donné de telle sorte que, pour la valeur d'excentricité (e') modifiée, les conditions additionnelles suivantes soient remplies :

- a) $e' < e$
 b)

40

$$\rho_2 \geq \frac{D_{m2}}{2} - 8e'$$

45

ρ_2 étant le rayon de courbure minimal possible d'un point de vue pratique du profil polygonal (30/2) à l'extrémité la plus fine du tronc de cône (14; 17).

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'angle β_{\max} est de 14° .
 3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que la meule (40), le long d'un axe des X s'étendant à angle droit par rapport à la génératrice (41), est déplacée, avec des pas donnés, et en ce que l'ébauche de pièce (46) est déplacée autour du deuxième axe (43) selon des pas angulaires donnés.
 4. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que l'avance de la meule (40) le long de l'axe des X se superpose à son mouvement le long de l'axe des X de façon correspondante au profil polygonal (30).

55

EP 0 335 255 B1

5. Procédé selon la revendication 3 ou 4, caractérisé en ce que le déplacement de l'ébauche de pièce (46) selon des pas angulaires donnés autour du deuxième axe (43) se produit selon une vitesse angulaire ($d\theta / dt$) de telle sorte que le taux d'enlèvement de copeaux (Q') spécifique est constant.

5 6. Procédé selon l'une des revendications 3 à 5, caractérisé en ce que le mouvement de la meule (40) selon l'axe des X est réglé selon la relation :

$$X = (R_3 + r_1 + s)^2 + (s')^2 - (R_3 + r_1)$$

10 où

R_3 = rayon de la meule (40)

r_1 = rayon intérieur du profil polygonal (30/2) à l'extrémité la plus fine du tronc de cône (14 ; 17)

15 s (valeur d'élévation du profil) = $e(1 - \cos(n\theta))$ avec θ = angle de rotation autour du deuxième axe (43)

s' = $ds/d\theta$

7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que la meule (40) est inclinée par rapport à un axe (B)perpendiculaire à son axe de rotation.

20

8. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce que l'angle d'inclinaison $\Delta\lambda$ est réglé selon la relation :

25

$$\Delta\lambda = \arctan \frac{D_1 - D_2}{2L} - \arctan \frac{D_{m1} - D_{m2}}{2L}$$

où

30 D_1 = le plus grand diamètre du cercle circonscrit du profil polygonal (30/1) à l'extrémité la plus épaisse du tronc de cône (14 ; 17)

D_{m1} = la moyenne arithmétique des diamètres (D_1 , d_1) du cercle circonscrit et du cercle inscrit (D_1 , d_1) du profil polygonal (30/1) à l'extrémité la plus épaisse du tronc de cône (14 ; 17)

L = longueur axiale du tronc de cône (14 ; 17).

35

40

45

50

55

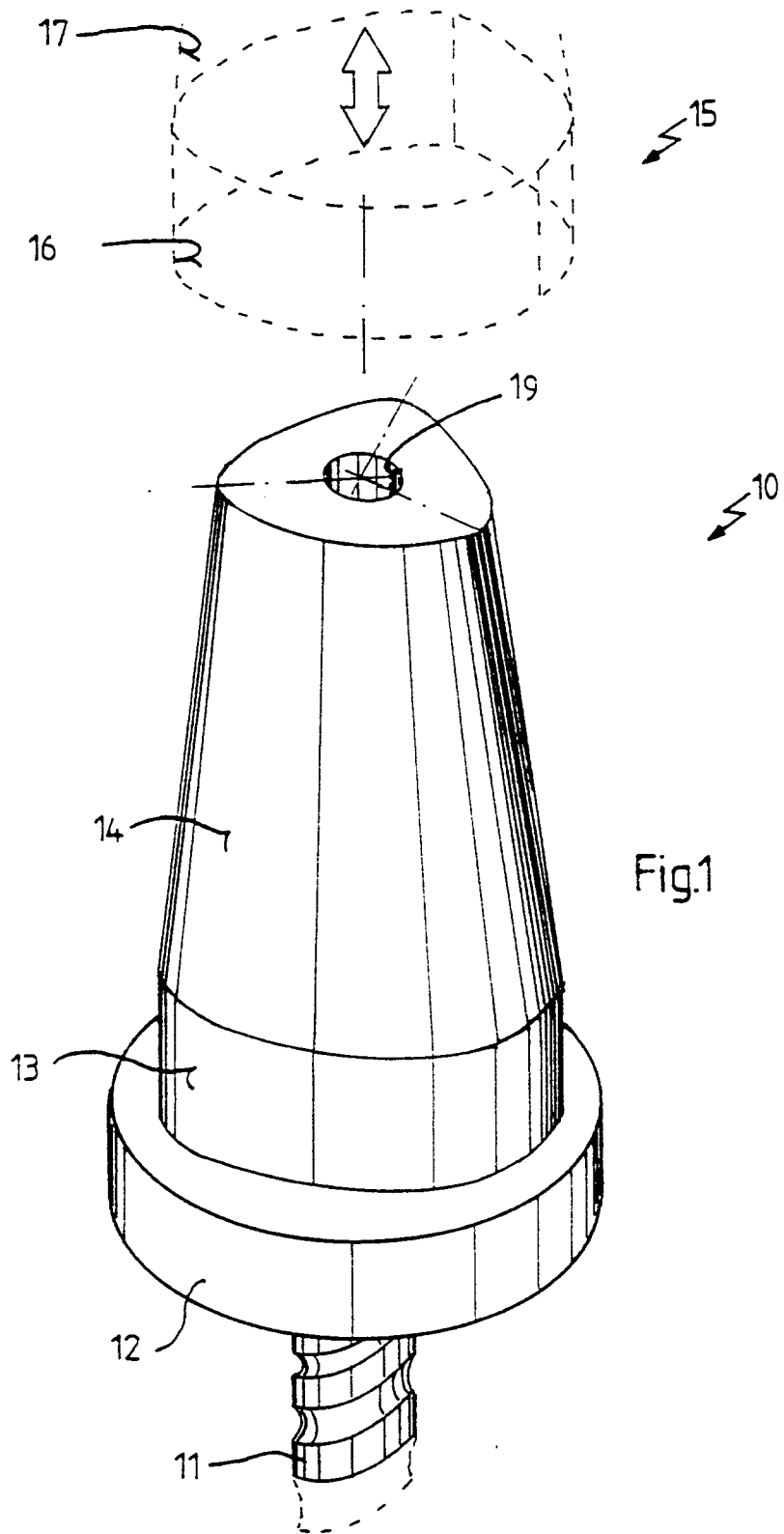


Fig.1

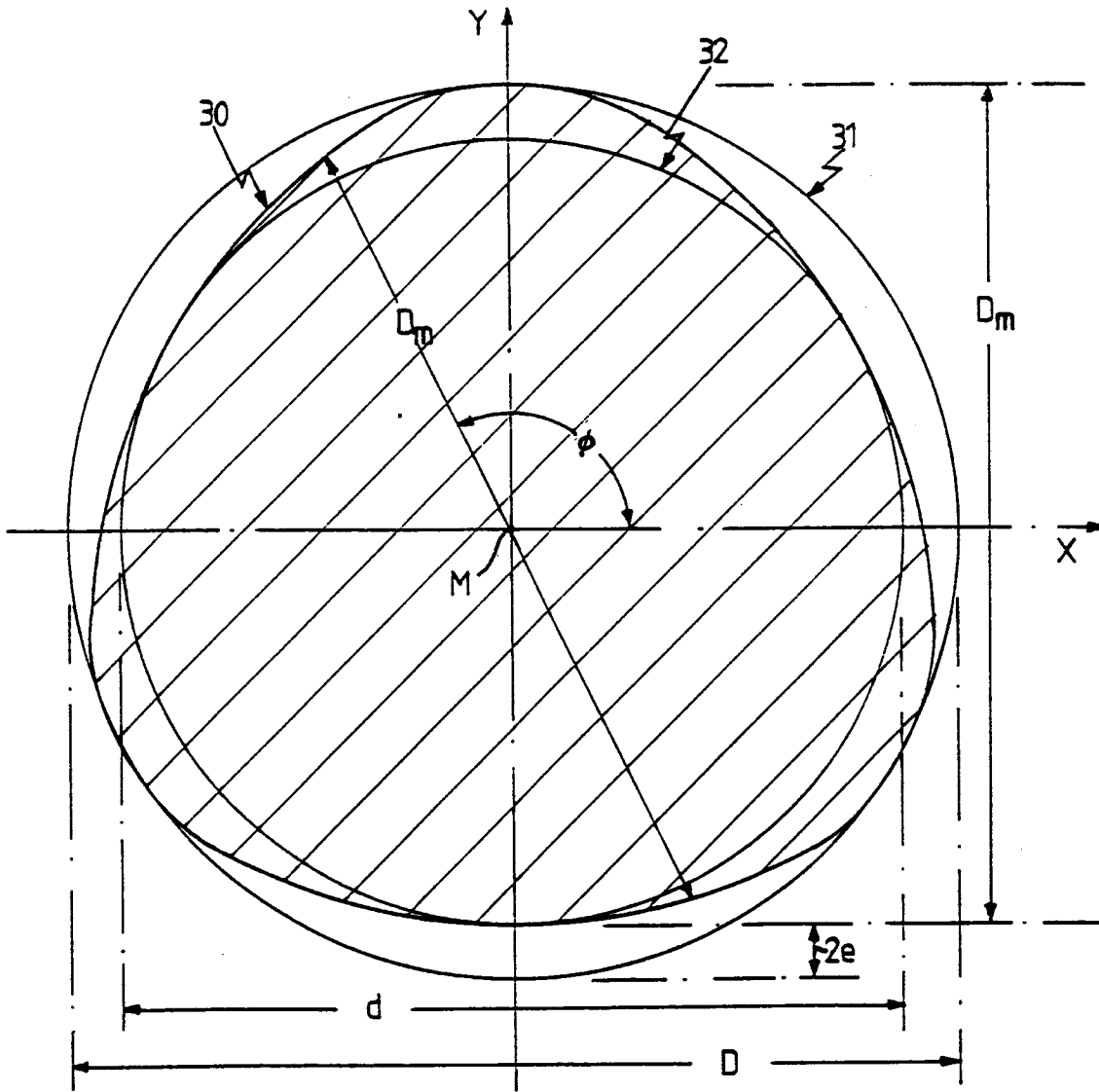


Fig.2

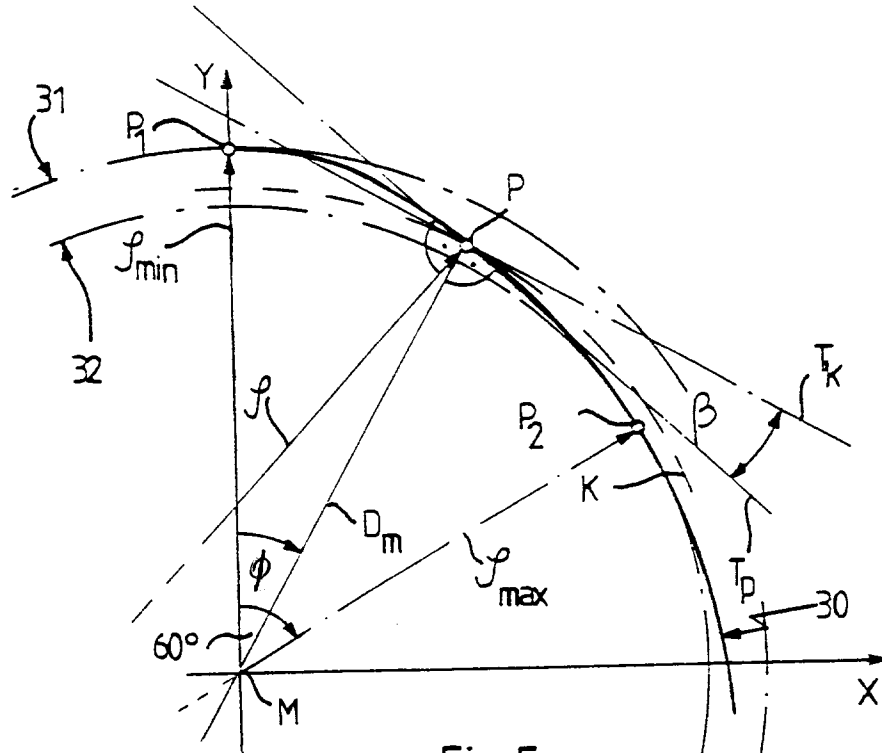


Fig.5

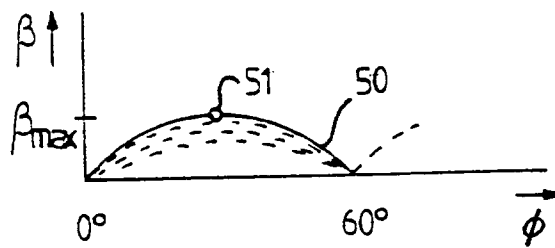


Fig.6

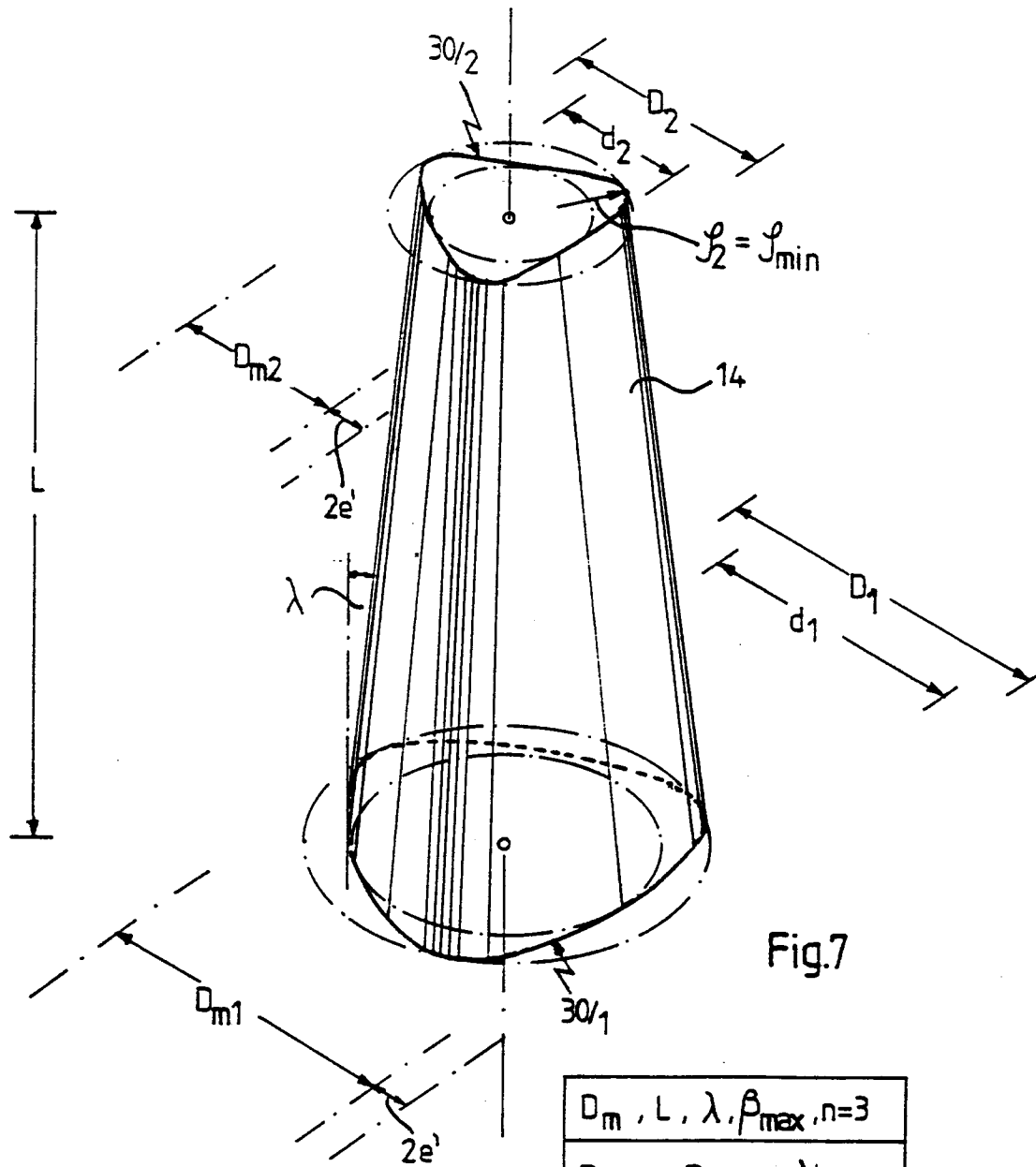


Fig.7

$D_m, L, \lambda, \beta_{max}, n=3$
$D_{m1} = D_m \cos \lambda$
$D_{m2} = D_{m1} - 2L \tan \lambda$
$e' = D_{m2} \frac{\tan \beta_{max}}{2n}$
$J_2 = \frac{D_{m2}}{2} - 8e'$
$J_2 \geq 2,5 \text{ mm} ; e' < e$

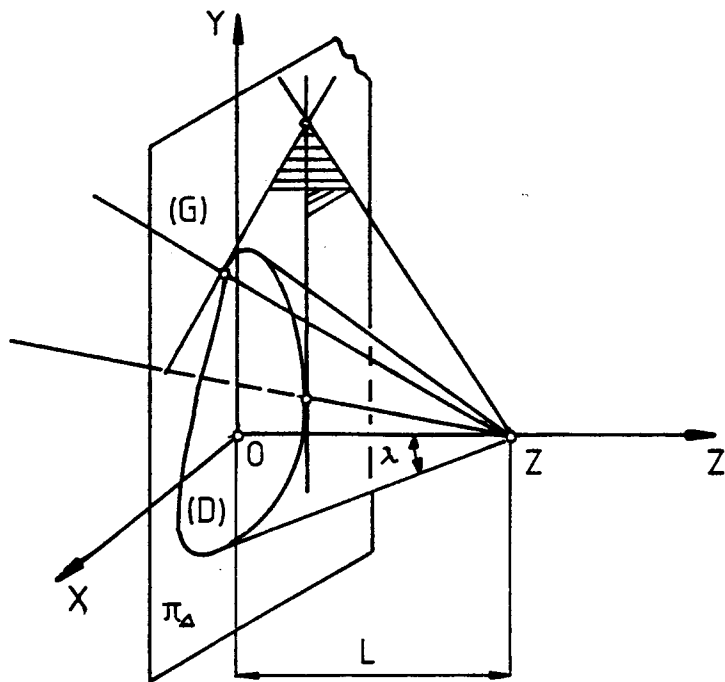


FIG. 8

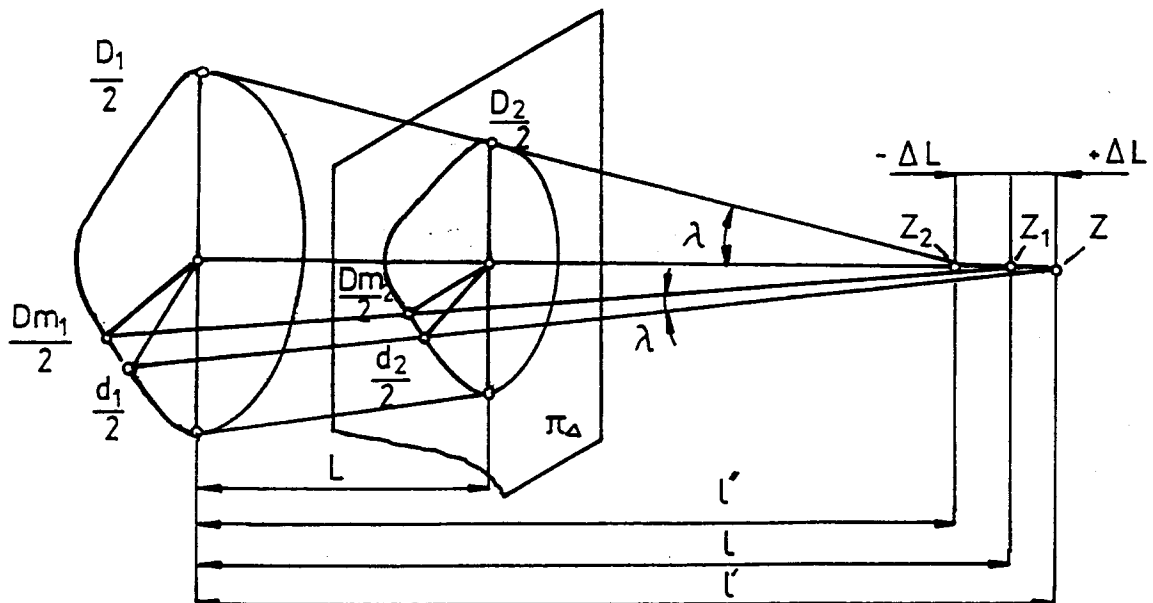


FIG. 9

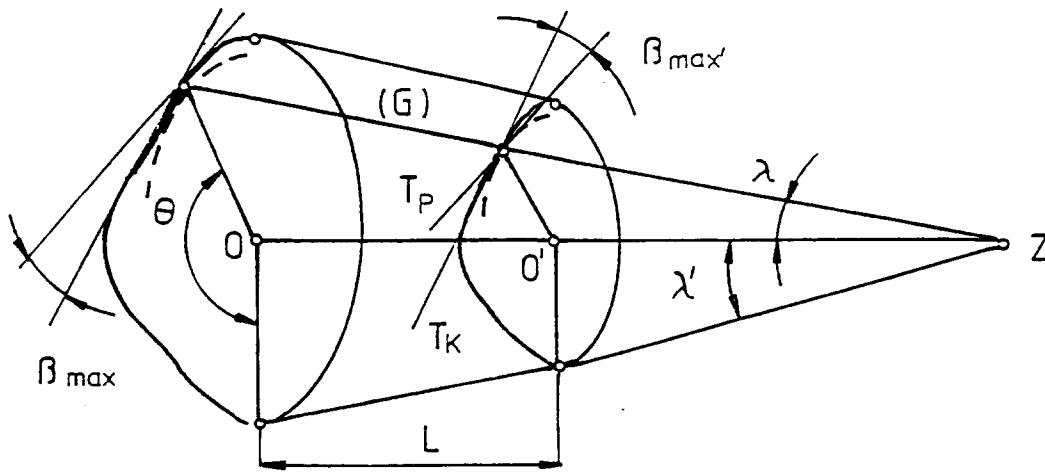


FIG. 10

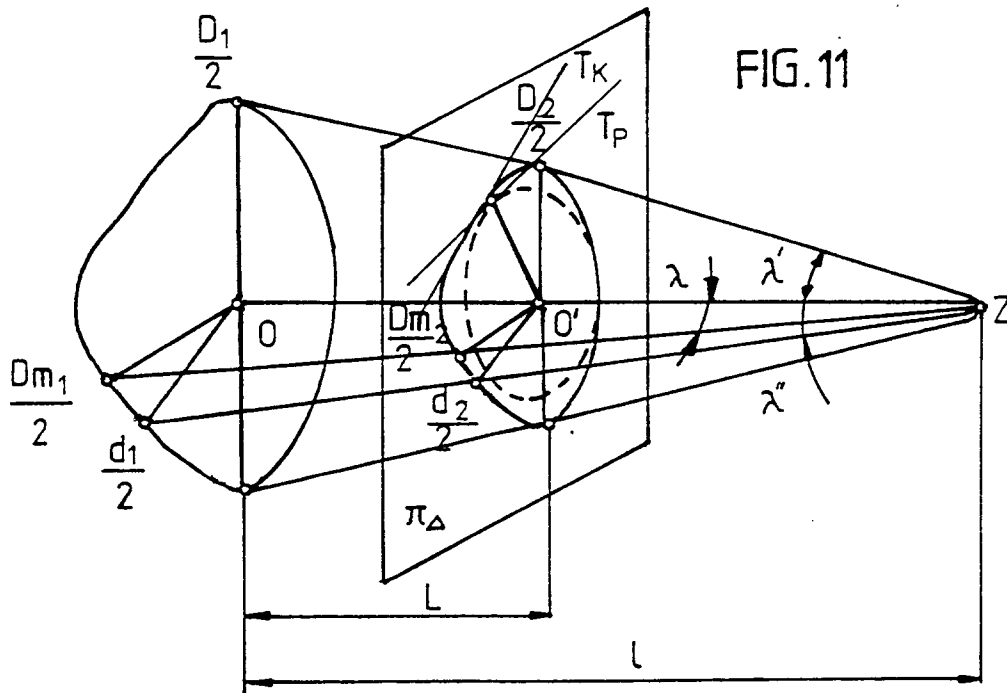


FIG. 11

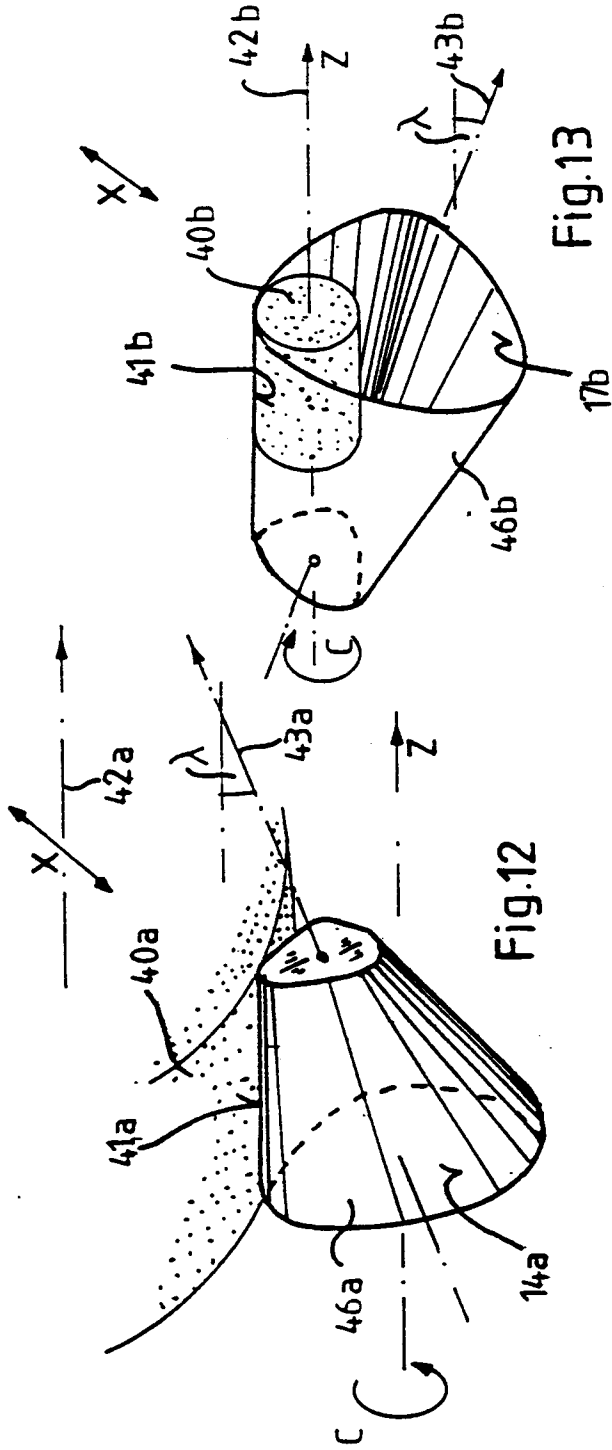


Fig.12

Fig.13

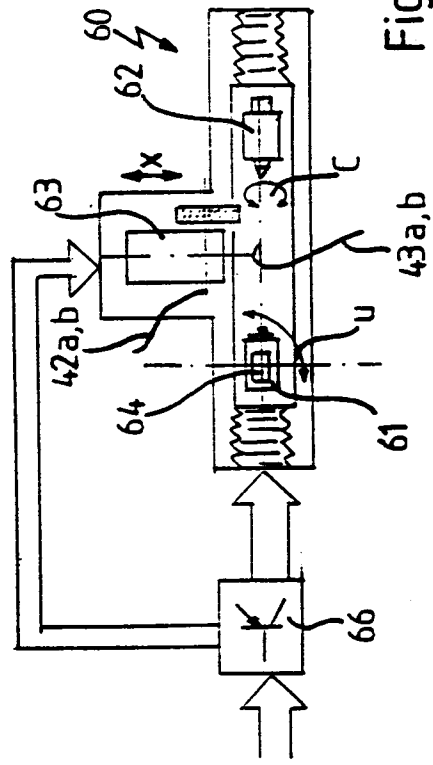


Fig.14

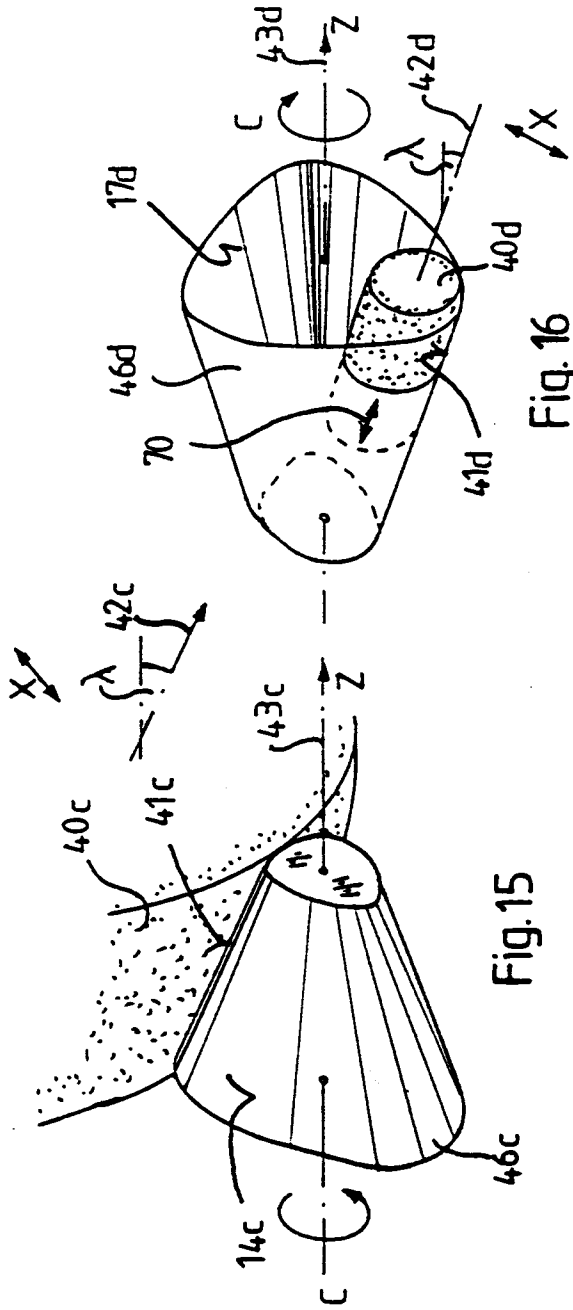


Fig. 15

Fig. 16

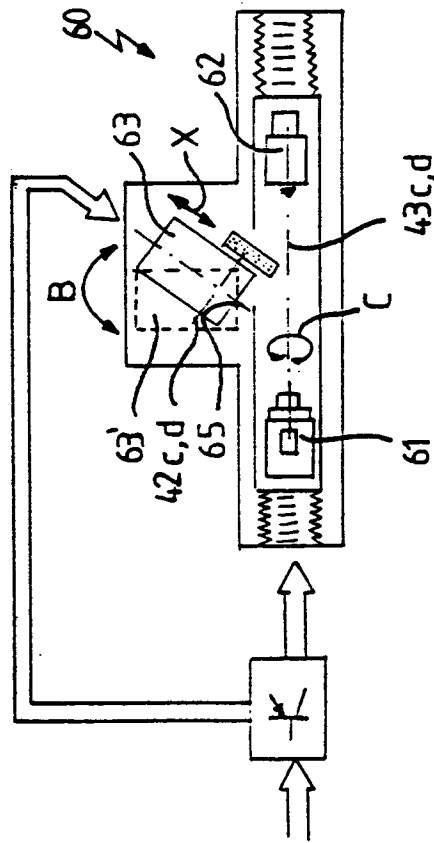


Fig. 17

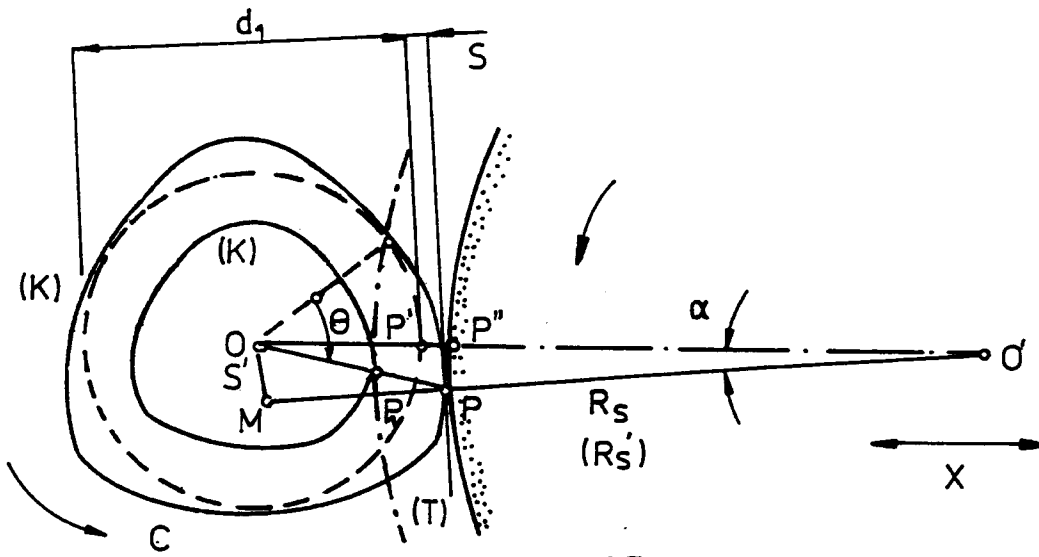


FIG. 18

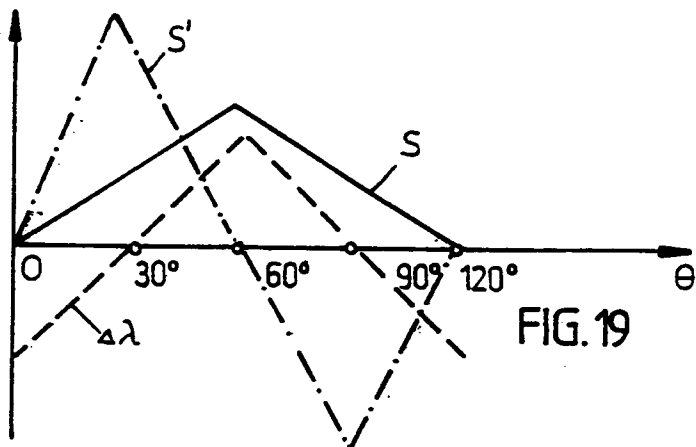


FIG. 19

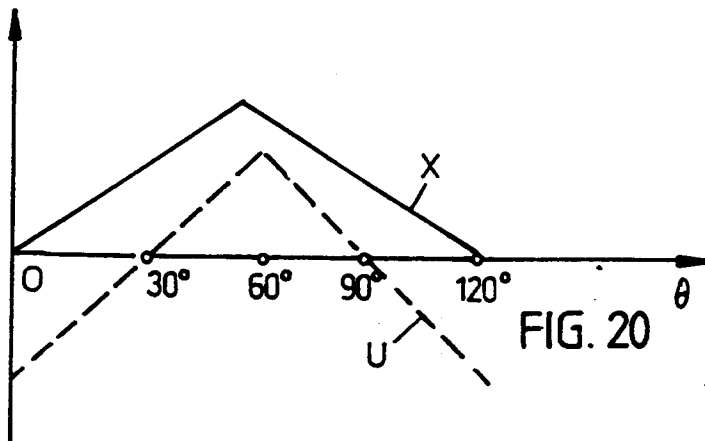


FIG. 20

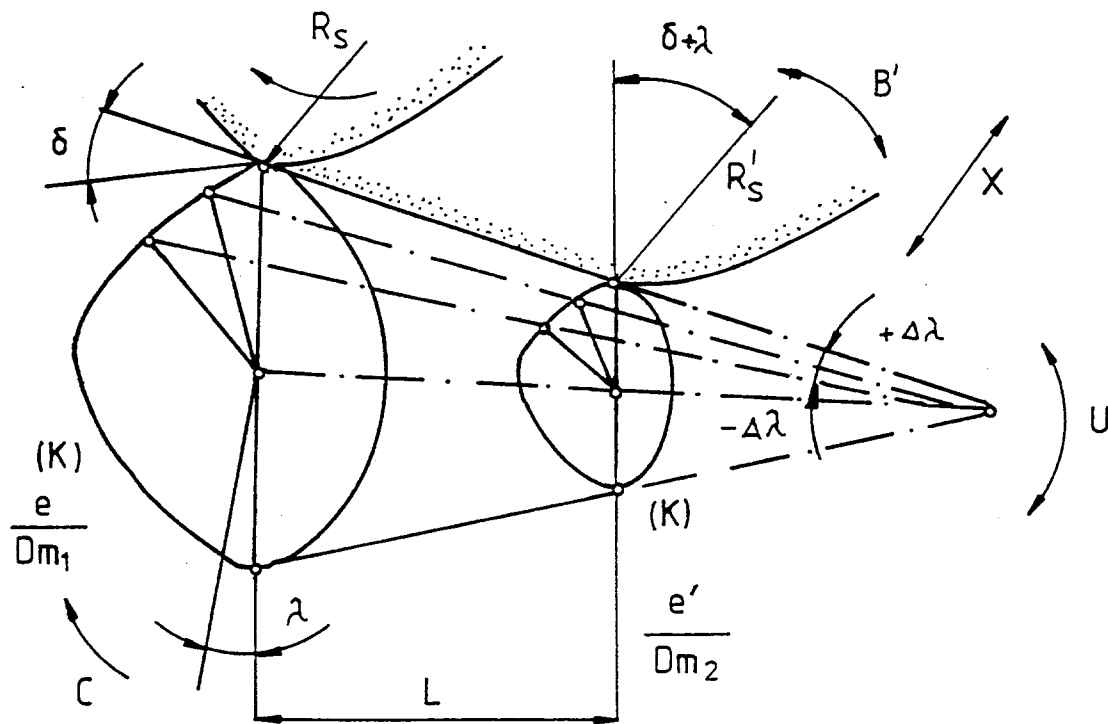


FIG. 21