



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT  
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

⑪ CH 673 796 A5

⑤① Int. Cl.<sup>5</sup>: B 23 F 19/00

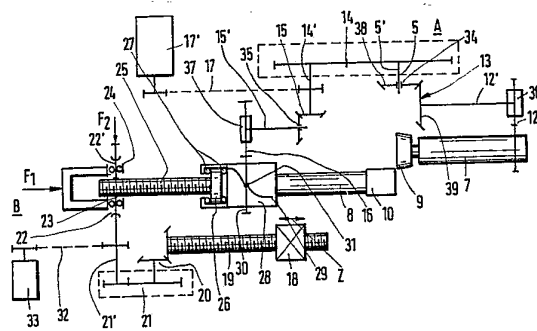
**Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein**  
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ **PATENTSCHRIFT** A5

⑫① Gesuchsnummer:	3226/86	⑦③ Inhaber:	Hermann Pfauter GmbH & Co., Ludwigsburg (DE)
⑫② Anmeldungsdatum:	12.08.1986		
⑫③ Priorität(en):	17.09.1985 DE 3533064	⑦② Erfinder:	Faulstich, Ingo, Ludwigsburg (DE)
⑫④ Patent erteilt:	12.04.1990		
⑫⑤ Patentschrift veröffentlicht:	12.04.1990	⑦④ Vertreter:	Jean Hunziker, Zürich

⑤④ **Verfahren zur Bearbeitung der Flanken von Zylinderrädern durch Wälzschälen sowie Vorrichtung zur Durchführung eines solchen Verfahrens.**

⑤⑦ Das Verfahren dient zur Bearbeitung von Flanken ungehärteter oder gehärteter, gerad- oder schrägverzählter, innen- oder aussenverzählter Zylinderräder durch Wälzschälen. Zwischen einem Werkzeug (9) und einem Werkstück (10) wird eine Grunddrehung erzeugt. Ausserdem wird eine Schraubbewegung des Werkzeuges (9) um die Achse des Werkstückes (10) erzeugt. Die Relativbewegung zwischen dem Werkzeug (9) und dem Werkstück (10) wird mit hoher Genauigkeit durchgeführt. Abweichungen in der Relativbewegung werden korrigiert. Die Zähnezahl  $z_0$  des Werkzeuges (9) ist zur Minimierung des Einflusses der Abweichungen des Werkzeuges (9) und seiner Einspannung so festgelegt, dass sich im Fall  $z_0 \geq z_2$  das Übersetzungsverhältnis  $i = z_0/z_2$  und im Falle  $z_0 < z_2$  der Kehrwert des Übersetzungsverhältnisses  $1/i = z_2/z_0$  als ganzzahliger Wert oder das Verhältnis zweier betragsmässig möglichst kleiner ganzer Zahlen ergibt.  $z_2$  ist hierbei die Werkstückzähnezahl. Mit dem Verfahren und der Vorrichtung können durch Wälzschälen Zylinderräder in hoher Verzahnungsqualität hergestellt werden.



## PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zum Bearbeiten von Flanken ungehärteter oder gehärteter, gerad- oder schrägverzahnter, innen- oder aussenverzahnter Zylinderräder durch Wälzschälen, bei dem eine Grunddrehung zwischen einem zahnradförmigen Werkzeug und dem Werkstück sowie eine Schraubbewegung um die Achse des Werkstückes erzeugt werden, dadurch gekennzeichnet, dass die zur Erzeugung der geforderten Verzahnungsgeometrie erforderliche Relativbewegung zwischen dem Werkzeug (9) und dem Werkstück (10) mit geringen Übertragungsabweichungen verwirklicht wird und die dann noch verbleibenden Hauptanteile der Übertragungsabweichungen korrigiert werden und zur Bearbeitung ein Werkzeug eingesetzt wird, dessen Zähnezahl  $z_0$  der Zähnezahl  $z_2$  des zu bearbeitenden Werkstückes so angepasst ist, dass für  $z_0 \geq z_2$  das Verhältnis  $i = z_0/z_2$  und im Falle  $z_0 < z_2$  der Kehrwert

$$\frac{1}{i} = \frac{z_2}{z_0}$$

einen ganzzahligen Wert oder das Verhältnis zweier möglichst kleiner ganzer Zahlen ergibt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem zur Erzeugung der Grunddrehung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück ein erster Getriebezug verwendet wird, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Getriebezug (A) so ausgelegt wird, dass die Übertragungsabweichungen möglichst vieler Getriebeelemente zumindest teilweise gegeneinander aufgehoben werden.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass verbleibende Abweichungen durch Korrekturglieder (36, 37), vorzugsweise im ersten Getriebezug (A), verringert werden.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem zur Erzeugung der Schraubbewegung ein zweiter Getriebezug verwendet wird, dadurch gekennzeichnet, dass von den Elementen zur Erzeugung der Grunddrehung ausschliesslich die relative Winkellage der Werkstückspindel (8) bzw. der Werkzeugschindel (7) beeinflusst wird (Fig. 3).

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem zur Erzeugung der Schraubbewegung ein zweiter Getriebezug (B) verwendet wird, durch den mehrere der zur Erzeugung der Grunddrehung benötigten Elemente in ihrer relativen Winkellage beeinflusst werden, dadurch gekennzeichnet, dass die Übertragungsabweichungen dieser Elemente durch fertigungs-, steuerungs- und/oder regelungstechnische Massnahmen hinreichend klein gehalten werden (Fig. 4).

6. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Relativbewegung zwischen dem Werkzeug (9) und dem Werkstück (10) zumindest teilweise durch elektronische Lageregelung erfolgt (Fig. 6).

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Übertragungsabweichungen zwischen einzelnen Elementen gemessen und eine entsprechende Korrekturbewegung der unkorrigierten Bewegung überlagert wird (Fig. 3).

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass geometrische Abweichungen des Werkzeuges (9) und/oder Einspannabweichungen durch Überlagerung einer entsprechenden Korrekturbewegung zwischen Werkzeug (9) und Werkstück (10) zumindest zum Teil ausgeglichen werden.

9. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 8, mit einem Bett, auf dem eine Spindel für ein Zahnrad aufweisendes, an der Vorrichtung vorgesehenes Werkzeug auf eine Werkstückspindel angeordnet ist, dadurch gekennzeichnet, dass die Zähnezahl  $z_0$  des Werkzeuges (9) zur Minimierung des Einflusses der auch bei grösstem fertigungstechnischem Aufwand unvermeidbaren Abweichungen des Werkzeuges (9) und der ebenfalls unvermeidbaren Einspannabweichungen des Werkzeuges so festgelegt ist, dass sich im Falle  $z_0$

$\geq z_2$  das Verhältnis der Zähnezahlen  $i = z_0/z_2$  und im Falle  $z_0 < z_2$  der Kehrwert des Zähnezahlverhältnisses  $1/i = z_2/z_0$  als ganzzahliger Wert oder das Verhältnis zweier betragsmässig möglichst kleiner ganzer Zahlen ergibt, wobei ( $z_0$ ) die Werkzeugzähnezahl, ( $z_2$ ) die Werkstückzähnezahl ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, die einen ersten Getriebezug zur Erzeugung der Grunddrehung zwischen Werkzeug und Werkstück aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass im ersten Getriebezug (A) Korrekturglieder (36, 37) zur Verringerung der Übertragungsabweichungen der Getriebeelemente angeordnet sind.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Korrekturglieder (36, 37) durch Doppelexzenterbuchsen zwischen Zahnrad und Welle, durch die eine sinusförmig verlaufende Korrekturbewegung nach Betrag und Phase einstellbar ist, gebildet sind.

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass im ersten Getriebezug (A) möglichst viele Getriebestufen (12, 13, 15, 16) ein Übersetzungsverhältnis von 1:1 haben.

13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass im ersten Getriebezug (A) alle Getriebestufen zwischen Werkzeug (9) und Werkstück (10) ein Übersetzungsverhältnis von 1:1 haben.

14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass sie eine Schärfeinrichtung (11) für das Werkzeug (9) aufweist.

## BESCHREIBUNG

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bearbeitung der Flanken von Zylinderrädern durch Wälzschälen nach dem Oberbegriff des Anspruches 1 sowie eine Vorrichtung zur Durchführung eines solchen Verfahrens nach dem Oberbegriff des Anspruches 9.

Seit einigen Jahren fordert der Markt zunehmende Verfahren, nach denen Zahnräder in gehärtetem Zustand nachbearbeitet werden können. Dies gilt auch für Zylinderräder, die in der Grossserienfertigung, z. B. im Automobilbau, eingesetzt werden. Die Forderung basiert einerseits auf dem Wunsch, höhere Leistungen als bisher bei kleinerem Bauvolumen der Getriebe mit möglichst niedriger Geräuschanregung zu übertragen, andererseits auf der Erkenntnis, dass der Härteprozess noch nicht hinreichend beherrschbar ist, so dass z. B. Zahnräder, die vor dem Härten eine sehr hohe Verzahnungsqualität besessen haben, nach dem Härten häufig unzulässig grosse Verzahnungsabweichungen besitzen.

Die in der Vergangenheit in der Grossserienfertigung eingesetzten Verfahren zur Bearbeitung von Zahnflanken nach dem Härten entsprechen noch nicht den Erfordernissen des Marktes. Die Verfahren sind insbesondere entweder zu langsam und damit zu teuer oder die erreichbare Verzahnungsqualität lässt zu wünschen übrig.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde in den vergangenen Jahren eine Reihe neuer oder zumindest verbesserter Verfahren zur Bearbeitung der Flanken gehärteter Zylinderräder entwickelt. Hierzu zählen das Schälwälzfräsen mit speziell ausgelegtem Hartmetallwälzfräser, das Schleifen mit globoidischer Schleifschnecke, die z. B. über ein diamantbelegtes Abrichtzahnrad profiliert wird, das Profilschleifen mit CBN-belegter Profilschleifscheibe im Einzelteilverfahren, das Schleifen mit zahnradförmigem Werkzeug, das in der Praxis als Honen, Feinen bzw. Hartschaben bezeichnet wird, oder das Schleifen mit einer mit CBN-belegten Schleifschnecke.

Jedes dieser Verfahren weist für den Einsatz in der Serienfertigung noch gravierende Nachteile auf. Hauptkriterien für den Einsatz in der Serienfertigung sind hohe Verzahnungsqualität und hohe Oberflächengüte, ein hohes Zeitspanvolumen, das heisst eine hohe Abtragsleistung, geringe Bearbeitungskosten, geringer Werkzeug-Instandhaltungsaufwand und eine einfache Umrüstbarkeit der Maschine. Darüber hinaus müssen mit den Verfahren Zahnräder bearbeitet werden können, die ausser der Verzahnung axial versetzt einen Bund oder eine zweite Verzahnung aufweisen, wobei zwischen der Verzahnung und dem axial versetzten Bund oder der zweiten Verzahnung ein unter Umständen nur geringer Zwischenraum vorhanden ist. Auch sollen mit dem Verfahren Innenverzahnungen bearbeitet werden können.

Zur Bearbeitung von Zylinderrädern ist das Wälzschälen bekannt. Dieses Bearbeitungsverfahren hat zwei Hauptmerkmale: es ermöglicht einerseits eine hohe Verzahnungsgeschwindigkeit und damit eine kurze Bearbeitungszeit, es lassen sich andererseits mit ihm nur Verzahnungen in grober Qualität erzeugen. Alle Versuche, durch Wälzschälen Verzahnungen hoher Qualitäten zu erzeugen, sind gescheitert. So wurde z. B. die Fertigung einer in den USA gezielt für die Schlichtbearbeitung ungehärteter, azsenverzählter Zylinderräder durch Wälzschälen entwickelten Maschine eingestellt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, das gattungsgemässe Verfahren und die gattungsgemässe Vorrichtung so auszubilden, dass eine hohe Verzahnungsqualität, eine hohe Oberflächengüte, ein hohes Zeitspanvolumen, geringe Bearbeitungskosten und ein geringer Instandhaltungsaufwand für das Werkzeug gewährleistet sind. Darüber hinaus sollen das Verfahren und die Vorrichtung auch zur Vorbearbeitung der Zahnräder, etwa zum Schrappen im ungehärteten Zustand, und zur Schlichtbearbeitung gehärteter Zylinderräder in der Serienfertigung geeignet sein.

Diese Aufgabe wird beim gattungsgemässen Verfahren erfindungsgemäss mit den kennzeichnenden Merkmalen des Anspruches 1 und bei der gattungsgemässen Vorrichtung erfindungsgemäss mit den kennzeichnenden Merkmalen des Anspruches 9 gelöst.

Mit dem erfindungsgemässen Verfahren können durch Wälzschälen Zylinderräder in hoher Verzahnungsqualität hergestellt werden. Die Relativbewegung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück wird mit hoher Genauigkeit durchgeführt. Es wird ein Werkzeug eingesetzt, dessen Zähnezahl der Zähnezahl des Werkstückes angepasst ist, wie im folgenden noch ausführlich dargelegt wird. Abweichungen in der Relativbewegung können minimiert oder korrigiert werden. Auf diese Weise ist es möglich, Zylinderräder im Wälzschälverfahren nicht nur mit einer hohen Verzahnungsgeschwindigkeit, sondern auch mit hoher Qualität herzustellen.

Mit der erfindungsgemässen Vorrichtung lässt sich die gewünschte hohe Fertigungsqualität einfach erreichen.

Weitere Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den weiteren Ansprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen.

Die Erfindung wird anhand eines in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispiels näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 in Seitenansicht eine erfindungsgemässe Wälzschälmaschine, deren Schälkopf unter einem Winkel zur Werkstückachse geschwenkt ist;

Fig. 2 eine Draufsicht auf die Wälzschälmaschine gemäss Fig. 1, deren Schälkopf in eine horizontale Lage geschwenkt ist;

Fig. 3 ein Getriebeschema der Wälzschälmaschine;

Fig. 4 einen Teil einer zweiten Ausführungsform einer Wälzschälmaschine, bei der die Zusatzdrehung über ein Summiergetriebe eingeleitet wird;

Fig. 5 in schematischer Darstellung und in Seitenansicht den Antrieb der Werkstückspindel bei der Wälzschälmaschine gemäss Fig. 4;

Fig. 6 in schematischer Darstellung einen Teil einer dritten Ausführungsform einer Wälzschälmaschine, bei der die Relativbewegungen zwischen Werkzeugspindel und Werkstückspindel teilweise elektronisch verknüpft sind;

Fig. 7 im Axialschnitt eine Fehlerkompensationseinrichtung der Wälzschälmaschine;

Fig. 8 die Fehlerkompensationseinrichtung gemäss Fig. 7 in Ansicht.

Die Wälzschälmaschine hat ein Bett 1, auf dem ein Axialschlitten 2 in Z-Richtung verschiebbar ist. Er trägt einen Radialschlitten 3, der relativ zum Axialschlitten 2 in X-Richtung verschiebbar ist. Am Radialschlitten 3 ist ein Schälkopf 4 um eine Achse 5 schwenkbar angeordnet, der mit dem Radialschlitten in X-Richtung verschoben werden kann. Auf dem Bett 1 ist starr eine Werkstückspindeleinheit 6 befestigt. Der Schälkopf 4 und die Werkstückspindeleinheit 6 haben jeweils eine Spindel 7 und 8 zur Aufnahme eines Werkzeuges 9 bzw. eines Werkstückes 10. Auf dem Bett 1 befindet sich eine Werkzeugschärfeneinrichtung 11, mit einem drehbaren Schärfelement 11', mit dem das Werkzeug 9 in der Wälzschälmaschine bei Bedarf geschält werden kann.

Während des Bearbeitens des Werkstückes 10 führen das Werkzeug 9 und das Werkstück 10 in bekannter Weise eine Grunddrehung aus. Sie drehen sich hierbei im umgekehrten Verhältnis ihrer jeweiligen Zähnezahl. Bei der Bearbeitung entsteht während einer Werkstückumdrehung ein schmales Band der endgültigen Werkstückverzahnung. Zur Ausbildung der Verzahnung am Werkstück 10 über die gesamte Breite ist eine Schraubbewegung erforderlich. Sie kommt dadurch zustande, dass der Axialschlitten 2 in Z-Richtung verschoben wird und gleichzeitig das Werkstück 10 eine Zusatzdrehung ausführt. Die Achsen von Werkzeug 9 und Werkstück 10 sind während der Bearbeitung in bekannter Weise unter dem Winkel  $\Sigma$  zueinander geschwenkt.

Fig. 3 zeigt ein Getriebeschema zur Erzeugung der Grunddrehung und der Schraubbewegung. Das Werkzeug 9 sitzt drehfest auf der Werkzeugspindel 7. Sie ist über eine Zylinderradstufe 12 mit einer Zwischenwelle 12' antriebsverbunden, die über eine Kegelradstufe 13 mit einer Welle 5' verbunden ist, deren Achse 5 die Schwenkachse des Schälkopfes 4 bildet. Die Welle 5' ist Teil einer Teilwechselradstufe 14, die eine Eingangswelle 14' hat, die über eine Kegelradstufe 15 mit einer Zwischenwelle 15' antriebsverbunden ist. Sie ist über eine Zylinderradstufe 16 mit der Werkstückspindel 8 und damit mit dem Werkstück 10 antriebsverbunden. Die Eingangswelle 14' ist über einen Riemtrieb 17 mit einem Antriebsmotor 17' verbunden. Von ihm aus werden über das beschriebene Getriebe das Werkzeug 9 und das Werkstück 10 um ihre jeweilige Achse rotierend angetrieben, wobei das Werkzeug und das Werkstück die Grunddrehung ausführen. Dieses beschriebene Getriebe bildet somit einen Getriebezug A zur Erzeugung der Grunddrehung zwischen dem Werkzeug 9 und dem Werkstück 10.

Zur Erzeugung der Schraubbewegung dient ein Schraubgetriebezug B. Er hat eine auf einer Spindel 19 sitzende Spindelmutter 18. Sie ist mit dem Axialschlitten 2 verbunden. Durch Drehen der Spindel 19 wird die Spindelmutter 18 und damit der Axialschlitten 2 in Z-Richtung verschoben. Die Spindel 19 ist über eine Kegelradstufe 20 mit einem Schraubwechselradgetriebe 21 verbunden. Es hat eine Eingangswelle 21', die über ein Schneckengetriebe 22 und eine Spindelmutter 23 mit einer Gewindespindel 25 antriebsverbunden ist. Zur Axiallagerung des Schneckenrades 22', das fest mit der Spindelmutter 23 verbunden ist, ist ein Axiallager 24 vorgesehen.

Die Gewindespindel 25 trägt an einem Ende einen Kolben 26, der über ein Axiallager 27 in einer Schraubhülse 28 gelagert ist. Sie ist mit einer Schraubenführung 29 versehen, in die ein Mitnehmer 31 eines Zylinderrades 30 eingreift. Die Schraubhülse 28 ist drehfest mit der Werkstückspindel 8 verbunden und auf ihr axial verschiebbar. Für die drehfeste Verbindung kann

beispielsweise ein Passfeder-Schiebesitz verwendet werden. Zum Antrieb des Schraubgetriebezuges B dient ein Motor 33, der über einen Riementrieb 32 mit der Eingangswelle 21' des Schraubwechselradgetriebes 21 antriebsverbunden ist. Der Motor 33 treibt über den beschriebenen Getriebezug B die Spindelmutter 18 an, wodurch der mit der Spindelmutter verbundene Axialschlitten 2 in Z-Richtung verschoben wird.

Die Schraubbewegung besteht aus der Verschiebung des Axialschlittens 2 und der Zusatzdrehung der Werkstückspindel 8. Die Zusatzdrehung wird durch Axialverschieben des Kolbens 26 bzw. der Gewindespindel 25 erzeugt. Über das Axiallager 27 wird beim Axialverschieben des Kolbens 26 die Schraubhülse 28 axial verschoben und hierbei um ihre Achse gedreht. Diese Drehung kommt dadurch zustande, dass der Mitnehmer 31 des Zylinderrades 30 der Zylinderradstufe 16 in die Schraubenführung 29 der Schraubhülse 28 eingreift. Durch Drehen der Spindelmutter 23 wird die drehfest angeordnete Gewindespindel 25 mit dem Kolben 26 und damit die Schraubhülse 28 axial verschoben. Infolge des Eingriffes des Mitnehmers 31 in die Schraubenführung 29 wird die Schraubhülse 28 um ihre Achse gedreht. Dabei wird die Werkstückspindel 8 mitgedreht, wodurch die Zusatzdrehung der Werkstückspindel erzeugt wird. Die Anpassung an die für das zu bearbeitende Werkstück erforderliche Zusatzdrehung erfolgt im Schraubwechselradgetriebe 21.

Da der Axialschlitten 2 und der Radialschlitten 3 in Z- und in X-Richtung verschoben werden, sind für die Wellen 5' und 15' Schiebeführungen 34 und 35 vorgesehen.

Vorzugsweise ist der Getriebezug A zur Erzeugung der Grunddrehung zwischen dem Werkzeug 9 und dem Werkstück 10 so ausgebildet, dass möglichst viele Elemente dieses Getriebezuges mit gleicher Drehzahl laufen. Im Ausführungsbeispiel sind die Zylinderradstufen 12 und 16 und die Kegelradstufen 13 und 15 jeweils im Übersetzungsverhältnis 1:1 ausgebildet. Innerhalb dieses Getriebezuges A treten also nur zwei Drehzahlen auf, nämlich die Drehzahl des Werkzeuges 9 und die Drehzahl des Werkstückes 10. Bei einer solchen Getriebeausbildung kompensieren sich die Übertragungsabweichungen der einzelnen Getriebestufen, die mit gleicher Drehzahl laufen, zum Teil selbst. In denjenigen Getriebebereichen, die jeweils gleich schnell laufen, können die Übertragungsabweichungen durch Korrekturglieder 36 und 37 minimiert werden. Das Korrekturglied 36 minimiert die Übertragungsabweichungen sämtlicher Elemente zwischen dem Werkzeug 9 und dem Teilwechselrad auf der Welle 5'. Das andere Korrekturglied 37 erfasst die Elemente zwischen der Werkstückspindel 8 und der Teilwechselradwelle 14'. Solche Korrektur Elemente sind an sich bekannt und können z. B. Doppel exzenterbuchsen sein, die zwischen dem Zahnrad und der Welle angeordnet werden und zusätzlich eine Möglichkeit zur winkelmässigen Einstellung des Korrekturbetrages zulassen. Die Übertragungsabweichungen haben etwa einen sinusförmigen Verlauf. Da innerhalb des Getriebezuges A nur zwei Drehzahlen auftreten, tritt eine optimale Kompensation dann auf, wenn dieser sinusförmige Verlauf der verschiedenen Getriebestufen einander entgegengerichtet verläuft. Mit den Korrekturgliedern 36, 37 kann dieser gegensinnige Verlauf der Übertragungsabweichungen minimiert werden.

Wird der Schälkopf 4 um die Achse 5 geschwenkt, so ändert sich die Relativlage der beiden Kegelräder 38, 39 der Kegelradstufe 13. Damit ändert sich auch die gesamte Übertragungsabweichung der mit Werkzeugdrehfrequenz umlaufenden Elemente. Diese Veränderung der Übertragungsabweichung lässt sich durch eine modifizierte Einstellung des Korrekturgliedes 36 ausgleichen.

Solche Korrekturglieder können auch im Schraubgetriebezug B vorgesehen sein. Mit ihnen lassen sich die Amplitude und die Phasenlage der zur Korrektur erforderlichen Zusatzbewegung für den jeweiligen Getriebezug einstellen.

Es ist natürlich auch möglich, vor jeder Bearbeitung in der Serienfertigung die Übertragungsabweichungen zwischen dem Werkzeug 9 bzw. der Werkzeugspindel 7 und dem Werkstück 10 bzw. der Werkstückspindel 8 zu messen und aufgrund des Messergebnisses die Einstellung der Korrekturglieder 36 und 37 vorzunehmen. Dabei werden die Einflüsse der Wechselräder in der Teilwechselradstufe 14 ebenfalls erfasst und weitgehend ausgeglichen.

In den Fig. 7 und 8 ist eine Ausführungsform des Korrekturgliedes 36 bzw. 37 dargestellt. Bei dieser Einrichtung besitzt die Welle 15' einen Wellenbund 52. Die Einrichtung selbst besteht aus der Exzenterbuchse 53, dem Zahnrad 54 mit aussermittiger Bohrung, Passfedern 55 und 56, Nuten 59 und 60 sowie dem Deckel 57 und der Schraube 58.

Die Wirkungsweise ist wie folgt:

Die Exzenterbuchse 53 ist über die Passfedern 56 und die Nuten 59 und 60 mit der Welle 15' verbunden. Sie besitzt eine äussere Aufnahme fläche, die aussermittig zur Bohrung angebracht worden ist. Auf dieser Aufnahme fläche wird das Zahnrad 54 mit aussermittiger Bohrung aufgenommen und über die Passfeder 55 winkelmässig positioniert. Durch Verdrehen des Zahnrades 54 relativ zur Exzenterbuchse 53 erhält man einen resultierenden Betrag der Aussermittigkeit der Verzahnung des Rades 54 zur Welle 15'. Die Winkellage dieser resultierenden Aussermittigkeit lässt sich über eine winkelmässige Positionierung der Einheit, bestehend aus der Exzenterbuchse 53 und dem Zahnrad 54, relativ zur Welle 15' auf den gewünschten Wert einstellen. Der Deckel 57 und die Schraube 58 halten die Einheit zusammen.

Es ist allgemein bekannt, dass eine aussermittig laufende Verzahnung eine periodische Übertragungsabweichung mit der Drehfrequenz des Rades erzeugt. Gelingt es also, die Aussermittigkeit in der gewünschten Amplitude und Phasenlage zu einer entsprechenden Welle einzustellen, so hat man damit eine periodische Übertragungsabweichung in den Getriebezug eingebracht. Kennt man nun die Übertragungsabweichung mit Drehfrequenz dieser Welle aufgrund einer Vermessung dieses Getriebes, so kann man durch Einstellung eines definierten Betrages der resultierenden Aussermittigkeit und der Phasenlage dieser Aussermittigkeit zur Welle eine gezielte Übertragungsabweichung in den Getriebezug einbringen, gegebenenfalls also eine vorhandene Übertragungsabweichung mit dieser Frequenz kompensieren.

Es ist auch möglich, das System zur Messung der Übertragungsabweichungen in die Maschine zu integrieren und die Einstellung der Korrekturglieder 36, 37 automatisch vorzunehmen.

Es besteht ferner die Möglichkeit, korrigierend in den Schraubgetriebezug B einzugreifen. Da die Verschiebung der Gewindespindel 25 zur Erzeugung der Zusatzdrehung von der Verschiebung des Axialschlittens 2 getrennt ist, kann über die Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  (Fig. 3) die Gewindespindel 25 in Achsrichtung um einen bestimmten Betrag verschoben werden. Die Kraft  $F_1$  wirkt in Achsrichtung der Gewindespindel 25 auf die Axiallager 24 des Schneckengetriebes 22. Die Kraft  $F_2$  wirkt auf die Axiallager der (nicht dargestellten) Schnecke des Schneckengetriebes 22. Diese Kräfte bewirken über die Nachgiebigkeit der Axiallager 24 bzw. der (nicht dargestellten) Axiallager der Schnecke des Schneckengetriebes eine Verschiebung der Gewindespindel 25 in Achsrichtung. Die Kräfte  $F_1$  bzw.  $F_2$  können z. B. hydraulisch unter Verwendung eines Servoventiles bzw. zweier Servoventile erzeugt werden. Die Ansteuersignale entsprechen den zu korrigierenden Abweichungen. Es ist möglich, die Signale über ein integriertes Messsystem on-line zu gewinnen. Es ist auch möglich, die Messsignale zu speichern und das Servoventil so anzu steuern, dass die Phasenschiebung aufgrund des Systemfrequenzganges kompensiert wird. Durch Axialverschieben der Gewindespindel 25 wird in der beschriebenen Weise über die

Schraubhülse 28 die Zusatzdrehung der Werkstückspindel 8 erzeugt.

Der Getriebezug A zur Erzeugung der Grunddrehung zwischen dem Werkzeug 9 und dem Werkstück 10 ist so ausgelegt, dass die Abweichungen möglichst vieler Übertragungselemente, wie Zahnräder, Zahnriemen, zumindest teilweise gegeneinander aufgehoben werden. Die verbleibenden Abweichungen können durch die Korrekturglieder 36, 37 gezielt weiter verringert werden, so dass die Übertragungsabweichungen minimal werden. Der mechanische Getriebezug B zur Erzeugung der Schraubbewegung ist so ausgelegt, dass mit Ausnahme der Werkstückspindel 8 bzw. der Werkzeugspindel 9 selbst keines der zur Erzeugung der Grunddrehung eingesetzten Elemente in seiner relativen Winkellage beeinflusst wird, weil die Zusatzdrehung unmittelbar an der Werkstückspindel 8 in den Getriebezug A eingeleitet wird. Es ist aber auch möglich, die Zusatzdrehung an anderer Stelle des Getriebezuges A einzuleiten. Dadurch ändert sich aber die Winkellage mehrerer Elemente des Getriebezuges A. In diesem Fall können die Übertragungsabweichungen durch fertigungs-, steuerungs- und/oder regelungstechnische Massnahmen hinreichend klein gehalten werden.

Es ist auch möglich, den einen der beiden Getriebezüge A, B oder auch beide Getriebezüge ganz oder teilweise durch elektronische Verknüpfung der Bewegungen zu ersetzen.

Es ist ferner möglich, eine Kombination der mechanischen Getriebezüge A, B mit einer elektronischen Verknüpfung der Bewegungen so zu kompensieren, dass die Übertragungsabweichungen zwischen einzelnen Elementen der Einrichtung gemessen und eine entsprechende Korrekturbewegung der unkorrigierten Bewegung überlagert wird.

Geometrische Abweichungen des Werkzeuges 9 und/oder Einspannabweichungen können durch die Überlagerung einer entsprechenden Korrekturbewegung zwischen dem Werkzeug 9 und dem Werkstück 10 zumindest zum Teil ausgeglichen werden.

Mit der beschriebenen Wälzschälmaschine können Verzahnungen hoher Qualität im Wälzschälverfahren erzeugt werden. Es ist möglich, dieses beschriebene Verfahren zur Schlichtbearbeitung gehärteter Zylinderräder in der Serienfertigung einzusetzen. Mit dem beschriebenen Verfahren können sehr hohe Verzahnungsqualitäten bei hoher Oberflächengüte erzeugt werden. Das Zeitspannvolumen, die sogenannte Abtragsleistung, ist optimal, und die Bearbeitungskosten können klein gehalten werden. Der Instandhaltungsaufwand des Werkzeuges 9 ist verhältnismässig gering. Mit dem Wälzschälverfahren können Werkstücke 10 bearbeitet werden, bei denen zwischen der Verzahnung und einem Bund oder einer zweiten Verzahnung nur ein geringer Zwischenraum vorhanden ist. Das beschriebene Verfahren bietet auch die Möglichkeit, Innenverzahnungen zu bearbeiten. Schliesslich ist das Verfahren auch zur Vorbearbeitung der Zahnräder geeignet, also zum Schrappen im ungehärteten Zustand.

Bei der Ausführungsform nach den Fig. 4 und 5 wird die Zusatzdrehung der Werkstückspindel 8 über ein Summiergetriebe 47 eingeleitet. Das Korrekturglied 37 ist bei dieser Ausführungsform auf der Welle 14' angeordnet. Das Summiergetriebe 47 befindet sich zwischen der Welle 14' und einer Schneckenwelle 48. Der Antrieb der Werkstückspindel 8 erfolgt in diesem Falle über die Schnecke 49 und das Schneckenrad 50. Die Eingangswelle 21' ist über die Zylinderradstufe 46 mit dem Summiergetriebe 47 antriebsverbunden. Die Grunddrehung zwischen Werkzeugspindel 7 und Werkstückspindel 8 verläuft in diesem Fall über die Welle 14, die Kegelräder 61 des Differentialgetriebes bzw. Summiergetriebes 47, die Schneckenwelle 48 und das Schneckenrad 50 auf die Werkstückspindel 8.

Die Zusatzbewegung verläuft über die Welle 21', die Zylinderradstufe 46 auf den Käfig 62 des Summiergetriebes 47 und von dort über die Kegelräder 61 auf die Schneckenwelle 48.

Die Übertragungsabweichungen zwischen Summiergetriebe 47 und Werkstückspindel 8 können über eine Verlagerung der Schnecke 49 in Richtung ihrer Achse, erzeugt über die Kraft  $F_3$  (Fig. 5), kompensiert werden. Die Kraft  $F_3$  wirkt auf die Axiallagerung 51 der Schnecke 49. Sie erzeugt aufgrund der Nachgiebigkeit dieser Lagerung die gewünschte Korrekturbewegung.

Bei der Ausführungsform gemäss Fig. 6 wird die Schraubbewegung nicht mehr mit rein mechanischen Mitteln realisiert. Es erfolgt vielmehr eine elektronische Verknüpfung einzelner Bewegungskomponenten. Zu diesem Zweck enthält die Maschine einen Massstab 41, einen Abtastkopf 42, mit dem die Axialschlittenposition erfasst wird, einen Regler 43, in dem die Messsignale unter Berücksichtigung der gewünschten Übersetzung zwischen Axialschlittenverschiebung und Zusatzschraubung angepasst werden, den Verstärker 44 und den Motor 45. Der Motor 45 treibt die vorher schon erwähnte Welle 21' an. In dieser Ausführungsform erfolgt der Antrieb des Axialschlittens 2 über den Motor 40 und die Gewindespindel 19 mit Spindelmutter 18. Bei Einsatz der hier erläuterten elektronischen Verknüpfung der Bewegungen lassen sich die Übertragungsabweichungen hinreichend klein halten.

Mit der auf dem Bett 1 angeordneten Werkzeug-Schärfeneinrichtung 11 kann das Werkzeug 9 bei entsprechender Abnutzung in einfacher Weise nachgeschärft werden.

Das Werkzeug 9 ist zur Erzeugung der hohen Verzahnungsqualität genau ausgelegt, genau gefertigt und genau in der Wälzschälmaschine aufgenommen. Das Werkzeug 9 besteht aus geeignetem Schneidstoff, z. B. aus Hartmetall. Die Zähnezahl des Werkzeuges 9 ist zur Minimierung des Einflusses der auch bei grösstem fertigungstechnischem Aufwand unvermeidbaren Abweichungen des Werkzeuges und seiner Einspannung auf das Arbeitsergebnis im Rahmen vorgegebener Grenzen so festgelegt, dass sich im Falle  $z_0 \geq z_2$  das Übersetzungsverhältnis  $i = z_0/z_2$  und im Falle  $z_0 < z_2$  der Kehrwert des Übersetzungsverhältnisses  $1/i = z_2/z_0$  als ganzzahliger Wert oder als Verhältnis zweier betragsmässig möglichst kleiner ganzer Zahlen ergibt.

In dieser Gleichung bedeutet  $z_0$  die Werkzeugzähnezahl und  $z_2$  die Werkstückzähnezahl.

Mit dem so ausgebildeten Werkzeug 9 wird in einfacher Weise die gewünschte hohe Verzahnungsqualität und Oberflächengüte des Werkstückes 10 erzielt.

Zum Wälzschälen von Zylinderrädern werden üblicherweise werkstückgebundene Werkzeuge eingesetzt. Bei der Auslegung dieser Werkzeuge muss der Konstrukteur unter anderem die gewünschte Werkstückgeometrie und den Arbeitsbereich der Maschine berücksichtigen (kleinster und grösster Werkzeughdurchmesser, kleinster und grösster Achsabstand, Schwenkwinkel sowie kleinste und grösste Drehzahlen der Arbeitsspindeln). Werkzeuge für die Bearbeitung innenverzahnter Werkstücke müssen zur Vermeidung von Kollision eine Zähnezahl erhalten, die wesentlich kleiner als die Werkstückzähnezahl ist. Eine weitere Einengung des für eine sinnvolle Werkzeugauslegung zur Verfügung stehenden Zähnezahlbereiches ergibt sich aus der Forderung nach einer Mindestzahnkopfstärke aus Stabilitätsgründen und einer Mindestzahnflankenweite aus fertigungstechnischen Gründen. Trotz dieser Einschränkungen verbleibt normalerweise ein relativ grosser Bereich, innerhalb dessen der Konstrukteur die Werkzeugzähnezahl festlegen kann.

Die Verzahnungsabweichungen wälzgeschälter Werkstücke hängen unter anderem ab vom Übersetzungsverhältnis  $i = z_0/z_2$ ; es bedeuten  $Z_0$  Werkzeugzähnezahl,  $z_2$  Werkstückzähnezahl. Angaben darüber, wie diese Übersetzung und damit für einen bestimmten Bearbeitungsfall die Werkzeugzähnezahl zur Erzeugung von Werkstücken in hoher Qualität gewählt werden soll, sind nicht bekannt. Die in der Literatur gegebene Empfehlung, zur Sicherung der Qualität der Verzahnung für die Bearbeitung von Innenverzahnung Werkzeugen einzusetzen, deren Zähnezahl nicht ganzzahlig in der Werkstückzähnezahl aufgeht, führt nicht

zum gewünschten guten Arbeitsergebnis. Siehe hierzu z. B. Handbuch Verzahnungstechnik, Prof. F. Opitz, VEB Verlag Technik, Berlin 1981, S. 161. Aus diesem Sachverhalt ergibt sich die Aufgabe, die Zähnezahle eines werkstückgebundenen Schälrades so festzulegen, dass Werkstücke hoher Verzahnungsqualität erzeugt werden können.

Erfindungsgemäss wird dazu vorgeschlagen, innerhalb der oben skizzierten Grenzen die Werkzeugzähnezahle so festzulegen, dass sich im Falle Werkzeugzähnezahle grösser Werkstückzähnezahle für das Übersetzungsverhältnis  $i = z_0/z_2$  und im Falle Werkzeugzähnezahle kleiner Werkstückzähnezahle für den Kehrwert des Übersetzungsverhältnisses  $1/i = z_2/z_0$  ein ganzzahliger Wert oder das Verhältnis zweier betragsmässig möglichst kleiner ganzer Zahlen ergibt.

Zur Erläuterung seien die Verhältnisse bei Bearbeitung eines schrägverzahnerten Werkstückes mit einem geradzahnerten Werkzeuges betrachtet. Beim Einsatz schrägverzahnerten Werkzeuge ergeben sich ähnliche Verhältnisse.

Besitzt das Werkstück eine Zähnezahle  $z_2 = 60$ , so sollte das Werkzeug erfindungsgemäss eine Zähnezahle  $z_0 = 60$  erhalten. In diesem Falle übertragen sich die Verzahnungsabweichungen des Werkzeuges wie folgt auf das Werkstück: die Teilungsgesamtabweichungen  $F_{p2}$  des Werkstückes ist näherungsweise gleich der Teilungsgesamtabweichungen  $F_{p0}$  des Werkzeuges, geteilt durch den Kosinus des Werkstück-Schrägungswinkels  $\beta_2$ :

$$F_{p2} \approx F_{p0} / \cos \beta_2$$

Die Profilgesamtabweichung  $F_{a2}$  des Werkstückes ist näherungsweise gleich der Profilgesamtabweichung  $F_{a0}$  des Werkzeuges, geteilt durch den Kosinus des Werkstück-Schrägungswinkels  $\beta_2$ :

$$F_{a2} \approx F_{a0} / \cos \beta_2$$

Eine Flankenlinienabweichung  $F_{\beta 2}$  entsteht aufgrund von Verzahnungsabweichungen des Werkzeuges nicht:

$$F_{\beta 2} = 0$$

Entsprechen die Verzahnungsabweichungen des Schälrades z. B. im Modulbereich zwischen 2 mm und 3,55 mm sowie im Durchmesserbereich zwischen 125 mm und 280 mm bezüglich  $F_{p0}$  und  $F_{a0}$  der Qualität 4 nach DIN 3962 (d. h. Güteklasse A nach DIN 1829 Teil 2), so sind  $F_{p2}$  und  $F_{a2}$  zumindest in Qualität 5 zu erwarten.

Würde man nun die Werkzeug-Zähnezahle  $z_0$  von 60 auf 61 ändern, so wäre  $i = z_0/z_2 = 61/60$ , also das Verhältnis zweier grosser Zahlen, verglichen mit dem bisher betrachteten Verhältnis  $i = 1:1$ . Am Werkstück würde neben den vorstehend erwähnten Abweichungen eine Flankenlinien-Formabweichung

$$f_{\beta 12} \approx F_{p0} / \cos \beta_2$$

entstehen. Diese Abweichung ist der oben angeführten Profilabweichung bei entsprechend grossem Werkstück-Schrägungswinkel voll überlagert. Man würde damit am Werkstück eine Profil-Gesamtabweichung in Qualität 8 und eine Flankenlinien-Formabweichung ebenfalls in Qualität 8 erhalten. Unter idealen Voraussetzungen (Maschine und Werkstückaufspannung extrem steif und genau) würde das Werkstück bei einer Übersetzung  $i = 1$  bezüglich  $f_{\beta 12}$  in Qualität 1 nach DIN 3962 liegen.

Vergleicht man die Toleranz für die Flankenlinien-Formabweichung des Werkstückes mit den Toleranzen für die Teilungsgesamtabweichung des Werkstückes, so erkennt man, dass zur Erzeugung eines Werkstückes in Qualität 4 bezüglich  $f_{\beta 12}$  ein Werkzeug in Qualität 1 bezüglich  $F_{p0}$  erforderlich wäre, falls das Werkzeug eine Zähnezahle  $z_0 = 61$  besitzt. Derartige Werkzeuge sind mit vertretbarem Aufwand zurzeit nicht herstellbar. Beim Einsatz von Werkzeugen, die der erfindungsgemässen Auslegung entsprechen, treten derartige Probleme nicht auf.

Lässt sich z. B. aufgrund der vorstehend erwähnten Grenzen für die Werkzeugzähnezahle  $i = 1$  nicht verwirklichen, so sollte erfindungsgemäss  $i$  bzw.  $1/i$  als Verhältnis anderer kleinerer ganzer Zahlen dargestellt werden. In Betracht kommen noch folgende Zähnezahlen:  $z_0 = 120, 30, 180, 20, 90$  und 40. Im einzelnen ist hierzu anzumerken:

Für andere ganzzahlige Werte von  $i = z_0/z_2$ , also z. B. für  $z_0 = 120$  (180) gilt: Werkzeugzähne, die während einer Werkstückumdrehung in einer bestimmten Werkstücklücke arbeiten, arbeiten nach  $i = 2$  (3) weiteren Werkstückumdrehungen in derselben Lücke. Beachtet man, dass zum Wälzschälens Vor-schübe von 0,1 mm je Werkstückumdrehung bis 0,2 mm je Werkstückumdrehung angewandt werden, so leuchtet ein, dass infolge von Überschneidungen in Flankenrichtung praktisch ebenfalls keine Flankenlinien-Formabweichungen aufgrund von Teilungsgesamtabweichungen des Werkzeuges am Werkstück entstehen können. Die Werkstückoberfläche erhält dabei lediglich eine Struktur, wie sie unter idealen geometrischen Bedingungen oder beim Einsatz eines Werkzeuges mit  $z_0 = 60$  entsteht, wenn dabei mit einem um den Faktor  $i = 2$  (3) vergrösserten Vorschub gearbeitet würde. Die vorstehend erwähnten Überschneidungen führen zusätzlich zu einer Verringerung der Teilungsgesamtabweichung am Werkstück.

Für ganzzahlige Werte von  $1/i = z_2/z_0$ , also für  $z_0 = 30$  (20) gilt: Jeder Zahn des Werkzeuges arbeitet in 2 (3) Lücken der Werkstückverzahnung. In einer Werkstückzahn-lücke arbeitet aber stets derselbe Werkzeugzahn.

In diesem Fall kann sich die Teilungsgesamtabweichung des Werkzeuges ebenfalls nicht als Flankenlinien-Formabweichung am Werkstück ausbilden. Als Teilungs-Summenabweichung entsteht ein Verlauf mit 2 (3) Perioden auf dem Werkstückumfang.

Ergibt sich für  $i$  bzw.  $1/i$  ein nicht ganzzahliger Wert, sondern ein Verhältnis zweier anderer kleiner ganzer Zahlen, also z. B.  $i = 3:2$  ( $1/i = 2:3$ ), so erhält man  $z_0 = 90$  (40). Für dieses Beispiel gilt: Nach 2 (3) Werkzeugumdrehungen und 3 (2) Werkstückumdrehungen arbeiten alle Werkzeugzähne wieder in der Werkstück-Zahn-lücke, in der sie vor dieser Drehung gearbeitet haben. Die Teilungsgesamtabweichung des Werkzeuges wirkt sich nicht als Flankenlinien-Formabweichung aus; es entsteht wieder eine Flankenstruktur, als ob die Bearbeitung unter idealen Bedingungen mit vergrössertem Axialvorschub erfolgt wäre.

Beachtet man, dass Einspannabweichungen des Werkzeuges und Komponenten der Übertragungsabweichung in der Drehung zwischen Werkzeug und Werkstück mit Drehfrequenz der Werkzeugspindel sich ähnlich auf das Werkstück übertragen wie die Teilungsgesamtabweichung des Werkzeuges, so leuchtet ein, dass den vorstehend beschriebenen Zusammenhängen grösste praktische Bedeutung zukommt. Realisiert man bei der Werkzeugauslegung ungünstige Übersetzungsverhältnisse, so erhält man auch beim Einsatz von Werkzeugen mit extrem engen Toleranzen Werkstücke in grober Verzahnungsqualität.

Es werden Bedingungen angegeben, nach denen für werkstückgebundene Werkzeuge die Zähnezahle so festgelegt werden kann, dass bei üblicher Qualität (Güteklasse) des Werkzeuges Werkstücke hoher Verzahnungsqualität erzeugt werden können.

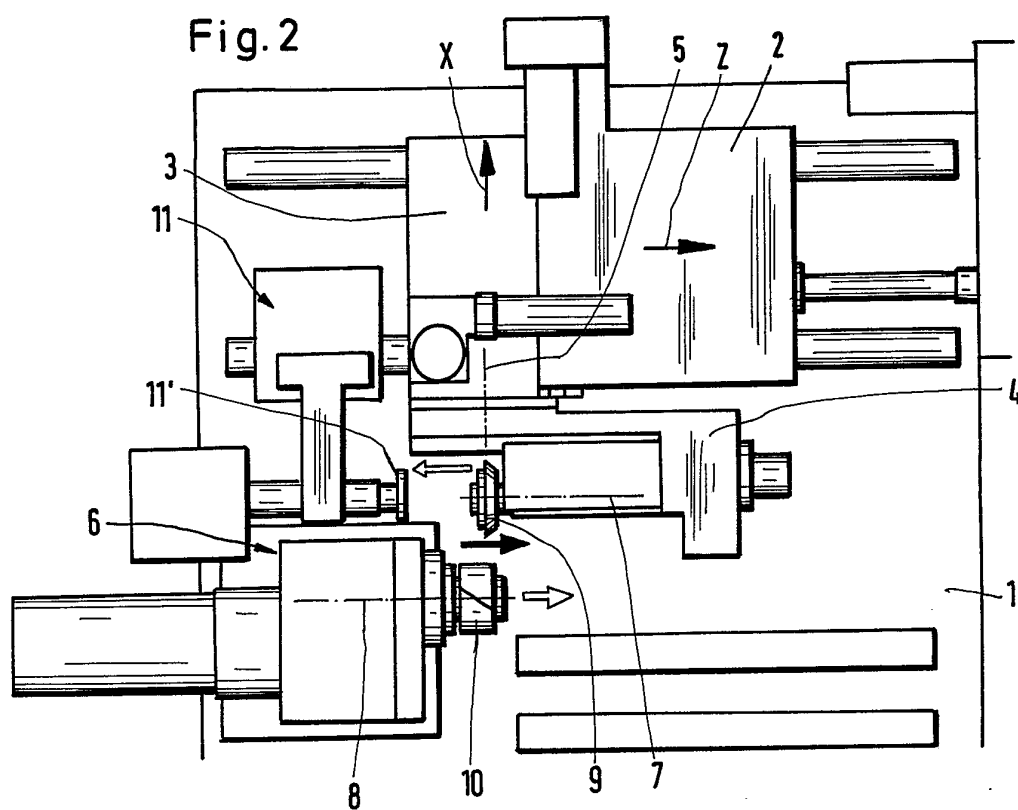
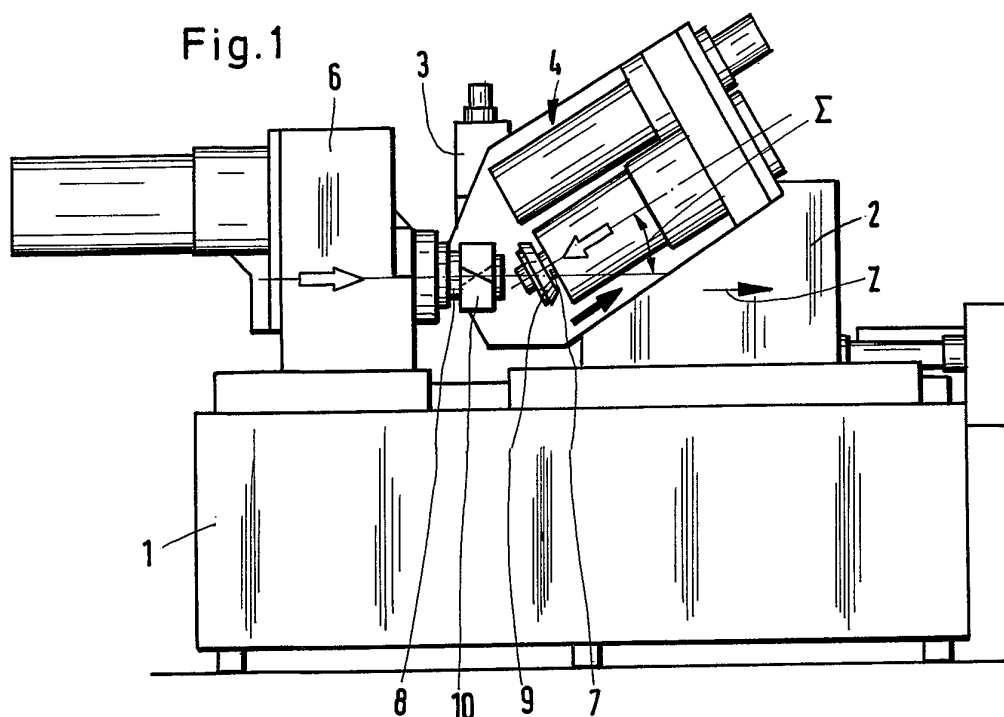


Fig. 3

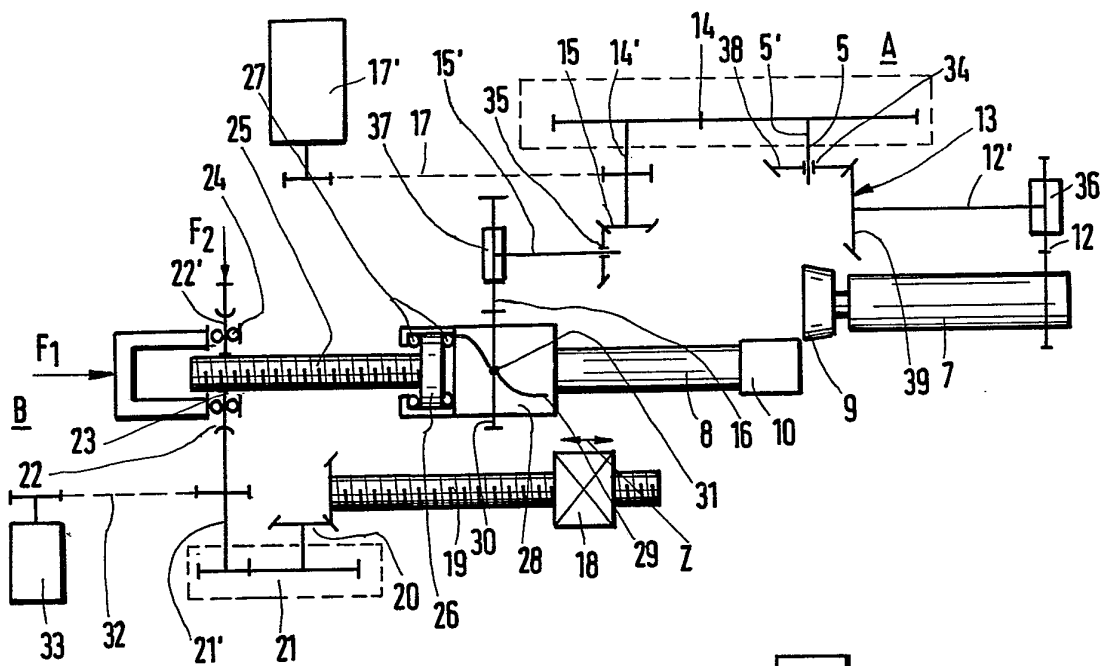


Fig.7

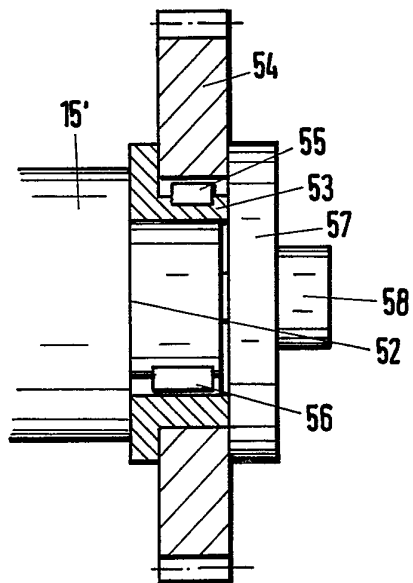


Fig.8

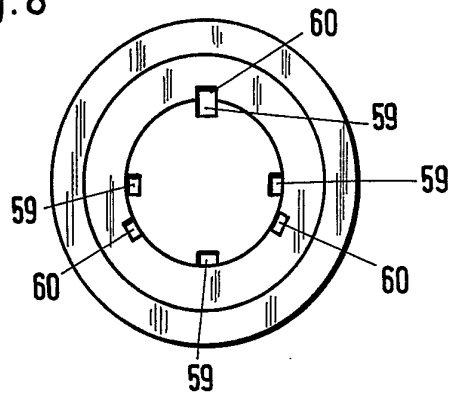




Fig. 4

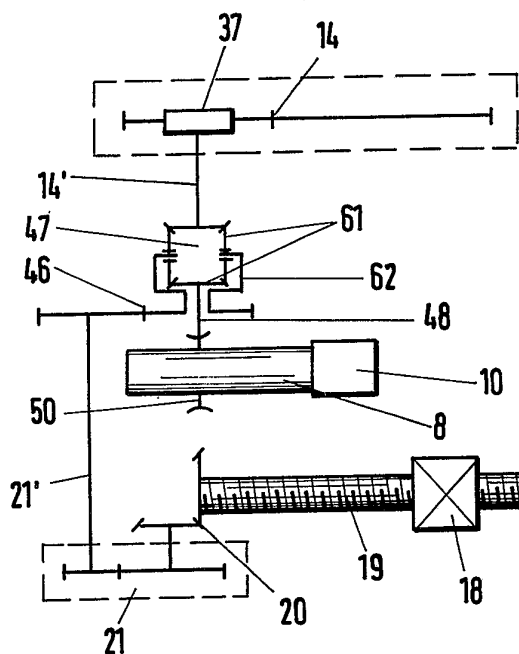


Fig. 5

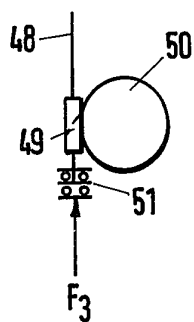


Fig. 6

