



(10) **DE 10 2005 042 278 B4** 2011.01.13

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2005 042 278.0**  
(22) Anmeldetag: **29.10.2005**  
(43) Offenlegungstag: **02.11.2006**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **13.01.2011**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **G01M 13/02** (2006.01)  
**G01M 13/00** (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(66) Innere Priorität:  
**10 2005 018 582.7 21.04.2005**

(73) Patentinhaber:  
**Bundesrepublik Deutschland, vertr. d. d.  
Bundesministerium für Wirtschaft und  
Technologie, dieses vertr. d. d. Präsidenten der  
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116  
Braunschweig, DE**

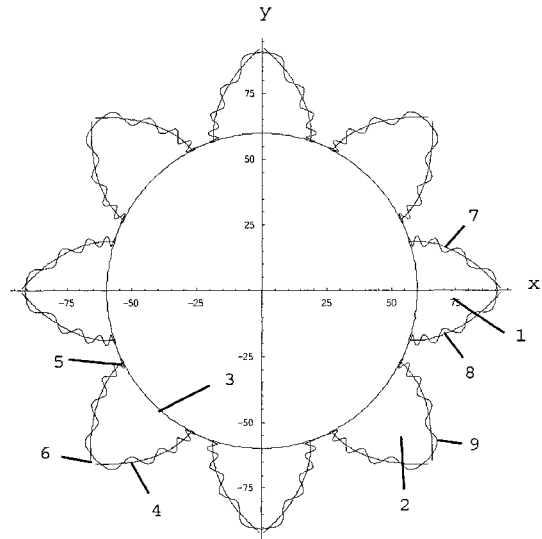
(72) Erfinder:  
**Härtig, Frank, Dr., 38116 Braunschweig, DE;  
Jusko, Otto, Dr., 31226 Peine, DE; Richter, Oliver,  
38176 Wendeburg, DE; Wäldele, Franz, Dr., 38116  
Braunschweig, DE**

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

**DE 195 19 429 C1**  
**JP 63-1 17 034 AA**

(54) Bezeichnung: **Evolventischer Prüfkörper mit überlagerten periodischen Strukturen, auch Wellen genannt, zur Beurteilung von Messgeräten und Werkzeugmaschinen**

(57) Hauptanspruch: Evolventischer Prüfkörper mit überlagerten periodischen Strukturen, auch Wellen genannt, dadurch gekennzeichnet, dass die periodischen Strukturen entlang der Eingriffslinie der Evolventenfläche verzerrungsfrei abgebildet werden können und auch entlang der Eingriffslinie definiert sind.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft einen evolventischen Prüfkörper mit überlagerten Wellenstrukturen. Mit ihm können 2D- und 3D-Messgeräte, Messverfahren, Werkzeugmaschinen und Fertigungsverfahren quantitativ oder qualitativ beurteilt werden.

**[0002]** Darüber hinaus lässt sich der Prüfkörper als Zahnrad oder Schnecke in ein Getriebe einbauen, um Untersuchungen am Laufverhalten oder an Geräuschen durchzuführen.

**[0003]** Die nachfolgenden Begriffe der Verzahnungsmesstechnik entsprechen der DIN-Norm 3960 und den Richtlinien VDI/VDE 2612 und 2607 [1, 2, 3].

**[0004]** Es ist bekannt, dass die Signalübertragungskette von Formmessgeräten durch das Abtasten von darauf zugeschnittenen Normalen geprüft und kalibriert werden kann. Seit einigen Jahren existieren dazu so genannte Mehrwellennormale [4]. Sie beschränken sich meist auf zylindrische Prüfkörper, die auf der Zylindermantelfläche eine Überlagerung von einer oder mehreren harmonischen Wellen verkörpern.

**[0005]** Ebenfalls ist bekannt, dass auch axiale Wellennormale auf Zylindern realisiert sind. Bei diesen sind die Wellen entlang der Zylinderachse ausgebildet. In Umfangsrichtung sind axiale Wellennormale kreisförmig.

**[0006]** Die typischerweise von Wellennormalen verkörperten Wellenzahlen entsprechen den genormten Grenzwellenzahlen der Formmesstechnik. Die definierten Wellen erlauben die Untersuchung des Verhaltens der gesamten Signalübertragungskette, beginnend beim Messsensor, etwa einem taktilen Taster, über den Signalverstärker und der anschließenden Digitalisierung im Messrechner bis zur digitalen Filterung in der Software.

**[0007]** Weiterhin ist bekannt, dass die Messprofile von Wellennormalen durch Frequenzanalyseverfahren, wie etwa der Fouriertransformation, ausgewertet werden können.

**[0008]** Es sind weiter Profilnormale bekannt, die ein bestimmtes Profil verkörpern, das aus einfachen geometrischen Elementen aufgebaut ist [5]. Solche Normale dienen z. B. zur Prüfung von Konturen- oder Koordinatenmessgeräten.

**[0009]** Es ist weiterhin bekannt, dass die oben erwähnten Normale wegen ihrer abweichenden Gestalt nicht zur Prüfprozesseignung von Verzahnungsmessgeräten eingesetzt werden können.

**[0010]** Es ist weiterhin bekannt, dass im Bereich der Zahnrad- und Schneckengetriebe Geräusche durch wellige Strukturen auf den Zahnflanken eines Zahnrades verursacht werden. Mit dem Ziel, die Geräusche zu minimieren, wird daher versucht, die Zusammenhänge zwischen den welligen Oberflächenstrukturen und der Geräusche quantitativ herzuleiten. Hierzu werden Testräder in ein Getriebe oder in einen Prüfstand eingebaut, um die Geräusche bei verschiedenen Drehzahlen zu erfassen. Anschließend erfolgen die Messungen der Zahnradflanken auf Koordinaten- oder Verzahnungsmessgeräten.

**[0011]** Es sind weiterhin Vorrichtungen zum Messen der Zahnflankentopographie bekannt. Hierzu gehören die Messverfahren Einflankenwälzprüfung [6] und Zweiflankenwälzprüfung [7]. Mit beiden Verfahren ist es möglich, die Summe aller Einzelfehler am Zahnrad, wie Profil-, Flankenlinien-, Teilungs- und Flankenformfehler, zu ermitteln.

**[0012]** Es ist weiterhin bekannt, dass die bestehenden Auswerteverfahren keinen Bezug auf die Verzahnungskinematik nehmen. Dieser ist aber unverzichtbar, um einen direkten Zusammenhang zwischen der welligen Oberflächenstruktur eines Zahnrades und dem Aufschwingen des Getriebezuges und somit der Geräuschbildung herzuleiten.

**[0013]** Es ist weiterhin bekannt, dass bisher keine wellenförmigen Evolventennormale existieren, die Bezug auf die Verzahnungskinematik nehmen und mit denen die Mess- und Auswerteverfahren rückführbar geprüft oder quantifiziert werden können.

**[0014]** Weiterhin ist bekannt, dass die Reproduzierbarkeit der Geräuschuntersuchungen nicht sichergestellt ist, da jedes der Testräder eine zufällige Oberflächenstruktur aufweist. Die Lebensdauer der Testräder ist jedoch beschränkt, da die Untersuchungen oftmals unter Last durchgeführt werden und sich dadurch die Ober-

flächenstruktur der Testräder durch Verschleiß ändert.

**[0015]** Der Erfindung lag daher die Aufgabe zugrunde, einen Prüfkörper mit evolventischer Grundform zu entwickeln, mit dem sich wellenförmige Abweichungen auf Verzahnungsmessgeräten oder Koordinatenmessgeräten mit entsprechender Verzahnungssoftware rückführbar prüfen lassen und zugleich Einflüsse, wie beispielsweise die Verwendung unterschiedlicher Taststifte oder unterschiedlicher Messgeschwindigkeiten, auf die Verzahnungsmessung quantitativ bestimmt werden.

**[0016]** Weiterhin soll die Fertigung des Prüfkörpers auch dazu dienen, die Fertigungsfähigkeit von Fertigungsverfahren zu quantifizieren, indem der Prüfkörper nach der Fertigung gemessen wird.

**[0017]** Weiterhin soll der Prüfkörper in einen Antriebsprozess, z. B. in einem Getriebe oder in einem Prüfstand, integriert werden können, um so Rückschlüsse auf die Laufeigenschaften oder Geräusche zu ermöglichen.

**[0018]** Zur Lösung dieser Aufgabe ist erfindungsgemäß ein evolventischer Prüfkörper mit überlagerten periodischen Strukturen der eingangs erwähnten Art dadurch gekennzeichnet, dass die periodischen Strukturen entlang der Eingriffslinie der Evolventenfläche verzerrungsfrei abgebildet und ebenso entlang der Eingriffslinie definiert sind.

**[0019]** Erfindungsgemäß ist der Prüfkörper ein Evolventenzahnrad oder zumindest eine Flanke eines Evolventenzahnrades, auf dessen Flankenfläche bzw. Flankenflächen eine wellenförmige Struktur überlagert ist. In **Fig. 1** ist der Stirmschnitt eines außenverzahnten evolventischen Prüfkörpers in Form eines Zahnrades mit überlagerten Wellen dargestellt. Die Zähne, wie beispielsweise der erste Zahn **1** und der zweite Zahn **2**, werden in mathematisch negativer Richtung gezählt. Der Grundkreis **3** ist die Bezugsgröße der fehlerfreien Evolvente **4**. Der Zahnfuß **5** liegt am Grundkreis **3**, der Zahnkopf **6** am Außenkreis der Verzahnung. Bei den Flanken unterscheidet man zwischen linker Flanke **7** und rechter Flanke **8**. Die wellenförmige Struktur **9** ist überhöht dargestellt. In **Fig. 1** ist zu erkennen, dass sich die Wellenstruktur **9** vom Zahnfuß **5** zum Zahnkopf **6** linear dehnt.

**[0020]** In **Fig. 2** sind die Eingriffsverhältnisse zweier gegeneinander laufender Zahnräder dargestellt. Das treibende Zahnrad **10** bewegt das getriebene Zahnrad **11**. Dabei berühren sich die beiden evolventischen Flanken **12** und **13** für die ausgewählte Drehstellung in ihrem gemeinsamen Berührungspunkt **14**. Während einer Drehung liegen alle Berührungspunkte auf der Eingriffslinie **15**. Unter Berücksichtigung der Verzahnungskinematik wandert der Berührungspunkt auf der Eingriffsstrecke linear zur Drehbewegung der beiden Zahnräder. Die Eingriffslinie eignet sich daher in besonderer Weise zur Darstellung der Wellen, da oszillierende Verschiebungen der Berührungspunkte unmittelbar zu oszillierenden Drehbewegungen des getriebenen Rades führen. Darüber hinaus lassen sich die Wellen verzerrungsfrei über der Eingriffslinie darstellen.

**[0021]** **Fig. 3** beschreibt beispielhaft eine Wellenstruktur **16** über der Eingriffslinie **17**. Die Amplituden der Welle entsprechen dabei Abweichungen **18** auf den Flanken. Die harmonischen Wellen beziehen sich auf eine Bezugsgröße **19**.

Mathematische Modellierung:

**[0022]** Die Flanken des Prüfkörpers lassen sich nach Gleichung 1 in kartesischen Koordinaten darstellen:

$$\begin{pmatrix} r \cdot \cos(\varphi_{b,i} + \text{hand} \cdot c \cdot z + \text{flank} \cdot \text{inv}\alpha_f) \\ r \cdot \sin(\varphi_{b,i} + \text{hand} \cdot c \cdot z + \text{flank} \cdot \text{inv}\alpha_f) \\ z \end{pmatrix} \quad \text{Gleichung 1}$$

**[0023]** Hierin sind:

- hand: Charakterisierung für die Steigungsrichtung des Zahnrades  
 -1 für linkssteigend; 0 für geradzahnt; 1 für rechtssteigend
- flank: Charakterisierung der Flanke  
 -1 für linke Flanke; 1 für rechte Flanke

$\varphi_b$ : Positionswinkel der Evolvente am Grundkreis  
 $c$ : Helixkonstante  
 $z$ : Z-Koordinate  
 $\text{inv}\alpha_f$ : Evolventenfunktion überlagert mit Wellen

**[0024]** Die Positionswinkel der Evolventen werden wie folgt dargestellt:

$$\varphi_{b,i} = - \left[ \text{type} \cdot \text{flank} \cdot \varphi_{b,1} + (i-1)\Delta\varphi_b + \frac{p}{r_0} \right] \quad \text{Gleichung 2}$$

**[0025]** Hierin sind:

$\text{type}$ : Charakterisierung der Verzahnung  
 -1 für Innenverzahnung; 1 für Außenverzahnung  
 $i$ : Zahnnummer  
 $p$ : Zahndicke  
 $r_0$ : Teilkreisradius

**[0026]** Die Lagedifferenz zwischen den einzelnen Zähnen  $\Delta\varphi_b$  wird nach Gleichung 3 berechnet.

$$\Delta\varphi_b = \frac{2\pi}{n} \quad \text{Gleichung 3}$$

**[0027]** Hierin ist  $n$  die Zähnezahl des Zahnrades. Die Helixkonstante  $c$  wird nach Gleichung 4 durch den Grundkreiswinkel  $\beta_b$  und den Grundkreisradius  $r_b$  beschrieben.

$$c = \frac{\tan \beta_b}{r_b} \quad \text{Gleichung 4}$$

**[0028]** Der Grundkreiswinkel ergibt sich aus dem Eingriffswinkel  $\alpha_0$  am Teilkreis und dem Schrägungswinkel  $\beta_0$  am Teilkreis nach Gleichung 5.

$$\beta_b = \arccos(\cos \alpha_0 \cdot \sqrt{\tan^2 \alpha_0 + \cos^2 \beta_0}) \quad \text{Gleichung 5}$$

**[0029]** Der Teilkreisradius wird anhand Gleichung 6 berechnet. Hierin ist  $m_n$  der Normalmodul.

$$r_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{n \cdot m_n}{\cos \beta_0} \quad \text{Gleichung 6}$$

**[0030]** Das wellenförmige Profil wird durch die Evolventenfunktion dargestellt.

$$\text{inv}\alpha_f = \tan(\alpha) - \alpha_f \quad \text{Gleichung 7}$$

**[0031]** Hierin sind  $\alpha$  der Eingriffswinkel der glatten Evolvente und  $\alpha_f$  der Eingriffswinkel der wellenförmigen Evolvente.

**[0032]** Der Eingriffswinkel ergibt sich allgemein nach Gleichung 8 aus dem Verhältnis des Grundkreisradius  $r_b$  zu dem Messkreisradius  $r$ .

$$\alpha = \arccos\left(\frac{r_b}{r}\right) \quad \text{Gleichung 8}$$

**[0033]** Unter Beachtung der Wälzkinematik lässt sich der Messkreisradius durch den Wälzwinkel  $l_y$  nach Gleichung 9 darstellen.

$$r = \sqrt{r_b^2 + l_y^2} \quad \text{Gleichung 9}$$

**[0034]** Für die wellenförmig überlagerten Evolventen ergeben sich die Gleichungen 10 und 11.

$$\alpha_f = \arccos\left(\frac{r_b}{r_f}\right) \quad \text{Gleichung 10}$$

$$r_f = \sqrt{r_b^2 + l_{yf}^2} \quad \text{Gleichung 11}$$

**[0035]** Die Wellen werden in Form einer Summe von harmonischen Schwingungen beschrieben, die dem Wälzweg überlagert wird. Der modifizierte Wälzweg lässt sich nach Gleichung 12 darstellen.

$$l_{yf} = \sum a_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot l_y}{\lambda_i} - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi \cdot c \cdot z \cdot r_b}{\lambda_i}\right) \quad \text{Gleichung 12}$$

**[0036]** Hierin sind:

$\alpha_i$ : Amplituden der Harmonischen  
 $\lambda_i$ : Wellenlängen der Harmonischen

**[0037]** Die bevorzugte Ausführungsform sind drahterodierte Zähne eines außenverzahnten Zahnrades. Die Flankenflächen sind dabei mit drei Wellen überlagert. Für das maßgebende Zahnrad gelten die folgenden Parameter:

Zähnezahl n:	8
Normalmodul mit in mm	19
Eingriffswinkel $\alpha_0$ in °	38
Steigungswinkel $\beta_0$ in °	0
Wälzlänge Fußkreis in mm	35
Wälzlänge Kopfkreis in mm	65

Lfd. Nr. der Harmonischen	Wellenlänge in mm	Frequenz in Wellen/100 mm	Amplitude in $\mu\text{m}$
1	25	4,0	10
2	8	12,5	7
3	2,5	40,0	5

**[0038]** Die Vorteile des erfindungsgemäßen Prüfkörpers liegen in der Anordnung seiner Wellen. Sie sind aus der Verzahnungskinematik abgeleitet. So erzeugt ein Prüfkörper, der mit konstanter Winkelgeschwindigkeit angetrieben wird, an einem fehlerfreien Gegenrad Winkelschwingungen, die linear den Wellen des Prüfkörpers zugeordnet werden können. Hierdurch können erstmals direkt und quantitativ Rückschlüsse von welligen Strukturen einer Flankenoberfläche auf das Übertragungsverhalten des Gegenrades gezogen werden.

**[0039]** Ein weiterer Vorteil des Prüfkörpers besteht in der Möglichkeit, ihn im so genannten Wälzverfahren hochgenau kalibrieren zu können. Das Wellenprofil wird hierbei in einer Eingriffsebene gemessen. Mit diesem kalibrierten Prüfkörper können Messprozesse analysiert und Messgerätefähigkeiten nachgewiesen werden. Dies ist gerade bei der Verzahnungsmesstechnik von großer Bedeutung, da die Messpunkte je nach verwendeter Messstrategie auf der Flanke unterschiedlich verteilt aufgenommen werden und dies zu unterschiedlichen Messergebnissen führen kann.

**[0040]** Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Prüfkörpers besteht in der Möglichkeit, ihn unter verschiedenen Messbedingungen zu messen, um so Messgeräte und Messverfahren zu beurteilen. Hierzu kann der Prüfkörper beispielsweise mit unterschiedlichen Taststiften, unterschiedlicher Messpunktedichte oder mit unterschiedlicher Messgeschwindigkeit gemessen werden.

**[0041]** Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Prüfkörpers besteht in der Möglichkeit, mit ihm unterschiedliche Messgeräte, wie Koordinatenmessgeräte, Verzahnungsmessgeräte oder Computertomographen, zu vergleichen, indem ein kalibrierter Prüfkörper mit diesen Messgeräten gemessen wird und die Ergebnisse

mit den kalibrierten Werten verglichen werden.

**[0042]** Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Prüfkörpers besteht in der Möglichkeit, ihn zu messen und Auswertalgorithmen dahingehend zu prüfen, ob und in welcher Qualität sie die aufgebrachten Wellen herausfiltern können.

**[0043]** Darüber hinaus kann die Fertigung des Prüfkörpers verwendet werden, um Werkzeugmaschinen und Fertigungsverfahren zu quantifizieren. In Zahnfußnähe werden kurzwellige Strukturen gefertigt, die in Richtung des Zahnkopfes kontinuierlich langwelliger werden. Die nachgeschaltete Messung der gefertigten Prüfkörper ermöglicht direkte Rückschlüsse auf die Qualität bzw. Quantität des Fertigungsverfahrens.

**[0044]** Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Prüfkörpers besteht schließlich in der Möglichkeit, ihn als Zahnrad oder Schnecke zu fertigen und ihn in ein Getriebe oder einen Prüfstand einzubauen, um so den Rückschluss auf Laufeigenschaften oder Geräusche zu erhalten.

[1] Norm DIN 3960; Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung, 1987

[2] Richtlinie VDI/VDE 2612; Profil- und Flankenlinienprüfung an Zylinderrädern mit Evolventenprofil; 2000

[3] Richtlinie VDI/VDE 2607; Rechnergestützte Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil; 2000

[4] Richtlinie VDI/VDE 2631; Blatt 2, Formprüfung – Bestimmung der Empfindlichkeit der Signalübertragungskette

[5] Richtlinie VDI/VDE 2629; Blatt 1, Genauigkeit von Konturenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Konturenmessgeräte nach dem taktilen Tastschnittverfahren

[6] Patentschrift DE 195 19 429 C1; Vorrichtung zum Messen der Zahnflankentopographie von Getriebeverzahnungen, Veröffentlichungstag 02.10.1996

[7] Master Gear for Detecting Error of Tooth Trace Direction, Japanese Patent Office, Publication number JP 63177034 A, Date of publication of application 21.07.1988

### Patentansprüche

1. Evolventischer Prüfkörper mit überlagerten periodischen Strukturen, auch Wellen genannt, **dadurch gekennzeichnet**, dass die periodischen Strukturen entlang der Eingriffslinie der Evolventenfläche verzerrungsfrei abgebildet werden können und auch entlang der Eingriffslinie definiert sind.

2. Prüfkörper nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Prüfkörper ein geradverzahntes oder schrägverzahntes Evolventenzahnrad ist.

3. Prüfkörper nach den Ansprüchen 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Prüfkörper eine Außenverzahnung oder Innenverzahnung verkörpert.

4. Prüfkörper nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Prüfkörper eine Evolventenschnecke ist.

5. Prüfkörper nach den Ansprüchen 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass sich die periodischen Strukturen auf eine Referenzlänge auf der Eingriffslinie beziehen.

6. Prüfkörper nach den Ansprüchen 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine periodische Struktur auf der Evolventenfläche aufgebracht ist.

7. Prüfkörper nach den Ansprüchen 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass bei einem Prüfkörper mit mehreren Zähnen oder Gängen die periodischen Strukturen so aufeinander abgestimmt sind, dass in einer gemeinsamen Eingriffsebene die gleichen Fehler wirken.

8. Prüfkörper nach den Ansprüchen 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Prüfkörper ein Testrad oder eine Testschnecke als Teil eines Getriebes oder eines Prüfstandes verkörpert.

9. Prüfkörper nach dem Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die bei seiner Messung ermittelten Werte die Grundlage für die Bewertung von Auswertalgorithmen darstellen, die sich auf die auf dem Prüfkörper abgebildeten Wellen beziehen.

10. Prüfkörper nach dem Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die bei seiner Konstruktion festgelegten Werte die Grundlage für die Bewertung von Auswertalgorithmen darstellen, die sich auf die auf den Prüfkörper abgebildeten Wellen beziehen.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

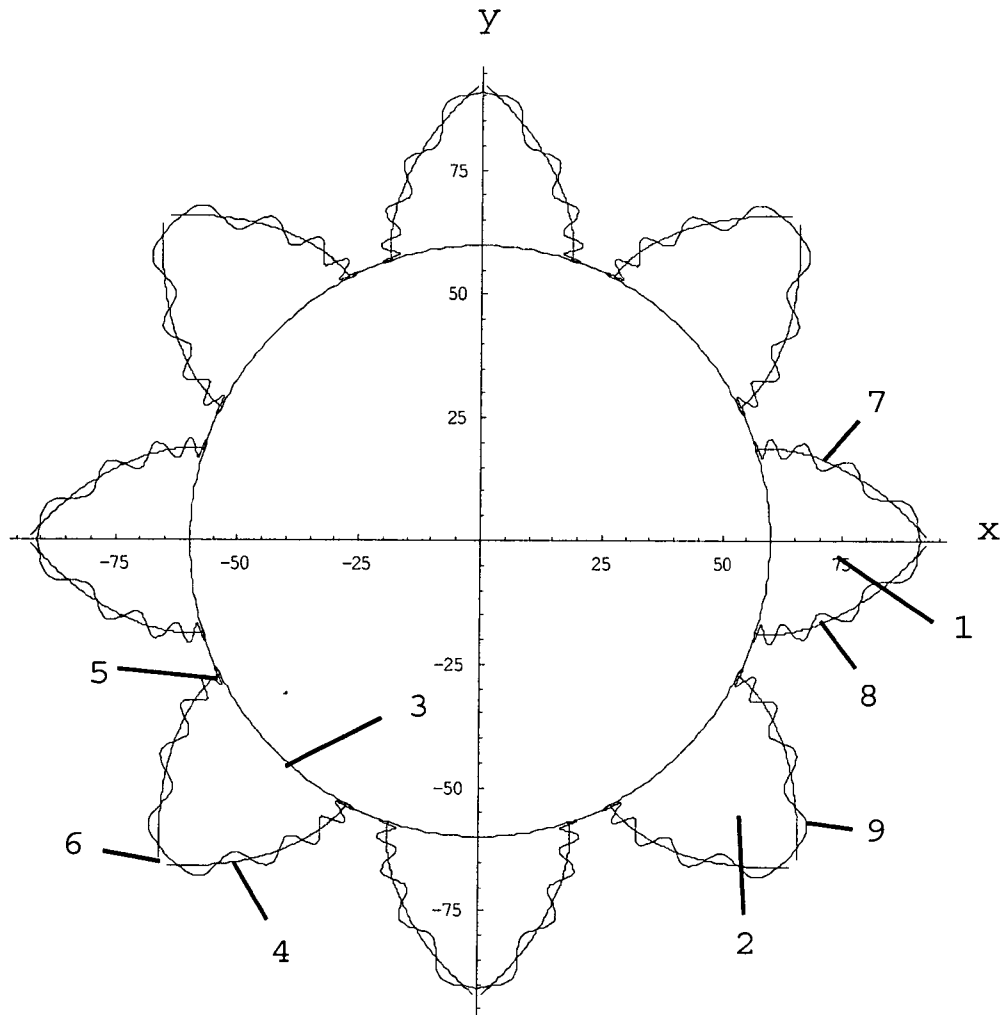


Fig. 1



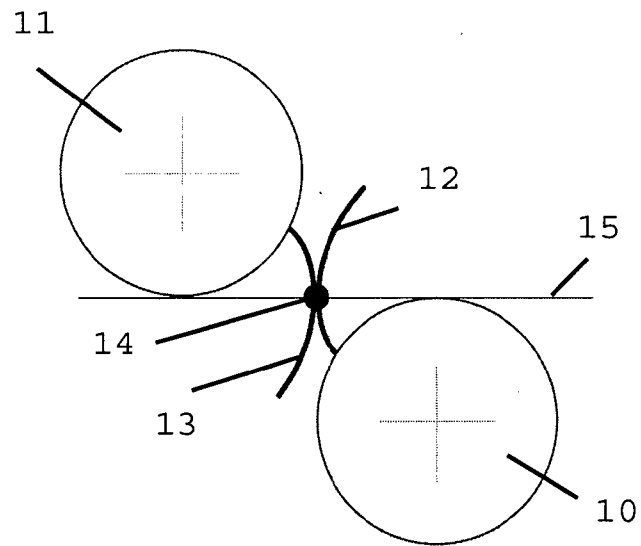


Fig. 2

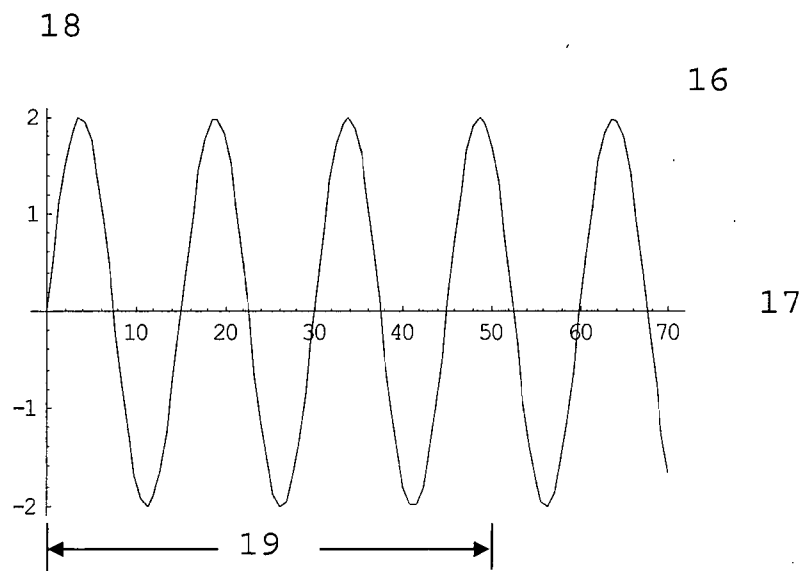


Fig. 3