



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT  
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

Int. Cl.<sup>3</sup>: B 23 P

1/12



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

**PATENTSCHRIFT** A5

11

**625 447**

21 Gesuchsnummer: 2419/78

22 Anmeldungsdatum: 06.03.1978

24 Patent erteilt: 30.09.1981

45 Patentschrift veröffentlicht: 30.09.1981

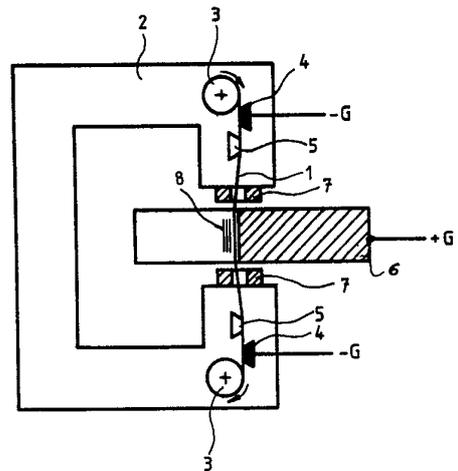
73 Inhaber:  
AG für industrielle Elektronik AGIE Losone bei Locarno, Losone

72 Erfinder:  
Ernst Bühler, Tenero

74 Vertreter:  
Dr. A.R. Egli & Co., Patentanwälte, Zürich

**54 Verfahren und Vorrichtung zum Drahterodieren unter Berücksichtigung der Auslenkungen der Drahtelektrode.**

57 Es wird die durch verschiedene Kraftwirkungen verursachte Auslenkung der Drahtelektrode (1) durch ein Wegaufnehmersystem (7) vermessen und die Vorschubbahn so korrigiert, dass sich die Drahtelektrode im Werkstück (6) immer auf der vorgeschriebenen Bahn befindet und somit Konturfehler eliminiert werden.



## PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zum Drahterodieren unter Berücksichtigung der durch den Erosionsprozess verursachten Auslenkung der Drahtelektrode, dadurch gekennzeichnet, dass durch mindestens ein Wegaufnehmersystem (7), welches zwischen Drahtführung (5) und Werkstück (6) um die Drahtelektrode (1) angebracht ist, die Auslenkung der Drahtelektrode bezüglich der Ruhelage vermessen wird, und dass mit Hilfe dieser Auslenkinformation  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  die Vorschubbahn ständig so korrigiert wird, dass sich die Drahtelektrode (1) immer auf der vorgeschriebenen Bahn befindet.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Korrektur der Vorschubbahn so erreicht wird, dass einem X-Y-Hauptachsenantrieb (25, 26) ein Stellbefehl  $X-\Delta X$ ,  $Y-\Delta Y$  zugeleitet wird, der aus der jeweiligen Sollposition X und Y und dem davon subtrahierten Auslenkfehler  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  zusammengesetzt ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Korrektur der Vorschubbahn so erreicht wird, dass über Regelverstärker (28) und einem X-Y-Hilfsachsenantrieb (29, 30) die Drahtführung (5) solange bezüglich einem Führungsarm (2) korrigiert wird, bis das Wegaufnehmersystem (7), welches fest mit dem Führungsarm (2) verbunden ist, keinen Auslenkfehler  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  mehr feststellt.

4. Verfahren nach den Ansprüchen 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, dass zum stromlosen Positionieren und Ausrichten der Drahtelektrode (1) die Drahtelektrode einer elektrisch leitenden oder nichtleitenden Referenzfläche angenähert wird, bis das Wegaufnehmersystem (7) einen Auslenkfehler  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  anzeigt, und anschliessend in der Gegenrichtung bewegt wird, bis der Auslenkfehler  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  wieder den Wert Null annimmt.

5. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Wegaufnehmersystem (7) Sensoren (9, 10, 11, 11a) zur Erfassung der Auslenkung der Drahtelektrode (1) enthält.

6. Vorrichtung nach Anspruch 5, gekennzeichnet durch vier kreuzweise in X-Y-Hauptachsenrichtung um die Drahtelektrode (1) angeordnete Messelektroden (9), die ständig vom Dielektrikum (8), das der Bearbeitungszone zugeführt wird, umströmt sind, und durch die Anordnung einer Wechselspannungsquelle (12) zwischen Drahtelektrode (1) und jeder dieser Messelektroden (9), wobei die zwischen Drahtelektrode (1) über das Dielektrikum (8) und die Messelektroden (9) fließenden Wechselströme mittels Absolutwertbilder (14) gleichrichtbar und messbar sind.

7. Vorrichtung nach Anspruch 5, gekennzeichnet durch je eine Lichtquelle (10) und einen Doppellichtsensor (11) in Achsenrichtung X und Y, die so um die Drahtelektrode (1) angeordnet sind, dass bei nichtausgelenkter Drahtelektrode (1) jeweils auf beiden Sensorhälften (11a, 11b) der Doppellichtsensoren (11) eine gleich breite Schattenzone verursacht wird und bei ausgelenkter Drahtelektrode (1) die Schattenzone auf der einen Sensorhälfte (11a) soviel vergrössert, wie sie auf der anderen Sensorhälfte (11b) verkleinert ist, und dass die dadurch veränderten Ausgangssignale der Doppellichtsensoren (11) über Verstärker (16) messbar und verstärkbar sind.

8. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass zur Weiterverarbeitung der Ausgangssignale  $X+$ ,  $X-$ ,  $Y+$ ,  $Y-$  des Wegaufnehmersystems (7) mindestens ein Analogrechner (21) mit einem Summenbildner (18), einem Inverter (19), einem Differenzbildner (17) und einer Divisionschaltung (20) vorgesehen ist, wobei der Summenbildner (18) und der Inverter (19) den Mittelwert der positiven und negativen Komponente jeder Achsenrichtung X, Y berechnen und der Differenzbildner (17) diesen Mittelwert von der positiven Komponente subtrahiert und die Divisionschaltung (20) diesen Wert durch den Mittelwert dividiert.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet,

dass ein dem Analogrechner (21) nachgeordneter Analog-Digitalwandler (22) die Signale der Auslenkinformation  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  aus dem Analogrechner quantisiert.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass dem Analog-Digitalwandler (22) ein Festwertspeicher (23) nachgeordnet ist, auf dessen Adresseneingänge die quantisierten Ausgangssignale des Analog-Digitalwandlers gelangen, wobei jeder Speicherplatz des Festwertspeichers (23) einen gegebenenfalls korrigierten Wert für die Auslenkung der Drahtelektrode (1) beinhaltet und somit eine Nichtlinearität des Wegaufnehmersystems (7) kompensiert.

15 Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Drahterodieren unter Berücksichtigung der durch den Erosionsprozess verursachten Auslenkungen der Drahtelektrode.

20 In der Drahtschneidetechnik haben sich in letzter Zeit als Bearbeitungs-Impulsquellen sogenannte Kurzimpuls-Generatoren durchgesetzt, welche einen grossen Fortschritt in der Bearbeitungsgeschwindigkeit brachten. (Zum Beispiel beschrieben in der GB-PS 1 533 949).

25 Schwingungen auf der Drahtelektrode konnten mit diesem Generatortyp zwar eliminiert werden, doch bewirkten die stark erhöhten Bearbeitungskräfte eine dauernde Auslenkung der biegeempfindlichen Drahtelektrode.

Diese Auslenkung welche der Bearbeitungsrichtung entgegengesetzt ist, verursacht bei gekrümmten Schnittkonturen bedeutende Konturfehler.

30 Andere Kräfte, verursacht z. B. durch Gasblasen im Dielektrikum oder von turbulenten Strömungen desselben oder Materialspannungen in der Drahtelektrode selbst, können ebenfalls eine temporäre, unkontrollierte Auslenkung der Drahtelektrode bewirken.

Die Beeinflussung der Schnittkontur durch Auslenkung der Drahtelektrode muss verhindert werden.

35 Eine Lösung wurde im japanischen Patent Nr. 119 393/74 bekannt. Dort wird eine theoretisch rechnerische Ermittlung der Auslenkung und deren Kompensation über die numerische Steuerung vorgeschlagen.

40 Dieses Verfahren mag auf einer geraden Schnittkontur genügen, wirft aber in einer gekrümmten Schnittkontur grösste Probleme auf, da nicht berechnet werden kann, auf welcher Bahn sich die Auslenkung von einer Achsrichtung in die andere verhält. Das Verfahren ist darum in der Praxis kaum anwendbar.

45 Eine weitere Lösung wird in der DE-OS 2 635 766 offengelegt und darin vorgeschlagen, die Generatorleistung und die Bearbeitungsgeschwindigkeit umso mehr zu reduzieren, je gekrümmter die Schnittkontur verläuft.

Dieses Verfahren hat den Nachteil einer starken Schnittleistungseinbusse bei häufig gekrümmten Schnittkonturen, zudem wird der Fehler offensichtlich nur teilweise kompensiert.

50 Eine andere Lösung schlägt man in der CH-PS 591 919 vor, wo die Drahtelektrode mit Zusatzströmen und Zusatzspannungen beaufschlagt wird, um kompensierende elektromagnetische und elektrostatische Kräfte auf die Drahtelektrode wirken zu lassen.

60 Leider bringt dies auch zusätzliche Belastung durch Stromwärme und Lichtbogenentladungen auf die Drahtelektrode, was sich wiederum in Schnittleistungseinbussen niederschlägt. Ausserdem sind die elektromagnetischen Kräfte nur bei ferromagnetischen Werkstücken wirksam.

65 Keine einzige dieser drei Lösungen kann Fehler durch Gasblasen und turbulente Strömungen im Dielektrikum oder durch Materialspannungen in der Drahtelektrode beheben.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die beschriebenen Konturfehler zu vermeiden und damit die Präzision des Drahtschneidverfahrens bedeutend zu steigern, ohne Einbußen in der Bearbeitungsgeschwindigkeit hinnehmen zu müssen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäss dadurch gelöst, dass die Drahtelektrode 1 durch mindestens ein Wegaufnehmersystem 7, welches zwischen Drahtführung 5 und Werkstück 6 um die Drahtelektrode 1 angebracht ist, in ihrer Auslenkung bezüglich der Ruhelage vermessen wird und dass mit Hilfe dieser Auslenkinformation  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  die Vorschubbahn ständig so korrigiert wird, dass sich die Drahtelektrode 1 immer auf der vorgeschriebenen Bahn befindet.

Die mit der Erfindung erzielbaren Vorteile bestehen darin, dass jede Auslenkung der Drahtelektrode rückwirkungsfrei und genau erfasst werden kann und eine Korrektur dieser Auslenkung in einfacher Weise automatisch ausgeführt werden kann. Eine Reduktion der maximal möglichen Bearbeitungsgeschwindigkeit ist auch auf stark gekrümmten Schnittkonturen nicht erforderlich. Weiter ist es durch die Erfindung erstmals möglich, die Drahtelektrode stromlos zu Referenzflächen auf dem Werkstück oder auf Drahtausrichtgeräten zu positionieren. Es wird damit eine höhere Positioniergenauigkeit ohne Beschädigung von Werkstück oder Drahtausrichtgerät erreicht.

Ausführungsbeispiele sind anhand der Fig. 1 bis 11 dargestellt und werden im folgenden beschrieben. Es bedeuten:

Fig. 1 Anordnung zum Drahtschneiden nach der Erfindung.

Fig. 2 Ausgelenkte Drahtelektrode im Querschnitt.

Fig. 3 Gekrümmte Bahnkontur.

Fig. 4 Wegaufnehmersystem nach dem elektrolytischen Verfahren.

Fig. 5 Wegaufnehmersystem nach dem Lichtsensor-Verfahren.

Fig. 6 Elektrischer Schaltplan für das elektrolytische Verfahren.

Fig. 7 Elektrischer Schaltplan für das Lichtsensor-Verfahren.

Fig. 8 Elektrischer Schaltplan für den Analogrechner.

Fig. 9 Diagramm für den Analogrechner.

Fig. 10 Schematische Darstellung des Aufbaus für eine Korrektur über den Hauptachsenantrieb.

Fig. 11 Schematische Darstellung des Aufbaus für eine Korrektur über einen Hilfsachsenantrieb.

In Fig. 1 wird die Anordnung zum Drahtschneiden nach der Erfindung prinzipiell dargestellt.

Die Drahtelektrode 1 wird von einer ersten Drahtspule 3 in bekannter Weise unter Zugspannung abgewickelt, durchläuft die Bearbeitungszone im Werkstück 6 und wird von einer zweiten Drahtspule 3 aufgewickelt. Das Dielektrikum 8, welches beim Drahtschneiden gewöhnlich aus aufbereitetem Wasser mit einem Leitwert von 1 bis 100  $\mu\text{s/cm}$  besteht, wird in die Bearbeitungszone geleitet. Zwischen dem Werkstück 6 über Stromkontakte 4 und der Drahtelektrode 1 werden die vom Generator gelieferten Bearbeitungsimpulse angelegt +G, -G. Die Drahtführungen 5 haben die Aufgabe, die Drahtelektrode 1 in einer definierten Lage zu halten. Drahtspulen 3, Stromkontakte 4 und Führungen 5 sind gewöhnlich auf einem Führungsarm 2 montiert. Diese ganze Anordnung führt in bekannter Weise eine Bewegung relativ zum Werkstück 6 aus, entsprechend der gewollten Schnittkontur.

Trotz höchstmöglich aufgebrachter Zugspannung auf der Drahtelektrode 1 bleibt dieselbe je nach Bearbeitungskräften zwischen etwa 5 und 100  $\mu\text{m}$  in der angedeuteten Weise ausgelenkt. Zur Erfassung dieser Auslenkung dient ein oberes und eventuell ein unteres Wegaufnehmersystem 7. Das untere Wegaufnehmersystem 7 wird besonders dann angebracht, wenn das Verfahren nach Anspruch 3 eingesetzt wird. Die Wegauf-

nehmersysteme 7 sind ebenfalls fest mit dem Führungsarm 2 verbunden.

In Fig. 2 ist die Drahtelektrode 1 stark vergrössert im Querschnitt dargestellt. Die gestrichelten Umrisse deuten dabei die Ruhelage der Drahtelektrode 1 an, die ausgezogenen Umrisse deren Lage unter Belastung durch die Bearbeitungskräfte. Die Drahtelektrode 1 wird um den Betrag a in irgendeiner Richtung ausgelenkt, und es stellt sich die Aufgabe, diesen Auslenkfehler durch die Komponenten  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  in X- und Y-Hauptachsenrichtung zu vermessen und zu korrigieren.

Fig. 3 zeigt anhand einer vorgeschriebenen, gekrümmten Bahn A-B, was passiert, wenn eine Auslenkung a vorliegt. Wird keine Korrektur vorgenommen, verläuft die geschnittene Kontur auf der erheblich abweichenden Bahn C-D. Erfindungsgemäss lässt man die Drahtführung 5 eine korrigierte Bahn E-F ausführen, welche in jedem Zeitpunkt um den vermessenen Betrag -a oder deren Komponenten  $-\Delta X$  und  $-\Delta Y$  von der vorgeschriebenen Bahn abweicht. Die dabei im Werkstück 6 geschnittene Kontur wird dadurch identisch mit der geforderten Bahn A-B.

Fig. 4 illustriert ein besonders geeignetes Messverfahren für das Wegaufnehmersystem 7. Das Verfahren ist bekannt für Leitfähigkeitsmesszellen für Flüssigkeiten. Dabei wird zwischen zwei Elektroden eine Wechselspannung angelegt und über den Messstrom und die mechanischen Abmessungen der Zelle auf den Leitwert geschlossen. Die grundlegende Beziehung lautet:

$$\kappa = \frac{l}{R \cdot A}$$

$\kappa$ : Leitwert in  $\mu\text{s/cm}$

l: Länge der gemessenen Flüssigkeitssäule in cm

A: Querschnitt der gemessenen Flüssigkeitssäule in  $\text{cm}^2$

R: Aus Spannung und Strom ermittelter Widerstand in  $\text{M}\Omega$ .

In der erfindungsgemässen Anordnung wird die Messzelle vierfach ausgeführt, und ausserdem wird nicht auf den Leitwert, sondern auf die Länge l geschlossen.

Die Drahtelektrode 1 dient als Gemeinschaftselektrode für alle vier Messzellen, darumherum sind kreuzweise vier Messelektroden 9 in den Hauptachsenrichtungen X+, X-, Y+, Y- angebracht. Die ganze Anordnung wird vom aufbereiteten Dielektrikum mit einem Leitwert von 1-100  $\mu\text{s/cm}$  durchströmt. Die Geometrie der Zellen wird so gewählt, dass beim angegebenen Bereich des Leitwertes und Auslenkungen der Drahtelektrode 1 von etwa 5 bis 100  $\mu\text{m}$  Widerstände R etwa im Bereich zwischen 100  $\Omega$  und 1  $\text{M}\Omega$  zu messen sind.

Fig. 6 illustriert eine geeignete Messschaltung für die Anordnung nach Fig. 4.

Eine Wechselspannungsquelle 12 von z.B. 10 V Effektivwert und z.B. mit der Netzfrequenz 50 oder 60 Hz wird über die Stromzuführung 4 oder ähnliche Mittel auf die Drahtelektrode 1 gebracht und andererseits über je einen Absolutwertbildner 14 auf die vier Messelektroden 9 geführt. Es muss eine Wechselspannung verwendet werden, um keine elektrolytischen Effekte zu erzeugen wie Korrosion und Abtrag von Drahtelektrode 1 und Messelektrode 9. Die dabei verwendeten Frequenzen und Spannungsformen sind von sekundärer Bedeutung, wichtig ist aber die Symmetrie der Wechselspannung. Die Wechselspannungsquelle 12 könnte z.B. auch in ihrem Effektivwert der verwendeten Leitfähigkeit des Dielektrikums angepasst werden, um den Analogrechner 21 nach Fig. 8 nicht zu überfordern. Die Absolutwertbildner 14 haben die Aufgabe, die über die variierenden Widerstände 13 der Messstrecke fliessenden Wechselströme gleichzurichten und in Spannungssignale zu transformieren.

Die vier Ausgangssignale /Y-, /Y+, /X-, /X+ können also nur positive Werte annehmen. Für den Absolutwertbildner

14 sei auf das Buch vom McGraw-Hill-Verlag Düsseldorf/New York: Applications of Operational Amplifiers 1973 von Jerold Graeme, Seite 127, verwiesen.

Ein anderes, sehr geeignetes Messverfahren für das Wegaufnehmersystem 7 ist in Fig. 5 dargestellt. Eine Lichtquelle 10 und ein Doppellichtsensor 11 sind pro Hauptachsenrichtung X, Y so um die Drahtelektrode 1 angeordnet, dass der durch die Drahtelektrode 1 verursachte Schatten die Sensorhälften 11a, 11b in Ruhelage gleichmässig bedeckt.

In ausgelenkter Position bewirkt die Asymmetrie des Schattens eine entsprechende Asymmetrie der Beleuchtungsstärke auf den beiden Sensorenhälften 11a, 11b und damit eine entsprechende Änderung deren Ausgangssignale. Als Lichtquelle 10 kommen Glühlampen oder besser Leuchtdioden in Frage. Als Doppellichtsensor 11 kann z. B. eine Doppelfotodiode vom Typ STDD-210 von Sensor Technology, Chatsworth/California, USA, verwendet werden. Dieses Bauteil hat in einem Abstand von nur 20  $\mu\text{m}$  zwei Fotodioden eingebaut. Bei Fotodioden wird bekanntlich durch die Messung des Sperrstromes bei angelegter Spannung in Sperrichtung auf die Beleuchtungsstärke geschlossen. Bei dieser Anordnung ergibt sich auch die Möglichkeit, die Lichtquellen 10 gepulst, beispielsweise mit einer Frequenz von 1 bis 100 kHz, zu betreiben und dann nur den Wechselstromanteil der Doppellichtsensoren auszuwerten. Dies würde eine höhere Störsicherheit ergeben.

Fig. 7 zeigt eine Lösung, wie nach dem Lichtsensor-Verfahren gemessen werden kann. Eine Gleichspannungsquelle 15 von beispielsweise 20 V beaufschlagt die Fotodioden der Doppellichtsensoren 11 mit Sperrspannung. Entsprechend der Beleuchtungsstärke fließen von den Ausgängen X+, X-, Y+, Y- die Sperrströme der Fotodioden, welche über die Verstärker 16 verstärkt und in analoge Spannungssignale /X+/, /X-/, /Y+/, /Y-/ umgewandelt werden. Die Art dieser Signale ist prinzipiell gleich wie jene in Fig. 6. Beide können im Analogrechner 21 weiterverarbeitet werden.

Fig. 8 illustriert diesen Analogrechner 21. Dieser ist für die X-Achse detailliert und für die Y-Achse als Block dargestellt. Die Aufgabe des Analogrechners 21 besteht darin, die Messwerte so aufzubereiten, dass Einflüsse wie: Leitwert des Dielektrikums 8, Durchmesser der Drahtelektrode 1, Stärke der Lichtquelle 10, Alterung der Doppellichtsensoren, Verschmutzung, Temperatur und ähnliches eliminiert werden.

Dies wird dadurch gelöst, dass der Mittelwert der beiden Absolutwerte /X+/, /X-/ jeder Achsenrichtung berechnet wird, dieser Mittelwert vom Absolutwert in positiver Achsenrichtung /X+/ subtrahiert wird und der erhaltene, positive oder negative Betrag zum vorher berechneten Mittelwert in Relation gesetzt wird. Man könnte dabei von einem relativen Fehler  $\Delta X$ , welcher von -1 bis +1 variieren kann, sprechen. Mittels einer durch Eichung zu ermittelnden Konstante (z. B. 100  $\mu\text{m}$ ) kann durch Multiplikation mit dem relativen Fehler die tatsächliche Auslenkung  $\Delta X$  in  $\mu\text{m}$  gefunden werden. Da aber sowieso mit Spannungspegeln operiert wird, z. B. -10 V bis 10 V, erübrigt sich diese Konstante, es ist nur darauf zu achten, dass die Gesamtverstärkung der Messanordnung und des Analogrechners so eingestellt ist, dass der Analog-Digitalwandler 22 in Fig. 10 den der Auslenkung entsprechenden Digitalwert ausgibt.

Fig. 9 zeigt eine graphische Darstellung des Rechenvorganges für die X-Achse. An den Eingängen fallen die Absolutwerte /X+/, /X-/ an. Diese werden in einem Summenbild 18 der Fig. 8 summiert. Da dieser Summenbild invertiert, ist ein Inverter 19 nachgeschaltet, der gleichzeitig infolge seiner  $A = 0,5$  die Summe durch 2 teilt, was den arithmetischen Mittelwert von /X+/, /X-/ ergibt. In einem Differenzverstärker 17 wird dieser Mittelwert vom Absolutwert /X+/ subtrahiert. (Im Diagramm von Fig. 9 durch Umkehrung der

Richtung des Mittelwertes  $\frac{/X+/ + /X-/}{2}$  und Summierung

zum Absolutwert /X+/. Es entsteht dabei die Komponente  $\Delta X$ , welche nun positive oder negative Werte annehmen kann und noch mit den verschiedenen beschriebenen Störeinflüssen behaftet ist. Diese Störeinflüsse werden durch die Division in der Divisionsschaltung 20 unterdrückt. Man erhält am Ausgang die Komponente  $\Delta X$  als positiven oder negativen Wert, welcher sich proportional zur gesuchten Komponente  $\Delta X$  des Auslenkfehlers verhält. Unter der Voraussetzung, dass Störeinflüsse auf die Absolutwerte /X+/, /X-/ gleichmässig einwirken, treten sie bei der Division im Zähler und im Nenner auf und können somit gekürzt werden. Für die Y-Richtung ist ein identischer Analogrechner 21 vorhanden.

Für die Erläuterung der verwendeten Schaltungen: Differenzbilder 17, Summenbilder 18, Inverter 19, sei auf das Buch «Electronics for Engineers» der Cambridge University Press, England, 1973, Seiten 120–123 und 111 verwiesen. Für die Divisionsschaltung 20 sei auf das RCA-Handbuch 1975 «Linear Integrated Circuits» Nr. SSD-201C, Seiten 449 und 450 hingewiesen.

Fig. 10 zeigt den schematischen Aufbau für eine Korrektur über den Hauptachsenantrieb 25, 26. Unter Hauptachsenantrieb wird das Vorschubsystem verstanden, das die von der numerischen Steuerung 27 vorgegebene Relativbewegung zwischen Drahtelektrode 1 und Werkstück 6 in bekannter Weise ausführt. Die vom Wegaufnehmersystem 7 vermessene Auslenkung der Drahtelektrode 1 wird über die Analogrechner 21 in den Komponenten  $\Delta X$  und  $\Delta Y$  des Auslenkfehlers ausgegeben. Über die Analog-Digital-Wandler 22 wird diese analoge Auslenkinformation  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  z. B. mit einer Auflösung von 8 bit quantisiert. Es würden also z. B. 128 Abstufungen zu je 1  $\mu\text{m}$  mit Vorzeichen zur Verfügung stehen. Es ergäbe sich dadurch eine maximal messbare Auslenkung der Drahtelektrode 1 von 128  $\mu\text{m}$  in alle Richtungen.

Ein eventuelles nicht lineares Verhalten des Wegaufnehmersystems 7 kann leicht über die Festwertspeicher 23 kompensiert werden, indem jedem verzerrten Digitalwert der Ausgangssignale  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  der Analog-Digital-Wandler ein richtiger Wert im entsprechenden Speicherplatz zugeordnet wird. Die richtigen Werte können dabei durch eine Eichung ermittelt werden. Als Festwertspeicher kommt z. B. ein 8  $\times$  8 bit PROM (Programmierbarer «Nurlesespeicher») in Frage.

Im Signalverknüpfungspunkt 24 wird vom Sollwert X bzw. Y der Auslenkfehler  $\Delta X$  bzw.  $\Delta Y$  subtrahiert und die so modifizierten Sollwerte  $X - \Delta X$  bzw.  $Y - \Delta Y$  dem X-Hauptachsenantrieb 25 und dem Y-Hauptachsenantrieb 26 zugeleitet.

Der Signalverknüpfungspunkt 24 hat dabei mehr symbolischen Charakter. Es könnte z. B. aus einer digitalen, festverdrahteten Rechenlogik bestehen oder aber viel wahrscheinlicher aus einem kleinen Unterprogramm im normalerweise schon vorhandenen programmierbaren Rechner der numerischen Steuerung 27 bestehen.

In diesem Zusammenhang sei auch erwähnt, dass mit Hilfe der heute vorhandenen Technologie, wie Mikroprozessoren, Multiplexer usw., die Aufgabe der Messwertaufbereitung 21, 22, 23, 24 rein «software-mässig», d. h. nur durch Programmierung eines Rechners, gelöst werden kann. Es würden dann die vier Ausgänge /X+/, /X-/, /Y+/, /Y-/ des Wegaufnehmersystems 7 von einem Analog-Digital-Wandler 22 im Zeit-Multiplexbetrieb abgefragt und die digitalen Werte einem programmierbaren Rechner zugeleitet. Dieser führt dann die ganze beschriebene Messwertaufbereitung digital durch und gibt die Signale  $X - \Delta X$  und  $Y - \Delta Y$  an die Antriebe X, Y, 25, 26 weiter.

Die Fig. 11 gibt die schematische Darstellung für eine Korrektur über einen Hilfsachsenantrieb 29, 30 wieder. Abgesehen von den bekannten Relativbewegungen des Werkstückes

6 zur Drahtelektrode 1 durch den Hauptachsenantrieb 25, 26 ist ein zusätzlicher kleiner Hilfsachsenantrieb 29, 30 vorgesehen, welcher die jetzt beweglich angeordnete Drahtführung 5 relativ zum Führungsarm 2 in den Achsenrichtungen X und Y um z.B.  $\pm 200 \mu\text{m}$  verstellen kann. Das Wegaufnehmersystem 7 ist fest mit dem Führungsarm 2 verbunden, und die Messwertaufbereitung wird bis und mit den Analogrechnern 21 von der Anwendung nach Fig. 10 übernommen. Die analoge Auslenkinformation  $\Delta X, \Delta Y$  wird jedoch den Regelverstärkern 28 zugefügt. Diese Regelverstärker 28 geben entsprechende Stellsignale auf den X-Hilfsachsenantrieb 30 und den Y-Hilfsachsenantrieb 29. Damit wird die Drahtführung 5 und damit die Drahtelektrode 1 so verstellt, dass der Auslenkfehler kleiner wird und die Auslenkinformation  $\Delta X, \Delta Y$  den Wert Null anstrebt. Dem Regelverstärker 28 wird vorteilhafterweise ein sogenanntes PI-Regelverhalten gegeben, d.h. sein Ausgangssignal ist proportional und integral von seinem Eingangssignal  $\Delta X$  oder  $\Delta Y$  abhängig. (Weitere Erklärungen dazu finden sich in der einschlägigen Literatur über Regelverstärker.) Die praktische Wirkung ist die, dass eine sprunghafte Ände-

rung des Eingangssignals  $\Delta X, \Delta Y$  mit einem entsprechenden Sprung am Ausgang beantwortet wird und gleichzeitig ein sehr kleines, aber lange dauerndes Eingangssignal mit maximaler Verstärkung auf den Ausgang gegeben wird. Nur so ist es möglich, die Drahtelektrode 1 optimal schnell und optimal genau in ihrer Lage zu korrigieren. Diese Anordnung nach Fig. 11 hat zwar den Schönheitsfehler, dass, weil das Wegaufnehmersystem 7 in Wirklichkeit nicht mit unendlich kleinem Abstand vom Werkstück 6 montiert werden kann, durch die gekrümmte Form der Drahtelektrode 1 ein Restfehler auf dem Werkstück 6 verbleibt, obschon das Wegaufnehmersystem 7 keine Auslenkung mehr misst. Dies lässt sich jedoch mit einer leichten positiven Rückkoppelung auf dem Regelverstärker 28 kompensieren, d.h. man lässt am Eingang des Regelverstärkers 28 die Auslenkinformation  $\Delta X$  bzw.  $\Delta Y$  immer um soviel grösser erscheinen, so dass auf dem Werkstück 6 der Fehler zu Null wird.

Die Anordnung nach Fig. 11 wird vorteilhafterweise als Baueinheit beidseitig des Werkstückes 6 auf dem Führungsarm 2 angebracht.

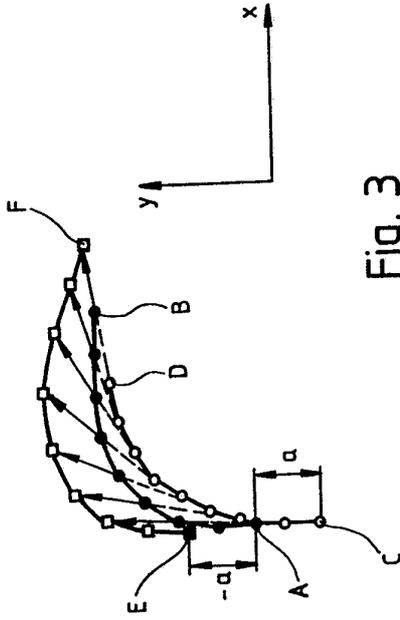


Fig. 3

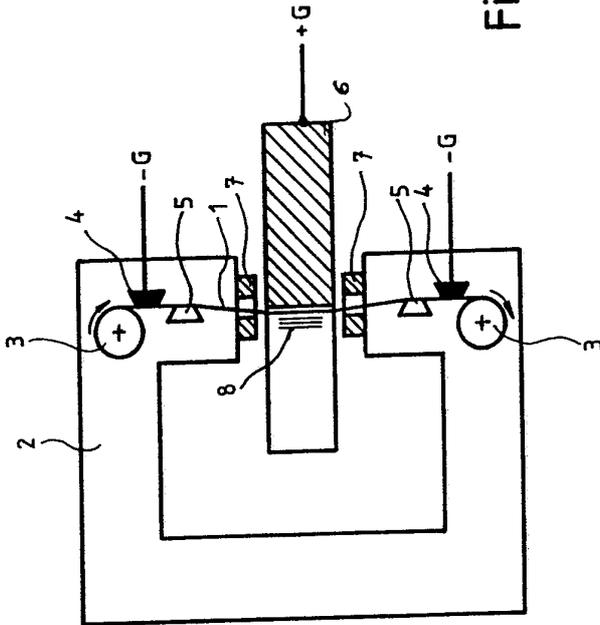


Fig. 1

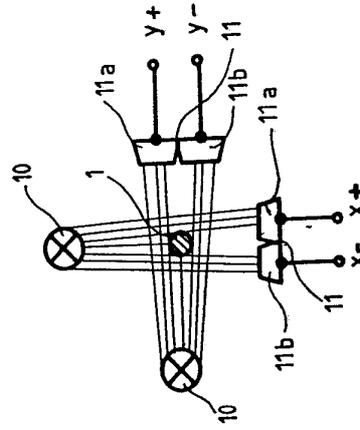


Fig. 5

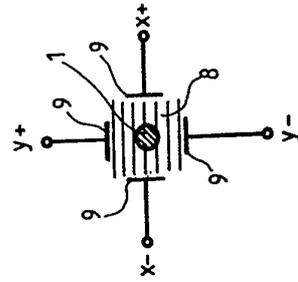


Fig. 4

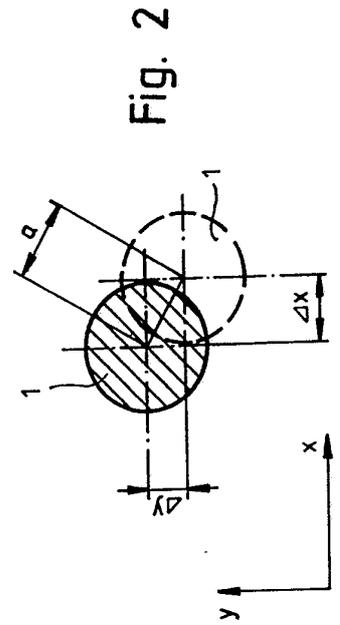


Fig. 2

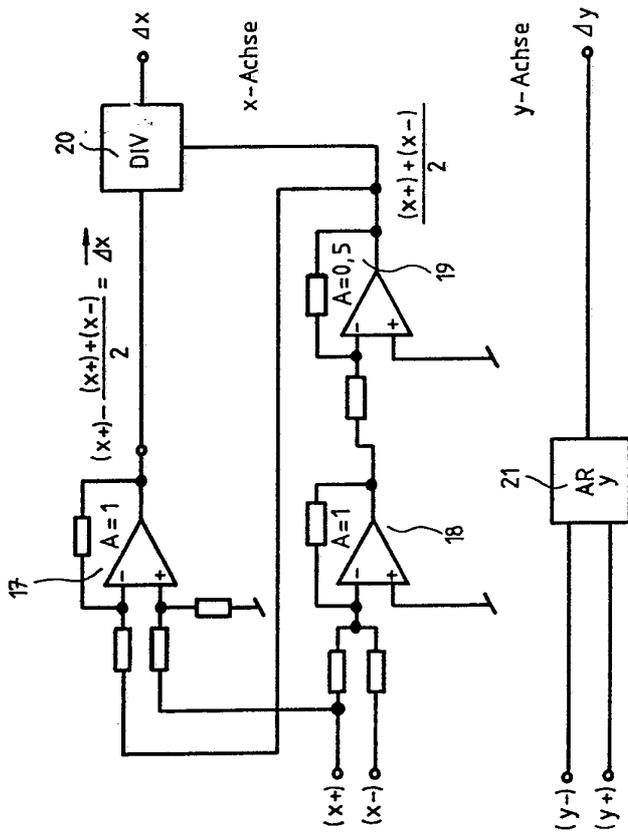


Fig. 8

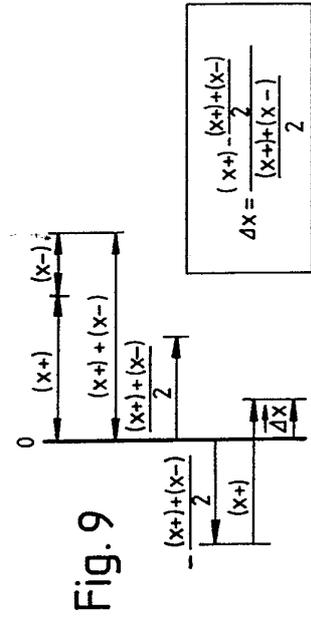


Fig. 9

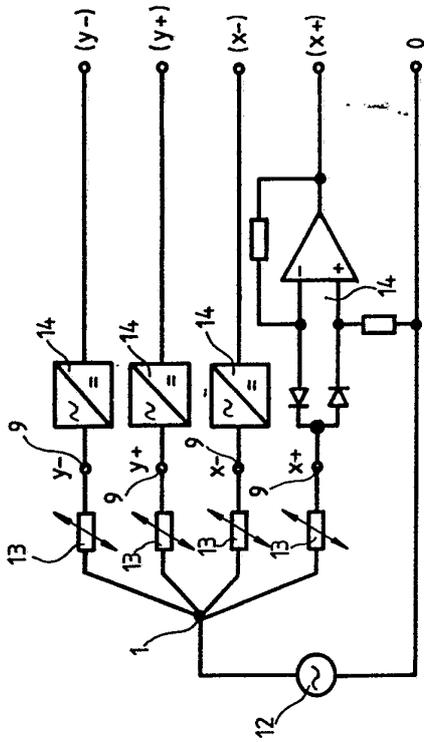


Fig. 6

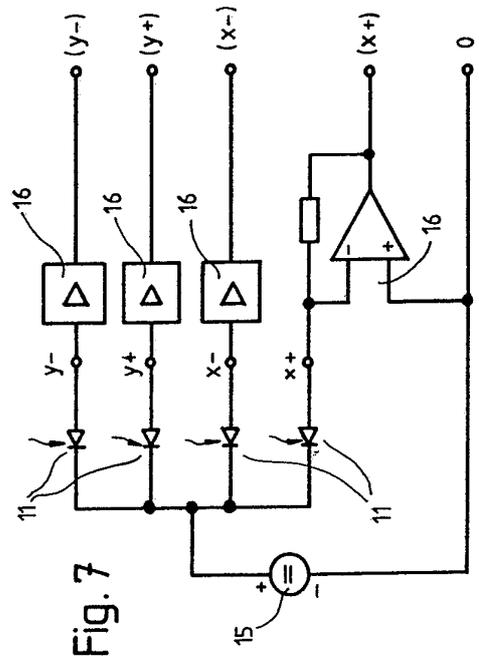


Fig. 7

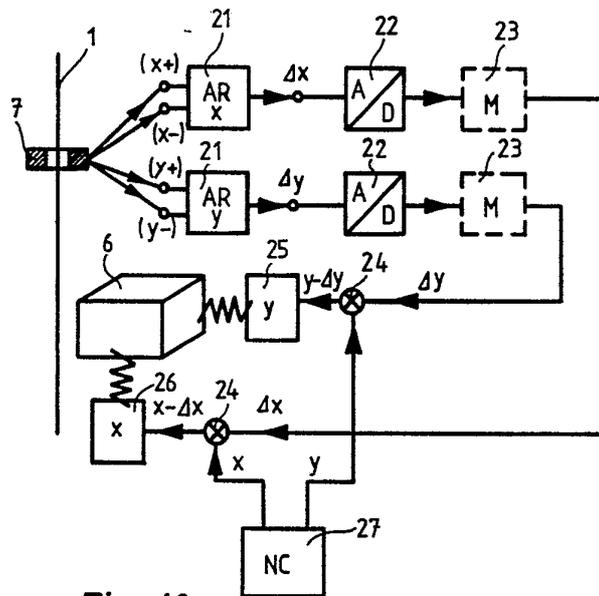


Fig. 10

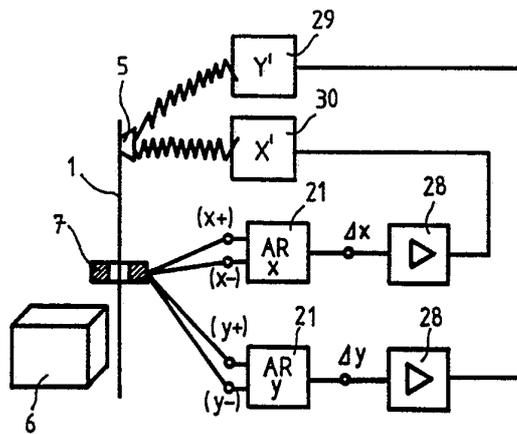


Fig. 11