

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
28. November 2013 (28.11.2013)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2013/174468 A2

- (51) **Internationale Patentklassifikation:** Nicht klassifiziert
- (21) **Internationales Aktenzeichen:** PCT/EP2013/001240
- (22) **Internationales Anmeldedatum:** 25. April 2013 (25.04.2013)
- (25) **Einreichungssprache:** Deutsch
- (26) **Veröffentlichungssprache:** Deutsch
- (30) **Angaben zur Priorität:** 10 2012 010 004.3 22. Mai 2012 (22.05.2012) DE
- (71) **Anmelder:** SATISLOH AG [CH/CH]; Neuhofstrasse 12, CH-6340 Baar (CH).
- (72) **Erfinder:** DIEHL, Joachim; Untergasse 48, 35398 Gießen (DE). MOOS, Steffen; Hauptstrasse 50, 35435 Wettenberg (DE). SCHMIDT, Achim; Sonnenstrasse 20 A, 35633 Lahnau (DE).
- (74) **Anwalt:** **OPPERMANN, Mark;** Patentanwälte Oppermann & Oppermann, Am Wiesengrund 35, 63075 Offenbach (DE).
- (81) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) **Title:** METHOD FOR GRINDING WORKPIECES, IN PARTICULAR FOR CENTRING GRINDING OF WORKPIECES SUCH AS OPTICAL LENSES

(54) **Bezeichnung :** VERFAHREN ZUM SCHLEIFEN VON WERKSTÜCKEN, INSBESONDERE ZUM ZENTRIERENDEN SCHLEIFEN VON WERKSTÜCKEN WIE OPTISCHEN LINSEN

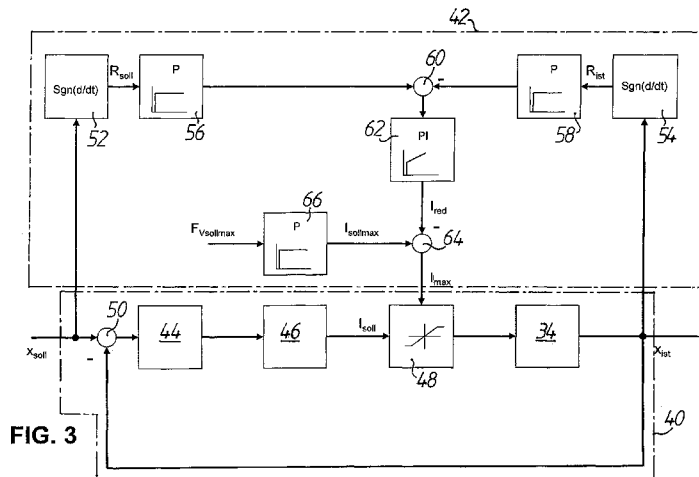
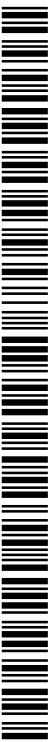


FIG. 3

(57) **Abstract:** The invention relates in particular to a method for centring grinding of workpieces such as optical lenses by means of a grinding tool using an actuator (34) for generating a relative advancing movement between the grinding tool and the workpiece, wherein the actuator is integrated in a current regulator (48) for an actuator current which determines an advancing force of the actuator in a position control loop (40) which is run through using a predetermined control cycle. In the method, for each control cycle: (i) a desired direction of movement ($R_{soll(n)}$) of the advancing movement and an actual direction of movement ($R_{ist(n)}$) of the advancing movement are ascertained; then (ii) the ascertained actual and desired directions of movement are compared to one another; and finally, (iii) when the comparison results in a deviation between the actual and desired directions of movement, a predetermined current limit ($I_{sollmax}$) for the actuator current emitted via the current regulator is decreased in a defined manner in order to reduce the advancing force of the actuator. As a result the advancing movement and material machining can be carried out quickly and efficiently without overstressing the tool or workpiece.

(57) **Zusammenfassung:**

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2013/174468 A2



CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

- *hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, die Priorität einer früheren Anmeldung zu beanspruchen (Regel 4.17 Ziffer iii)*

Es wird ein Verfahren insbesondere zum zentrierenden Schleifen von Werkstücken wie optischen Linsen mittels eines Schleifwerkzeugs unter Verwendung eines Aktuators (34) zur Erzeugung einer relativen Vorschubbewegung zwischen Schleifwerkzeug und Werkstück offenbart, wobei der Aktuator mit einem Stromregler (48) für einen eine Vorschubkraft des Aktuators bestimmenden Aktuatorstrom in einem Lageregelkreis (40) integriert ist, welcher mit einem vorbestimmten Regelzyklus durchlaufen wird. Bei dem Verfahren werden für jeden Regelzyklus: (i) eine Soll-Bewegungsrichtung ($R_{\text{soll}(n)}$) der Vorschubbewegung sowie eine Ist-Bewegungsrichtung ($R_{\text{ist}(n)}$) der Vorschubbewegung ermittelt; sodann werden (ii) die ermittelten Ist- und Soll-Bewegungsrichtungen miteinander verglichen; und schließlich wird, (iii) wenn der Vergleich eine Abweichung zwischen den Ist- und Soll-Bewegungsrichtungen ergibt, eine vorbestimmte Stromgrenze (I_{Sollmax}) für den über den Stromregler abgegebenen Aktuatorstrom definiert reduziert, um die Vorschubkraft des Aktuators zu verringern. Im Ergebnis werden die Vorschubbewegung und Materialzerspanung schnell und effizient durchgeführt, ohne dass es zu einer Überbeanspruchung von Werkzeug oder Werkstück kommen kann.

**VERFAHREN ZUM SCHLEIFEN VON WERKSTÜCKEN, INSBESONDERE ZUM
ZENTRIERENDEN SCHLEIFEN VON WERKSTÜCKEN WIE OPTISCHEN LINSEN**

TECHNISCHES GEBIET

Die vorliegende Erfindung bezieht sich allgemein auf ein Verfahren zum Schleifen von Werkstücken mittels eines Schleifwerkzeugs unter Verwendung eines Aktuators zur Erzeugung einer relativen Vorschubbewegung zwischen Schleifwerkzeug und Werkstück, wobei der Aktuator mit einem Stromregler für einen eine Vorschubkraft des Aktuators bestimmenden Aktuatorstrom in einem Lageregelkreis integriert ist, welcher mit einem vorbestimmten Regelzyklus durchlaufen wird.

- 10 Insbesondere bezieht sich die Erfindung auf ein Verfahren zum zentrierenden Schleifen von Werkstücken aus den Anwendungsgebieten Feinoptik (optische Linsen), Uhrenindustrie (Uhren-
gläser) und Halbleiterindustrie (Wafer), wo Werkstücke mittels Zentriermaschinen zunächst zentriert zu spannen und in der
15 Folge am Rand zu schleifen sind.

STAND DER TECHNIK

- 20 Linsen für Objektive od.dgl. werden nach der Bearbeitung der optischen Flächen "zentriert", damit die optische Achse, deren Lage durch eine Gerade gekennzeichnet ist, welche durch die beiden Krümmungsmittelpunkte der optischen Flächen hindurch verläuft, auch durch die geometrische Mitte der Linse geht. Die
25 Linse wird zu diesem Zweck zunächst zwischen zwei fluchtenden Zentrierspindeln derart ausgerichtet und gespannt, dass die beiden Krümmungsmittelpunkte der Linse mit der gemeinsamen Rotationsachse der Zentrierspindeln zusammenfallen. In der Folge wird der Rand der Linse in einer definierten Beziehung
30 zur optischen Achse der Linse bearbeitet, wie es später für den

Einbau der Linse in einer Fassung notwendig ist. Dabei wird dem Rand durch spanende Bearbeitung eine definierte Geometrie sowohl in der Draufsicht auf die Linse - Umfangskontur der Linse - als auch im Radialschnitt gesehen - Kontur des Rands, etwa geradlinige Ausbildung oder Ausbildung mit Stufe(n)/Facette(n) - gegeben. Dies erfolgt namentlich im Falle von Glaslinsen durch einen Schleifprozess. Wenn im Zusammenhang mit der vorliegenden Erfindung allgemein von "Schleifen" die Rede ist, soll dies allerdings auch "Feinschleifen" und "Polieren" mit umfassen, wo gleichermaßen mit geometrisch unbestimmten Schneiden gearbeitet wird.

Was die beim Zentrieren verwendeten Mechanismen zur Erzeugung der relativen Vorschubbewegung zwischen Schleifwerkzeug und Werkstück angeht, wurden bei den älteren kurvengesteuerten Zentriermaschinen "LZ 80" der LOH Optikmaschinen AG, Wetzlar, Deutschland (Rechtsvorgängerin der Satisloh GmbH), die zwei Schleifspindeln für den drehenden Antrieb der Schleifwerkzeuge (Schleifscheiben) mittels einstellbarer Gewichte über einen Seilzug zugestellt. Die maximale Zustellbewegung der Schleifspindeln selbst wurde hierbei über langsam rotierende Kurvenscheiben gesteuert, auf denen eine mit der jeweiligen Schleifspindel gekoppelte Abtastrolle als Festanschlag ablief. Wenn gleich diese sehr einfache mechanische Lösung Vorteile in Bezug auf die mögliche Prozessgeschwindigkeit hatte, weil sich der Vorschub weitgehend abhängig von der Leistungsfähigkeit der Schleifscheiben und dem geschliffenen Substratmaterial selbst einstellte, bestand ein gravierender Nachteil darin, dass für jede Werkstückgeometrie eine eigene Kurvenscheibe vorzusehen war.

Auch sind Lösungen bekannt (siehe z.B. die Druckschrift EP-A-1 693 151, die allerdings keine Zentriermaschine betrifft), bei denen die Schleifkraft über die Vorspannung von Federn eingestellt wird, welche auf die Schleifspindel wirken. Die Verwen-

5 dung von Federn bei der Einstellung der Schleifkraft hat jedoch Nachteile, wenn es gilt, unrunde, insbesondere eckige Geometrien an rotierenden Werkstücken zu schleifen. An den Ecken ist das Werkstück nämlich "bestrebt", die Schleifscheibe entgegen
10 der Vorschubrichtung wegzudrücken, wobei sich die Vorspannung der auf die Schleifspindel wirkenden Feder erhöht. Dies wiederum bewirkt eine unerwünschte Erhöhung der Schleifkraft, was dazu führen kann, dass im Bereich der auf die Schleifscheibe drückenden Ecke des Werkstücks eine Mulde, also ein Formfehler
10 entsteht.

Bei modernen CNC-gesteuerten Zentriermaschinen, die über eine entsprechende Bahnführung von Werkzeug und/oder Werkstück die Schleifbearbeitung beliebiger Werkstückformen ermöglichen, wird
15 üblicherweise eine Zwangs-Vorschubregelung vorgesehen. Wenn hierbei die Vorschubgeschwindigkeit jedoch zu schnell gewählt wird, kann es zu einer Überlastung des Schleifwerkzeugs und unter Umständen auch zum "Brennen" des Werkstücks im Berührungspunkt zwischen Werkzeug und Werkstück kommen, was insbesondere
20 bei der Verwendung von Mineralöl als Kühlschmierstoff zu Verpuffungen und erheblichen Folgeschäden (nicht nur) an der Zentriermaschine führen kann. Abhilfe können hier freilich programmierte Sicherheitsabstände schaffen, z.B. derart, dass die Vorschubgeschwindigkeit bis zu einem vorbestimmten Abstand zwischen Werkzeug und Werkstück hoch eingestellt wird und bei Erreichen dieses Abstands auf eine niedrigere Vorschubgeschwindigkeit umgeschaltet wird. Solche Sicherheitsmechanismen bedin-
25 gen jedoch zwangsläufig längere Bearbeitungszeiten.

30 Schließlich sind auch sogenannte "Adaptive-Control"-Lösungen bekannt (siehe etwa die Druckschrift US-A-2006/0073765), bei denen die Stromaufnahme der Schleifspindel und/oder des Rotationsantriebs für das Werkstück oder aber Signale von eigens vorgesehenen Kraftaufnehmern als Eingangsgröße für eine Vorschubbegrenzung genutzt werden. Ein Nachteil einer von der
35

Stromaufnahme der Schleifspindel abhängigen Vorschubregelung ist, dass Letztere aufgrund der beim Schleifen erforderlichen hohen Schnittgeschwindigkeiten infolge der Massenträgheit von Schleifspindel und -werkzeug träge ist und daher nur verzögert, ggf. zu spät reagiert. Die Verwendung einer Kraftsensorik hingegen hat insbesondere den Nachteil, dass diese stets zwischen Werkzeug und Maschine, oder Werkstück und Maschine angeordnet werden muss, was funktionsbedingt zu einer gewissen Nachgiebigkeit der Maschine führt, die einer hohen Werkstückgüte und -genauigkeit abträglich sein kann.

AUFGABENSTELLUNG

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Schleifen von Werkstücken, namentlich zum zentrierenden Schleifen von Werkstücken wie optischen Linsen bereitzustellen, das die oben zum Stand der Technik angesprochenen Probleme adressiert. Insbesondere soll hierbei die Vorschubbewegung zwischen Schleifwerkzeug und Werkstück derart erfolgen, dass einerseits während der Schleifbearbeitung weder eine Überlastung des Schleifwerkzeugs noch ein "Brennen" oder ein Formfehler am Werkstück auftritt/entsteht, andererseits die Vorschubbewegung und Materialzerspanung dennoch möglichst schnell und effizient durchgeführt werden.

DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Diese Aufgabe wird durch die im Patentanspruch 1 angegebenen Merkmale gelöst. Vorteilhafte oder zweckmäßige Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Patentansprüche 2 bis 5.

Erfindungsgemäß werden bei einem Verfahren zum Schleifen von Werkstücken, insbesondere zum zentrierenden Schleifen von Werkstücken wie optischen Linsen, mittels eines Schleifwerk-

zeugs unter Verwendung eines Aktuators zur Erzeugung einer relativen Vorschubbewegung zwischen Schleifwerkzeug und Werkstück, der mit einem Stromregler für einen eine Vorschubkraft des Aktuators bestimmenden Aktuatorstrom in einem Lageregelkreis integriert ist, welcher mit einem vorbestimmten Regelzyklus durchlaufen wird, für jeden Regelzyklus zunächst (i) eine Soll-Bewegungsrichtung der Vorschubbewegung sowie eine Ist-Bewegungsrichtung der Vorschubbewegung ermittelt; sodann (ii) wird die ermittelte Ist-Bewegungsrichtung der Vorschubbewegung mit der ermittelten Soll-Bewegungsrichtung der Vorschubbewegung verglichen; und schließlich (iii) wird, wenn der Vergleich eine Abweichung zwischen der Ist-Bewegungsrichtung der Vorschubbewegung und der Soll-Bewegungsrichtung der Vorschubbewegung ergibt, eine vorbestimmte Stromgrenze für den über den Stromregler abgegebene Aktuatorstrom definiert reduziert, um die Vorschubkraft des Aktuators zu verringern.

Durch dieses Verfahren, bei dem dem Vorschubmotor (Aktuator) eine variable Vorschubkraft über den Motorstrom vorgegeben, anhand der Soll- und Ist-Richtungen der Vorschubbewegung auf die aktuellen Kraftverhältnisse geschlossen und daraus resultierend die Vorschubkraft prozessabhängig über den Motorstrom beeinflusst wird, wird insbesondere die Abtragsleistung beim Schleifen, speziell bei dem Abzentrieren von unrundern Werkstücken optimiert. Es ergeben sich verglichen zum Stand der Technik deutliche Verkürzungen der Prozesszeiten, ein Wegfall von Sicherheitsabständen, eine einfache Anschnitterkennung sowie eine sichere Verhinderung von Überlastungszuständen von Werkstück und Werkzeug durch zu hohe Vorschubgeschwindigkeiten oder durch Kollisionen. Die tatsächliche Vorschubgeschwindigkeit wird hier letztendlich bestimmt über die Abtragsleistung des Werkzeugs, welche sich im Prozessablauf verändern kann durch z.B. Abstumpfen oder Zusetzen des Schleifbelags oder eine Veränderung der Kühl- und Schmiermitteleigenschaften. Durch die Auswertung der Soll- und Ist-Richtungen der Vorschubbewegung

und die Nutzung der Kraft/Strom-Abhängigkeit des Vorschubmotors sind schließlich externe Kraftaufnehmer od.dgl. entbehrlich; der Werkstückgüte und -genauigkeit ggf. abträgliche Nachgiebigkeiten werden somit vermieden.

5

Vorzugsweise werden für die Ermittlung bzw. Bestimmung der Bewegungsrichtungen der Vorschubbewegung im obigen Schritt (i) die Soll- und Ist-Positionen des Aktuators aus dem aktuellen Regelzyklus und aus dem vorhergehenden Regelzyklus ausgewertet, die am Lageregelkreis problemlos abgegriffen werden können.

10

Im Hinblick auf eine gute Einflussnahmemöglichkeit auf das Verhalten der Stromänderung ist es ferner bevorzugt, wenn bei dem Vergleich der ermittelten Ist-Bewegungsrichtung der Vorschubbewegung mit der ermittelten Soll-Bewegungsrichtung der Vorschubbewegung im obigen Schritt (ii) ein Vergleichssignal generiert wird, welches über ein PI- oder PID-Übertragungsglied ein Stromreduktionssignal erzeugt, wobei im Schritt (iii) sodann ein Signal für die vorbestimmte Stromgrenze um das jeweilige Stromreduktionssignal verringert als Strombegrenzungssignal dem Stromregler aufgeschaltet wird.

20

Um das Schleifverfahren für die Bearbeitung unrunder Geometrien, die mehr oder weniger "eckig" sein können, zu optimieren, werden vorzugsweise in Abhängigkeit von der Form des zu schleifenden Werkstücks verschiedene Parametersätze für den Proportionalanteil (Verstärkung K_P) und den Integralanteil (Nachstellzeit T_N) des PI- oder PID-Übertragungsglieds eingesetzt.

25

Wenngleich für das erfindungsgemäße Schleifverfahren beliebige Aktuatoren als Vorschubantrieb eingesetzt werden können, solange diese eine definierte Kraft/Strom-Abhängigkeit aufweisen, ist es schließlich insbesondere im Hinblick auf eine hohe Feinfühligkeit der Regelung, ein schnelles Reaktionsverhalten, Leichtgängigkeit und Selbsthemmungsfreiheit, etc. bevorzugt,

35

wenn als Aktuator zur Erzeugung der relativen Vorschubbewegung zwischen Schleifwerkzeug und Werkstück ein Linearmotor verwendet wird.

5

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Im Folgenden wird die Erfindung anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels unter Bezugnahme auf die beigefügten, vereinfachten Zeichnungen näher erläutert. In den Zeichnungen zeigen:

Fig. 1 eine Vorderansicht einer lediglich schematisch dargestellten Zentriermaschine für insbesondere optische Linsen, bei der das erfindungsgemäße Schleifverfahren Anwendung finden kann;

Fig. 2 eine prinzipielle Darstellung zu einem zentrierenden Schleifprozess, wobei im oberen Teil der Figur der Beginn der eigentlichen Schleifbearbeitung und im unteren Teil der Figur das Ende der eigentlichen Schleifbearbeitung gezeigt ist;

Fig. 3 ein vereinfachtes Blockschaltbild eines Lageregelkreises für einen Vorschubantrieb der Zentriermaschine gemäß Fig. 1, mit übergeordneter Stromsteuerung bzw. -begrenzung für die Durchführung des erfindungsgemäßen Schleifverfahrens;

Fig. 4 eine prinzipielle Darstellung zu einem zentrierenden Schleifprozess mit erfindungsgemäßer Verfahrensweise, der an einem Werkstück mit unrunder Außenkontur durchgeführt wird, zur Veranschaulichung der Änderung des entgegen der Vorschubkraft wirkenden Prozesskraftanteils infolge des sich drehwinkelabhängig

35

ändernden Abstands des Eingriffspunkts zwischen Schleifwerkzeug und Werkstück zur Werkstück-Drehachse und der sodann entsprechend reduzierten Vorschubkraft; und

5

Fig. 5 ein Diagramm, in dem exemplarisch für einen zentrierenden Schleifprozess mit erfindungsgemäßer Verfahrensweise der Vorschubweg x (oben) und der infolge der Begrenzung des Aktuatorstroms zugelassene Schlepfehler (unten) über der Zeit t aufgetragen sind.

10

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DES AUSFÜHRUNGSBEISPIELS

15

In Fig. 1 ist eine CNC-geregelte Zentriermaschine 10 zum Schleifen von Werkstücken, insbesondere optischen Linsen L lediglich schematisch und nur insoweit dargestellt, als es für das Verständnis der vorliegenden Erfindung notwendig erscheint. Weitere Details zum Aufbau und zur Funktion der Zentriermaschine 10 können der zeitgleich eingereichten deutschen Patentanmeldung DE 10 2012 XXX XXX.X der vorliegenden Anmelderin entnommen werden, auf die hiermit ausdrücklich Bezug genommen wird.

25

In Fig. 1 links zu erkennen sind zwei bezüglich einer Zentrierachse C fluchtend angeordnete Zentrierspindeln 12, 14, deren Zentrierspindelwellen 16, 18 unabhängig voneinander im Drehwinkel lagegeregelt drehend antreibbar sind (Werkstück-Drehachsen $C1, C2$). Ein Synchronlauf der Zentrierspindelwellen 16, 18 wird hierbei in an sich bekannter Weise CNC-technisch bewirkt. An den einander zugewandten Enden sind die Zentrierspindelwellen 16, 18 jeweils zur Aufnahme einer Spannglocke 20, 22 ausgebildet, wie sie aus der deutschen Norm DIN 58736-3 bekannt ist. Zwischen den Spannglocken 20, 22 ist die optische Linse L für

35

die Schleifbearbeitung ihres Rands fest eingespannt. Die hierfür erforderlichen Hub- und Spanneinrichtungen, die eine definierte Bewegung bzw. Kraftaufbringung an einer der Zentrierspindeln 12, 14 entlang der Zentrierachse C ermöglichen, sind in Fig. 1 nicht gezeigt. In einer Richtung senkrecht zur Zentrierachse C sind die Zentrierspindeln 12, 14 fest, d.h. nicht beweglich.

Werkzeugseitig ist (wenigstens) eine Werkzeugspindel 24 mit einem Drehantrieb für eine Werkzeugspindelwelle 26 vorgesehen, an der eine Schleifscheibe G als Schleifwerkzeug gehalten ist. Die Schleifscheibe G ist somit entsprechend dem Pfeil in Fig. 1 in der Drehzahl gesteuert drehend antreibbar (Werkzeug-Drehachse A), um mit ihrer Umfangsfläche U für einen Materialabtrag am Werkstück L zu sorgen.

Die Werkzeugspindel 24 ist ferner auf einem X-Schlitten 28 montiert, der CNC-lagegeregelt in Fig. 1 nach rechts bzw. links linear bewegbar ist (Linearachse X; Vorschubbewegung). Dafür ist der X-Schlitten 28 über hier nicht gezeigte Führungswagen an zwei parallel verlaufenden, auf einem Maschinenbett (nicht dargestellt) angebrachten Führungsschienen 30, 32 geführt. Für den Antrieb des X-Schlittens 28 dient ein Linearmotor 34 als Aktuator, von dem in Fig. 1 der maschinenbettfeste Stator 36 mit seinen Magneten zu erkennen ist. Der Läufer (Spulen) des Linearmotors 34 ist unter dem X-Schlitten 28 montiert und in Fig. 1 nicht zu sehen. In Fig. 1 oberhalb des X-Schlittens 28 ist ein lineares Wegmesssystem 38 angeordnet, mittels dessen die axiale Lage (x_{ist}) des X-Schlittens 28 auf an sich bekannte Weise erfasst werden kann.

In Fig. 1 oberhalb des linearen Wegmesssystems 38 bzw. der Zentrierspindel 14 sind schließlich noch angedeutet rechts die in Richtung auf die Zentrierachse C wirkende Vorschubkraft F_v , die mittels des Linearmotors 34 am X-Schlitten 28 aufgebracht

werden kann und deren Größe proportional zu dem am Läufer des Linearmotors 34 angelegten Strom I ist, und links der entlang der x-Richtung der Vorschubkraft F_v entgegenwirkende Prozesskraftanteil F_p , der abhängig ist von der Drehzahl und -richtung des Werkstücks L , der Drehzahl und -richtung der Schleifscheibe G (Gleichlauf/Gegenlauf), dem Material und der Geometrie des Werkstücks L , dem Material, der Geometrie und dem Verschleißzustand der Schleifscheibe G , der Kühlung und Schmierung (Reibung) an der Eingriffsstelle zwischen Werkstück und Schleifscheibe G , etc.

Die Fig. 2 veranschaulicht einen zentrierenden Schleifprozess in allgemeiner Form: Über den Linearmotor 34 wird entsprechend dem Pfeil eine Vorschubbewegung V der um die Werkzeug-Drehachse A rotierenden Schleifscheibe G bewirkt. Hierbei ist die X-Achse derart lagezuregeln, dass die um die Zentrierachse C drehend angetriebene (Werkstück-Drehachse $C1$) optische Linse L , die anfangs eine beliebige Außenkontur AK aufweisen kann (im dargestellten Beispiel achteckig), auf eine durch ein NC-Programm definierte Endkontur EK abzentriert wird. Bei einer unrunder Endkontur EK , wie der hier gezeigten leicht elliptischen Endkontur EK , wird die Vorschubachse X zusätzlich auf an sich bekannte Weise mit der Werkstück-Drehachse $C1$ koordiniert, wofür Letztere mit einem hochauflösenden Winkelmesssystem WM (siehe Fig. 1) versehen ist. Es ist ersichtlich, dass die Schleifscheibe G bei einer Unrundbearbeitung von Werkstücken L nicht kontinuierlich in einer Vorschubrichtung, d.h. in Fig. 2 nur nach links bewegt werden kann, vielmehr - zumindest am Ende der Bearbeitung - in Abhängigkeit vom Drehwinkel des Werkstücks L um die Zentrierachse C entlang der Vorschubachse X vor und zurück bewegt werden muss, um die unrunde Endkontur EK zu generieren.

Die Fig. 3 zeigt mit Hilfe eines vereinfachten Blockschaltbilds den Lageregelkreis 40 für den Linearmotor 34 (Vorschubantrieb)

der Zentriermaschine 10 gemäß Fig. 1, dem eine besondere Stromsteuer- bzw. -begrenzungsschaltung, kurz Strombegrenzung 42, für den Aktuatorstrom I zur Durchführung des erfindungsgemäßen Schleifverfahrens zugeordnet ist. Der Lageregelkreis 40 umfasst in an sich bekannter Weise - vgl. beispielsweise das Fachbuch "Werkzeugmaschinen Band 3, Automatisierung und Steuerungstechnik" von Prof. Dr.-Ing. Manfred Weck, 3. Auflage 1989, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 195, Bild 8-3 - einen Lageregler 44, einen Geschwindigkeitsregler 46, einen Stromregler 48 und den hiervon angesteuerten Aktuator (der Linearmotor 34 im vorliegenden Fall) sowie im Rahmen der Lagerückführung eine Summationsstelle 50 für die Soll-Position x_{soll} und die Ist-Position x_{ist} . Das lineare Wegmesssystem 38, das die Ist-Position x_{ist} liefert, ist in Fig. 3 ebenso wenig gezeigt, wie die NC-Steuerung, welche die Soll-Position x_{soll} vorgibt. Auch sind unterlagerte Geschwindigkeits- und Stromrückführungen nicht dargestellt, die im Rahmen einer Kaskadenregelung vorgesehen sein können. Der Lageregelkreis 40 wird wie üblich mit einem vorbestimmten Regelzyklus durchlaufen, z.B. mit einer Zykluszeit bzw. Abtastrate von 2 ms.

Zu erwähnen ist an dieser Stelle schließlich noch, dass I_{soll} im Lageregelkreis 40 gemäß Fig. 3 die Soll-Stromvorgabe für den Stromregler 48 bezeichnet, die - ggf. nach Stromrückführung - im Lageregelkreis 40 in dem Bestreben vorgegeben wird, den Linearmotor 34 so anzusteuern, dass der Lageistwert (Ist-Position x_{ist}) als Regelkreisausgang dem Lagesollwert (Soll-Position x_{soll}) als Regelkreiseingang möglichst fehlerfrei folgt. Der über den Stromregler 48 abgegebene Aktuatorstrom I wird jedoch definiert begrenzt, und zwar unter Inkaufnahme auch größerer Schleppfehler, zu welchem Zweck die Strombegrenzung 42 vorgesehen ist, die nachfolgend beschrieben werden soll.

Als Eingangsgrößen für die Strombegrenzung 42 dienen ersichtlich die von der NC-Steuerung für die Vorschubachse X vorgege-

bene Soll-Position x_{soll} , die vom linearen Wegmesssystem 38 erfasste Ist-Position x_{ist} der Vorschubachse X und eine ebenfalls von der NC-Steuerung vorgegebene maximale Soll-Vorschubkraft $F_{Vsollmax}$, aus der sich eine vorbestimmte Stromgrenze $I_{sollmax}$ ergibt und die später noch näher erläutert werden wird.

In dem in Fig. 3 linken oberen Funktionsglied 52 werden die Soll-Positionen $x_{soll(n)}$, $x_{soll(n-1)}$ des Linearmotors 34 aus dem aktuellen Regelzyklus (n) und aus dem vorhergehenden Regelzyklus (n-1) mittels einer Signumfunktion ("Sgn") ausgewertet. Das Kürzel "d/dt" (zeitliche Ableitung) steht hierbei für folgende Beziehung:

$$d/dt = (x_{soll(n)} - x_{soll(n-1)}) / (t_{(n)} - t_{(n-1)})$$

15

Da die Abtastrate konstant ist kann dies mit $(t_{(n)} - t_{(n-1)}) = konst.$ vereinfacht werden zu:

$$d/dt = (x_{soll(n)} - x_{soll(n-1)})$$

20

Das Ergebnis der gebildeten Signumfunktion ist die Soll-Bewegungsrichtung $R_{soll(n)}$ der Vorschubbewegung V im aktuellen Regelzyklus (n). Die folgenden drei Fälle sind hierbei möglich:

25

$$\begin{aligned} (x_{soll(n)} - x_{soll(n-1)}) > 0 & \rightarrow \text{Sgn}(d/dt) = R_{soll(n)} = +1 \\ (x_{soll(n)} - x_{soll(n-1)}) = 0 & \rightarrow \text{Sgn}(d/dt) = R_{soll(n)} = 0 \\ (x_{soll(n)} - x_{soll(n-1)}) < 0 & \rightarrow \text{Sgn}(d/dt) = R_{soll(n)} = -1 \end{aligned}$$

30

In analoger Weise werden in dem in Fig. 3 rechten oberen Funktionsglied 54 die erfassten Ist-Positionen $x_{ist(n)}$, $x_{ist(n-1)}$ des Linearmotors 34 aus dem aktuellen Regelzyklus (n) und aus dem vorhergehenden Regelzyklus (n-1) mittels einer Signumfunktion ausgewertet. Hierbei gilt:

$$d/dt = (x_{ist(n)} - x_{ist(n-1)}) / (t_{(n)} - t_{(n-1)})$$

Mit $(t_{(n)} - t_{(n-1)}) = \text{konst.}$ vereinfacht sich dieser Ausdruck wiederum zu:

5
$$d/dt = (x_{ist(n)} - x_{ist(n-1)})$$

Demnach sind die folgenden drei Fälle für die Ist-Bewegungsrichtung $R_{ist(n)}$ der Vorschubbewegung im aktuellen Regelzyklus (n) möglich:

10

- (1.) $(x_{ist(n)} - x_{ist(n-1)}) > 0 \rightarrow \text{Sgn}(d/dt) = R_{ist(n)} = +1$
 (2.) $(x_{ist(n)} - x_{ist(n-1)}) = 0 \rightarrow \text{Sgn}(d/dt) = R_{ist(n)} = 0$
 (3.) $(x_{ist(n)} - x_{ist(n-1)}) < 0 \rightarrow \text{Sgn}(d/dt) = R_{ist(n)} = -1$

15 Mit anderen Worten gesagt findet im ersten Fall (1.) bezogen auf die Zentrierachse C tendenziell eine Vorwärtsbewegung der Schleifscheibe G statt, in dem zweiten Fall (2.) ändert sich der Abstand der Schleifscheibe G zur Zentrierachse C nicht, d.h. die Schleifscheibe G steht (keine Bewegung) und in dem
 20 dritten Fall (3.) liegt bezogen auf die Zentrierachse C tendenziell eine Rückwärtsbewegung der Schleifscheibe G vor.

Die so bestimmten Richtungswerte (1, 0 bzw. -1) für die Soll-Bewegungsrichtung R_{soll} und die Ist-Bewegungsrichtung R_{ist} der
 25 Vorschubbewegung V werden sodann jeweils auf ein proportional wirkendes Übertragungsglied (P-Glied) 56 bzw. 58 geschaltet, welches das jeweilige Signal mit einer einstellbaren Verstärkung ausgibt. Diese Verstärkung kann variiert werden, um den Einfluss des jeweiligen Signals zu gewichten.

30

Die derart verstärkten Signale für die Soll-Bewegungsrichtung R_{soll} und die Ist-Bewegungsrichtung R_{ist} der Vorschubbewegung V werden danach auf eine Summationsstelle 60 geschaltet, die vermittels einer Differenzbildung (Soll-Wert minus Ist-Wert) einen

Vergleich der ermittelten Ist-Bewegungsrichtung R_{ist} der Vorschubbewegung V mit der ermittelten Soll-Bewegungsrichtung R_{soll} der Vorschubbewegung V bewirkt. Stimmen hierbei die ermittelten Soll- und Ist-Bewegungsrichtungen R_{soll} bzw. R_{ist} der Vorschubbewegung V überein -

$$(a) \quad R_{soll(n)} = +1 = R_{ist(n)} \quad \text{oder} \quad (b) \quad R_{soll(n)} = -1 = R_{ist(n)}$$

- d.h. (a) die Schleifscheibe G soll sich bezüglich der Zentrierachse C tendenziell vorwärtsbewegen und bewegt sich tatsächlich auch vorwärts, oder (b) die Schleifscheibe G soll sich bezogen auf die Zentrierachse C tendenziell zurückbewegen und bewegt sich in der Tat auch zurück, so ist der Ausgang der Summationsstelle 60 gleich Null. Gleiches gilt für den Grenzfall der gewollt stehenden Vorschubachse X -

$$(c) \quad R_{soll(n)} = 0 = R_{ist(n)}$$

- d.h. wenn (c) keine Vorschubbewegung V der Schleifscheibe G erfolgen soll und auch nicht vorliegt. Der Schleifprozess läuft bei diesen Fällen wie gewünscht; die Schleifscheibe G ist scharf.

Die möglichen Abweichungsfälle bei dem vorbeschriebenen Vergleich in der Summationsstelle 60 umfassen insbesondere die Zustände:

$$(d) \quad R_{soll(n)} = +1 \neq R_{ist(n)} = 0 \quad \text{und} \quad (e) \quad R_{soll(n)} = +1 \neq R_{ist(n)} = -1$$

Im erstgenannten Abweichungsfall (d) soll sich die Schleifscheibe G in Richtung auf die Zentrierachse C bewegen (Vorschubbewegung V in Fig. 2), tut dies aber nicht (Blockieren der Vorschubachse X). Demnach ist zu diesem Zeitpunkt der der Vorschubkraft F_V entgegenwirkende Prozesskraftanteil F_P wenigstens gleich der Vorschubkraft F_V (vgl. Fig. 1), wodurch die Schleif-

scheibe G an ihrer weiteren Vorschubbewegung V gehindert wird. Ursächlich hierfür kann z.B. eine abgestumpfte/verschlissene Schleifscheibe G oder eine unzureichende Kühlschmierstoff-Zufuhr sein.

5

Der zweitgenannte Abweichungsfall (e) kann sich bei der Schleifbearbeitung einer Unrundgeometrie am Werkstück L ergeben, wenn der Prozesskraftanteil F_p die Vorschubkraft F_v übersteigt, nachdem es bedingt durch den sich winkelabhängig
10 ändernden Eingriffspunkt zu Betrags- und Wirkrichtungsänderungen der Schleifkraft kommt, wobei das Werkstück L die Schleifscheibe G infolge der unrunder Außenkontur AK des Werkstücks L entgegen der Vorschubrichtung wegdrückt. Dies ist in Fig. 4 veranschaulicht: Das drehende Werkstück L schiebt mit seinem
15 sich über den Umfang ändernden Radius zur Zentrierachse C bzw. seinen in radialer Richtung "vorstehenden" Konturabschnitten die Schleifscheibe G um einen Betrag Δx entgegen der Vorschubrichtung in Fig. 4 nach rechts.

20 In den beschriebenen Abweichungsfällen besteht die Gefahr einer Überbeanspruchung/Überlastung von Werkstück L und/oder Werkzeug G, was zu einem "Brennen" an der Eingriffsstelle führen kann, bei der Unrundbearbeitung zudem die Gefahr eines "Eingrabens" der Schleifscheibe G in das Werkstück L und somit von Formfehlern am Werkstück L. Um in diesen Fällen ein Ausweichen der
25 Vorschubachse X zu erleichtern und auch das damit verbundene Losbrechmoment der Linearführungen 30, 32 zu eliminieren, wird die Kraftgrenze der Vorschubachse X über den Aktuatorstrom I dynamisch reduziert.

30

Genauer gesagt wird bei dem Vergleich der ermittelten Ist-Bewegungsrichtung $R_{ist(n)}$ der Vorschubbewegung V mit der ermittelten Soll-Bewegungsrichtung $R_{soll(n)}$ der Vorschubbewegung V in der Summationsstelle 60 ein Vergleichssignal generiert, welches
35 über ein proportional-integrierend wirkendes Übertragungsglied

(PI-Glied) 62 ein Stromreduktionssignal $I_{red(n)}$ erzeugt. Alternativ kann hier auch ein schnelles PID-Glied mit z.B. einer Differential- oder Vorhaltezeit T_v von Null oder nahezu Null zum Einsatz kommen, der ähnlich wie ein PI-Regler wirkt.

5

Das Stromreduktionssignal $I_{red(n)}$ wird als Subtrahend einer weiteren Summationsstelle 64 aufgeschaltet. Den Minuenden an der Summationsstelle 64 bildet die vorbestimmte Stromgrenze, d.h. ein Signal für einen maximalen Soll-Strom $I_{sollmax}$, das sich über ein weiteres proportional wirkendes Übertragungsglied (P-Glied) 10 66 aus der oben bereits erwähnten maximalen Soll-Vorschubkraft $F_{Vsollmax}$ ergibt, die von der NC-Steuerung vorgegeben wird. Bei dieser Vorgabe für die maximale Soll-Vorschubkraft $F_{Vsollmax}$ (z.B. 100 N) findet zum einen Berücksichtigung, welche Vorschubkraft für den tatsächlichen Schleifprozess gewünscht ist, 15 was vom Bediener eingegeben werden kann; zum anderen werden Kraftschwankungen der Zustellachse X durch den Einfluss von Rastmomenten des Linearmotors 34 sowie Kraftverluste durch Reibung in den Linearführungen 30, 32 und an den Arbeitsraum- 20 abdeckungen (nicht gezeigt) berücksichtigt, die einmalig exemplarisch ermittelt werden und als additiver Wert in die Soll-Vorschubkraft $F_{Vsollmax}$ einfließen.

Die Summationsstelle 64 gibt schließlich ein Strombegrenzungssignal $I_{max(n)}$ (maximaler Soll-Strom $I_{sollmax}$ minus der jeweiligen 25 Stromreduktion $I_{red(n)}$) aus, das dem Stromregler 48 aufgeschaltet wird. Im Ergebnis wird der vom Stromregler 48 an den Linearmotor 34 abgegebene Aktuatorstrom I , der die Vorschubkraft F_v des Linearmotors 34 bestimmt, dynamisch auf den Strom $I_{max(n)}$ 30 begrenzt, d.h. trotz ggf. höherer Stromvorgabe $I_{soll(n)}$ im Lageregelkreis 40 gibt der Stromregler 48 lediglich den begrenzten Strom $I_{max(n)}$ an den Linearmotor 34 ab. Dies führt in den obigen Bewegungsrichtungs-Abweichungsfällen (d) und (e) zu einer Verringerung der Vorschubkraft $F_{v(n)}$ des Linearmotors 34 (illustriert mit unterschiedlich langen Kraftpfeilen für die Vor- 35

schubkraft F_v in Fig. 4 oben und unten rechts). In den obigen Fällen (a) bis (c) hingegen, in denen noch keine Abweichung der Ist- und Soll-Bewegungsrichtungen der Vorschubbewegung V vorliegt, wird die vorbestimmte Stromgrenze, d.h. der maximale Soll-Strom $I_{sollmax}$ nicht reduziert, weil die Summationsstelle 60 Null ausgibt und folglich auch das Stromreduktionssignal $I_{red(n)}$ Null beträgt.

Liegt eine Bewegungsrichtungs-Abweichung gemäß den Fällen (d) und (e) über mehrere Regelzyklen n vor, so erhöht sich über das PI-Glied 62 das Stromreduktionssignal $I_{red(n)}$ entsprechend; nach der Summationsstelle 64 wird der zugelassene Strom $I_{max(n)}$ demgemäß von Regelzyklus zu Regelzyklus immer kleiner. Das Regelverhalten des PI-Glieds 62 - wie schnell, "hart" oder "weich" - kann hierbei bekanntlich über die Parameter für den Proportionalanteil (Verstärkung K_p) und den Integralanteil (Nachstellzeit T_N) beeinflusst und auch im Hinblick auf das bearbeitete Material optimiert werden. Vorteilhaft werden in Abhängigkeit von der Rundheit bzw. der Eckigkeit der zu schleifenden Werkstückgeometrie von Schleifprozess zu Schleifprozess verschiedene Parametersätze für die Verstärkung K_p und die Nachstellzeit T_N verwendet, dann aber für den jeweiligen Schleifprozess durchgängig. So werden für eine eckige, z.B. quadratische Außenkontur AK die Verstärkung K_p durchaus hoch, die Nachstellzeit T_N aber eher klein, für eine runde bzw. eckenlose, beispielsweise elliptische Außenkontur AK die Verstärkung K_p eher niedriger, die Nachstellzeit T_N indes tendenziell höher vorge wählt. Die tatsächlichen Werte für die Regler-Parametrierung sind für die jeweilige Zentriermaschine 10 und den jeweiligen Schleifprozess individuell zu optimieren, so dass eine Quantifizierung hier nicht erfolgen soll. Ergibt sich schließlich bei dem Vergleich der Ist- und Soll-Bewegungsrichtungen an der Summationsstelle 60 keine Abweichung mehr, wird der Aktuatorstrom I über den Stromregler 48 wieder bis maximal zur voreingestell-

ten Stromgrenze $I_{sollmax}$ erhöht, wodurch die Vorschubkraft F_V des Linearmotors 34 wieder entsprechend wächst.

Die Fig. 5 zeigt in einem Diagramm beispielhaft für einen zentrierenden Schleifprozess mit der vorbeschriebenen - wahlweise zu- oder abschaltbaren - Aktuatorstrom- bzw. Kraftbegrenzung am Linearmotor 34 aufgetragen über der Zeit t oben den Vorschubweg x (durchgezogene bzw. gestrichelte Linie) des X-Schlittens 28, mithin der Werkzeugspindel 24 mit der Schleifscheibe G und darunter den sich infolge der Begrenzung des Aktuatorstroms I aufbauenden Schleppfehler (strichpunktierte Linie). Im Punkt a läuft der X-Schlitten 28 mit einer vorgewählten Vorschubgeschwindigkeit los, die nicht an die Abtragsfähigkeit des Werkzeugs gekoppelt sein muss und im Hinblick auf eine möglichst schnelle und effiziente Materialzerspannung vorzugsweise höher gewählt wird als vom Schleifabtrag her möglich ist. Im Punkt b trifft die Schleifscheibe G auf das Werkstück L auf. Während die Ist-Position x_{ist} der Soll-Position x_{soll} bis zum Punkt b im Wesentlichen fehlerfrei folgt, "fallen" Ist-Position x_{ist} (durchgezogene Linie) und Soll-Position x_{soll} (gestrichelte Linie) danach "auseinander"; ein Schleppfehler (strichpunktierte Linie unten) entsteht. Im Punkt b ist dabei eine kurzfristige Blockade der Vorschubbewegung V zu erwarten (im Graph nicht zu erkennen), die wie oben beschrieben über die Strombegrenzung 42 eine Reduktion der Vorschubkraft F_V induziert, so dass eine Überbeanspruchung von Werkstück L bzw. Werkzeug G nicht erfolgt. In der Folge ist der Lageregelkreis 40 "bestrebt", den Schleppfehler zu kompensieren, wird bei der Bestromung des Linearmotors 34 trotz entsprechender Stromvorgabe I_{soll} am Stromregler 48 jedoch durch die Strombegrenzung 42 (I_{max}) limitiert. Erst ab dem Punkt c, wenn der Endwert der Soll-Position x_{soll} erreicht ist, baut sich der Schleppfehler ab bis auch die Ist-Position x_{ist} ihren Endwert im Punkt d erreicht. Mit anderen Worten gesagt ergeben sich zwischen den Punkten b und d die Ist-Positionen x_{ist} der Schleifscheibe G und

die Geschwindigkeit der Vorschubbewegung V (Steigung des Graphen) lediglich als Folge der über die Strombegrenzung 42 zugelassenen Vorschubkraft F_v . Letztere wird zwischen den Punkten b und d infolge der Strombegrenzung 42 so groß sein, dass sich keine längere Abweichung zwischen der Ist-Bewegungsrichtung R_{ist} und der Soll-Bewegungsrichtung R_{soll} der Vorschubbewegung V ergibt, wird im Rahmen des Zulässigen also stets maximal groß sein. Der beschriebene Kraftschleifprozess kann beendet werden, wenn bei d ein einstellbarer Grenzwert für den Schleppfehler (z.B. 0,01 mm) während einer vollständigen Umdrehung des Werkstücks L unterschritten wird.

Während (u.a.) am Punkt b in Fig. 5 der weiter oben beschriebene Abweichungsfall (d) zu erwarten steht (Blockieren der Vorschubachse X), veranschaulicht das in x - wie t -Richtung stark vergrößerte Detail D_v in Fig. 5 die Situation im oben unter Bezugnahme auf die Fig. 4 erläuterten Abweichungsfall (e), wenn das drehende Werkstück L die Schleifscheibe G entgegen der Vorschubrichtung um einen Betrag Δx wegschiebt. Dabei entspricht der Punkt e im Detail D_v dem Zustand in Fig. 4 oben, während der Punkt f im Detail D_v den Zustand in Fig. 4 unten repräsentiert. Demgemäß kommt es zu sich sägezahnartig wiederholenden Erhöhungen des Schleppfehlers (nicht wiederholend dargestellt).

Bei aktivierter Strombegrenzung 42 ist der Betrag der vorgewählten Vorschubgeschwindigkeit im Grunde egal, denn der vom Geschwindigkeitsregler 46 ausgegebene Soll-Aktuatorstrom I_{soll} wird im Stromregler 48 bei der Bearbeitung ggf. ohnehin limitiert (I_{max}). So kann auch mit verschiedenen vorgewählten Vorschubgeschwindigkeiten gearbeitet werden, z.B. mit einem schnellen Eilgang zur schnellen Annäherung von Werkzeug G und Werkstück L und einem demgegenüber langsameren Arbeitsgang während der Zerspanung. Der Umschaltpunkt zwischen Eilgang und Arbeitsgang kann dabei durch kontinuierliche Auswertung des Schleppfehlers der Vorschubachse X einfach und sicher gefunden

werden (Anschnitterkennung), weil im Moment der Berührung zwischen Werkzeug G und Werkstück L der Schleppfehler der Vorschubachse X durch die fehlende Kraftreserve bzw. begrenzte Vorschubkraft F_v des Linearmotors 34 schnell und stark ansteigt (vgl. in Fig. 5 den sich nach dem Punkt b rasch aufbauenden Schleppfehler). Ein im Stand der Technik üblicher Sicherheitsabstand zum Werkstück L, der einen erheblichen Zeitverlust durch "Luftschleifen im Arbeitsgang" mit sich bringt, ist nicht notwendig, da es durch die Kraftreduzierung am Linearmotor 34 zu keiner kritischen Überlastung oder Zerstörung des Werkzeugs G und/oder Werkstücks L kommen kann.

Es wird ein Verfahren insbesondere zum zentrierenden Schleifen von Werkstücken wie optischen Linsen mittels eines Schleifwerkzeugs unter Verwendung eines Aktuators zur Erzeugung einer relativen Vorschubbewegung zwischen Schleifwerkzeug und Werkstück offenbart, wobei der Aktuator mit einem Stromregler für einen eine Vorschubkraft des Aktuators bestimmenden Aktuatorstrom in einem Lageregelkreis integriert ist, welcher mit einem vorbestimmten Regelzyklus durchlaufen wird. Bei dem Verfahren werden für jeden Regelzyklus: (i) eine Soll-Bewegungsrichtung der Vorschubbewegung sowie eine Ist-Bewegungsrichtung der Vorschubbewegung ermittelt; sodann werden (ii) die ermittelten Ist- und Soll-Bewegungsrichtungen miteinander verglichen; und schließlich wird, (iii) wenn der Vergleich eine Abweichung zwischen den Ist- und Soll-Bewegungsrichtungen ergibt, eine vorbestimmte Stromgrenze für den über den Stromregler abgegebenen Aktuatorstrom definiert reduziert, um die Vorschubkraft des Aktuators zu verringern. Im Ergebnis werden die Vorschubbewegung und Materialzerspanung schnell und effizient durchgeführt, ohne dass es zu einer Überbeanspruchung von Werkzeug oder Werkstück kommen kann.

BEZUGSZEICHENLISTE

	10	Zentriermaschine
	12	untere Zentrierspindel
5	14	obere Zentrierspindel
	16	untere Zentrierspindelwelle
	18	obere Zentrierspindelwelle
	20	untere Spannglocke
	22	obere Spannglocke
10	24	Werkzeugspindel
	26	Werkzeugspindelwelle
	28	X-Schlitten
	30	Führungsschiene
	32	Führungsschiene
15	34	Linearmotor
	36	Stator
	38	lineares Wegmesssystem
	40	Lageregelkreis
	42	Strombegrenzung
20	44	Lageregler
	46	Geschwindigkeitsregler
	48	Stromregler
	50	Summationsstelle
	52	Funktionsglied
25	54	Funktionsglied
	56	P-Glied
	58	P-Glied
	60	Summationsstelle
	62	PI-Glied
30	64	Summationsstelle
	66	P-Glied
	A	Werkzeug-Drehachse (drehzahlgesteuert)
	AK	Außenkontur
35	C1, C2	Werkstück-Drehachse (winkellagegeregelt)

	C	Zentrierachse
	EK	Endkontur
	F _P	Prozesskraftanteil in x-Richtung
	F _V	Vorschubkraft
5	G	Schleifwerkzeug / Schleifscheibe
	I	Aktuatorstrom
	L	Werkstück / optische Linse
	R	Bewegungsrichtung der Vorschubbewegung
	t	Zeit
10	U	Umfangsfläche der Schleifscheibe
	V	Vorschubbewegung
	WM	Winkelmesssystem
	x	Position des Schleifwerkzeugs
	Δx	Betrag der Werkzeugverschiebung
15	X	Vorschubachse / Linearachse Schleifwerkzeug (lagegeregelt)

PATENTANSPRÜCHE:

1. Verfahren zum Schleifen von Werkstücken (L), insbesondere zum zentrierenden Schleifen von Werkstücken wie optischen Linsen, mittels eines Schleifwerkzeugs (G) unter Verwendung eines Aktuators (34) zur Erzeugung einer relativen Vorschubbewegung (V) zwischen Schleifwerkzeug (G) und Werkstück (L), wobei der Aktuator (34) mit einem Stromregler (48) für eine Vorschubkraft (F_V) des Aktuators (34) bestimmenden Aktuatorstrom (I) in einem Lageregelkreis (40) integriert ist, welcher mit einem vorbestimmten Regelzyklus (n) durchlaufen wird, und wobei für jeden Regelzyklus (n):
- (i) eine Soll-Bewegungsrichtung ($R_{\text{soll}(n)} = -1, 0$ oder 1) der Vorschubbewegung (V) sowie eine Ist-Bewegungsrichtung ($R_{\text{ist}(n)} = -1, 0$ oder 1) der Vorschubbewegung (V) ermittelt werden;
 - (ii) die ermittelte Ist-Bewegungsrichtung ($R_{\text{ist}(n)}$) der Vorschubbewegung (V) sodann mit der ermittelten Soll-Bewegungsrichtung ($R_{\text{soll}(n)}$) der Vorschubbewegung (V) verglichen wird; und,
 - (iii) wenn der Vergleich eine Abweichung zwischen der Ist-Bewegungsrichtung ($R_{\text{ist}(n)}$) der Vorschubbewegung (V) und der Soll-Bewegungsrichtung ($R_{\text{soll}(n)}$) der Vorschubbewegung (V) ergibt, eine vorbestimmte Stromgrenze (I_{sollmax}) für den über den Stromregler (48) abgegebenen Aktuatorstrom ($I_{(n)}$) definiert reduziert wird, um die Vorschubkraft ($F_{V(n)}$) des Aktuators (34) zu verringern.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei für die Bestimmung der Bewegungsrichtungen ($R_{\text{ist}(n)}$; $R_{\text{soll}(n)}$) der Vorschubbewegung (V) im Schritt (i) die Soll- und Ist-Positionen ($x_{\text{soll}(n)}$, $x_{\text{soll}(n-1)}$; $x_{\text{ist}(n)}$, $x_{\text{ist}(n-1)}$) des Aktuators (34) aus dem aktuellen Regelzyklus (n) und aus dem vorhergehenden Regelzyklus (n-1) ausgewertet werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei bei dem Vergleich der ermittelten Ist-Bewegungsrichtung ($R_{\text{ist}(n)}$) der Vorschubbewegung (V) mit der ermittelten Soll-Bewegungsrichtung ($R_{\text{soll}(n)}$) der Vorschubbewegung (V) im Schritt (ii) ein Vergleichssignal generiert wird, welches über ein PI- oder PID-Übertragungsglied (62) ein Stromreduktionssignal ($I_{\text{red}(n)}$) erzeugt, und wobei im Schritt (iii) ein Signal für die vorbestimmte Stromgrenze (I_{sollmax}) um das jeweilige Stromreduktionssignal ($I_{\text{red}(n)}$) verringert als Strombegrenzungssignal ($I_{\text{max}(n)}$) dem Stromregler (48) aufgeschaltet wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei in Abhängigkeit von der Form des zu schleifenden Werkstücks (L) verschiedene Parametersätze für den Proportionalanteil (Verstärkung K_p) und den Integralanteil (Nachstellzeit T_N) des PI- oder PID-Übertragungsglieds (62) eingesetzt werden.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei als Aktuator zur Erzeugung der relativen Vorschubbewegung (V) zwischen Schleifwerkzeug (G) und Werkstück (L) ein Linearmotor (34) verwendet wird.

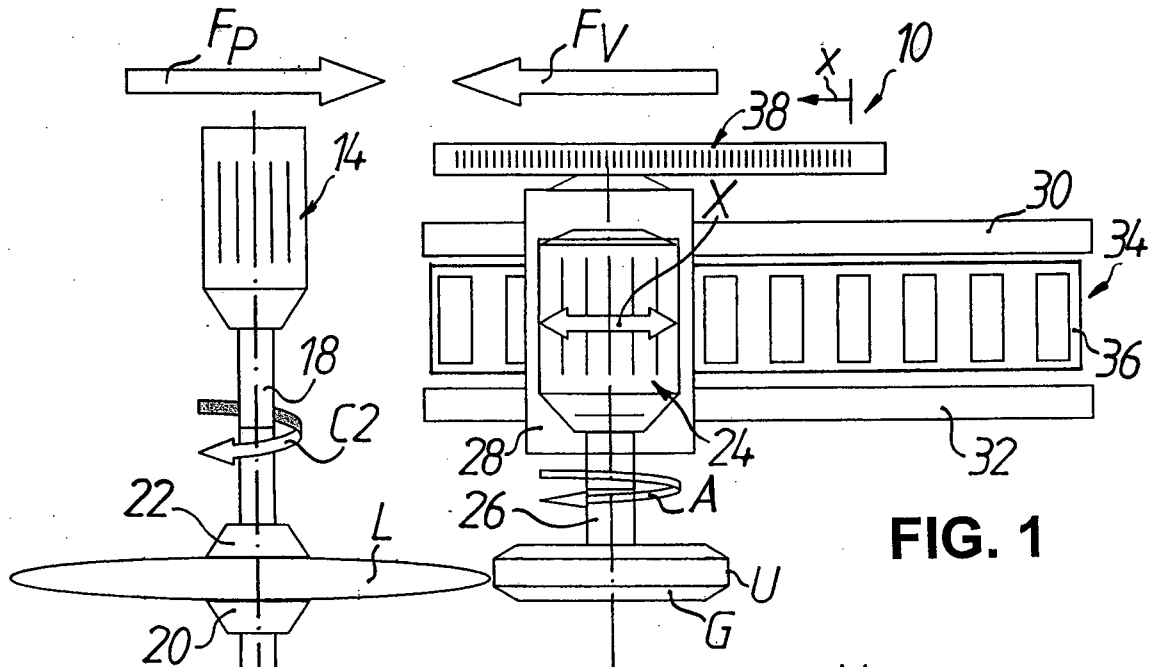


FIG. 1

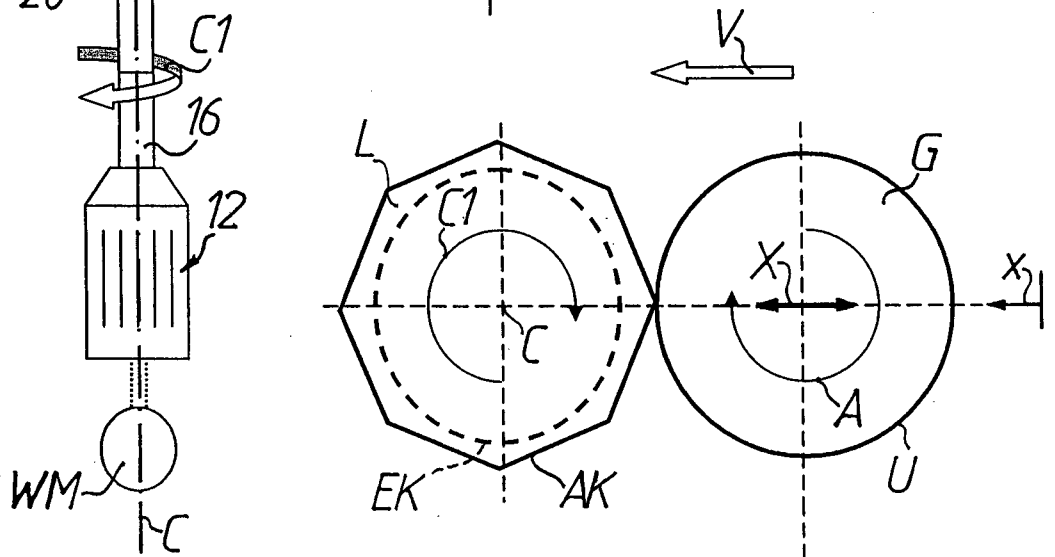
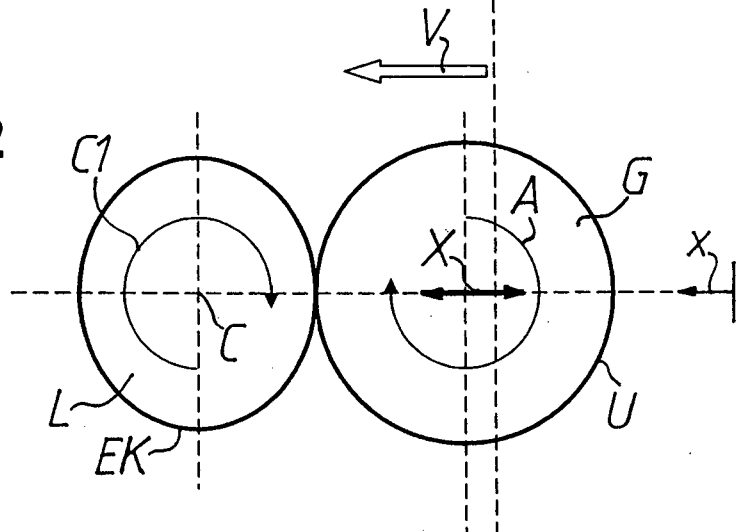


FIG. 2



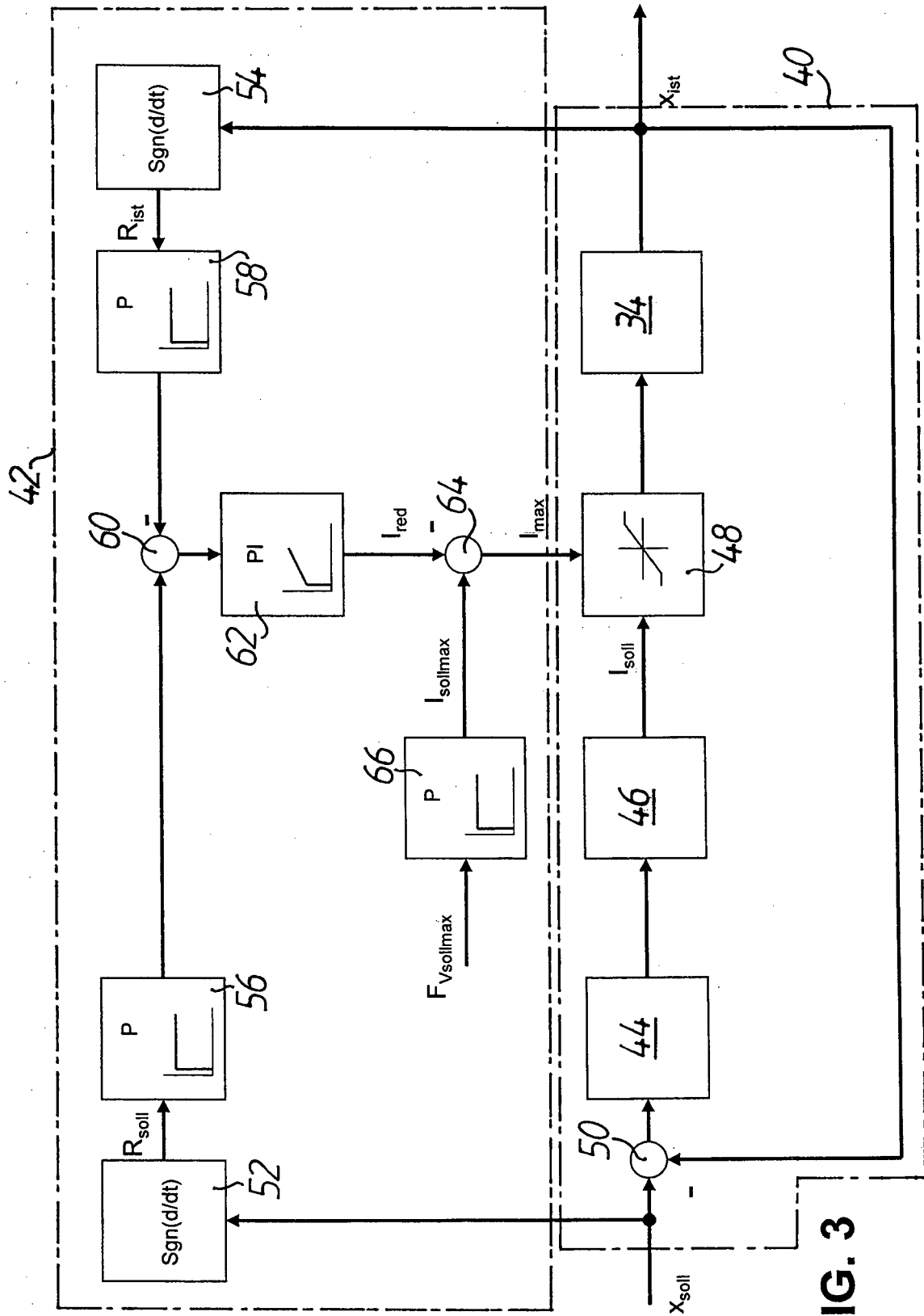


FIG. 3

