



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

⑫ **PATENTSCHRIFT** A5

⑰ Gesuchsnummer: 5881/80	⑦ Inhaber: Dr. Horst Nahr, Neustadt/Aisch (DE)
⑳ Anmeldungsdatum: 04.08.1980	
㉓ Priorität(en): 07.08.1979 DE 2931940	⑧ Erfinder: Nahr, Horst, Dr., Neustadt/Aisch (DE)
㉔ Patent erteilt: 15.04.1985	
④ Patentschrift veröffentlicht: 15.04.1985	⑦ Vertreter: Rebmann-Kupfer & Co., Zürich

⑤ Verfahren und Vorrichtung zur Regelung des Werkzeugvorschubes von spanabhebenden Maschinen.

⑤ Es wird die Änderung der Wirkleistungsaufnahme des Antriebsmotors in Relation zur Änderung des Vorschubweges, d.h. der Differentialquotient  $dP/ds$  gemessen und als Steuersignal für die Betätigung des Werkzeugvorschubes verwendet. Damit können Ausweichbewegungen des eingespannten Werkstückes mit erfasst werden. Zusätzlich kann eine Messung der genannten Leistungsaufnahme in Relation zur Zeit, d.h. des Differentialquotienten  $dP/dt$  erfolgen und in den Regelprozess eingeführt werden. Hierdurch werden Unrundheiten des Werkstückes abgebaut.

## PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Regelung des Werkzeugvorschubes an spanabhebenden Maschinen, insbesondere für Fräsmaschinen, Bohrmaschinen, Schleifmaschinen, Rundschleifmaschinen, Innen-Rundschleifmaschinen, Entgratmaschinen, Drehmaschinen, wobei die Leistungsaufnahme am Antriebsmotor gemessen wird, dadurch gekennzeichnet, dass die Änderung der Wirkleistungsaufnahme in Relation zur Änderung des Vorschubweges, das heisst der Differentialquotient  $dP/ds$  gemessen und in ein Steuersignal für die Betätigung des Werkzeugvorschubes umgesetzt wird, wobei ein Vergleich des Ist-Differentialquotienten  $dP/ds$  mit einem oder mehreren Maximalwerten dieses Differentialquotienten erfolgt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zusätzlich die Änderung der Leistungsaufnahme des Motors in Relation zur Zeit, das heisst der Differentialquotient  $dP/dt$  gemessen und asymmetrisch derart verarbeitet wird, dass nur ein Anstieg der Leistung in den Regelprozess eingeht, ein Abfall der Leistung jedoch unberücksichtigt bleibt.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass das aus dem zeitlichen Anstieg der Leistung gewonnene Signal gespeichert und der Speicher mit einer Zeitkonstanten entladen wird, wobei bei sich drehendem Werkstück die Zeitkonstante der Drehzahl des Werkstückes so angepasst wird, dass Unrundheiten des Werkstückes abgebaut werden, bevor der Vorschub wieder beschleunigt wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die aufgenommene Leistung gemessen und mit einer oberen Nenngrenze verglichen, sowie zusammen mit einem oder beiden der Differentialquotienten  $dP/ds$  und  $dP/dt$  in den Regelprozess eingeführt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Ladungszustand des Speichers in Kombination mit der gemessenen Leistung als Teil der Regelgrösse verwendet wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass das aus der gemessenen Leistung resultierende Signal zu dem aus dem Ladungszustand des Speichers resultierenden Signal addiert wird und die Summe einen Teil der Regelgrösse darstellt.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Leistungsmessung zweimal je Wechselstromperiode bzw. sechsmal je Drehstromperiode erfolgt.

8. Regelvorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass Messorgane für die Erfassung der Strom- und Spannungswerte des Antriebsmotors und Mittel zur vektoriellen Zuordnung und Weitergabe dieser Werte an einen Analogmultiplizierer vorgesehen sind und dass im Analogmultiplizierer eine Anordnung zur Umwandlung der eingegebenen Werte in entsprechende elektrische Ausgangssignale vorgesehen ist.

9. Regelvorrichtung nach Anspruch 8, gekennzeichnet durch Mittel, welche das elektrische Ausgangssignal des Analogmultiplizierers als Regelgrösse ohne mechanische Zwischenglieder bilden und in die Regelung des Antriebsmotors eingeben.

Schleifmaschinen, Rundschleifmaschinen, Innen-Rundschleifmaschinen, Entgratmaschinen und Drehmaschinen, wobei die Leistungsaufnahme am Antriebsmotor gemessen wird. Ferner betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens.

Ein Verfahren der eingangs genannten Art ist im Prinzip aus der DE-OS 1 602 973 bekannt, wobei aber nur der absolute Wert der Verformungsleistung und damit die vom Werkzeug ausgeübte Verspannungskraft erfasst werden. Dies wird jedoch den Problemen und Aufgaben, wie sie für eine möglichst optimale Ausnutzung von spanabhebenden Werkzeugmaschinen auftreten, nicht gerecht. Insbesondere werden hiermit schnelle Änderungen in der Belastung, wie sie durch plötzlich auftretende Vorsprünge am Werkstück oder harte Stellen im Werkstück auftreten können, nicht schnell genug erfasst. In Konsequenz dessen ergibt sich nachteiligerweise entweder eine Überlastung der Werkzeugmaschine oder über relativ grosse Zeiträume eine nicht genügende Auslastung der Maschine. Die DE-OS 1 948 011 sieht zwar vor, den Differentialquotienten der Zerspanungsleistung nach der Zeit, also  $dP/dt$  für die Regelung des Arbeitsvorschubes zu verwenden. Dabei ist zunächst messtechnisch die Messung der Zerspanungsleistung wesentlich umständlicher als die entsprechende Messung am Antriebsmotor, von der die Erfindung ausgeht. Nachteilig ist hierbei aber insbesondere, dass die Erfassung des Differentialquotienten  $dP/dt$  nur dann ein brauchbares Mass für die Regelung ergibt, wenn die relative Vorschubgeschwindigkeit des Werkzeuges zum Werkstück konstant ist. Gerade hier können sich aber Abweichungen und Unregelmässigkeiten ergeben. Insbesondere kann der Druck des Werkzeuges auf das Werkstück rechnerisch kaum zu erfassende Ausweichbewegungen aufgrund der Elastizität des eingespannten Werkstückes bewirken. Die hierdurch bedingte Ausweichgeschwindigkeit des Werkstückes ist also weitgehend unbekannt. Ein weiteres Problem besteht in der Abarbeitung von Unrundheiten. Bei einem konstanten Vorschub würde das Werkzeug der Werkstückkontur elastisch folgen und die Unrundheit nur asymptotisch abbauen. Im Zusammenhang mit den beiden vorgenannten Problemen tritt die Forderung auf, dass nach Erreichen der Endlage des Werkzeuges, dem sogenannten «Ausfeuern», das Werkstück das gewünschte Endmass u.a. dadurch erreichen soll, dass die durch die Vorschubkraft bedingten elastischen Verspannungen (Anbiegung der Maschinenspindel) sich zurückstellen.

Die Aufgabe der Erfindung besteht in der Lösung der vorgenannten Probleme.

Hierzu wird mit der Erfindung ausgehend von einem Verfahren der eingangs genannten Art zunächst vorgesehen, dass die Änderung der Wirkleistungsaufnahme in Relation zur Änderung des Vorschubweges, d.h. der Differentialquotient  $dP/ds$  gemessen und in ein Steuersignal für die Betätigung des Werkzeugvorschubes umgesetzt wird, wobei ein Vergleich des Ist-Differentialquotienten  $dP/ds$  mit einem oder mehreren Maximalwerten dieses Differentialquotienten erfolgt. In der vorgenannten Formel bedeutet P die Aufnahme der Wirkleistung (im folgenden und in den Ansprüchen wird der Einfachheit halber nur noch von Leistung gesprochen) des Antriebsmotor der Werkzeugmaschine und s der Vorschubweg des Werkzeuges zum Werkstück. Dabei versteht es sich, dass die Erfindung auch bei einem sich zum Werkzeug hin bewegenden Werkstück in der gleichen Weise anwendbar ist. Hiermit wird ein Regelalgorithmus angewendet, so dass der D-Anteil der PID-Regelung schnell, hinreichend gross und asymmetrisch wird. Diese Asymmetrie des D-Anteils bewirkt, dass eine Störgrösse mit einer Fouriertransformierten, die vergleichbar oder schneller als die Regelzeitkonstante ist und zu einer normalerweise gedämpften

Die Erfindung betrifft zunächst ein Verfahren zur Regelung des Werkzeugvorschubes an spanabhebenden Maschinen, insbesondere für Fräsmaschinen, Bohrmaschinen,

Regelschwingung führen würde, dergestalt wirkt, dass der Vorschub wohl abgebremst, nicht aber anschliessend sofort wieder beschleunigt wird. Die Vorschubgeschwindigkeit erreicht erst dann wieder den ursprünglichen Wert, wenn die Störung abgeklungen ist. Diese Regelung ist eigensicher gegen Regelschwingungen, wobei die Wahl der Regelparameter recht unkritisch ist, zum anderen aber ist sie schnell, wenn es darauf ankommt, Maschine und Werkzeug vor plötzlich auftretender Überlastung zu schützen. Mit anderen Worten: Es wird eine schnellwirkende Abbremsung des Vorschubes im Zeitpunkt der ersten Berührung des Werkzeuges mit dem Werkstück bewirkt. In diesem Stadium wird nämlich der Differentialquotient  $dP/ds$  mit einem Maximalwert (Schranke) verglichen, der nur wenig über Null liegt. Ein Überschreiten dieses Wertes führt zu dem Signal «Erkennen der Werkstückkontur» und zu einer entsprechenden Reduzierung des Vorschubes oder im Fall des Berührungsschutzes zur Stillsetzung des Vorschubes. Bei einem normalen Arbeitsvorschub (Zerspanbetrieb) bedeutet jede Änderung von  $dP/ds$  eine Änderung der Werkstückkontur oder der Werkstückbeschaffenheit an der betreffenden Stelle. Eine Änderung der Werkstückkontur hat in der Regel eine Änderung der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück zur Folge, z. B. der Übergang von Luft in das Werkstückmaterial oder von einem schmalen Werkstück gerade ins volle Material des Werkstückes. Ein besonderer Vorteil der Verarbeitung des Differentialquotienten  $dP/ds$  liegt darin, dass hiermit der Maschine gewissermassen ein «Tastsinn» oder ein «taktiles Empfinden» gegeben wird mit der Möglichkeit, den Vorschub derart zu regeln, dass gerade Vorsprünge, Oxidschichten usw. erkannt und abgearbeitet werden, ohne dass das Werkzeug ins eigentliche Material des Werkstückes einschneiden muss. Insbesondere wird dabei eine Anpassung des Vorschubes an die jeweilige effektive Belastung erreicht. Die Messung der genannten Änderung der Wirkleistung nach dem Vorschubweg in Form des o.g. Differentialquotienten bewirkt ferner, dass auch die genannten Ausweichbewegungen bzw. die Ausweichgeschwindigkeit des Werkstückes (bzw. eine entsprechende Bewegung des Werkzeuges) messtechnisch mit erfasst und daher bei der Einstellung berücksichtigt werden können. Das Endmass des Werkstückes wird aufgrund des nunmehr gegebenen definierten Belastungszustandes bis zum Ende des Bearbeitungsvorganges sicher eingehalten. Erwähnt sei, dass es nicht genügt zur Regelung nur den Strom des Antriebsmotors zu verwenden, da die Leistung gegeben ist durch

$$P = \underline{U} \cdot \underline{I} = U \cdot I \cdot \cos \tau$$

Wiewohl die Spannung  $U$  in der Regel hinreichend konstant ist, muss ausser dem Strom  $I$  auch der Faktor  $\cos \tau$  berücksichtigt werden, da insbesondere bei kleiner Wirkleistungsaufnahme sich zunächst  $\cos \tau$  ändert, während  $I$  annähernd gleich bleibt. Erst wenn die Wirkleistung in die Grössenordnung der Nennleistung kommt, ändert sich der Strom in gleichem Masse. Es ergibt sich eine einwandfreie Beseitigung von Unrundheiten des Werkstückes bei einer unkritischen Einstellung der Prozessparameter. Mit der Messung der Änderung der Leistungsaufnahme des Antriebsmotors wird dabei die gewünschte Schnelligkeit der Regelung erreicht. Dies gilt insbesondere dann, wenn gemäss einem weiteren Merkmal der Erfindung diese Werte ohne mechanische Hilfsmittel unmittelbar über einen Analogmultiplizierer in elektrische Regelsignale umgesetzt werden. Ferner kann gemäss der Erfindung als weitere Verfahrensmassnahme vorgesehen sein, dass zusätzlich die Änderung der Leistungsaufnahme des Motors in Relation zur Zeit, d. h. der Differentialquotient  $dP/dt$  gemessen und asymmetrisch

derart verarbeitet wird, dass nur ein Anstieg der Leistung in den Regelprozess eingeht, ein Abfall der Leistung jedoch unberücksichtigt bleibt. Dies bedeutet, dass zwar ein Anstieg der Leistung den Vorschub verzögert, jedoch ein Abfall der Leistung den Vorschub nicht wieder beschleunigt. Hierdurch wird die Abarbeitung von Ungenauigkeiten des Werkstückes verbessert. Dabei empfiehlt es sich gemäss einem weiteren, bevorzugten Verfahrensmerkmal der Erfindung, dass das aus dem zeitlichen Anstieg der Leistung gewonnene Signal gespeichert und der Speicher mit einer Zeitkonstanten entladen wird, die der Drehzahl des Werkstückes so angepasst ist, dass Unrundheiten abgebaut werden, bevor der Vorschub wieder beschleunigt. Hierdurch wird vermieden, dass – wie es bei einem konstanten Vorschub der Fall wäre – das Werkzeug der Werkstückkontur elastisch folgt, d. h. sich die Unregelmässigkeiten bis ins Endmass fortsetzen.

Weiter sieht die Erfindung eine Verfahrensmassnahme vor, wonach die aufgenommene Leistung des Antriebsmotors gemessen und mit einer oberen Nenngrenze verglichen, sowie zusammen mit einem oder beiden der genannten Differentialquotienten ( $dP/ds$ ,  $dP/dt$ ) in den Regelprozess eingeht. Der Überlastungsschutz aufgrund einer Messung der aufgenommenen absoluten Leistung ist an sich bekannt. In Verbindung mit den genannten Differentialquotienten wird die Regelung noch optimiert. Insbesondere in Verbindung mit der Messung des Differentialquotienten  $dP/dt$  und der Zeitkonstanten ist hier eine spezielle PD-Regelung (Leistung-Zeit-Regelung) gegeben mit dem Effekt, dass die Regelung um so empfindlicher auf plötzliche Widerstände reagiert, je höher die bereits vorliegende effektive Leistung ist, d. h. je geringer der noch verbleibende Spielraum bis zur Nennleistung ist. Die maximale Nennleistung bildet also die obere Schranke für die Summe aus der gemessenen Leistungsaufnahme des Motors und dem Ladungszustand des Speichers. Bei auftretenden Unrundheiten wird also der Vorschub verlangsamt oder sogar so lange stillgesetzt, bis die vorspringenden Teile des Werkstückes abgetragen sind, ohne dass zugleich mit den vorspringenden auch tiefer liegende Stellen des Werkstückes zerspannt werden würden, wodurch nämlich die Unrundheit mehr oder weniger erhalten oder zumindest nur asymptotisch verschwinden wurde.

Gemäss dem Vorstehenden kann also nach der Erfindung der Ladungszustand des Speichers in Kombination mit der gemessenen Leistung als Teil der Regelgrösse verwendet werden bzw. es wird das aus der gemessenen Leistung resultierende Signal zu dem aus dem Ladungszustand des Speichers resultierenden Signal addiert und die Summe stellt die Regelgrösse oder einen Teil der Regelgrösse dar.

Eine weitere Verfahrensmassnahme der Erfindung geht dahin, dass die Leistungsmessung zweimal je Wechselstromperiode bzw. sechsmal je Drehstromperiode erfolgt. Hiermit liegt beispielsweise bei Wechselstromantrieb alle 10 Millisekunden ein verwertbares Leistungsmass  $P$  in Form eines Spannungssignales vor, wobei die Verzögerung zwischen Auftreten der Leistung und Ausgang des Signals geringer als eine Millisekunde ist. Die Erfassung der Regelgrösse ist also sehr schnell möglich. Falls ein Wechsel- oder Drehstromantrieb mit höherer Frequenz als 50 Hz vorliegt, ist auch die Zahl der Messungen pro Sekunde entsprechend höher.

Die Erfindung betrifft ferner eine Regelvorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemässen Verfahrens. Hiernach sind Messorgane für die Erfassung der Strom- und Spannungswerte des Antriebsmotors und Mittel zur vektoriellen Zuordnung und Weitergabe dieser Werte an einen Analogmultiplizierer vorgesehen (siehe Anspruch 8). Hierdurch wird die effektive elektrische Leistung  $U \cdot I \cdot \cos \tau$  und nicht etwa die Scheinleistung gemessen. Die effektive Leistung ist nach Abzug der Leerlaufleistung des Motors ein di-

rektes Mass für die Tangentialkraft der Verspannung zwischen Werkzeug und Werkstück. Bei gegebenen Zerspannungsbedingungen steht diese Tangentialkraft in einem bestimmten Verhältnis zur Normalkraft, so dass die gemessene effektive elektrische Leistungsaufnahme auch ein Mass für die Normalkraft ist. Der Analogmultiplizierer weist die Mittel auf, um die eingegebenen Werte und insbesondere die genannten Differentialquotienten in entsprechende elektrische

Ausgangssignale, z. B. Spannungssignale, umzusetzen. Von hier aus können sie einem Regler z. B. einem Zweipunktregler, zugeführt werden (siehe Anspruch 9). Die vorstehend umrissene Mess- und Regelvorrichtung vermeidet mechanisch bewegte Teil und ist so schnell, dass sie die bei 50 Hz-Antrieben hundertmal, bzw. dreihundertmal pro Sekunde auftretenden Änderungen folgen und eine entsprechende schnelle Regelung des Antriebsmotors bewirken kann.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65