

EINE MÖGLICHKEIT FÜR DIE ADAPTIVE REGELUNG DES EINSTECHSCHLEIFENS

Von

S. NAGY

Lehrstuhl für Fertigungstechnik, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 27. Febr. 1976)

Vorgelegt von Prof. Dr. I. KALÁSZI

I. Einleitung

Das Schleifen ist ein komplexes mechanisches und physikochemisches Verfahren, dessen Zweck ist, die geometrischen Formen der Werkstücke in einem vorherbestimmten Maße zu verändern, jedoch ohne eine wesentliche Veränderung in der Struktur des Stoffes [1].

Für den Zweck des Schleifens sind die geometrischen und strukturellen Größen des zu bearbeitenden Werkstückes als Eingangsgrößen zu betrachten, während als Ausgangsgrößen die geometrischen und strukturellen Größen des bearbeiteten Werkstückes sowie die Bearbeitungszeit und Bearbeitungskosten gelten [2].

Die optimale Regelung des Schleifprozesses bereitet viele Probleme [3], [4], da unsere Kenntnisse „a priori“ über die Zusammenhänge zwischen den Größen des Prozesses mangelhaft sind. Die vorliegenden Theorien gründen sich auf vereinfachten Annahmen mit beschränkter Gültigkeit und ermöglichen nicht, den Prozeß allgemeingültig, einschließlich sämtlicher Zusammenhänge, zu beschreiben. Daher lassen sich die Ausgangsgrößen für die vorhergegebenen Eingangsgrößen mit genügender Genauigkeit nicht bestimmen.

Da wir den Prozeß nur annähernd beschreiben können und sich die Kennlinien und Parameter in einer unbekanntem Weise stochastisch verändern, müssen diese während des Prozesses von Zeit zu Zeit wieder bestimmt werden. Die Identifikation ermöglicht, im Besitz der erweiterten Informationen, eine Optimierregelung durchzuführen. Die oben erwähnten Regelungsprozesse können mit adaptiven Regelungssystemen gesichert werden [5].

2. Der Schleifprozeß

2.1. Die Zielfunktionen des Schleifprozesses

Die Beurteilung der Ergebnisse kann beim Schleifen mit Berücksichtigung der folgenden Gesichtspunkte erfolgen:

- a) Werkstückfehler (z.B. Formfehler, Oberflächenrauigkeit, Strukturänderungen an der Materialoberfläche);

- b) die Kosten der Bearbeitung;
- c) die Zeit (Produktivität) der Bearbeitung.

Bei Festlegung der Zielfunktion können diese Beurteilungsgesichtspunkte entweder einzeln oder miteinander kombiniert in Betracht gezogen werden [2]. In den meisten Fällen werden die Minimalkosten gesucht, die zu den höchstzulässigen Fehlern gehören. Dieser Fall wird in diesem Vortrag behandelt.

2.2. Das Modell des abspannenden Verfahrens

Bei einer unveränderten Schnittgeschwindigkeit und unveränderten Geschwindigkeitsverhältnissen sowie bei gegebenen geometrischen Bedingungen und einer bestimmten Kombination des Werkstückes, der Schleifscheibe und des Kühl- und Schmiermittels hängt das abgetrennte Spanvolumen (v) von der Zeit des Schleifens ab:

$$v = f(F, t) \quad (1)$$

Für eine der möglichen annähernden Berechnungen gilt die folgende Gleichung:

$$Z' = \alpha \cdot F^\beta \cdot e^{-\gamma \cdot F^\delta \cdot t} \quad (2)$$

Nach Integrierung bei der Anfangsbedingung $v(0) = 0$ erhält man das Materialvolumen (v), das während des Schleifens abgetrennt wurde:

$$v = \int_0^t Z' dt = \frac{\alpha}{\gamma} \cdot F^{(\beta-\delta)} \cdot (1 - e^{-\gamma \cdot F^\delta \cdot t}). \quad (3)$$

Gleichung (3) macht die beträchtliche Anzahl der Parameter (α , β , γ , δ) ersichtlich die — auch bei einem relativ einfachen Modell — für den Abtrennprozeß charakteristisch sind.

2.3. Restriktionsfunktionen

Falls bei Beurteilung der Schleifergebnisse die Bearbeitungsfehler zu berücksichtigen sind, soll die Wirkung der Varianten auf die Entstehung der einzelnen Fehlertypen im Prozeß bekannt sein. Bei den Bedingungen sind die Bearbeitungsfehler (k_{r1} , k_{r2} , . . . k_{rn}) vorwiegend von der spezifischen Normalschleifkraft und dem abgetrennten Spanvolumen abhängig:

$$k_{rn} = f(v, F) \quad (4)$$

Aus Gleichung (1) und (4) läßt sich für jeden wesentlichen Fehlertyp je eine

Restriktionsfunktion (5) aufstellen:

$$v \leq f(k_{rn}, F, t) \quad (5)$$

In der Ungleichheit bezeichnet v das abgetrennte Spanvolumen, bei dem noch kein Fehler, größer als k_{rn} auftritt. Ein weiterer beschränkender Faktor ist die für die Schleifmaschine zugelassene höchste Schleifkraft:

$$U < U_{\max} \quad (6a)$$

Wird die Regelung der Normalschleifkraft gewünscht (Schleifen mit konstanter Kraft), muß man wegen der Meßprobleme auch mit einer unteren Grenzkraft rechnen:

$$U > U_{\min} \quad (6b)$$

Die zugelassene höchste Schleifleistung gibt auch eine Beschränkung:

$$N \leq N_{\max} \quad (7)$$

2.4 Kostenfunktion

Die spezifischen Kosten der abspannenden Bearbeitung (Aufwand für die Spanvolumeneinheit des Werkstückes) sind die folgenden:

$$K = K_0 \cdot \frac{t}{v} + (K_0 \cdot t_k + K_s) \frac{1}{v} + \frac{K_0 \cdot t_N}{v_W} \quad (8)$$

Diese Gleichung ist aus der Literatur [8] bekannt.

3. Die Optimierregelung des Schleifprozesses

3.1 Prinzipielle Anordnung

Abb. 1 zeigt das Blockdiagramm eines optimierenden Schleifsystems. Das System und seine Algorithmen wurden für das mit geregelter Kraft durchgeführte Einsteichschleifen ausgearbeitet.

Die Basisangaben, die dem konkreten Bearbeitungsverhalten am nächsten stehen, wählt der A0-Algorithmus A0 von Angaben aus. Diese Angaben sind die Ergebnisse von früheren Versuchen und sind im Speicher der Rechner gespeichert. Diese Angaben dienen als Anfangsangaben zu der ersten Werkstückserie. Algorithmus A1 ermittelt zuerst aufgrund dieser Angaben den Parametervektor (C), der die Parameter des geschätzten Vorgangs umfaßt, dann korrigiert Algorithmus A1 den Wert des Parametervektors mit den aus der Werkstückserie gewonnenen Meßergebnissen.

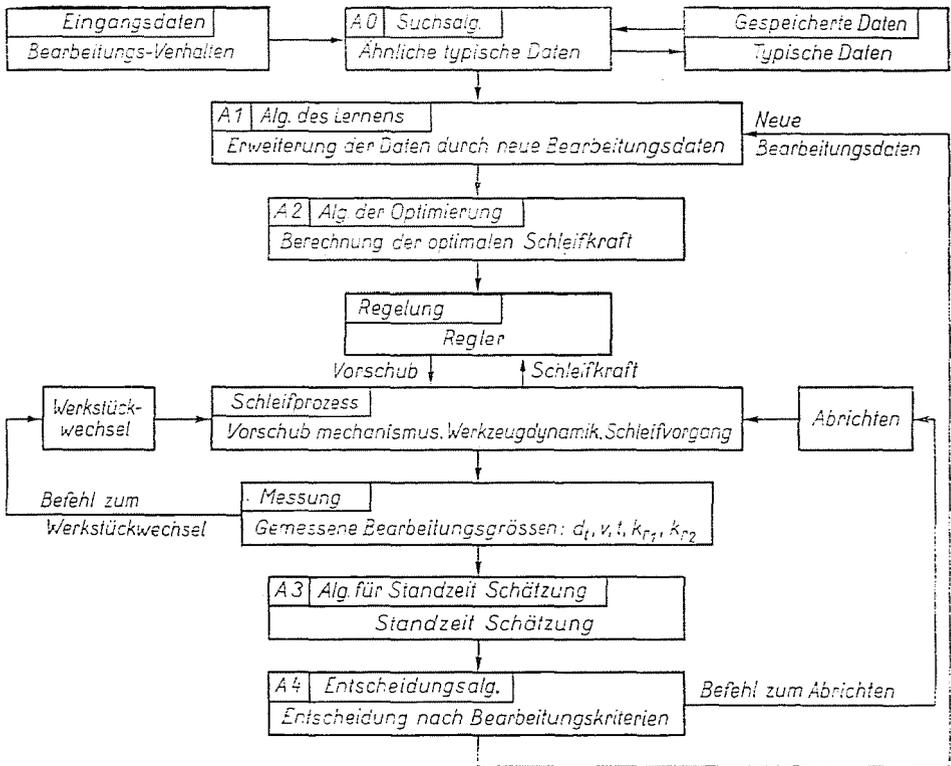


Abb. 1

Der Algorithmus A1 hat einen lernenden Charakter. Der optimierende Algorithmus A2 bestimmt den Optimalwert der spezifischen Schleifkraft. Für die Regelung der Normalschnittkraft sorgt ein getrennter Regelungskreis. Die Ausgangsgrößen des Schleifvorgangs (abgetrenntes Spanvolumen, Schleifzeit, Kantenverschleiß, usw.) werden durch Probenahme festgestellt und in einem Digitalrechner gespeichert. Algorithmus A3 führt aufgrund dieser Angaben Schätzungen für die zu erwartende Standzeit der Schleifscheibe durch. Algorithmus A4 kann aufgrund der Standzeit einen Befehl für den Beginn des Abrichtens geben. Algorithmus A1 betrachtet diese Ausgangsgrößen als aktuelle Werte. Für die nächste Werkstückserie bestimmt Algorithmus A1 den Parametervektor im Besitz dieser erweiterten Informationen.

3.2 Optimierungsalgorithmus

Die Optimierung der in Punkt 2.1 erwähnten Zielfunktion wird als Aufgabe gestellt. In diesem Falle sind die höchstzulässigen Bearbeitungsfehler gegeben und das Minimum einer Kostenfunktion bestimmten Verlaufes wird

gesucht [9]. Nehmen wir an, daß der Prozeß bzw. die Parameter der Restriktionsfunktionen (Gleichungen 1, 5, 6a, 6b, 7) gut bekannt sind und diese auch während des Schleifens unverändert bleiben. Dann wäre es im Besitz der Kostenfunktion (8) möglich, die zusammenhängenden drei Größen V_{opt} , T_{opt} , F_{opt} durch übliche mathematische Methoden zu erfassen.

Aus dem Obigen wird es klar, daß die Optimierregelung Informationen in relativ großem Umfang verlangt, da alle Einzelheiten der für den Prozeß charakteristischen Funktionen bekannt sein müssen. Für konkrete Bearbeitungsfehlerkriterien wäre es dagegen genügend nur die Standzeiten (T_n) bzw. Standzeitvolumen (V_n) zu kennen, die zu den durch die Kriterien bestimmten Punkten gehören, ferner die entsprechenden Kräfte (F). So wäre es möglich, für die häufigsten Fehlertypen, in Kenntnis einiger Kennlinien, eine Optimierregelung durchzuführen [10].

Zur Klarstellung dieser Lösung seien zwei Standzeitkriterien gewählt: K_{rm1} und K_{rm2} . Setzen wir ihre Werte in Gleichung (4) ein. So erhalten wir eine Beziehung zwischen V_1 , F_1 und V_2 , F_2 . Diese Beziehung hat eine gute Annäherung in exponentialer Form:

$$V_1 = C_3 \cdot F_1^{C_4} \quad (9a)$$

$$V_2 = C_7 \cdot F_2^{C_8} \quad (9b)$$

Nachdem aus diesen Gleichungen die Werte von F_1 bzw. F_2 ausgedrückt und in Gleichung (1) eingesetzt sind, ergeben sich die folgenden Gleichungen, die sich auch in exponentialer Form schreiben lassen:

$$V_1 = C_1 \cdot T_1^{C_5} \quad (9c)$$

$$V_2 = C_5 \cdot T_2^{C_6} \quad (9d)$$

Aus diesem vereinfachten Modell des Prozesses, wenn der Parametervektor ($C_1 \dots C_8$) bekannt ist, ist die optimale Schnittkraft mit Hilfe der Kostenfunktion durch Extremwertberechnung erfaßbar.

3. 2. 1 Extremwertberechnung

Die Derivierung der Gleichung (8) — nachdem die Gleichungen (9c) und (9d) eingesetzt sind — führt zu den folgenden Gleichungen:

$$0 = \frac{\partial K}{\partial T_1} = \frac{K_0}{C_1} (1 - C_2) \cdot T_1^{-C_4} - \frac{K_0 \cdot t_k + K_s}{C_1} \cdot C_2 \cdot T_1^{-(C_4+1)} \quad (10a)$$

$$0 = \frac{\partial K}{\partial T_2} = \frac{K_0}{C_1} (1 - C_6) \cdot T_2^{-C_8} - \frac{K_0 \cdot t_k + K_s}{C_5} \cdot C_6 \cdot T_2^{-(C_8+1)} \quad (10b)$$

Zur Vereinfachung wird die Bezeichnung „p“ laut der nächsten Gleichung eingeführt:

$$p = \frac{K_0 \cdot t_k + K_s}{K_0} \quad (11)$$

Als Resultat werden die Extremwerte von T_1 und T_2 erhalten:

T_{1s} , T_{2s} sowie die dazugehörenden Standzeitvolumen: V_{1s} , V_{2s} :

$$V_{1s} = C_1 \cdot T_{1s}^{C_2} \quad (12a)$$

$$V_{2s} = C_5 \cdot T_{2s}^{C_6} \quad (12b)$$

$$T_{1s} = p \cdot \frac{C_2}{1 - C_2} \quad (13a)$$

$$T_{2s} = p \cdot \frac{C_6}{1 - C_6} \quad (13b)$$

3.2.2 Auswahl des Optimalwertes

Die Abbildungen 2a, 2b und 2c zeigen die möglichen Anordnungen der Extremwerte an den Standzeitkurven, falls $C_2 < C_6$, d. h. $T_{1s} < T_{2s}$. Dem Schnittpunkt (P_m) der Standzeitkurven „a“ und „b“ sind die Werte T_m und V_m zugeordnet:

$$T_m = p \cdot \left(\frac{C_1}{C_5} \right)^{\frac{1}{C_6 - C_2}} \quad (14a)$$

$$V_m = C_5 \cdot T_m^{C_6} \quad (14b)$$

Stoffmengen, in Abhängigkeit von der Zeit, die durch die zu den Extremwerten gehörenden, konstanten Schnittkräfte F_1 und F_2 abgespannt wurden. Die Steilheit der Kurven (Z') kennzeichnet die momentane Schnittleistung. Es ist zu sehen, daß zum Beispiel der Extremwert P_{2s} im Abb. 2a nicht erreichbar ist, wenn mit einer konstanten Kraft F_2 geschliffen wird, weil die Fehlergrenze K_{rml} — die zur Kurve „a“ gehört — bereits im Punkt P_A überschritten wird. Aus diesem Grund können nur die zu P_{1s} gehörenden Werte als Optimum angenommen werden, obwohl zu Punkt P_{2s} niedrigere Kosten gehören. — Nach gleichen Überlegungen wird das Optimum auch in anderen Fällen ausgewählt. Das Resultat wird:

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------|
| a) falls $V_m < V_{1s}$ | dann $V_{opt} = V_{1s}$ |
| b) falls $V_m > V_{2s}$ | dann $V_{opt} = V_{2s}$ |
| c) falls $V_{1s} \leq V_m < V_{2s}$ | dann $V_{opt} = V_m$ |

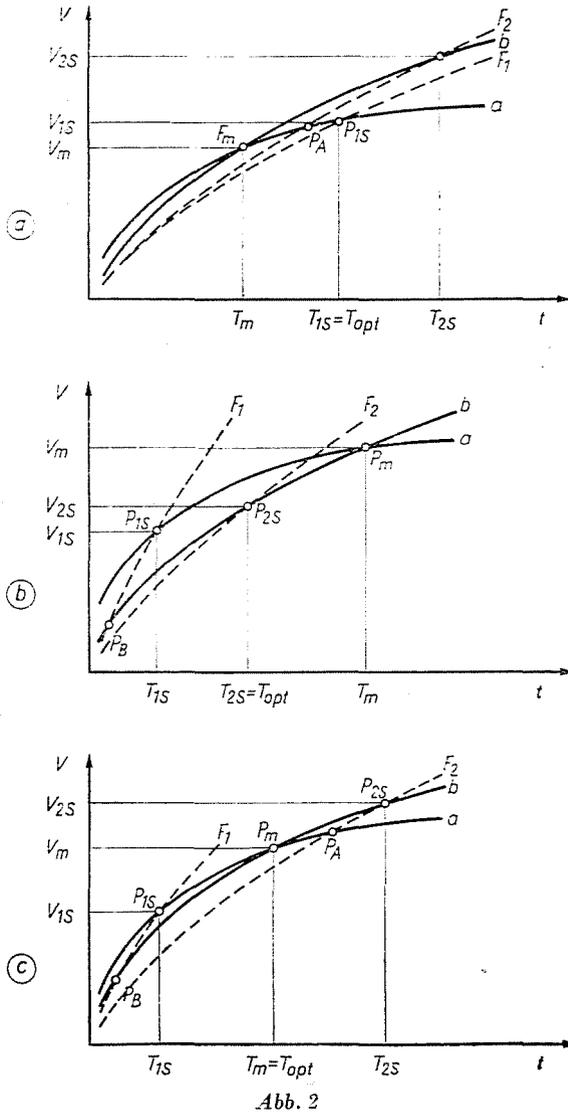


Abb. 2

3.2.3 Bestimmung der optimalen Regelungsgröße

Die spezifische Schnittkraft ist erfassbar aus den Werten V_{opt}

$$F_{opt} = \left(\frac{V_{opt}}{C_3} \right)^{\frac{1}{C_4}} \quad (15a)$$

$$F_{opt} = \left(\frac{V_{opt}}{C_7} \right)^{\frac{1}{C_5}} \quad (15b)$$

$$F_{opt} = \left(\frac{V_{opt}}{C_3} \right)^{\frac{1}{C_4}} - \left(\frac{V_{opt}}{C_7} \right)^{\frac{1}{C_5}} \quad (15c)$$

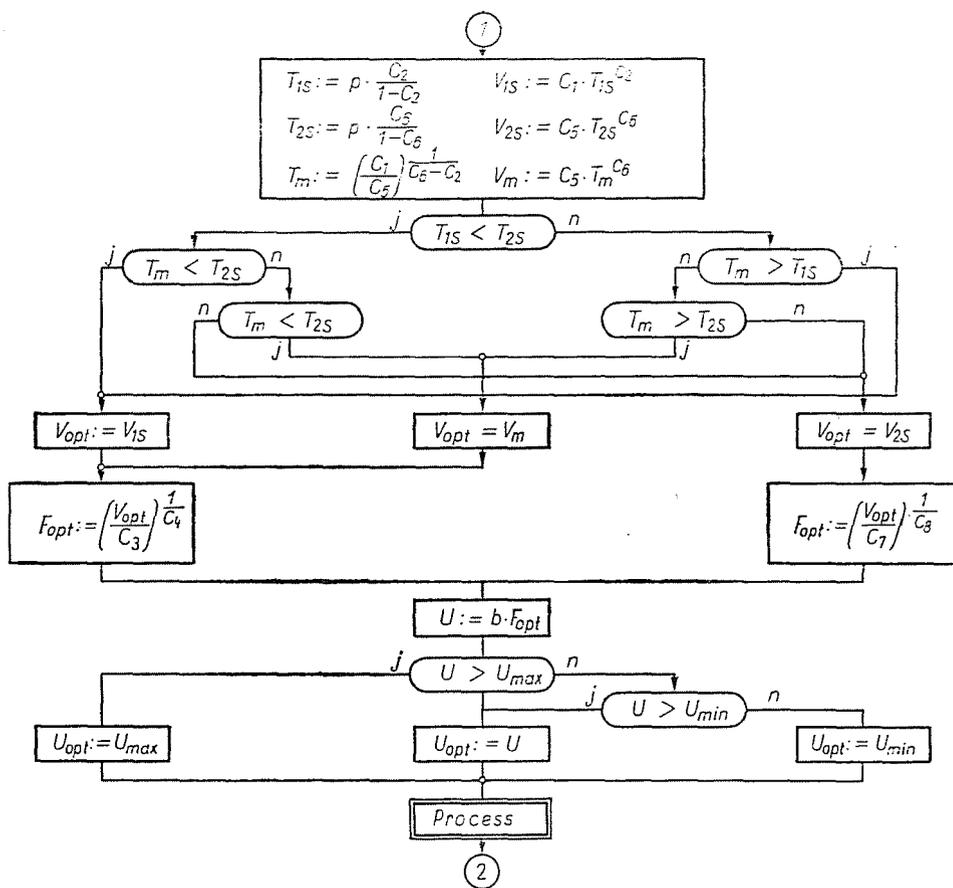


Abb. 3

Die optimale Schnittkraft (U_{opt}) ist aus der eingespannten Breite des Schleifkörpers (b) und aus der maximalen Belastbarkeit der Werkzeugmaschine zu ermitteln. Der bezügliche Berechnungsprozeß wird im Blockdiagramm in Abb. 3. zusammenfassend angegeben.

3.3.4 Identifizierung des Schleifprozesses

Ein grundlegendes Kennzeichen der Projektierung von traditionellen optimalen Systemen ist, daß die ausführliche Kenntnis der Kennlinien des geregelten Prozesses als Basis dient. Ist der Parametervektor C bekannt — wie früher erwähnt — so ist die optimale Regelungsgröße erfassbar. Der Parametervektor C kann durch Vorversuche bestimmt werden. Die Vorversuche beziehen sich aber nur auf einige typische Fälle, nicht auf jeden gegebenen Fall. Ferner beweisen die Erfahrungen auch die Tatsache, daß der Wert des Para-

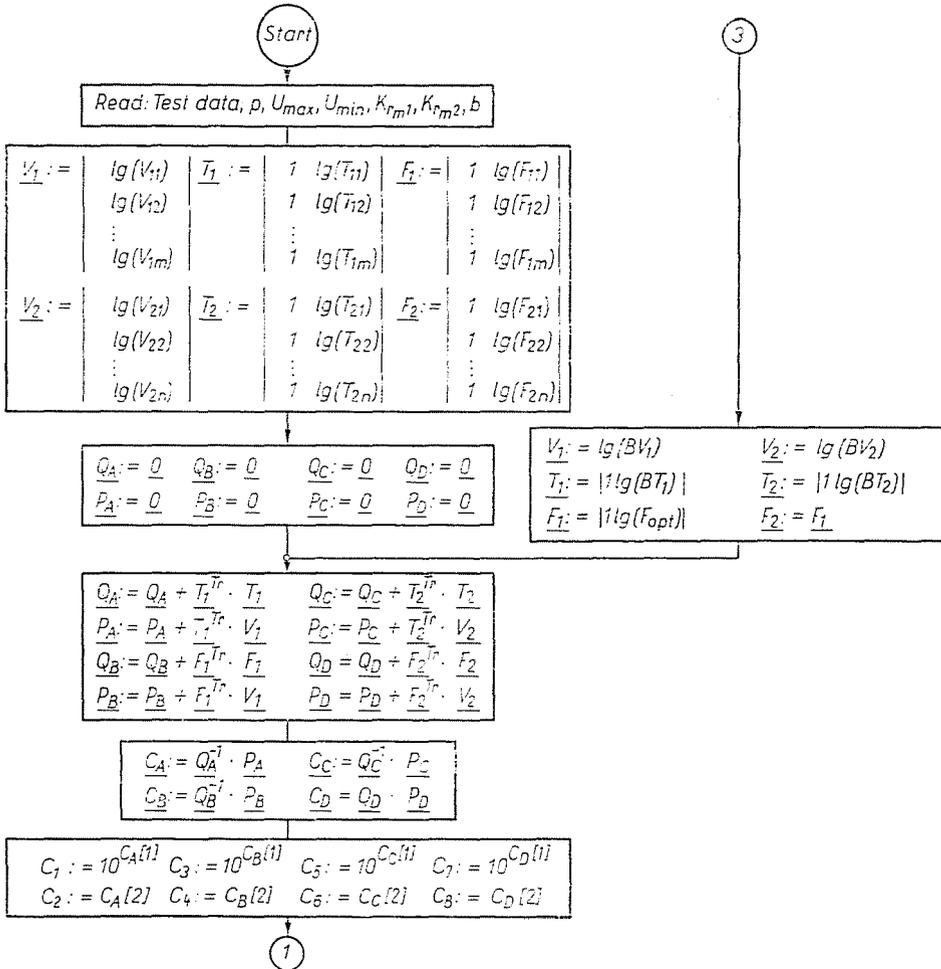


Abb. 4

metervektors während des Prozesses einer stochastischen Veränderung unterworfen ist. Das sind Beweise dafür, daß unsere Kenntnisse „a priori“ mangelhaft sind. Daher ist es erforderlich, während des Prozesses weitere Informationen zu sammeln, den Parametervektor näher zu kennen, d.h., das System zu identifizieren (Abb. 4). Als Ausgangsdaten zur Bestimmung des Parametervektors gelten die bei den Vorversuchen erhaltenen Standzeitwerte sowie die während des Prozesses gemessenen bzw. geschätzten Standzeitwerte. Der Parametervektor wird bei je einem Schleifzyklus nur einmal berechnet. Als Berechnungsbasis dient — bei Inbetrachtung der Annäherungen (9a, 9b, 9c, 9d) — die logarithmische Regression. Die Matrizen Q_A , Q_B , Q_C , Q_D , P_A , P_B , P_C , P_D werden von den Werten berechnet, die von den Logarithmen der

vorherigen Versuchsergebnisse gebildet wurden, und zwar durch Addierung einer Matrix, die von den Logarithmen der aktuellen Meßwerte bei jedem Standzeitzyklus gebildet wurde. Diese Addierung ist die Grundlage des Algorithmus des sich selbst weiterentwickelnden adaptiven Regelungssystems. Bei Invertierung der Matrizen Q_A, Q_B, Q_C, Q_D können Berechnungsprobleme auftreten (schwache Konvergenz). Der beschränkte Rahmen dieses Vortrages erlaubt nicht die Behandlung dieser Probleme.

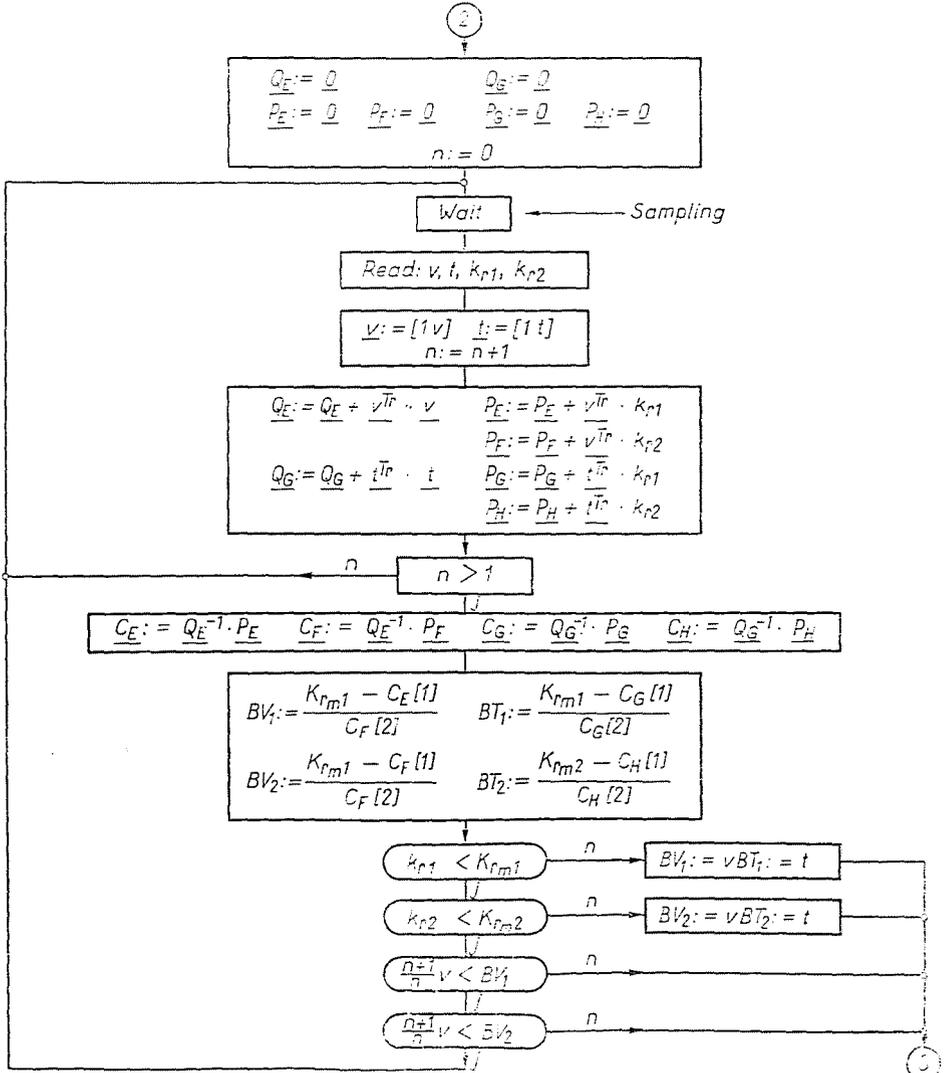


Abb. 5

3.2 Der Algorithmus der Standzeit-Schätzwertberechnung

Die Berechnung des Parametervektors verlangt die Bestimmung der Standzeiten und Volumenwerte für die einzelnen Fehlertypen des Werkstückes (Abb. 5). Die Aufgabe ist also den Schnittpunkt der Funktionen $k_{rn} = f(v)$ und $k_{rn} = f(t)$ mit der Abhängigkeit $K_{rmi} = \text{konstant}$ zu bestimmen.

In der Praxis genügt meistens die lineare Annäherung für Funktionen $k_{rn} = f(t)$ und $k_{rn} = f(v)$, die entweder direkt oder nach nicht linearen Transformation der variablen Größen anwendbar ist. Die Aufschreibungsweise mit Matrizen kann auch bei Annäherung mit einer höheren Funktion formal angewandt werden, jedoch sind die zusätzlichen Fehler, welche mit der steigenden Zahl der zu bestimmenden Konstanten auftreten, in jedem Falle zu betrachten.

Es bereitet Probleme, daß mit Hilfe der gegenwärtig vorliegenden Mittel die charakteristischen Werte der meisten Fehlertypen während der Bearbeitung nicht meßbar sind. So müssen wir uns auf die Schätzungen beschränken, die aus den zeitweise gemessenen Werten erzielbar sind. Die Länge der Probenmeßzeit wird durch die Präzision des Schleifprozesses und den zu erwartenden Meßfehler stark beeinflußt. Wenn Werkstücke in einer relativ großen Anzahl während der Schleifscheiben-Standzeit zu bearbeiten sind, dann ist die Probenahme je Werkstück zweckmäßig, wodurch eine wesentliche Vereinfachung erreicht wird.

Abb. 4 veranschaulicht den Algorithmus der Schätzungen. Die Schätzung wird für jede Probenahmeperiode wiederholt und das Schleifen wird ohne Schleifscheibenabrichtung fortgesetzt, bis das während des Prozesses gemessene Abspannvolumen den Wert erreicht, der von den aus der letzten Probenahme berechneten Standzeitvolumenwerten der kleinste ist.

5. Versuchsergebnisse

5.1 Versuchsmethode

Unsere Hauptzielsetzung war, die Anwendbarkeit des beschriebenen Algorithmus unter Einstechschleifbedingungen darzulegen, wozu eine Handregelung genügend war. Die Messungen der Werte v , k_{r1} und k_{r2} werden für jedes gefertigte Werkstück auf konventionelle Weise durchgeführt. Die Bewertung der Meßwerte erfolgte durch eine programmierbare Tischrechenmaschine zur Zeit des Werkstückeaustausches und der erhaltene U_{opt} -Wert wurde zur Regelung der Vorschubseinheit ebenfalls von Hand eingestellt [10].

5.2 Arbeitsbedingungen

Werkstoff	C45N
Schleifscheibentyp	KA 32 K5 Ke
Schleifscheibendurchmesser	Ø 400 mm
Schleifgeschwindigkeit	33 m/sec
Geschwindigkeitsverhältnis	60
Kühl-Schmiermittel	Wäßrige Lösung mit Soda
Kostenzeit (p)	8 min
zulässiger Kantenverschleiß ($K_{r,m1}$)	0,3 mm ²
zulässige Oberflächenrauigkeit ($K_{r,m2}$)	2µm

5.3 Meßwerte

Die Tabelle in Abb. 6 und Abb. 7 zeigt die Anfangsschritte der Versuchsreihe, die zwecks der Bestimmung der stochastischen Störsignale durchgeführt wurde, welche auf den Prozeß Einfluß haben. Aus diesem Grunde wurden zuerst die zusammenhängenden T -, V -, F -Werte, unter den beschriebenen

Basisdaten:

$V_{11} = 810$	$T_{11} = 3,4$	$F_{11} = 1,2$	$V_{21} = 700$	$T_{21} = 4$	$F_{21} = 0,9$
$V_{12} = 980$	$T_{12} = 5,5$	$F_{12} = 0,9$	$V_{22} = 930$	$T_{22} = 5,8$	$F_{22} = 0,78$
$V_{13} = 1320$	$T_{13} = 11$	$F_{13} = 0,65$	$V_{23} = 1210$	$T_{23} = 9,1$	$F_{23} = 0,7$
$V_{14} = 1580$	$T_{14} = 17$	$F_{14} = 0,5$	$V_{24} = 1490$	$T_{24} = 12,9$	$F_{24} = 0,63$
$V_{15} = 1710$	$T_{15} = 20$	$F_{15} = 0,47$	$V_{25} = 2010$	$T_{25} = 19$	$F_{25} = 0,55$

$$Q_A = \begin{vmatrix} 5 & 4,84 \\ 4,84 & 5,12 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 5 & 4,84 \\ 4,84 & 5,12 \end{vmatrix}$$

$$Q_B = \begin{vmatrix} 5 & -0,78 \\ -0,78 & 0,24 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 5 & -0,78 \\ -0,78 & 0,24 \end{vmatrix}$$

$$Q_C = \begin{vmatrix} 5 & 4,71 \\ 4,71 & 4,73 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 5 & 4,71 \\ 4,71 & 4,73 \end{vmatrix}$$

$$Q_D = \begin{vmatrix} 5 & -0,80 \\ -0,80 & 0,14 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 5 & -0,80 \\ -0,80 & 0,14 \end{vmatrix}$$

$$P_A = \begin{vmatrix} 15,45 & 0 \\ 15,15 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 15,45 & 0 \\ 15,15 & 0 \end{vmatrix} \quad P_B = \begin{vmatrix} 15,45 & 0 \\ -2,51 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 15,45 & 0 \\ -2,51 & 0 \end{vmatrix}$$

$$P_C = \begin{vmatrix} 15,37 & 0 \\ 14,68 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 15,37 & 0 \\ 14,68 & 0 \end{vmatrix} \quad P_D = \begin{vmatrix} 15,37 & 0 \\ -2,42 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 15,37 & 0 \\ -2,42 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\begin{matrix} C_1 = 481,0 & C_3 = 923,9 & C_5 = 284,2 & C_7 = 554,1 \\ C_2 = 0,42 & C_4 = -0,79 & C_6 = 0,66 & C_8 = -2,15 \end{matrix}$$

$$V_{15} = 1010 \quad T_{15} = 5,8 \quad V_m = 1224 \quad T_m = 9,1 \quad V_{25} = 1723 \quad T_{25} = 15,4$$

$$V_{opt} = 1224 \quad T_{opt} = 9,1$$

$$F_{opt} = 0,70$$

Abb. 6

Erste Serie:

$n = 1$	$v = 195$	$t = 1,1$	$k_{r1} = 0,05$	$k_{r2} = 1,2$
			$BV_1 = -$	$BV_2 = -$
$n = 2$	$v = 390$	$t = 2,6$	$k_{r1} = 0,08$	$k_{r2} = 1,25$
			$BV_1 = 1170$	$BV_2 = 1055$
$n = 3$	$v = 605$	$t = 4,2$	$k_{r1} = 0,11$	$k_{r2} = 1,75$
			$BV_1 = 1217$	$BV_2 = 1055$
$n = 4$	$v = 810$	$t = 5,8$	$k_{r1} = 0,15$	$k_{r2} = 1,8$
			$BV_1 = 1139$	$BV_2 = 1193$
$n = 5$	$v = 990$	$t = 7,3$	$k_{r1} = 0,16$	$k_{r2} = 1,8$
			$BV_1 = 1220$	$BV_2 = 1223$
$n = 6$	$v = 1180$	$t = 9$	$k_{r1} = 0,18$	$k_{r2} = 1,9$
			$BV_1 = 1276$	$BV_2 = 1270$
$n = 7$	$v = 1400$		$BV_1 < v$	$BV_2 < v$ Ende

$$Q_A = \left| \begin{array}{cc} 5 & 4,84 \\ 4,84 & 5,12 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{cc} 1 & 0,98 \\ 0,98 & 0,97 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{cc} 6 & 5,82 \\ 5,82 & 6,09 \end{array} \right|$$

$$Q_B = \left| \begin{array}{cc} 5 & -0,78 \\ -0,78 & 0,24 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{cc} 1 & -0,16 \\ -0,16 & 0,02 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{cc} 6 & -0,94 \\ -0,94 & 0,26 \end{array} \right|$$

$$Q_C = \left| \begin{array}{cc} 5 & 4,71 \\ 4,71 & 4,73 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{cc} 1 & 0,95 \\ 0,95 & 0,91 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{cc} 6 & 5,67 \\ 5,67 & 5,65 \end{array} \right|$$

$$Q_D = \left| \begin{array}{cc} 5 & -0,80 \\ -0,80 & 0,14 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{cc} 1 & -0,16 \\ -0,16 & 0,02 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{cc} 6 & -0,93 \\ -0,93 & 0,17 \end{array} \right|$$

$$P_A = \left| \begin{array}{cc} 15,45 & 3,10 \\ 15,15 & 3,05 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{cc} 18,55 & \\ & 18,21 \end{array} \right| \quad P_B = \left| \begin{array}{cc} 15,45 & 3,10 \\ -2,51 & -0,50 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{cc} 18,55 & \\ & -3,01 \end{array} \right|$$

$$P_C = \left| \begin{array}{cc} 15,37 & 3,07 \\ 14,68 & 2,94 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{cc} 18,44 & \\ & 17,63 \end{array} \right| \quad P_D = \left| \begin{array}{cc} 15,37 & 3,07 \\ -2,42 & -0,49 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{cc} 18,44 & \\ & -2,91 \end{array} \right|$$

$$C_1 = 482,1 \quad C_3 = 919,4 \quad C_5 = 284 \quad C_7 = 550,6 \\ C_2 = 0,42 \quad C_4 = -0,82 \quad C_6 = 0,65 \quad C_8 = -2,14$$

$$V_{15} = 1015 \quad T_{15} = 5,8 \quad V_m = 1235 \quad T_m = 9,3 \quad V_{25} = 1715 \quad T_{25} = 15,3 \\ V_{opt} = 1235 \quad T_{opt} = 9,3 \\ F_{opt} = 0,70$$

Abb. 7

Arbeitsbedingungen, als Durchschnitt mehrerer Messungen für Vorversuchswerte bestimmt. Danach wurde mit dem tatsächlichen Prozeß, bei unveränderten Arbeitsbedingungen begonnen und die Schwankungen des Leitsignals U wurden beobachtet; diese betragen höchstens $\pm 10\%$, d.h. einen annehmbaren Wert. [11], [12].

Bei den weiteren Versuchen war die Feststellung zum Ziel gesetzt, wie schnell sich das System bei modifizierten Arbeitsbedingungen verändert, welche und wieviel vorherige Werte erforderlich sind und wie häufig die Proben zu entnehmen sind. Diese Versuche sind noch im Gange.

Zusammenfassung

Falls beim Einstechschleifen mit geregelter Kraft das bekanntgegebene extremale, sich weiterentwickelnde adaptive Regelungssystem angewandt wird, wird die Normalschleifkraft — von den Schleifergebnissen abhängig — so bestimmt, daß die Mindestkosten der Bearbeitung erreicht werden. Die Identifizierungs- und Optimierungs-Algorithmen sind sinngemäß auch für weitere Standzeitkriterien, sowie für Annäherungen höherer Ordnung anwendbar. Wie durch die Versuche bewiesen, führen die angegebenen Annäherungsgleichungen zu befriedigenden Ergebnissen. Auch von den Annäherungen höherer Ordnung kann man keine wesentliche Verbesserung erwarten, da sie wegen der Präzision des Schleifprozesses, der Ungenauigkeit der Messungen und der seltenen Probenahmen nicht möglich ist. Bei Beurteilung der Funktion des Systems spielt der Konvergenzkoeffizient des Systems eine wichtige Rolle, der für die Genauigkeit und Geschwindigkeit des Systems entscheidend ist.

Die Genauigkeit kann nur zu Lasten der Systemgeschwindigkeit erhöht werden und umgekehrt. Durch erhöhte Präzision, z.B. homogene Schleifscheiben, gute Auswahl der geeigneten Scheiben, der kinetischen Bedingungen, Kühl-Schmierflüssigkeit usw., kann die Wirksamkeit der adaptiven Regelung verbessert werden, so sind auch diese Probleme in Zukunft eingehend zu behandeln, wenn eine wirksame Regelung gewünscht wird.

Symbole

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	empirische Konstanten (siehe: Gleichung 2)
b	wirkende Schleifscheibenbreite im Schnitt (mm)
$C_1 \dots C_8$	empirische Konstanten, gegeben durch Gleichungen 9a, 9b, 9c, 9d
F, F_1, F_2, F_{opt}	spezifische Schnittkräfte, beziehungsweise Optimalwerte (kp/mm)
K	spezifische Schleifkosten (Ft/mm ²)
K_0	Betriebskosten (Ft/min)
K_s	Werkzeugsverbrauchs- und Abrichtkosten (Ft)
k_{r1}, k_{r2}, k_{rn}	Qualitätskenngrößen
$K_{rm1}, K_{rm2}, K_{rmn}$	Grenzwerte der Qualitätskenngrößen k_{r1}, k_{r2}, k_{rn}
N, N_{max}	Schleifleistung (kW)
p	Kostenzeitparameter (min)
T_1, T_2, T_n	Standzeiten gegeben durch Kriterien $K_{rm1}, K_{rm2}, K_{rmn}$ (min)
$T_{1s}, T_{2s}, T_{opt}, T_m$	Grenzwerte bzw. Optimalwerte der Größen T_1 und T_2 (min)
t_k	Abrichtzeit der Schleifscheibe (min)
t_N	Nebenzzeit (min)
$U, U_{max}, U_{min}, U_{opt}$	Normalschnittkraft (kp)
v	abgeschliffenes Materialvolumen (mm ³ /mm)
V_1, V_2, V_n	Schleifstandzeit gegeben durch Kriterien $K_{1m1}, K_{mr2}, K_{rmn}$
$V_{1s}, V_{2s}, V_{opt}, V_m$	Grenz-, bzw. Optimalwerte von V_1 und V_2 (mm ³ /mm)
BV_1, BV_2	Standvolumen-Schätzwert (mm ³)
BT_1, BT_2	Standzeit-Schätzwert (min)
t	Schleifzeit (min)
v_W	abzutrennendes Materialvolumen (mm ³)
Z'	spezifische Schleifleistung (mm ³ /kp min)
C	Parametervektor, gebildet aus den Werten $C_1 \dots C_8$
P_A, P_B, P_C, P_D	Vektoren gebildet aus den Meßwerten
Q_A, Q_B, Q_C, Q_D	Symmetrische Quadratmatrizen, gebildet aus den Meßwerten

Literatur

1. PEKLENIK, J.: Geometrical Adaptive Control of Manufacturing Systems. CIRP Ann 18. (1970) p. 265—272
2. SALJE, E.: Strategien zur Prozeßoptimierung beim Außenrundeinstechschleifen. Industrie-Anzeiger 95. Nr. 5. (1973) p. 1088—1091
3. JACOBS, H. J., REINHOLD, R.: Probleme der Verfahrensoptimierung im Maschinenbau. Wiss. Z. Techn. Univers. Dresden 21. (1972) p. 264—270.
4. RYUJI WADA: Adaptive Steuerung einer Rundschleifmaschine. Werkstatt und Betrieb. 104. (1971) p. 391—396
5. CSÁKI, F.: Korszerű szabályozásmélet. Akadémiai Kiadó, 1970. Budapest

6. KALÁSZI, I., ILIÁSZ, D., TÓTH, I.: Performance and Evaluation of Grinding Fluids. Conference, Chicago, (1972)
7. KALÁSZI, I.: Some Remarks on Grinding Wheel and Wheel Life. Periodica Polytechnica 16. No. 1. (1972) p. 97—108
8. KÖVES—MOSER—ALMÁSI: Kőszőrülés és finommegmunkálás. Műszaki Könyvkiadó, 1970. Budapest
9. NAGY, S.: Adaptive Regelung beim Schleifen. Vortrag, Graz (1972)
10. NAGY, S.: Rozwijajaca sie regulacja optimalizacyjna przy slyfowaniu wglebnym. Konferencja technologia obrobki sciernej. Rzeszow. 1974
11. KALÁSZI, I., NAGY, S.: Adaptive Regelung für Einstechschleifen mittels Regelgröße Schnittkraft. INFERT'74 Dresden 1974
12. NAGY S.: A kőszőrülési folyamat adaptív irányításának elvi és kísérleti vizsgálata. Műszaki doktori értekezés. 1975. BME

Sándor NAGY, H-1521 Budapest