

Jens Ginzel

Funkenerosives Senken mit Neuro-Fuzzy
Prozeßführung und Fehlentladungsbehandlung unter
Berücksichtigung der Bahn- und Planetärerrosion



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, Hamburg, Univ. der Bundeswehr, 2002

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2002

ISBN 3-8316-0153-4

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Stand der Technik	3
2.1 Prinzip der funkenerosiven Bearbeitung	3
2.2 Aufbau und Funktion einer funkenerosiven Senkanlage	6
2.3 Verfahren zur Vorschubregelung	10
3. Zielsetzung und Vorgehensweise	14
4. Aufbau der entwickelten Versuchsanlage	16
4.1 Prozeßrechner	17
4.2 Antriebssystem	18
4.3 Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	18
4.4 Generator	18
4.5 Spaltsensor und Generatorsteuerung	19
4.6 Mikrocontroller	22
4.7 Kommunikationsbeziehungen innerhalb des Prozeßführungssystems	23
5. Erkennung lichtbogenartiger Fehlentladungen	27
5.1 Ursache lichtbogenartiger Fehlentladungen	27
5.2 Methoden zur Erkennung lichtbogenartiger Fehlentladungen	29
5.3 Entwicklung einer neuartigen Methode zur Lichtbogenerkennung	34
5.4 Wirksamkeit der entwickelten Lichtbogensensorik	39
5.5 Die Mutation normaler Entladungen in Lichtbögen	42
5.6 Ein neuartiges Verfahren zur Technologieentwicklung	53
5.7 Vergleich mit anderen Methoden der Lichtbogenerkennung	60
5.8 Die physikalischen Vorgänge bei der Entladungsmutation	64
6. Vorschubregelung	66
6.1 Bewertung der Zündverzögerungszeit als Reglereingangsgröße	66
6.2 Alternative Reglereingangsgrößen	68
6.3 Vergleich unterschiedlicher Methoden der Spaltweitenregelung	69
6.4 Einsatz von Fuzzy-Logik zur Regelung	77
6.5 Fuzzy-Logik-basierte Spaltweitenregelung	79
6.6 Einordnung in die Entwicklungstendenzen im Bereich der Spaltweitenregelung	84
6.7 Abtragsversuch mit einer komplexen Erosionsaufgabe	86

7.	Optimierung des Spaltweitenreglers mit Neuronalen Netzen	89
7.1	Konzeption der Prozeßoptimierung	89
7.2	Funktionsweise und Anwendung künstlicher Neuronaler Netze	91
7.3	Anwendung von Neuronalen Netzen zur Adaption des Spaltweitenreglers	94
7.4	Die Wirkung der Skalierungsfaktoren auf den Erosionsprozeß	97
7.5	Gewinnung und Bereitstellung von Trainingsdaten	100
7.6	Konzeption und Training des Netzwerkes	102
7.7	Praktischer Einsatz der Prozeßoptimierung	104
8.	Numerische Bahnsteuerungen für die Funkenerosion	108
8.1	Gliederung einer numerischen Steuerung in Funktionsblöcke	109
8.2	Konzeption einer numerischen Steuerung für Funkenerosion	111
8.3	Die offene Steuerungsarchitektur OSACA	117
8.4	Architektur der realisierten numerischen Steuerung	120
8.5	Versuchsergebnisse	122
9.	Zusammenfassung und Ausblick	125
	Literatur	128

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

$A(t)$	-	Ausfallrate
B_S	V	Brennspannungsschwellwert
C	F	Kapazität
C_S	F	Spaltkapazität
$f'(t)$	-	Dichtefunktion
$F(t)$	-	Verteilungsfunktion
G	$1 / \Omega$	Leitwert
I	A	Strom
\hat{i}_e	A	Maximalwert des Entladestromes
\bar{i}_e	A	Mittelwert des Entladestromes
KS	%	Kurzschlußanteil
K_{vor}	m	Reglerverstärkung für Zustellbewegung
K_{zur}	m	Reglerverstärkung für Rückzugsbewegung
L	H	Induktivität
LB	%	Lichtbogenanteil
LL	%	Leerlaufanteil
Lim_{LL}	-	Grenzwert des Leerlaufanteils vor Zustellbewegung
Lim_{KS}	-	Grenzwert des Kurzschlußanteils vor Rückzugsbewegung
N_{VPL}	-	Fehlentladungen in Folge zum Auslösen einer Spülbewegung
$N_{spül}$	-	Fehlentladungen in Folge zum Auslösen einer Impulspause
OSZ_{ampl}	μm	Amplitude der Oszillationen bei der Spülbewegung
OSZ_{abst}	μm	Sicherheitsabstand der Spülbewegung zum Werkstück
OSZ_{anz}	-	Anzahl der Oszillationen bei der Spülbewegung
P_{LL}	m	Reglerverstärkung für Rückzugsbewegung
P_{KS}	m	Reglerverstärkung für Zustellbewegung
R	Ω	Widerstand
R_a	μm	Mittenrauhwert

S_R	-	Skalierungsfaktor am Fuzzy-Reglerausgang für Rückzugsbewegung
S_V	-	Skalierungsfaktor am Fuzzy-Reglerausgang für Zustellbewegung
t_0	μs	Pausendauer
t_{arc}	μs	Mutationszeitpunkt einer Entladung in eine Fehlentladung
t_d	μs	Zündverzögerungszeit
$\overline{t_{dm}}$	μs	Mittelwert der Zündverzögerungszeit
t_{dsoll}	μs	Sollwert der Zündverzögerungszeit
t_e	μs	Entladedauer
t_i	μs	Impulsdauer
t_p	μs	Periodendauer
U_0	V	Leerlaufspannung
\bar{u}_e	V	Mittelwert der Entladespannung
V_E	mm^3/min	Verschleißrate
VPL	μs	Impulspause
V_W	mm^3/min	Abtragsrate
W_e	J	Entladeenergie
X_S	-	Flächenschwerpunkt

Griechische Buchstaben

α, β	-	Parameter der <i>Weibull</i> -Verteilungsfunktion
μ	-	Zugehörigkeitsgrad zu einer Fuzzy-Menge
ν	%	relativer Verschleiß

Abkürzungen

AC	Alternative Current (Drehstrom)
ACC	Adaptive Control Constraint (Adaptiver Grenzwertregler)
ACO	Adaptive Control Optimization (Adaptive Regleroptimierung)
CAN	Controller Area Network
Cu	Kupfer
CPU	Central Processing Unit

D	Diode
DSP	Digitaler Signalprozessor
FE	Funkenerosion
FPGA	Field Programmable Gate Array (programmierbarer Logikbausteintyp)
HSC	High Speed Cutting (Hochgeschwindigkeitszerspanung)
IGBT	Isolated Gated Bipolar Transistor
I/O	Input / Output (Ein- / Ausgabe)
MED	Fuzzy-Menge „Medium“
NC	Numerical Control
RAM	Random Access Memory (Schreib- und Lesespeicher)
ROM	Read Only Memory (nur Lesespeicher)
RS-422	Internationaler Standard zur Datenübertragung (ITU-T V.11)
Sercos	Nach IEC 1491 genormte Antriebsschnittstelle
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TiAl	Titan-Aluminium-Legierung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VH	Fuzzy-Menge „Very High“
VL	Fuzzy-Menge „Very Low“

1 Einleitung

Die abtragende Wirkung von elektrischen Funkenentladungen wurde 1944 entdeckt [Laz44]. Jedoch begann die industrielle Nutzung des erosiven Effektes erst 1954 mit der Verfügbarkeit der ersten funkenerosiven Senkanlagen [DaCo95]. Als abtragendes Bearbeitungsverfahren hat sich diese Technologie mittlerweile mit den Varianten „funktenerosives Senken“ und „funktenerosives Schneiden“ als Fertigungsverfahren etabliert [Kön90].

Das funkenerosive Senken, das in der vorliegenden Arbeit ausschließlich behandelt wird, stellt ein berührungslos abbildendes Verfahren dar. Die Negativform einer Werkzeugelektrode wird dabei durch einen kontinuierlichen Materialabtrag in ein Werkstück reproduziert. Für den Materialabtrag verantwortlich sind primär thermische Vorgänge, die aus den elektrischen Entladungen resultieren.

Vor allem im Werkzeug- und Formenbau ist die Funkenerosion zur Schlüsseltechnologie avanciert, weil mit diesem Verfahren zum einen jeder elektrisch leitfähige Werkstoff ungeachtet seiner Härte und Festigkeit bearbeitet werden kann, zum anderen wird durch die Funkenerosion eine hohe geometrische Gestaltungsfreiheit möglich, die insbesondere bei der Herstellung komplizierter Raumformen von entscheidender Bedeutung ist [Kob95]. Da nahezu keine Bearbeitungskräfte auftreten und die zugeführten elektrischen Energiemengen genau steuerbar sind, ist die Elektroerosion prädestiniert für die Mikrobearbeitung [KEM01], [Mas01], [Nöt01]. Damit eröffnen sich der Erosionstechnologie neue Anwendungsfelder in der Mikrosystemtechnik.

Gegenüber der spanenden Bearbeitung weist die Funkenerosion lange Bearbeitungszeiten auf und ist damit nur in speziellen Fällen ökonomisch anwendbar. Anders als bei spanenden Verfahren ist beim funkenerosiven Senken der Vorschub nicht einstellbar, sondern erfolgt in Abhängigkeit vom Bearbeitungsprozess. Eine Vorschubregelung hat die Aufgabe, den Abstand zwischen Werkzeugelektrode und Werkstück ständig so einzustellen, daß möglichst viele abtragswirksame Funkenentladungen stattfinden können. Der elektrisch wirksame Spalt zwischen Werkstück und Werkzeug ist während der Bearbeitung nicht meßbar. Deshalb müssen zur Regelung dieses Spaltes andere Zustandsgrößen herangezogen werden, die jedoch in hohem Maße stochastischen Schwankungen unterliegen. Da kein vollständiges Modell des Abtragsvorgangs existiert, ist die Auslegung der Regelung erschwert. Plötzlich auftretende instabile Prozeßzustände in Form von lichtbogenartigen Fehlentladungen können zudem die Oberfläche des Werkstücks beschädigen und erfordern eine schnelle Reaktion. Die Hersteller funkenerosiver Senkanlagen ermitteln deshalb in umfangreichen Versuchsreihen technologische Daten. Der Anwender kann daraus für Standardbearbeitungsfälle die Maschineneinstellung entnehmen, die einen sicheren Prozeßverlauf gewährleistet. Ist für den speziellen Anwendungsfall kein herstellereitiges Technologiewissen verfügbar, so muß der Anwender diese Daten in Versuchen selber ermitteln.

Die Entwicklung der Funkerosionsanlagen wird getragen von den Fortschritten auf dem Gebiet der Elektronik. Mit Hilfe von modernen Leistungshalbleitern wurden die für den Abtragsvorgang als Energiequelle fungierenden Generatoren verbessert [Tim96]. Mikroprozessoren ermöglichen durch numerische Steuerungen die mehrachsige, bahngesteuerte Vorschubbewegung [Waß92]. Der Senkerosion werden damit neue Einsatzfelder erschlossen. Mittels einer planetären Bewegung läßt sich der als Verschleiß bezeichnete Abtrag an der formgebenden Werkzeugelektrode kompensieren [KöBe85]. Die Genauigkeit des Bearbeitungsverfahrens kann auf diese Weise gesteigert werden, wobei gleichzeitig der Aufwand zur Elektrodenherstellung sinkt.

Da die Regelung der Spaltweite ein entscheidendes Mittel ist, um während der Bearbeitung auf das Arbeitsergebnis Einfluß zu nehmen [Rau84], stellen adaptive Regelstrategien eine Möglichkeit zur Leistungssteigerung und zur Erhöhung des Automatisierungsgrades dar. Die Entwicklung automatischer Optimiersysteme zur ständigen Anpassung der Maschineneinstellung an die sich stetig ändernden Bearbeitungsbedingungen ist deshalb zum Gegenstand zahlreicher Arbeiten geworden [Kur72], [Eng75], [Bar76], [Kur72], [Dau85], [Slo89], [Deh92], [Ode95], [Wit97], [Raa99].

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, Möglichkeiten zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Prozeßsicherheit bei funkerosiven Senkanlagen aufzuzeigen. Dazu wird zunächst das Phänomen der lichtbogenartigen Fehlentladungen untersucht. Die Analyse der bekannten Verfahren zur Lichtbogendetektion führt zu einer effizienten Erkennungsmethodik, die sich durch ihre hohe Empfindlichkeit auszeichnet. Aufbauend auf einen Abtragsprozeß, der durch eine derart wirksame Lichtbogenbehandlung stabilisiert ist, werden alternative Konzepte zur Spaltweitenregelung untersucht. Die Einbeziehung von Methoden und Techniken aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz münden schließlich in einer Fuzzy-Logik-basierten Spaltweitenregelung, die durch ein künstliches Neuronales Netz dem sich ständig ändernden Prozeßverlauf angepaßt wird. Durch die Entwicklung einer den Besonderheiten der funkerosiven Bearbeitung angepaßten numerischen Steuerung werden diese Maßnahmen zur Verbesserung der Vorschubregelung auf die mehrachsige Bearbeitung übertragen. Vorteile ergeben sich durch die informationstechnische Vernetzung aller am Herstellungsprozeß beteiligten Fertigungseinrichtungen [Blö97]. Das herstellerübergreifende Zusammenwirken verschiedener Steuerungssysteme bildet hierfür eine Voraussetzung [WKK93]. Aus diesem Grund wurde das entwickelte Prozeßführungssystem in seinen Schnittstellen einem offenen Steuerungsstandard angenähert.