

IX. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung und Verbesserung von Methoden und Technologien der Prozeßführung funkenerosiver Senkanlagen mit Blickpunkt auf eine Erhöhung der Abtragsleistung unter Einhaltung von vorgegebenen Verschleißwerten, was gleichbedeutend mit einer Wirtschaftlichkeitssteigerung ist. Aufgrund der Komplexität des Abtragsprozesses und der prinzipbedingten meßtechnischen Unzulänglichkeiten war eine umfangreiche Weiterentwicklung der hiesigen Versuchsanlage notwendig, die einerseits die Bearbeitung beliebiger Senkerosionsaufgaben ermöglichen und andererseits über Ressourcen verfügen sollte, welche es erlauben, den gesamten Prozeßverlauf aufzuzeichnen und über geeignete Mechanismen auszuwerten. Zusätzlich waren die Steuerungsprogramme und die eingesetzte Prozeßrechenarchitektur so zu gestalten, daß ein möglichst offenes System entstand. Dieses System ist jetzt gekennzeichnet durch eindeutig definierte Schnittstellen, hohe Wiederverwendbarkeit der Einzelkomponenten und absolut sichere und schnelle Datentransferpfade. Auf Basis der erarbeiteten Grundlagen wurde eine Reihe von Methoden und Verfahren neu oder weiterentwickelt, um insgesamt ein „Hierarchisches Prozeßführungssystem“ für funkenerosive Senkanlagen zu realisieren. Mit Hilfe der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Versuchserodieranlage konnten im Verlauf der Untersuchungen die wichtigsten Fragestellungen der Senkerosionstechnologie untersucht werden. In den Schwerpunkten Antriebstechnik (Spaltweitenregelung), Prozeßsensorik (Lichtbogenerkennung und -behandlung), Energiequellen für die Funkenerosion (Erodiergeneratoren), adaptiver Bewegungsspülung (Micro-Oszillationsspülung) und Prozeßoptimierung mittels fuzzy-gestützter Optimierung entstanden einige grundlegende Entwicklungen, die auch im praktischen Erodierbetrieb eingesetzt wurden und zum Zeitpunkt der Beendigung dieser Arbeit bereits zum Teil in die industrielle Serienfertigung eingeflossen sind.

Die Komplexität des physikalischen Abtragsprozesses und des Zusammenspiels aller Komponenten der Prozeßführung verlangten eine genaue Analyse der Prozeßgegebenheiten. Insbesondere die Vorgänge im Funkenspalt, die Betrachtung der physikalischen Abläufe und die Anwendung von bekanntem Wissen standen zu Beginn der Arbeit im Vordergrund der Untersuchungen. Aus der Betrachtung des Abtragssystems mit seinen charakteristischen energietragenden Größen entstand die Grundlage zur Definition der Ziele vorliegender Arbeit. Das Konzept der Prozeßführung und dessen Umsetzung basiert dabei auf einem hierarchischen Aufbau. Die unterste Hierarchiestufe nimmt der Abtragsprozeß ein. Steuerungstechnisch kann dieser in die drei Hauptkomponenten Energie, Antrieb und Funkenspalt aufgeteilt werden. Jede Komponente besitzt eigene Aktoren und Sensoren, die Informationen aufnehmen und Stellbefehle ausführen. Der Aktor-Sensorebene ist der Prozeßrechenkern überlagert. Er führt die zentralen Prozeßführungsaufgaben autark aus. Die oberste Hierarchiestufe nimmt der Bedien- und Optimierrechner ein. Diese Hierarchie spiegelt sich in der Prozeßrechenarchitektur, den Daten- und Kontrollflüssen und den zeitlichen Anforderungen an die einzelnen Komponenten wider. Ein zweiter Ansatz, der sich in die hierarchische Architektur einfügt, ist die Trennung von Prozeßstabilisierung und Optimierung. Ersteres füllt die unteren Hier-

archiestufen aus, wohingegen die Prozeßoptimierung an der Spitze der Hierarchie abläuft.

Die Umsetzung des Konzeptes führte über eine zeitliche Charakterisierung, eine Spezifikationsphase mit einer Aufgabenverteilung und der Definition der Steuerungsprozesse zu einem Prozeßführungssystem für funkenerosive Senkanlagen.

Die Umsetzung der Prozeßführungsstrategie verlangte nach einigen, zum Teil grundlegenden Neuentwicklungen. So entstand eine für die Funkenerosion speziell angepasste Generortechnologie mit den notwendigen Prozeß- und Bedienschnittstellen. Die Spaltweitenregelung wurde mittels eines Direct Digital Control Interfaces gelöst, das es erlaubt, eine digitale Regelung im Prozeßrechner zu integrieren. Darauf aufbauend konnte ein digitaler nichtlinearer Regler entwickelt werden, der speziell für die funkenerosive Spaltweitenregelung optimiert ist. Die Forderung nach einer Anlage, die prinzipiell für alle Senkbearbeitungsaufgaben geeignet ist, verlangte nach effizienten Verfahren zur Erkennung und Behandlung von Kurzschlüssen und Lichtbögen. Hierbei zahlten sich die Grundlagenuntersuchungen aus, die in Verbindung mit klassischen elektrotechnischen Methoden auf ein neuartiges Verfahren zur Lichtbogenbehandlung führten. Dieses Verfahren erlaubt die Erkennung und Reaktion auf vermeintliche Lichtbögen am Beginn der Entladung. Die Unterbrechung der Energiezufuhr im Lichtbogenfall führt auf einen insgesamt sehr sicheren und zugleich effizienten Abtragsprozeß.

Die genannten Neuentwicklungen wurden schließlich in einem hierarchischen Prozeßführungssystem zusammengefaßt. Gleichzeitig entstand eine Prozeßoptimierung, die Elemente von Fuzzy Control zur Prozeßbewertung mit gedächtnisbasierten Ansätzen zur Prozeßparametereinstellung kombiniert. Das Resultat ist eine prozeßangepasste Parametereinstellung zur Gewährleistung eines maximalen Abtrages unter Einhaltung von vorgegebenen Verschleiß- und Oberflächenwerten.

Abschließend wurde anhand einer Spezialerodieraufgabe die Leistungsfähigkeit der entwickelten Prozeßstabilisierung gezeigt. Schwerpunkt dieses ersten Versuchsteils war die Dokumentation des Einflusses einzelner Einstellparameter auf das Abtragsergebnis. Dabei wurde eine Reihe Parametervariationen erprobt, die das Potential der Anlagentechnik wiedergibt. Die speziellen Abtragsversuche zeigten außerdem, daß die hierarchische Prozeßführung mit den zum Teil neuartigen Elementen der Prozeßstabilisierung genügend Substanz besitzt, bisher kaum erreichte Abtragsleistungen bei höchster Prozeßsicherheit zu realisieren. Im zweiten Versuchsteil wurde eine Standarderodieraufgabe ausgewählt, um die Wirkung und die Arbeitsweise der gedächtnisbasierten Fuzzy-Prozeßoptimierung aufzuzeigen. Dabei wurde deutlich, daß die Prozeßklassifizierung den Prozeßzustand sehr treffend beschreibt und wie erwartet durch die Anpassung der korrekten Steuerparameter auf den Prozeß rückwirkt. Erste Versuche, die Fuzzy-Optimierung für Spezialerodieraufgaben einzusetzen, zeigten, daß eine Abtragssteigerung mit einer Standardoptimierung nicht möglich ist. Hierzu ist die Ergänzung des Fuzzy Algorithmus um eine spezielle Regelbasis für Sondererodieraufgaben, wie z.B. die Schlitzerosion, notwendig.

Insgesamt bietet das realisierte Konzept einige Ansatzpunkte für Weiterentwicklungen, die auf Abtragssteigerung und Verschleißminimierung abzielen. Insbesondere folgende Themengebiete sind dabei von zentralem Interesse:

- Die **Generatortechnologie**, die an die funkenerosiven Belange angepaßt wurde, kann für spezielle Aufgaben verbessert werden. Die Forderung nach einer variablen Stromflanke steht dabei im Mittelpunkt. Hierzu existieren bereits vielversprechende Ansätze. Prinzipiell erscheint, basierend auf dem bestehenden Generatorprinzip der geregelten Prozeßstromquelle, eine variable Arbeitsstromflanke ohne allzu großen Aufwand möglich.
- Die **Erkennung und Behandlung von Lichtbögen** ist mit der bereits realisierten Schaltungstechnik nachgewiesenermaßen möglich. Die erwähnte Lichtbogenvorhersage als Bestandteil der Lichtbogendetektion wurde in der aktuellen Version der Prozeßführung nicht implementiert, verspricht aber zusätzliche Möglichkeiten der Lichtbogenvermeidung und Verschleißreduzierung, da die Vorhersage jegliche schädliche Wirkung von lichtbogenartigen Entladungen verhindert. Hierin liegt mit Sicherheit ein großes Potential für weitere Prozeßverbesserungen.
- Die **Prozeßoptimierung** mit den Komponenten Fuzzy-Prozeßbewertung und gedächtnisbasierter prozeßangepaßter Einstellstrategie birgt das wohl am höchsten zu bewertende Potential für Weiterentwicklungen. Die Prozeßbewertung arbeitet bereits zuverlässig und liefert ordentliche Prozeßbeurteilungen. Die Einstellstrategie scheint hingegen in Teilen verbesserungswürdig. Ein Ansatz zur Verbesserung wäre eine noch flexiblere Auswahl der Reaktion auf die ermittelte Prozeßstabilität. Im Moment muß die Prozeßoptimierung zunächst die Bandbreite der Parameter der Spaltweitenregelung voll ausschöpfen, um die zeitlichen oder Spülparameter verstellen zu können. Da die Parameter zur Prozeßbeurteilung sehr stark und zufällig schwanken, ist eine relativ lange Prozeßbeobachtungszeit notwendig, um den Prozeß zu klassifizieren. Daraus ergibt sich ein entsprechend langes Verweilen in einer Ebene der Wirkhierarchie der Einstellparameter. Abhilfe verspricht ein zusätzlicher Algorithmus, der eine Häufigkeitsbewertung der Parametervariationen vornimmt und damit die Parameteranpassung gemäß der Einstellstrategie beschleunigt. Hierbei besteht allerdings die Gefahr, daß der Prozeß instabil werden kann, da bei zu starker oder rascher Manipulation, z.B. der zeitlichen Impulsparameter, deren starker Einfluß auf die globale Prozeßstabilität nachteilig wirken kann.

Die nach dem Kenntnisstand vorliegender Arbeit deutlichste Verbesserung würde eine „lernende Komponente“ in Form eines künstlichen neuronalen Netzes in der Einstellstrategie erbringen. Dabei ist denkbar, das Gedächtnis der Einstellstrategie wesentlich zu erweitern. Die Erweiterung könnte komplette Einstellzyklen eventuell unter Einbeziehung der Werkzeuggeometrie oder der Bearbeitungsaufgabe umfassen. Hierbei würde das neuronale Netz

die Eingangswerte aufnehmen und ständig mit dem erzielten Prozeßfortschritt, der die Abtragsqualität wiedergibt, vergleichen. Gemäß einem zu definierenden Gütekriterium müßte das Netz in der Lage sein, automatisch günstige Einstellungen zu finden und abzuspeichern. So ließe sich mit dem neuronalen Netz nach Vergleich der neuen Bearbeitungsaufgabe mit bekannten Erodieraufgaben sehr schnell auf optimale Bearbeitungsparameter schließen. Die im Rahmen dieser Arbeit geschaffenen programmtechnischen Grundlagen, die für die Wiederverwendbarkeit und im Sinne der objektorientierten Programmierung auf möglichst hohe Kapselung ausgelegt sind, erlauben es, die bisherige Einstellstrategie durch eine lernende Strategie zu ergänzen.

Im Rahmen vorliegender Arbeit reichte für die zum Teil grundlegenden Untersuchungen und Entwicklungen eine Einachsmaschine für die reine Senkerosion vollkommen aus. Für weiterführende Projekte muß allerdings die zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit bereits projektierte und zum Teil beschaffte Erweiterung auf die Planetärerosion erfolgen. Danach scheint die Übertragung der Erkenntnisse auf die sogenannte Bahnerosion denkbar. In bezug auf die Planetärerosion würde man zunächst mittels z.B. digitalen Antrieben nach dem Prinzip der verteilten Intelligenz dezentrale Spaltweitenregler aufbauen. Stünde eine derartige Hochleistungs-Erodierpositionssteuerung zur Verfügung, könnten die Ergebnisse vorliegender Arbeit mit relativ geringem Aufwand auf eine Planetärerosionsaufgabe übertragen werden. Grundlage bilden auch dort die Generator-technologie, die Lichtbogenerkennung und -behandlung, die adaptive Bewegungsspülung und eine leistungsfähige Prozeßoptimierung.

Insgesamt zeigt die vorliegende Arbeit, daß ein interdisziplinärer Ansatz für die Technologie des funkenerosiven Senkens sehr von Vorteil ist. Es ist zu erwarten, daß die weitere fakultätsübergreifende Bearbeitung des Forschungsgebietes „funkenerosives Abtragen“ im Maschinenbau auch in Zukunft den Weg zu immer leistungsfähigeren Maschinen weisen wird.