2 Stand der Technik

Die Funkenerosion hat sich als Bearbeitungsform gleichwertig zu traditionellen Verfahren wie Drehen, Fräsen usw. in die Produktion integriert. Von großer Bedeutung war hierbei die stetige Weiterentwicklung der Erosionstechnologie, die maßgeblich durch Fortschritte auf dem Gebiet der Elektrotechnik vorangetrieben wurde. Moderne Leistungshalbleiter ermöglichen wirkungsvolle Generatoren. Der Einsatz von Computern erlaubt die Implementierung komplexer Regelstrategien und bietet die Grundlage für den Einsatz von NC-Technik.

2.1 Prinzip der funkenerosiven Bearbeitung

Das funkenerosive Senken ist nach VDI 3402 ein abbildendes Formgebungsverfahren, bei dem die Form einer elektrisch leitfähigen Werkzeugelektrode in eine ebenfalls leitfähige Werkstückelektrode abgebildet wird. Der Bearbeitungsprozeß findet in einer nichtleitenden Flüssigkeit, dem Dielektrikum, statt. Der Abtragsmechanismus basiert auf der Wirkung elektrischer Entladungsfolgen. Zur Durchführung des Abtragsprozesses wird eine pulsförmige Gleichspannung an Werkstück und Elektrode angelegt. Werden dann beide Elektroden so weit aufeinander zubewegt, bis die Durchschlagfestigkeit des Arbeitsmediums von der elektrischen Feldstärke überschritten wird, so kommt es zu Folgen von Funkenentladungen und damit zum Materialabtrag. Die physikalischen Vorgänge während des Entladungsvorgangs können nach Bild 2.1 in vier aufeinander folgende Phasen aufgeteilt werden:

I *Ionisierung des Dielektrikums:*
Nach dem Anlegen einer Spannung an den Arbeitsspalt entsteht ein elektrisches Feld, das die Ionisierung von Partikeln im Dielektrikum bewirkt und für die Bewegung der Ionen sorgt. Die Dauer dieser auch als Zündverzögerungszeit t_d bezeichneten Phase hängt von der Isolationsfestigkeit des Dielektrikums ab.

II *Ausbildung des Entladekanals:*
Zwischen Werkzeug- und Werkstückelektrode baut sich ein leitfähiger Kanal auf. Die für diesen Vorgang verantwortlichen Mechanismen werden in der Literatur unterschiedlich beschrieben. So ist nach der Elektronenlawinen-Theorie [HHV73], [Dij73] diese Kanalbildung ein Resultat des lawinenartigen Anwachsens der Ladungsträger. Die Partikel-Theorie [Sch66] macht Abtragspartikel, die sich im Dielektrikum befinden und zusammen eine leitende Brücke bilden, für den Aufbau des Entladekanals verantwortlich. Neuere Arbeiten sehen die Ursache für die Entladung in elektronendominanten Streamern [Bad96]. Diese Ansicht scheint sich durch optische Untersuchungen zu bestätigen [SLW01]. Mit der Ausbildung des Plasmakanals ändert sich der Widerstandswert des Arbeitsspaltes und es kommt zu einem Zusammenbruch der Spaltspannung.

III Brennphase mit Erweiterung des Entladekanals:
In dieser Phase findet die Aufschmelzung an den Elektrodenoberflächen entsprechend der eingebrachten Energie statt. Der Entladekanal breitet sich aus und es bilden sich Gasblasen aufgrund von verdampftem Dielektrikum. Dabei nimmt die Anode Energie aus der kinetischen und potentiellen Energie der Elektronen auf, während der Kathode Energie aus der kinetischen und potentiellen Energie der Ionen zufließt.

Da Elektronen und Ionen aufgrund verschiedener Massen auch unterschiedliche Beschleunigungen aufweisen, ist eine zeitlich und quantitativ ungleichmäßige Aufschmelzung an Anode und Kathode zu verzeichnen. Der Anode werden geringere Energiemengen zugeführt, allerdings setzt der Energieeintrag unmittelbar nach dem Zünden der Entladung ein, wogegen der Kathode höhere Energien zugeführt werden, jedoch erst allmählich mit steigender Entladedauer. Außerdem weist der Plasmakanal anodenseitig eine größere Ausdehnung auf, wodurch die Stromdichte dort geringer ist. Diese unterschiedliche Aufteilung der Entladeenergie zwischen Werkzeug- und Werkstückelektrode ermöglicht die wirtschaftliche Nutzung der Funkenerosion.

IV Zusammenbruch des Entladekanals:
Beim elektrischen Abschalten der Entladung endet die Energiezufuhr. Der Druck im Entladekanal nimmt ab und die Temperaturen fallen durch Wärmeableitung in die Umgebung. Spontan beginnt die unter dem Druck im Entladekanal überhitzte Schmelze zu sieden und wird aus der Werkstückoberfläche ausgeschleudert bis auf einen teigigen Rest, der wieder an der Oberfläche erstarrt. Aus dem Auswurf entstehen durch schockartiges Abkühlen kugel- bis eiförmige Partikel, die das Dielektrikum verunreinigen.

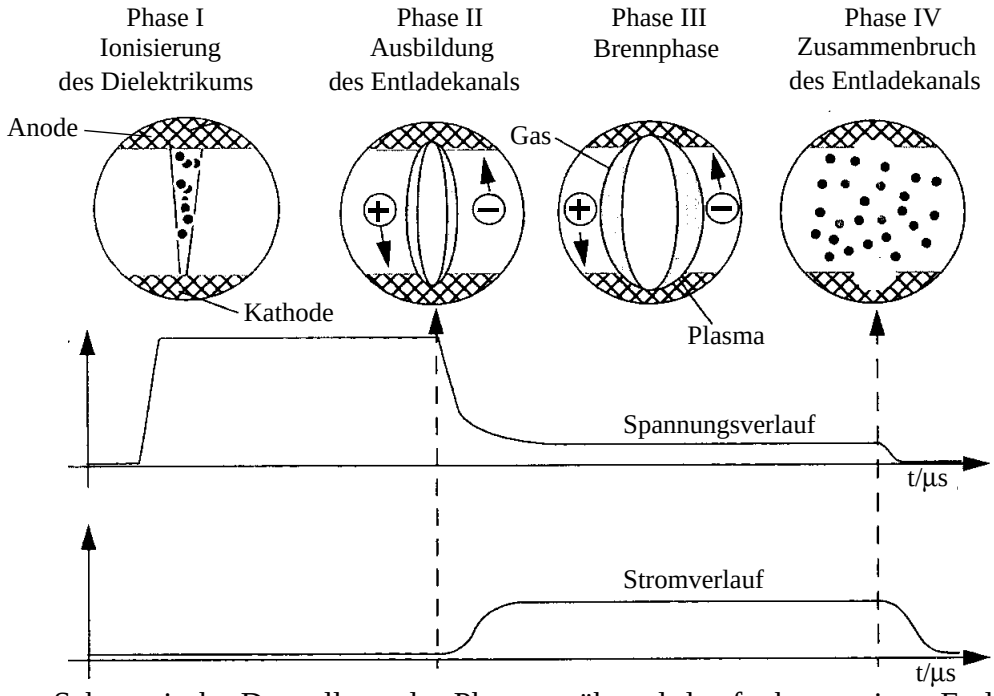


Bild 2.1: Schematische Darstellung der Phasen während des funkenerosiven Entladungsvorgangs

In der Pause deionisiert das Dielektrikum und erlangt seine Durchschlagfestigkeit zurück. Dies ist notwendig, damit eine unmittelbare Folgeentladung niemals wieder den vorherigen Entladekanal antrifft, sondern stattdessen an einer anderen Stelle im Funkenspalt stattfindet. Durch dieses ständige Wandern der Entladungsstelle wird eine punktuelle thermische Überbelastung der Werkstückoberfläche vermieden.

Die Formgenauigkeit von funkenerosiv hergestellten Einsenkungen wird wesentlich vom Abtragsvolumen auf der formgebenden Werkzeugelektrode, dem sog. Elektrodenverschleiß, bestimmt. Das am Werkzeug und Werkstück pro Entladung abgetragene Werkstoffvolumen hängt von der Polarität und den physikalischen Eigenschaften der Elektrodenmaterialien sowie von der Entladedauer und vom Entladestrom ab. Bei technologisch sinnvoll gewählten Prozeßeingangsgrößen kann ein geringer Elektrodenverschleiß bei gleichzeitig hohem Werkstückabtrag erzielt werden. Weitergehende Verbesserungen lassen sich durch 3-dimensionale Bewegungen der Werkzeugelektrode (Planetärerosion) und adaptive Regeleinrichtungen erzielen.

Die Oberflächenbeschaffenheit erodierter Werkstücke weist besondere Eigenschaften auf, die auf den thermischen Charakter des Abtragsvorgangs zurückzuführen sind. So ist die Topographie funkenerosiv bearbeiteter Oberflächen geprägt durch die Aneinanderreihung und Überlagerung einzelner Entladekrater. Sie kann als muldig oder narbig bezeichnet werden. Die Rauheit der Oberfläche wird durch die Größe der einzelnen Entladekrater und damit im wesentlichen durch die während der Entladung zugeführte Energie bestimmt. Aufgrund der hohen Temperaturen, die im Verlauf einer Funkenentladung an den Fußpunkten des Plasmakanals vorherrschen, treten an den Randschichten metallurgische Veränderungen auf. Diese Randschichten sind charakterisiert durch die Wiedererstarrung von aufgeschmolzenem Material (Randzone), durch Phasenumwandlungen (Umwandlungszone) und dadurch bedingten Eigenspannungen [Sch66].

Durch Verminderung der Entladeenergie können die Tiefe der Rand- und Umwandlungszone sowie die Restspannungen verringert werden [KoWe76]. Beim funkenerosiven Polieren [Jut83], einer Erweiterung des funkenerosiven Senkens, sind Mittenrauhwerte bis $R_a = 0{,}2\ \mu m$ erzielbar. Dies wird erreicht, indem nur minimale Entladeenergien zugeführt werden. Die Werkzeugelektrode wird dabei negativ gepolt. Allerdings ist die Anwendbarkeit dieses Verfahrens durch das instabile Prozeßverhalten eingeschränkt, das verstärkt bei niedrigen Entladeenergien zu beobachten ist [LZY88].

2.2 Aufbau und Funktion einer funkenerosiven Senkanlage

Eine funkenerosive Senkanlage setzt sich zusammen aus den Hauptbestandteilen (Bild 2.2):

- Maschinengestell mit Vorschubsystem
- Dielektrikumsaggregat
- Generator
- Regeleinrichtung mit numerischer Steuerung

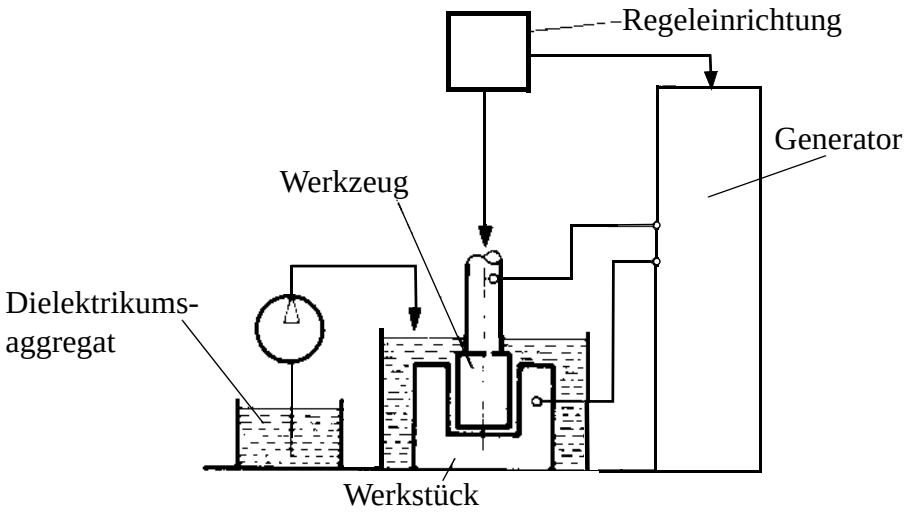


Bild 2.2: Schematischer Aufbau einer Senkerodier-Anlage

2.2.1 Generatortechnik

Aufgabe des Generators ist die Bereitstellung der für den Erosionsvorgang notwendigen impulsförmigen elektrischen Energie. Der Generator kann dabei entweder nach dem Prinzip einer Spannungs- oder Stromquelle arbeiten. Bild 2.3 zeigt die nach VDI 3402 vorgegebenen Impulskenngrößen.

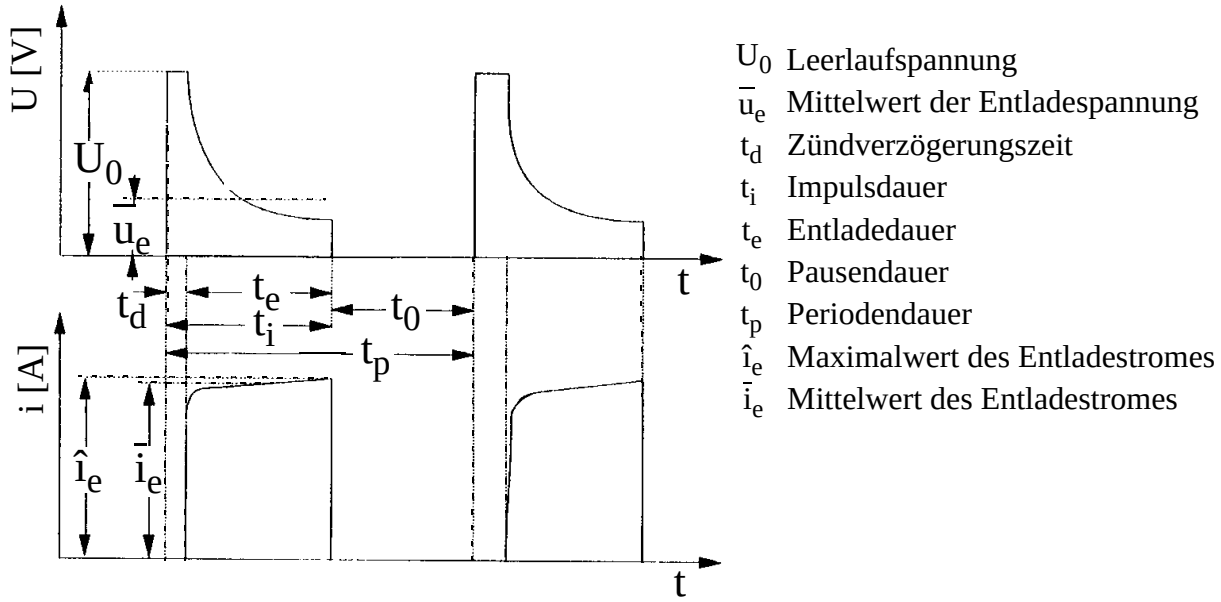
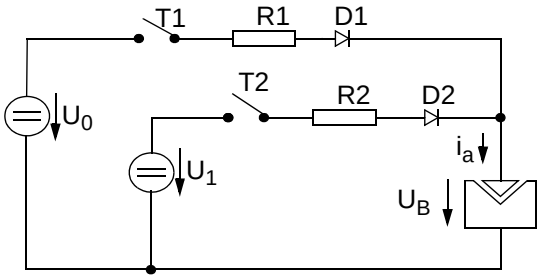


Bild 2.3: Elektrische Kenngrößen der Funkenentladung

Ein als Spannungsquelle arbeitender Generator wird im Bereich der Funkenerosion als sogenannter „statischer Impulsgenerator“ bezeichnet. Er basiert auf einer gesteuerten Kondensatorentladung über dem Arbeitsspalt (Bild 2.4).

U_0: Leerlaufspannung
U_1: Arbeitsspannung

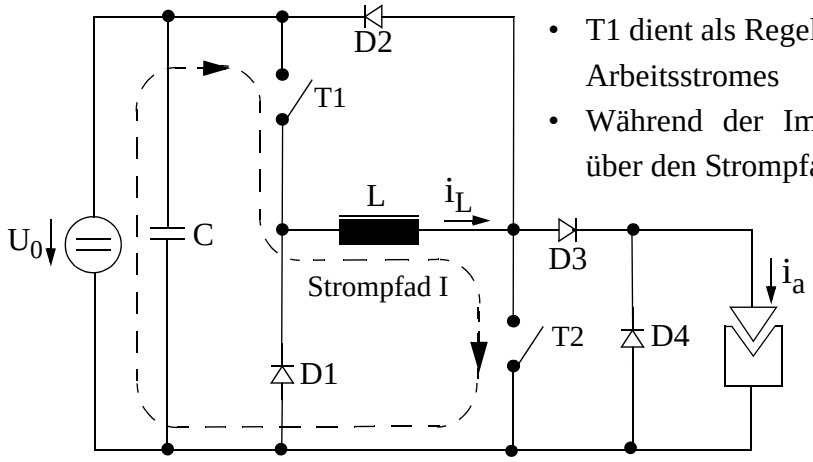


- Die Zündquelle wird über den Schalter T1 an den Funkenspalt gelegt.
- Zunächst fließt ein niedriger Strom.
- Sobald die „Zündung des Funkens“ detektiert wird, schaltet ein Steuerelement den Leistungsteil mit einer Leerlaufspannung von z.B. 80V über den Schalter T2 an den Funkenspalt.

Bild 2.4: Prinzipdarstellung eines statischen Impulsgenerators nach VDI 3404

Zur Stromeinstellung und -begrenzung müssen diese Art Generatoren über Hochlastwiderstände verfügen. Insbesondere im Falle eines Kurzschlusses zwischen den beiden Elektroden, der während der Bearbeitung gelegentlich auftreten kann, ist es bei dieser Art von Generator notwendig, die überschüssige Wirkleistung in den Hochlastwiderständen zu vernichten. Dadurch verschlechtert sich die Leistungsbilanz derartiger Erosionsanlagen. Außerdem erfordern die Hochlastwiderstände viel Platz und müssen gekühlt werden. Aufgrund dieser Nachteile sind Generatoren dieser Bauart in modernen Erosionsanlagen zumeist durch Geräte, die nach dem Prinzip einer Stromquelle arbeiten, ersetzt worden.

Im Gegensatz zu Spannungsquellen arbeiten Stromquellen nahezu verlustfrei. Das Prinzip einer geregelten Stromquelle beruht auf einem ständig fließenden Arbeitsstrom, der auf einen vorgebbaren Sollwert geregelt wird. Der Strompfad unterscheidet sich bei Impuls- und Pausenzeit. Während der Impulsdauer fließt der Strom durch den Funkenspalt. Hingegen wird der Strom während Pausenzeit in eine Art „Freilaufkreis“ hinein kommutiert, damit der Funkenspalt stromlos wird. Als Energiespeicher dient eine Spule (Bild 2.5).



- T1 dient als Regeltransistor zur Einstellung des Arbeitsstromes
- Während der Impulspause fließt der Strom über den Strompfad I

Bild 2.5: Prinzipdarstellung einer geregelten Stromquelle nach [WeSl87]

Neuere Entwicklungen im Bereich der Generatortechnik zielen darauf ab, den Verlauf der Stromimpulse zu formen [Tim96], wodurch eine Reduktion des Elektrodenverschleißes erreicht werden kann. Die Grundlage hierfür bildet die Erkenntnis, daß bei anodisch gepolter Werkzeugelektrode der Verschleiß im wesentlichen zu Beginn der Entladung durch Verdampfung erfolgt. Wird der Stromimpuls so geformt, daß am Anfang der Entladung nur ein kleiner Stromfluß zugelassen wird, der erst später im Verlauf der Brennphase ansteigt, so läßt sich damit der Verschleiß an der anodisch gepolten Werkzeugelektrode reduzieren und damit die Abbildungsgenauigkeit erhöhen [Enn80].

2.2.2 Dielektrikum

Das Dielektrikum hat die Aufgabe der Isolation von Werkzeugelektrode und Werkstückelektrode. Verfügt das Dielektrikum über eine erhöhte Durchschlagfestigkeit, so stellt sich während der Bearbeitung ein geringerer Erosionsspalt ein, wodurch sich eine verbesserte Abbildungsgenauigkeit erzielen läßt. Auf der anderen Seite führen geringe Erosionsspaltweiten zu instabilem Prozeßverhalten. Um dieses zu vermeiden, wird beim funkenerosiven Polieren häufig die Durchschlagfestigkeit des Dielektrikums gezielt durch Verunreinigung mit Silikon herabgesetzt, um größere Erosionsspaltweiten und einen stabileren Prozeßverlauf zu erreichen [WLR98].

Weitere Aufgaben des Dielektrikums sind:

- Die Ionisation des Funkenspaltes nach dem Anlegen der Zündspannung, damit ein Funkenüberschlag ermöglicht wird,
- die Einschnürung des Entladekanals, um eine hohe Energiedichte an den Fußpunkten zu erreichen,
- die Deionisation des Entladekanals nach Impulsende, damit sich ein Ortswechsel für die Bildung des nächsten Entladekanals ergibt,
- die Kühlung der Elektroden,
- der Abtransport von abgetragenen Partikeln aus der Bearbeitungszone.

Synthetische Öl-Dielektrika stellen heute den Stand der Technik dar [NN94], [Sch99]. Sie garantieren optimale Abtragsraten und sind geruchlos. Der Einsatz wasserbasierter Dielektrika ist Gegenstand neuerer Forschungsarbeiten. Hierdurch ergeben sich neben ökologischen Vorteilen auch Möglichkeiten zur Verfahrenskombination mit dem elektrochemischen Abtragen [KKS95].

2.2.3 Maschinengestell mit Vorschubsystem

Das Maschinengestell bildet die Grundlage für die bei der Bearbeitung erreichbare Präzision. Es treten bei der Funkenerosion kaum Prozeßkräfte auf. So müssen lediglich Druck- und Saugkräfte, die bei Abhebe- und Zustellbewegungen auftreten, sowie dynamische Kräfte, die aus der Beschleunigung schwerer Werkzeugelektroden resultieren, vom Maschinengestell kompensiert werden. Um die dafür notwendige Steifigkeit aufzuweisen, sind die Maschinenkörper zumeist als Massivgußteile oder in Polymerbeton ausgeführt.

An die Vorschubantriebe werden hohe Anforderungen hinsichtlich des dynamischen Verhaltens gestellt, damit schnelle Abhebebewegungen zur Spaltspülung durchführbar sind. Aus diesem Grund haben sich in der industriellen Anwendung AC-Motoren durchgesetzt. Linearantriebe sorgen in der neuesten Maschinengeneration für weitere Steigerungen bei der Durchführung von Abhebebewegungen [NN99a].

2.2.4 Regeleinrichtung mit numerischer Steuerung

Anders als bei den meisten Werkzeugmaschinen darf bei der Funkenerosion der Vorschub nicht mit konstanter Geschwindigkeit erfolgen, sondern wird durch den Bearbeitungsprozeß selbst vorgegeben. Die Vorschubregelung dient dazu, die für den Erosionsprozeß optimale Spaltweite einzustellen. Dabei muß häufig auch eine kurzfristige Vergrößerung des Arbeitsspaltes realisiert werden, was bei der sogenannten Bahnerosion eine Rückzugsbewegung auf der Bahn bedeutet. Aufgrund dieser Besonderheiten handelt es sich bei den numerischen Steuerungen funkenerosiver Senkanlagen um Sonderlösungen, die an diese Bearbeitungstechnologie angepaßt wurden [PrSc00].

Sondersteuerungen mit zumeist herstellerspezifischen Schnittstellen behindern jedoch die rechnergestützte Vernetzung aller an der Prozeßkette beteiligten Fertigungseinrichtungen. Diese Vernetzung bildet die Voraussetzung für eine durchgängige Informationsverarbeitung und - bereitstellung und damit für bestmögliche Planung und Steuerung der Produktion [Tho91]. Dabei ist die funkenerosive Bearbeitung innerhalb der Prozeßkette ein besonders wichtiger Synchronisationspunkt, da die funkenerosive Senkanlage gleichzeitig mit dem richtig vorgearbeiteten Werkstück und der passenden Elektrode beschickt werden muß. Um etwa die Anbindung eines übergeordneten Produktions-Planungs- und Steuerungssystems herstellerübergreifend zu ermöglichen, muß die numerische Steuerung offene Schnittstellen aufweisen. Bei den zur Zeit kommerziell verfügbaren Erodiermaschinen sind derartige offene Steuerungskonzepte noch nicht vorhanden.

2.3 Verfahren zur Vorschubregelung

Damit der Erosionsprozeß mit hohem Werkstückabtrag bei gleichzeitig niedrigem Werkzeugverschleiß abläuft, muß eine ständige Regelung des Arbeitsspaltes erfolgen. Die verwendete Regelstrategie bestimmt entscheidend die Leistungsfähigkeit einer Erodiermaschine. Eine Schwierigkeit bei der Spaltweitenregelung besteht darin, daß die für den Abtragsprozeß maßgebende elektrisch wirksame Spaltweite während der Bearbeitung nicht direkt gemessen werden kann, sondern nur indirekt über andere Entladungskenngrößen (Zündverzögerungszeit t_d, mittlere Spaltspannung $\bar{u}$) abgeschätzt werden kann. Die eingesetzten Regelgrößen unterliegen jedoch erheblichen zufallsbedingten Schwankungen.

Für die Reglersynthese sind modellbasierte Ansätze aus der Regelungstechnik [Lun99], [Unb93] nur bedingt verwendbar, da ein Modell des Abtragssystems nicht existiert. Die Ansätze zur Modellierung der Vorgänge im Funkenspalt beschränken sich jeweils auf die Teilbereiche:

- Wärmeverteilung in den Elektroden zur Analyse des Werkstückabtrags und Elektrodenverschleißes: [Dij73], [Dib89], [Pat89], [Eub93], [Wer75], [BGE96]
- Statistische Modellierung des Prozeßverlaufes: [RaWa90], [AlTr01]
- Geometrische Verteilung der Abtragspartikel im Arbeitsspalt: [BiKo98]

Zusätzlich erschwert wird die Regelung des Erosionsprozesses durch die folgenden Besonderheiten, die sich aus der Physik des Funkenspaltes ergeben:

- Die stochastischen Schwankungen der Spaltzustandsgrößen
- Die für verschiedene Impulsdauern, Tastverhältnisse, Stromstärken, Zündspannungs-Amplituden sowie Werkzeuggeometrien und Spülbedingungen unterschiedlich vorzugebenden Sollwerte und Reglerkennlinien
- Das mit Leerlauf- und Kurzschlußbereich nichtlineare Verhalten des Funkenspaltes
- Die plötzlich auftretenden Prozeßentartungen mit Lichtbogentendenz

In der Praxis sind Spaltweitenregler überwiegend als einfache Proportional-Regler ausgeführt, die zum Teil um nichtlineare Anteile (geknickte Kennlinie) erweitert wurden. Anhand von Technologietabellen erfolgt dann die Einstellung der Reglerparameter auf den jeweiligen Bearbeitungsfall. Nachteilig an dieser Art der Reglereinstellung ist jedoch, daß aufwendige technologische Experimente notwendig sind, um die in den Technologietabellen zusammengefaßten Daten zu erheben. Außerdem erfolgt während der Bearbeitung keine Anpassung an die sich stetig ändernden Randbedingungen, so daß ein erfahrener Bediener zumeist selbst Anpassungen vornehmen muß. Das Ziel zahlreicher Forschungsanstrengungen ist daher die Entwicklung automatisch arbeitender Optimierungsverfahren, die in der Lage sind, die Bearbeitungsparameter an der Maschine so einzustellen, daß ein möglichst maximaler Abtrag bei gleichzeitig minimalem Elektrodenverschleiß erreicht wird.

Eine Optimierung des Reglersollwertes und der Pausendauer auf der Basis der Zündverzögerungszeit entwickelte *Peuler* [Peu81]. Dabei erfolgte eine Unterteilung in verschleißintensive (H1), verschleißarme (H2) und abtragsunwirksame (H3) Entladungen.

Eine feinere Unterteilung der Entladungen in 15 Typen nahm *Dauw* in seinem Optimiersystem vor. Bei Vorgabe von maximal zulässigem Verschleiß und gewünschter Qualität der Oberfläche paßte diese Optimierung den Sollwert des Spaltweitenreglers und die Impulsparameter an [Dau85].

Eine Optimierung für das Erodieren entlang einer planetären Bahn entwickelte *Slomka*. Die Parameter des Spaltweitenreglers wurden dabei getrennt für die einzelnen Segmente der kreisförmigen Bahn angepaßt [Slo89]. Notwendig wurde diese Art der Optimierung, da die verwendete Maschine keine Regelbewegung im dreidimensionalen Raum ausführen konnte, sondern die Kreisbahn aus der geregelten Senkbewegung über ein Sinuspotentiometer ableitete.

Dehmer entwickelte ein Optimierungssystem, das sich auf die Einhaltung eines konstanten relativen Verschleißes konzentrierte [Deh92]. Die Parameter des Spaltweitenreglers sollten dabei so kombiniert werden, daß beim Erreichen des vorgegebenen relativen Verschleißes auch der maximal mögliche Abtrag auftritt. Dieses Ziel sollte durch einen in mehrere Ebenen unterteilten Algorithmus erreicht werden, wobei in jeder Ebene jeweils systematische Parametervariationen vorgenommen wurden.

Lichtbogenartige Fehlentladungen, die während des Erosionsvorgangs plötzlich auftreten können und die Gefahr der Zerstörung von Werkzeug- und Werkstückelektrode mit sich bringen, wurden von *Odensass* in die Spaltweitenregelung mit einbezogen [Ode95]. Der somit entstandene Spaltweitenregler schaltet je nach Prozeßzustand zwischen einem Feinregler bei guten Erosionsbedingungen, einer schnellen Rückzugsbewegung bei Lichtbogengefahr und einem Zustandsregler zur schnellen aber gedämpften Zustellung der Pinolenposition nach beseitigter Lichtbogengefahr um.

Rajurkar nutzte ein stochastisches Echtzeitmodell des Prozesses zur Optimierung eines Proportional-Reglers [RaWa93]. Als Gütekriterium der Optimierung wurde dabei die Varianz normierter Zündverzögerungszeiten (t_d) eingesetzt (Selftuning-Regler).

Die vorgestellten adaptiven Strategien basieren auf Methoden der klassischen Regelungstechnik. Dabei wird mit statistischen Verfahren der zeitliche Verlauf ausgewählter Prozeßgrößen bewertet, um Reglerparameter anzupassen. Häufig geschieht diese Parameteranpassung durch systematische Variation.

Folgende Nachteile stellen sich prinzipbedingt bei diesen Adaptionsverfahren ein:

- Für eine hinreichend gesicherte statistische Analyse müssen aus den Prozeßdaten zahlreiche Stützpunkte errechnet werden. Dazu ist die Betrachtung einer ausreichend großen Menge von Impulsen notwendig, wodurch sich zwangsläufig lange Reaktionszeiten ergeben.
- Die systematische Variation der Bearbeitungsparameter bringt zwangsläufig auch Fehleinstellungen hervor, die ihre Auswirkung eventuell erst nach einer gewissen Zeit zeigen. Notwendig ist deshalb ein Verfahren, das in der Lage ist zu lernen, indem es aufgrund gemachter Erfahrungen bereits vorab den Erfolg einer Parametervariation bewerten kann.
- Prozeßentartungen in Form von Lichtbögen erfordern eine direkte Behandlung, die in vielen Adaptionsverfahren nicht enthalten ist. Beispielsweise ergeben sich bei Energieabschaltung und einer unmittelbar eingeleiteten Abhebebewegung völlig veränderte Spaltbedingungen, denen die Adaption Rechnung tragen müßte.
- Der voraussichtliche Effekt der modifizierten Parameter ändert sich mit fortschreitender Einsenktiefe, so daß vormals erfolgreiche Veränderungen ihre Wirkung verfehlen können. Eine ständige Neubewertung des Einflusses der Parameter wird notwendig.
- Die Vielzahl der Werkstoffpaarungen und Erosionsformen kann dazu führen, daß die als Grundlage für ein Adaptionsverfahren dienenden statistischen Zusammenhänge nicht immer in der notwendigen Ausprägung anzutreffen sind. Die allgemeine Anwendbarkeit des Verfahrens ist dadurch nicht gesichert.
- Durch die gegenseitige Beeinflussung der veränderbaren Parameter in ihrer Wirkung wird eine komplexe Mehrgrößenregelung notwendig.

2.3.5 Fuzzy-Logik-basierte Verfahren der Vorschubregelung

Neuere Forschungsansätze versuchen, das intuitive Expertenwissen des erfahrenen Maschinenbedieners in die Steuerung der Vorschubregelung zu integrieren. Möglich wird dies durch die Anwendung von Fuzzy-Logik oder künstlichen Neuronalen Netzen.

Boccadoro und *Dauw* entwickelten einen Fuzzy Spaltweitenregler, der durch einen auf konventionelle numerische Verfahren basierten Adaptionsalgorithmus angepaßt wurde [BoDa95]. Den vielfältigen Anforderungen an die Spaltweitenregelung, die sich je nach Bearbeitungsfall unterscheiden können, wurde durch den Austausch der kompletten Fuzzy-Wissensbasis entsprechend der Anwendung Rechnung getragen.

Eine hierarchisch kaskadierte Fuzzy-Optimierung entwickelte *Witzak* [Wit97]. Für die Bewertung des Prozeßzustandes wurde Fuzzy-Logik eingesetzt. Auf Grundlage dieser Prozeßbewertung erfolgte dann eine systematische Variation der Bearbeitungsparameter. Dabei wurde auch der als konventioneller Proportional-Regler ausgeführte Vorschubregler adaptiert.

Eine Weiterentwicklung des Adaptionsverfahrens nach *Dehmer* stellt die Arbeit von *Raabe* dar [Raa99]. Durch den Einsatz der Regressionsanalyse innerhalb der *Dehmer*-Optimierungsmethode besteht aufgrund von statistischen Schwankungen während des Erosionsprozesses die Gefahr von Fehleinschätzungen. Zur Lösung dieses Problems wurden Zwischenergebnisse der Adaption vorab mittels Fuzzy-Logik validiert. Auch im Rahmen der Spaltweitenregelung und zur Lichtbogenbehandlung erfolgte der Einsatz von Fuzzy Technologien. Die Fortschritte im Bereich der Software-Werkzeuge zur Entwicklung von Fuzzy-Systemen erleichterten dabei die Erstellung der vielen verschiedenen Fuzzy-Regelbasen [NN96a]. So konnte die Entwicklung der Fuzzy-Regler durch neuronale Netze vereinfacht werden.

Die Forschungsansätze zur Einbeziehung von Fuzzy-Technologien in die Prozeßsteuerung funkenerosiver Senkanlagen lassen erkennen, welch hohes Potential dieser Ansatz bietet, um eine Steigerung des Automatisierungsgrades und der Bearbeitungsqualität zu erzielen. Die vorgestellten Regelsysteme setzen Fuzzy Logik jedoch nur ein, um konventionelle adaptive Strategien zu ergänzen oder zu verbessern. Der Nutzen von Fuzzy-Technologien besteht in diesem Fall lediglich darin, bei den prozeßbedingt stark schwankenden und zum Teil widersprüchlichen Eingangsdaten sinnvolle Ausgaben zu erzeugen. Auch das Potential künstlicher Neuronaler Netze wird bislang kaum genutzt. Lediglich eines der betrachteten Prozeßführungssysteme verwendet neuronale Netze [Raa99]. Diese werden jedoch nur innerhalb des Entwicklungswerkzeuges zur Erzeugung der Fuzzy-Komponenten eingesetzt und können nicht als permanent aktive Bestandteile des Prozeßführungssystems betrachtet werden.

Neuronale Netze bieten gegenüber anderen Verfahren der künstlichen Intelligenz Vorteile:

- Die Fähigkeit zum Lernen.
- Die Möglichkeit der Repräsentation von Wissen.
- Die Toleranz von unvollständigen oder widersprüchlichen Eingangsdaten

Auch der Gefahr von Prozeßentartungen wird in den vorgestellten Regelsystemen nicht ausreichend begegnet. So verfügen diese Systeme zumeist über keine oder nur unzureichende Einrichtungen zur wirksamen Erkennung lichtbogenartiger Fehlentladungen, die als Hauptursache für Prozeßentartungen anzusehen sind. Insbesondere im ungespülten Betrieb, der in der praktischen Anwendung überwiegt, ist aufgrund der Verschmutzung des Spaltes durch Abtragspartikel die Gefahr lichtbogenartiger Fehlentladungen besonders hoch. Ein erhöhtes Risiko zur Prozeßentartung besteht ebenfalls bei der Schlichterosion aufgrund der kleinen Erosionsspaltweiten und der geringen Entladeenergien. Um auch im mannlosen Betrieb reproduzierbare Ergebnisse sicherzustellen, sollte das Prozeßführungssystem neben einem abtragsintensiven Erosionsprozeß auch die Vermeidung von Prozeßentartungen anstreben. Erst durch eine wirksame Methode zur Erkennung und reaktionsschnellen Behandlung lichtbogenartiger Fehlentladungen kann ein sicherer Erosionsprozeß gewährleistet werden und als Ausgangspunkt für eine Prozeßoptimierung dienen.