VII.UMSETZUNG DER HIERARCHISCHEN PROZEßFÜHRUNG

Die steuerungstechnische Umsetzung des Entwurfs aus Kapitel 6 führt auf die beschriebene dezentrale Struktur. Diese liefert ein hierarchisches Prozeßführungssystem, das die Prozeßführungsaufgaben in Prozeßstabilisierung und Prozeßoptimierung unterteilt.

7.1. Prozeßstabilisierung

Die Prozeßqualität des funkenerosiven Abtragsvorganges spiegelt sich in der Abtragsrate und dem Verschleiß wider. Die Aufgabe der Prozeßstabilisierung ist es, den Abtragsprozeß möglichst im abtragsintensiven d.h. leerlaufarmen Bereich zu halten, dabei aber gleichzeitig Lichtbögen und Kurzschlüssen sicher entgegenzuwirken. Die Prozeßstabilisierung besteht aus der *Spaltweitenregelung*, der *Lichtbogen- und Kurzschlußbehandlung* und der *Bewegungsspülung*. Die zusätzliche Saug- oder Druckspülung wird im Rahmen vorliegender Arbeit nicht betrachtet, da diese Erosionsart in der Praxis aufgrund des vollautomatisierten Betriebes heutiger Erodieranlagen keine Rolle mehr spielt. Das Zusammenspiel der drei genannten Komponenten basiert auf der Spaltweitenregelung, die die Spaltweite einstellt und ständig nachführt, so daß der Funkenspalt durchzünden kann. Die Spaltweitenregelung arbeitet auf Basis eines nichtlinearen Reglers mit der Regelgröße „mittlere Zündverzögerungszeit“. Auf die zunehmende Verschmutzung des Arbeitsspaltes im Verlauf der Erosion wird mit der Bewegungsspülung reagiert. Die Lichtbogen- und Kurzschlußbehandlung arbeitet dabei ständig als unterlagerte Sicherheitseinrichtung, die Lichtbögen und Kurzschlüsse detektiert und gegebenenfalls die Energiezufuhr zum Spalt unterbricht oder die Bewegungsspülung auslöst. Für die Zeitdauer der Spülzyklen wird die Spaltweitenregelung unterbrochen. Die Komponenten der Prozeßstabilisierung ergänzen sich in ihrer Wirkung und sind in bezug auf die Prozeßsteuerung als autarke Einheit zu sehen.

7.1.1. Lichtbogen-, und Kurzschlußbehandlung

Aufgrund der zufälligen Prozeßentwicklung treten grundsätzlich beim FE-Abtragen immer Lichtbögen und gelegentlich auch Kurzschlüsse auf. Wie bereits erwähnt, existiert eine Anzahl von Verfahren, die die unterschiedlichsten Meßgrößen verarbeitet, um daraus Informationen zur Lichtbogendetektion zu gewinnen. Der Kurzschlußfall ist im Vergleich zum Lichtbogen sehr einfach mittels eines Strom-Spannungsvergleichs unter Berücksichtigung des Steuertaktes zu ermitteln. Der Kurzschlußfall liegt genau dann vor, wenn bei über den Funkenspalt fließendem Arbeitsstrom der Spannungsabfall über dem Funkenspalt einen Wert von ca. 5V unterschreitet. Zwischen diesem harten, sehr niederohmigen Spaltkurzschluß und der lichtbogenartigen Entladung ist ein fließender Übergang. So kann z.B. auch ein anliegender Kurzschluß bei momentaner Spaltvergrößerung, vergleichbar mit einem öffnenden Schalter, in einen Lichtbogen entarten. Tendenziell kann eine Reihe von z.B. 5 bis 10 Lichtbögen in Folge zu kurzschlußartigen Prozeßzuständen führen. I.d.R können mit geeigneten Spülmaßnahmen derartige Folgen von Lichtbögen sehr wirksam bekämpft werden. Im Folgenden wird die Lichtbogenbehandlung, wie sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde, dargestellt. Zu

den Lichtbögen können dabei auch die „hochohmigen Kurzschlüsse“ gezählt werden, da eine eindeutige meßtechnische Unterscheidung von Lichtbögen nicht möglich ist.

Das physikalische Prinzip der Lichtbogenerkennung

In Kapitel 5.3.2 sind die wichtigsten bekannten Verfahren der Lichtbogendetektion beschrieben. Die genannten Vorgehensweisen orientieren sich entweder an der Einzelentladung oder nutzen eine Folge von Entladungen aus, um auf etwaige lichtbogenartige Impulse zu reagieren. Je nach Meßgröße schwankt die Effizienz und Sicherheit der Verfahren erheblich. Bei Verfahren, die auf statistischen Ansätzen bei Folgen von Lichtbögen beruhen und dabei das Fehlen der Zündverzögerungszeit t_d als Kriterium heranziehen, müssen prinzipbedingt zahlreiche Lichtbögen im Prozeßverlauf akzeptiert werden. Eine Vorhersagemöglichkeit bieten die genannten Verfahren bis auf eines [BOW92] nicht. Optimal wäre die gänzliche Vermeidung von lichtbogenartigen Entladungen. Falls dies nicht möglich ist, so muß in jedem Fall sichergestellt sein, daß auf erkannte Lichtbögen unverzüglich mit dem Abschalten der Energiezufuhr reagiert wird. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und zum Patent angemeldete Methode zur Lichtbogenvorhersage, Lichtbogendetektion und prozeßangepaßte Reaktion auf erkannte Lichtbögen [BWB95b] erfüllt diese Forderungen.

Die Grundüberlegung, daß Schaltvorgänge zu Impulsbeginn und -ende im funkenerosiven Abtragssystem mit dem sprungförmigen Anregen einer, wie auch immer abgeschlossenen Übertragungsleitung gleichgesetzt werden, bildet die Basis des neuartigen Verfahrens zur Lichtbogenerkennung. Das Einschalten bedeutet dabei, daß das System mit einem Spannungssprung von null auf Zündspannungsniveau beaufschlagt wird. Das Abschalten kommt einem Spannungssprung von Brennspannungsniveau auf null gleich. Somit arbeitet das Verfahren während der Zündphase zu Impulsbeginn und während der Deionisierungsphase zu Impulspausenbeginn. In Analogie zum Leitungsmodell entspricht das Anlegen einer Spannung an den Arbeitsspalt der Beaufschlagung einer offenen Leitung mit einem Spannungssprung von 0V auf die Höhe der Zündspannung. Entsprechend den Impedanzverhältnissen stellt sich aufgrund von Reflexionen ein Schwingen der Spannung über dem Arbeitsspalt ein. Die Dämpfung und die auftretenden Frequenzen dieser Schwingung erlauben rückwärts die Charakterisierung der Entladungsart.

Grundlage dieser Methode ist das in Kapitel 5.2 hergeleitete Übertragungsmodell für die Funkenerosion. Dort bewirkt der Funkenspalt abhängig von seiner elektrischen Beschaffenheit als variable Abschlußimpedanz unterschiedliche Leitungsreflexionen. Die drei Fälle die den Abschluß der Leitung bestimmen, sind Leerlauf, Abschluß mit einem beliebigen komplexen Widerstand $\underline{R}_a$ und Kurzschluß. In Bild 7-1 sind die Grenzfälle allgemein mit den exemplarisch gemessenen Reflexionen dargestellt. Die Spannungsverläufe als Überlagerungen der vorwärtslaufenden und reflektierten Wellen sind für den Leitungsanfang (U_e) und für das Leitungsende (U_a) gemessen.

Der Sonderfall des Abschlusses der Leitung mit ihrem Wellenwiderstand Z (R_a=Z) wird als korrekt abgeschlossene Leitung bezeichnet (Bild 7-1b). Dies ist der Idealfall, der mi-

nimale Reflexionen am Leitungsende bewirkt. Ist die Leitung mit einem Kurzschluß (R_a=0) abgeschlossen (Bild 7-1c), so kann sich überhaupt keine Spannung U_a ausbilden. Der dritte Sonderfall beschreibt die am Abschluß „leerlaufende“ Leitung (Bild 7-1a). Entsprechend ist R_a sehr groß oder unendlich. In diesem Fall bewirken die abschlußseitigen Reflexionen ein ausgeprägtes Schwingen der Spannung U_a.

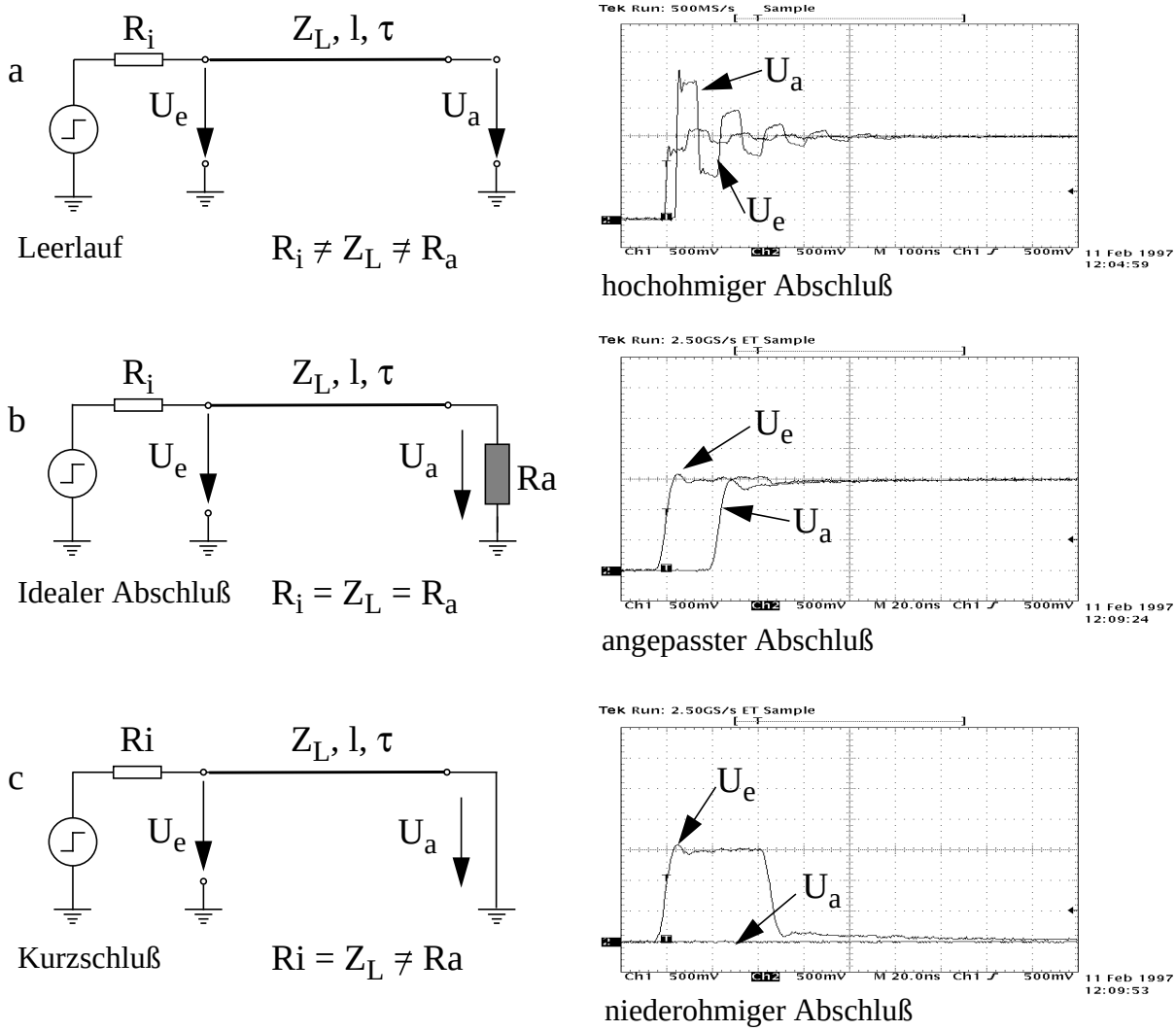


Bild 7-1: ***Exemplarisches Schwingverhalten bei unterschiedlichen Leitungsanpassungen und -abschlüssen: a. Offene Leitung; b. Abgeschlossene Leitung; c. Kurzgeschlossene Leitung***

Die Neuartigkeit des Verfahrens gründet sich darauf, die wirksame Impedanz des Arbeitsspaltes charakteristischen Prozeßzuständen zuzuordnen. Daraus lassen sich die in Tabelle 7-1 dargestellten Analogien ableiten, die den Zusammenhang zwischen dem Funkenspalt als Leitungsabschluß und dessen Deutung als Lichtbogenindikator herausstellen. Die letzte Spalte beinhaltet bereits eine Aussage über die Klassifizierung der aktuellen Entladung. Zu Beginn der Zündphase liefert die Klassifizierung eine Aussage über die aktuelle Entladung und kann z.B. zum Abschalten führen, wenn ein vermeintlicher Lichtbogen erkannt wurde. Am Ende der Brennphase kann aus der Klassifizierung eine Aussage über die Deionisierungsgeschwindigkeit des Arbeitsspaltes gewonnen werden. Eine Konsequenz kann hierbei die Verlängerung der Pause sein. Die Verlän-

gerung führt dazu, daß der Spalt seine elektrische Stabilität vor dem Zünden der nächsten Entladung sicher erreicht.

Leitungstheorie	Beginn Zündphase	Beginn Pausendauer	Folgerungen für die Klassifizierung
Leerlauf, offene Leitung	Stabiler, gut isolierender Arbeitsspalt, bzw. Abschlußimpedanz	Stabiler, gut deionisierter Arbeitsspalt	Gegenwärtige oder kommende Entladung akzeptabel „Guter Impuls“
Abgeschlossene Leitung, i.A Ra<>Z	Elektrisch instabiler, nicht isolierender, Arbeitsspalt	Elektrisch instabiler, noch leitender Arbeitsspalt	Die aktuelle Entladung oder die Folgeentladung ist wahrscheinlich lichtbogenartig „Frühzünder oder Lichtbogen“
Kurzschluß, mit sehr geringer Impedanz abgeschlossene Leitung	Elektrisch kurzgeschlossener Arbeitsspalt	Elektrisch kurzgeschlossener Arbeitsspalt	Die aktuelle Entladung ist der Kurzschluß, die Folgeentladung darf nicht gezündet werden „Schlechter Impuls“

***Tabelle 7-1*: Analogie zwischen der funkenerosiven Entladung und dem leitungstheoretischen Modell**

Zusammenfassend ergibt sich mittels der Analogiebetrachtung von Leitungen mit ihren Abschlüssen und dem Funkenspalt mit Zuleitung eine neuartige Lichtbogenstrategie für die Funkenerosion, die sowohl eine Vorhersage als auch eine sichere Detektion von lichtbogenartigen Entladungen und Kurzschlüssen erlaubt. Dabei gilt die Zuordnung:

Hochohmiger Abschluß - Guter Impuls

Maximale Reflexion des Spannungssignals, geringe Dämpfung, ausgeprägte Schwingungsneigung.

Niederohmiger Abschluß - Lichtbogengefahr

Gedämpfte Schwingung des Spannungssignals, schwach ausgeprägte Schwingungsneigung

Sehr niederohmiger Abschluß - Lichtbogen oder Kurzschluß

Maximale Dämpfung des Spannungssignals, keine Schwingungsneigung

Der letzte Schritt zur Anwendung der Lichtbogenstrategie in der Praxis ist die Realisierung einer elektronischen Schaltung, die in der Lage ist, die Schwingungsinformation aus dem Spaltspannungssignal zu extrahieren, zu verarbeiten und die Klassifikation nach abtragswirksamen „guten Entladungen“ und nach schädlichen abtragsunwirksamen „lichtbogenartigen Entladungen“ vorzunehmen. Die Klassifikation unterteilt die Impulse in „Gute Impulse“, „Frühzünder“ und „Schlechte Impulse“, wie Lichtbögen und Kurzschlüsse. Die sogenannten Frühzünder sind Entladungen, die an sich kritisch sind, allerdings bei der Zündung des Funkens eine Schwingungsneigung aufweisen, die zu einer

Zulassung dieser Entladungen führt. Als lichtbogenartig klassifizierte Impulse werden binnen maximal 5µs abgeschaltet. Der Teil „Lichtbogenvorhersage“ der Lichtbogenstrategie liegt nur als Prototyp vor und ist nicht in die aktuelle Prozeßssteuerung eingebunden. Die im Rahmen dieser Arbeit realisierte Schaltungslösung ist in Kapitel 7.3.4 dargestellt.

Für den Einsatz des Verfahrens in der Praxis gilt, daß die Schwingkreismethode zur Prozeßklassifikation vor der Anwendung zunächst eines Abgleiches mit dem anlagenspezifischen Übertragungsverhalten bedarf, um zuverlässig Prozeßentartungen zu erkennen. Ein weiterer Gesichtspunkt sind die Störspektren, die für die Fragen der „elektromagnetischen Verträglichkeit“ von Interesse sind. Nach Aussagen von Maschinenherstellern ist das mit der Schwingkreismethode ausgenutzte Schwingverhalten am Impulsbeginn ein unerwünschtes Phänomen. Entsprechende Messungen an Anlagen, die nach Angaben des Herstellers störungssicher sind, zeigten allerdings exakt das gleiche Schwingverhalten, wie die im Rahmen dieser Arbeit verwandte Versuchsanlage. Daraus kann geschlossen werden, daß die mit der Schwingkreismethode ausgenutzten höher frequenten Schwingungen generell vorhanden sind und bezüglich der Störemision von FE-Senkanlagen nicht ins Gewicht fallen.

Für die weitere Verarbeitung in der Prozeßstabilisierung wird die Meldung über Folgelichtbögen für die externe Verwendung bereitgestellt. Dabei bestätigte sich in Erodierversuchen die Annahme, daß einzelne Lichtbögen, sofern sie sofort abgeschaltet werden, keine drastischen Einflüsse auf die Prozeßstabilität haben. Folgen von Lichtbögen hingegen deuten auf Probleme der Spaltdeionisierung hin, die z.B. mittels eines Abhebespülzyklusses zu beseitigen sind. Lichtbogendetektion und Bewegungsspülung zusammen realisieren auf diese Art und Weise eine prozeßangepaßte Bewegungsspülung, die den Spaltweitenregler in seinem Bestreben nach einem stabilen Prozeß als „unterlagerte“ Stabilisierungselemente unterstützen.

7.1.2. Spaltweitenregelung

Die Spaltweitenregelung ist das Kernelement der Prozeßstabilisierung beim funkenerosiven Abtragen. Ziel der Spaltweitenregelung ist die Einstellung und ständige Anpassung der sogenannten „elektrisch wirksamen Spaltweite“ an die für die Erosion optimalen Werte. Allgemein besteht die CNC-Achssteuerung funkenerosiver Anlagen, wie in Bild 7-2 dargestellt, immer aus zwei überlagerten Regelkreisen mit unterschiedlichen Regelparametern zur Generierung eines Stellwertes. Die Gesamtregelstrecke ist ein sehr komplexes Gebilde, bestehend aus dem Antriebsstrang mit elektrischen Motoren, Spindeln, Zahnriemen und eventuell Getrieben und dem Funkenspalt mit seinen charakteristischen Übertragungseigenschaften. Bei Mehrachsmaschinen entspricht der Teilstrang „Lageregelung“ demjenigen einer konventionellen Werkzeugmaschine. Dort wird entsprechend einer Sollvorgabe für die Position über eine Lageregelung ein Stellwert generiert, der die Pinole mit Hilfe des Antriebsstranges in den Zielpunkt bewegt. Gleichzeitig wird dieser Bewegung die Spaltregelbewegung überlagert. In [Slo89] wird anhand von Planetärzyklen aufgezeigt, daß neben der Überlagerung der beiden Bewe-

gungen Abhängigkeiten zwischen der von einer CNC vorgegebenen Bahn und der Spaltweitenregelung vorhanden sind.

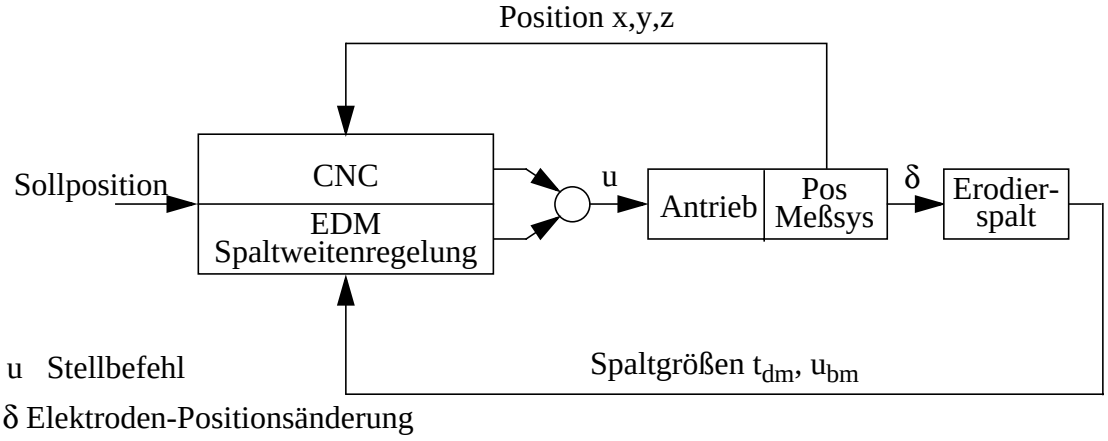


***Bild 7-2*: Prinzipdarstellung des Regelkreises zur Pinolenpositionierung**

Da die im Rahmen dieser Arbeit verwandte Versuchsanlage nur über eine Arbeitsachse (Z-Achse) verfügt, kann die CNC-Bahnsteuerung entfallen. Dafür wird lediglich eine Sollmaßüberprüfung durchgeführt. Die Sollposition in Bild 7-2 entspricht dem Endmaß der FE-Bearbeitung. In der Praxis wird als Endmaß ein um die tatsächliche Erodierspaltweite reduziertes Untermaß als Sollposition angegeben. Dazu wird tabellarisch die für eine eingestellte Bearbeitungsaufgabe geltende Spaltweite vom Hersteller mit der Maschine dem Bediener zur Verfügung gestellt oder automatisch in die Sollwertvorgabe miteingerechnet. Die Rückführung einer Regelgröße, die die Spaltweite beschreibt, und nicht der Spaltweite selbst ist zwingend, da die „elektrisch wirksame Spaltweite“, nicht meßbar ist. Als Hilfsgröße sind in heutigen Maschinen entweder die „mittlere Spaltspannung u_{bm}“ oder die „mittlere Zündverzögerungszeit t_{dm}“ anzutreffen. Neuere Verfahren wie auch die vorliegende Arbeit setzen digitale Regler ein, die auf der gemittelten Zündverzögerungszeit basieren. Da die mittlere Spaltspannung hier nicht verwendet wird, soll im Folgenden nur die mittlere Zündverzögerung betrachtet werden. Da es sich bei der Zündverzögerungszeit um eine nichtlineare Größe handelt, die zudem eher zufällig schwankt, stellt sich die Frage nach der tatsächlichen Verwandtschaft der „elektrisch wirksamen Spaltweite“, im Folgenden einfach mit Spaltweite bezeichnet, und der „Zündverzögerungszeit“. Die beiden folgenden Aussagen geben die Randbedingungen mit der jeweiligen Extrembedingung korrekt wieder:

Wenn die Spaltweite klein oder null ist,
dann ist die Zündverzögerungszeit ebenfalls klein oder wird zu null.

Wenn die Spaltweite sehr groß ist,
dann ist die Zündverzögerungszeit groß oder es kommt nicht zur Zündung.

Diese beiden Randbedingungen legen zwei Punkte der funktionalen Beziehung zwischen der tatsächlichen Spaltweite s in µm und Zündverzögerungszeit t_d in µs fest. Der Zusammenhang zwischen einzelnen Zündverzögerungszeiten und Spaltweiten kann im Bereich zwischen den Randwerten nicht quantitativ angegeben werden. Deswegen wird die mittlere Zündverzögerungszeit verwandt, die die statistische Unsicherheit der Einzel-

werte deutlich verringert und in erster Näherung ein quasi-proportionales Verhältnis zur Spaltweite aufweist. Der Zusammenhang ist in Bild 7-3 dargestellt.

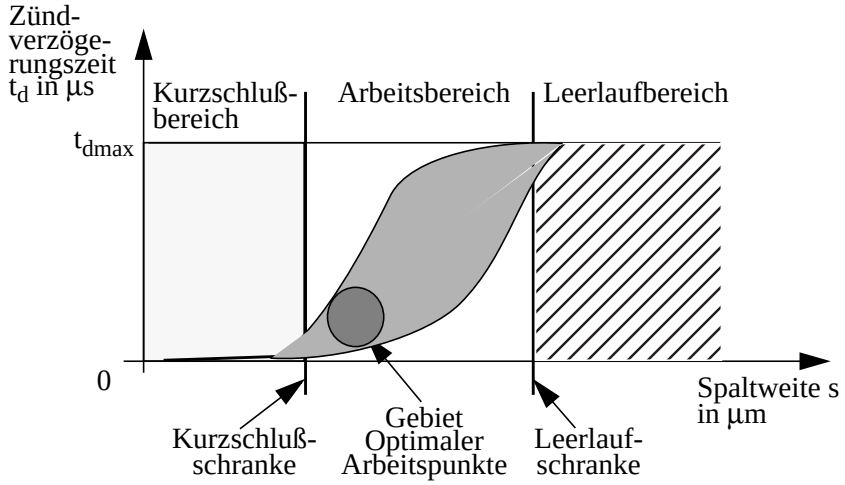


Bild 7-3: ***Schematischer Zusammenhang zwischen der Spaltweite s und der zu erwartenden Zündverzögerungszeit t_d***

Dem schematisierten Zusammenhang zwischen der zu erwartenden Zündverzögerungszeit t_d und der Spaltweite s ist das Gebiet optimaler Arbeitspunkte zu entnehmen, das prinzipiell nahe dem Kurzschlußpunkt liegt. Aus Sicht der Prozeßstabilisierung ist der Arbeitspunkt soweit nach links unten verschiebbar bis die Prozeßstabilisierung den Prozeß nicht mehr beherrschen kann. Je weiter der Arbeitspunkt nach rechts oben wandert, desto unwirtschaftlicher bzw. ineffektiver wird der Abtragsprozeß. Es existiert nicht ein einzelner optimaler Arbeitspunkt, sondern es liegt ein Gebiet optimaler Arbeitspunkte vor. Je nach Bearbeitungsaufgabe zeigt sich ein optimaler Arbeitsbereich, der sich im Verlauf fortschreitender Bearbeitung allerdings erfahrungsgemäß verschiebt. Hierbei wird man tendenziell mit zunehmender Einsenktiefe eine Verschiebung des Arbeitspunktes nach links unten feststellen, da die mittlere Zündverzögerungszeit aufgrund zunehmender Spaltverschmutzung und Einsenktiefe abnimmt. In Bild 7-4 ist exemplarisch eine Häufigkeitsverteilung der Regelgröße „Zündverzögerungszeit“ dargestellt. Man erkennt, daß der Großteil der Entladungen mit einer sehr kurzen Zündverzögerungszeit zündet. Dies ist zum Teil, wie bereits ausgeführt, in der neuen Generatortechnik begründet. Die zweite Besonderheit, die die maximale Zündverzögerungszeit betrifft, folgt aus der Leerlaufbeschränkung, wie in Kapitel 5.1 dargelegt, zur Sicherstellung der Stromanlaufhöhe im Generator.

Wie aus den Häufigkeitsverteilungen zu ersehen ist, schwankt der Mittelwert der Zündverzögerungszeit je nach Prozeßqualität nicht unwesentlich. Ein zu hoher oder extrem kleiner Mittelwert deutet in jedem Fall auf mangelnde Prozeßgüte hin. Im Falle des zu kleinen Wertes, der auf Lichtbogen- oder Kurzschlußtendenz hinweist, würde man prinzipiell durch z. B. gezieltes Spülen versuchen, den Energieeintrag in den Arbeitsspalt und die anzunehmende Spaltverschmutzung zu reduzieren. Beides kann im Mittel durch eine tendenzielle Vergrößerung der Spaltweite und kräftigere Pinolenbewegungen mit verstärkten Rückzugsbewegungen erreicht werden. Entsprechendes gilt für die Leerlauf-

tendenz. Dort würde durch Beruhigen der Pinolenbewegung und verstärkte Vorwärtsbewegung dem Leerlauftrend entgegengewirkt werden. Neben der Ausregelung der Extremwerttendenzen sollte die Spaltweitenregelung tendenziell den Istwert der mittleren Zündverzögerungszeiten dem Sollwert annähern.

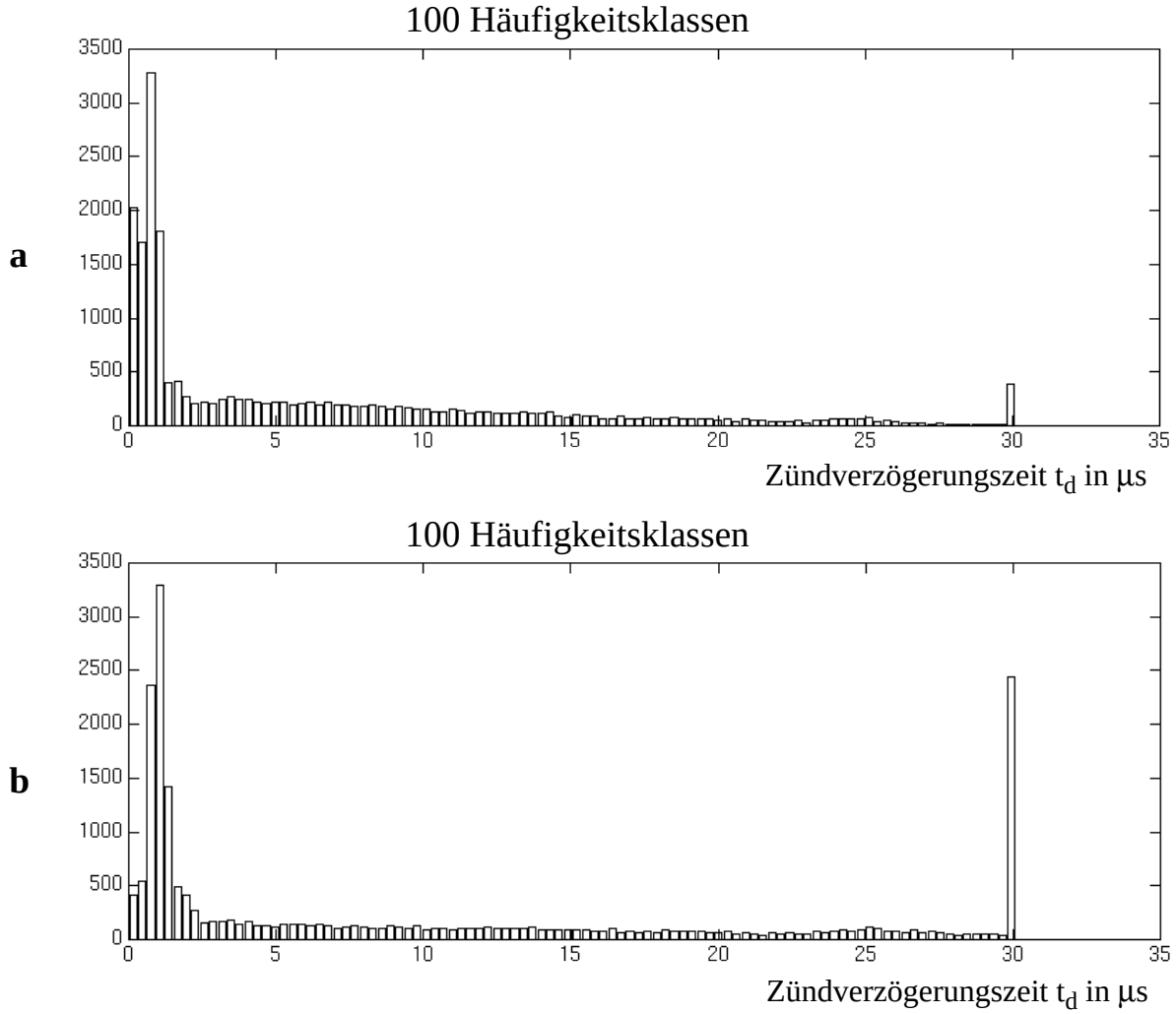


Bild 7-4: ***Serie von Zündverzögerungszeiten von 20160 Impulsen in Folge, für eine CU^+-ST^- Bearbeitung, I_a=12A; U_z=180V t_e=100µs, t_o=20µs; a. Abtragsintensiv mit Kurzschlußtendenz; b: Weniger Abtrag mit Leerlauftendenz***

Diese Beruhigung des Systems um den Arbeitspunkt in Verbindung mit der Extremwertreaktion verlangt insbesondere unter Berücksichtigung der Kennlinie aus Bild 7-4 prinzipiell nach einem nichtlinearen Regler mit folgenden Eigenschaften:

- hohe Dynamik zur Beherrschung der Extremwerte (Kurzschluß, Leerlauf)
- sehr ruhiges Regelverhalten um den Arbeitspunkt, d.h. dem Punkt mit minimalem Regelfehler
- minimales Überschwingen bei der Ausregelung des Regelfehlers insbesondere bei der Leerlaufausregelung, d.h. bei Zustellbewegungen zur Verkleinerung des Arbeitsspaltes

Entsprechend den Anforderungen wurde im Rahmen vorliegender Arbeit, unter Einbeziehung der entwickelten DDC-Antriebssteuerung (Direct Digital Control), ein speziell auf die Anforderungen abgestimmter digitaler nichtlinearer Spaltweitenregler gemäß Bild 7-5 entwickelt. Der Regelalgorithmus basiert auf einem „t_d-Mittelwertregler“ mit unsymmetrischen Verstärkungen (k_v, k_r mit k_r= n k_v; n>3) und ist ergänzt um eine fehlerangepaßte Stellgrößenkorrektur. Die Überlagerung des unsymmetrischen Proportionalreglers mit dem Stellgrößenkorrekturglied liefert einen nichtlinearen Regler, der die gewünschte Dynamik für die Extremwerte bereithält und gleichzeitig um den Arbeitspunkt herum ein sehr ruhiges Regelverhalten besitzt. Die Unsymmetrie in den Regelverstärkungen hat zwei Gründe. Erstens ist ein langsameres Zustellen der Pinole für den Prozeß günstig, da Überschwinger kleiner ausfallen und somit der Gefahr des Überschwingens in den Kurzschlußbereich entgegengewirkt wird. Andererseits ist der kräftige Rückzug im Falle von Prozeßentartungen sehr wichtig für die Spaltreinigung. Der zweite Grund ist die Berechnung des Regelfehlers aus Istwert und Sollwert. Allgemein üblich für die Sollwertvorgabe sind 10% der Brenndauer. Im Fall einer Brenndauer von 100 µs ergäbe sich betragsmäßig der Regelfehler zu 90 µs, da die gemessene Zündverzögerungszeit gleich der Brenndauer ist (t_d= t_e). Im Kurzschlußfall ist der Istwert der Zündverzögerungszeit t_d gleich null und es folgt ein Regelfehler von 10 µs. Bei einem einfachen Proportionalregler ist demnach der Stellwert betragsmäßig für den Leerlauf neunmal größer als für den Kurzschluß. Würde man nur einen einzigen Verstärkungsfaktor einsetzen, so hätte dies zur Folge, daß man entweder hohe Rückzugsdynamik realisieren könnte, dafür aber eine überproportional kräftige Vorwärtsbewegung mit der Gefahr des Überschwingens in den Kurschlußbereich in Kauf nehmen müßte. Auf der anderen Seite hätte die Vermeidung der Überschwinger zwangsläufig ein träges Kurzschlußreaktionsverhalten zur Folge.

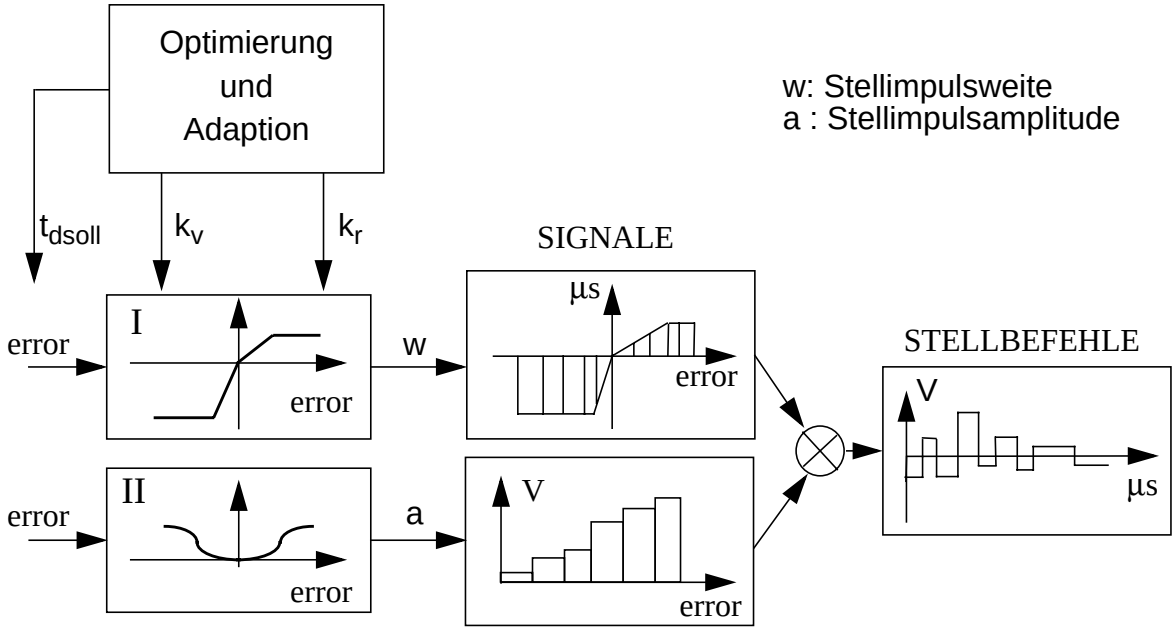


Bild 7-5: Blockdiagramm des nichtlinearen Spaltweitenreglers

Zur Unterstützung ist die Impulstaktung zusätzlich, wie bereits erwähnt, mit einem spe-

ziellen Leerlauf-Timeout versehen. Der Zwangsabbruch des Impulses 30 µs nach Anlegen der Zündspannung bedeutet, daß der Mittelwert insgesamt kleiner bleibt und der Regelfehler gleichmäßiger um den Sollwert herum verteilt ist. Im Prozeß selbst ist aufgrund dieser Maßnahme eine deutliche Beruhigung bei gleichzeitiger Abnahme der Kurzschlußhäufigkeit zu beobachten. Insgesamt liefert der Proportionalregler mit dem nichtlinearen Anteil damit ein sehr ausgewogenes Reglerverhalten.

Der Spaltweitenregler produziert einen Spannungspuls, der über eine DDC-Karte an einen AC-Servoverstärker gegeben wird. Der Servoeingang ist eine analoge +-10V Schnittstelle. Der nichtlineare Spaltweitenregler wird mittels zweier unabhängiger Regelglieder realisiert.

I. Die Pulsweitenregelung zur Anpassung der Stellimpulsweite *w* an den Regelfehler. Dieser Teil arbeitet, wie bereits beschrieben, als unsymmetrischer Proportionalregler mit variabler Sollwertvorgabe.

II. Die Amplitudenregelung für die Anpassung der Stellimpulsamplitude *a* an den Regelfehler (error). Für die Anpassung der Amplitude ist im Regler ein Kennfeld implementiert, das den Regelfehler zur eingestellten Brenndauer in Beziehung setzt und daraus die aktuelle Amplitude berechnet. Die Amplitudenregelung paßt die Stellgröße an die relative Fehlergröße an. Die relative Fehlergröße ist der prozentuale Anteil des Regelfehlers (t_{dsoll} - t_d) von der eingestellten Brenndauer t_e. Für sehr kleine Fehler wird die Stellenergie der geschwindigkeitsproportionalen Ansteuerungsimpulse durch sehr kleine Impulsamplituden erheblich verringert, wohingegen bei großem Regelfehler die maximale Amplitude und somit die größte Stellenergie ausgegeben wird.

Beide Reglerkomponenten geben ihre Stellsignale an die DDC-Karte, die daraus den Stellimpuls generiert. Die Systemtotzeiten und die Abtastzeit sind die bestimmenden Entwurfskriterien. Die Systemtotzeit beträgt ca. 600 µs. Der eigentliche Regelalgorithmus benötigt etwa ein zehntel der Totzeit zur Berechnung neuer Stellwerte. Das bedeutet der Regler kann als quasi kontinuierlich betrachtet werden. Somit geht die Abtastzeit bzw. die damit eng verbundene Berechnungszeit des Reglers kaum in die Systemauslegung ein. Die zeitliche Steuerung reglerintern sieht vor, daß der Antrieb ca. alle 500µs einen neuen Stellbefehl bekommt. Dabei wird die Impulsamplitude ständig an den Reglerfehler anpaßt. Die Amplitudenregelung arbeitet unterlagert und gibt alle 100µs eine fehlerangepaßte Impulsamplitude aus.

In Bild 7-6 ist das Kennfeld des Spaltweitenreglers dargestellt. In Bild 7-6a ergibt sich das Verstärkungsverhältnis k_v:k_r zu 1:5. In Bild 7-6b ist es 1:3. In der Z-Achse ist der Impulsenergiegehalt dargestellt. Die Stellenergie entspricht der Fläche unter den amplituden- und weitenmodulierten Stellimpulsen. Die Diagramme zeigen, daß bei gleicher Wahl der Verstärkungsfaktoren die Stellenergie für gleiche Regelfehler nahezu gleich ist. Wählt man allerdings die Rückwärtsverstärkung z.B. 4 mal größer, so wird entsprechend für einen Regelfehler mit positivem Vorzeichen die Stellenergie deutlich höher sein. Für einen negativen Regelfehler sind beide Kennfelder identisch, da dort dieselbe

Vorwärtverstärkung k_v im Regelalgorithmus verwandt wird.

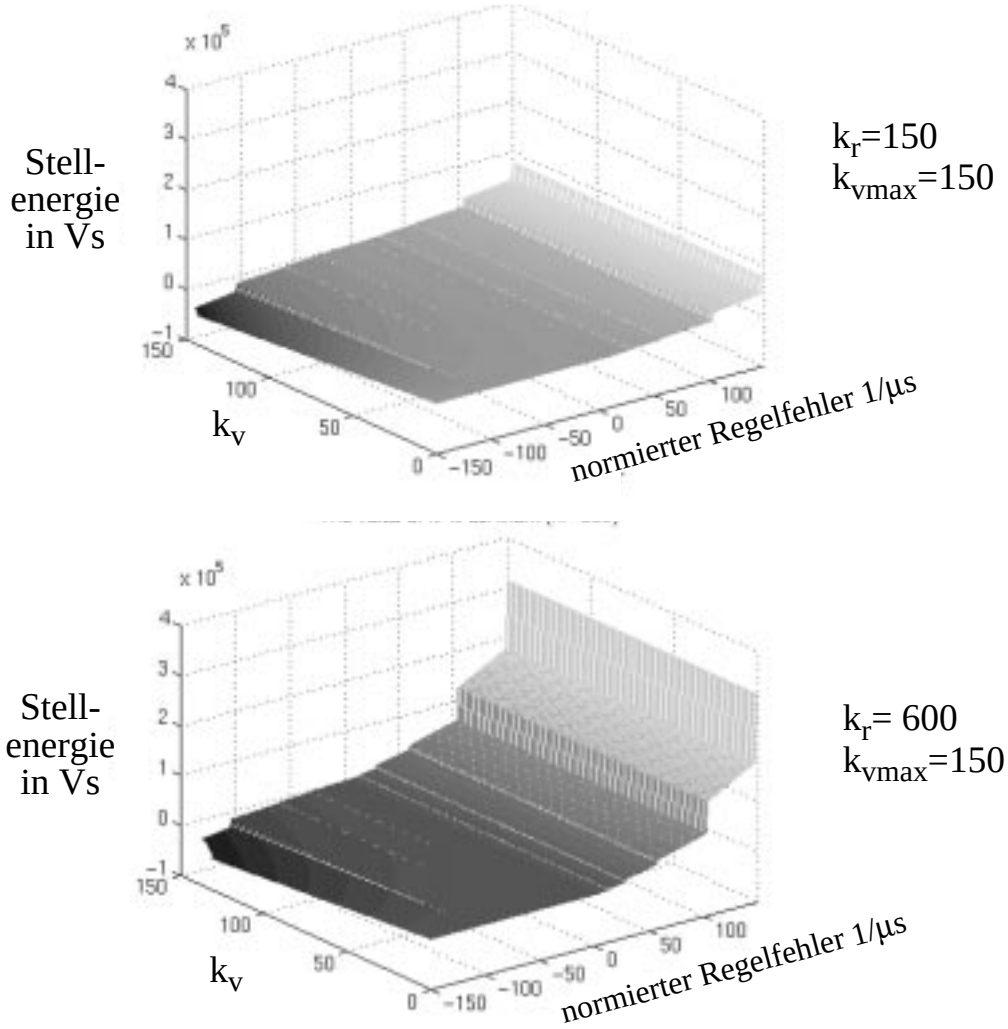


Bild 7-6: ***Kennfelder des Spaltweitenreglers***
a. Verstärkungsverhältnis k_{vmax}:k_r ist 1:1
b. Verstärkungsverhältnis k_{vmax}:k_r ist 1:4

Die Wirkungsweise des Spaltweitenreglers ist in Bild 7-7 nochmals anhand einer Simulation verdeutlicht. Dabei wurde eine Positionsregelung simuliert. Der Regler soll dabei einen Positionssprung ausregeln. Die entsprechende Simulation wurde unter dem Simulationssystem MATLAB/SIMULINK programmiert und umfaßt die gesamte Nachbildung des digitalen Spaltweitenreglers unter Zugrundelegung des identifizierten Modells der Regelstrecke. Als Regler wird der beschriebene nichtlineare Spaltweitenregler verwendet. Hier wurde das Verhältnis k_v/k_r zu 1/3 gewählt, so daß positive Regelfehler (Kurzschlußtendenz) stärker gewichtet sind als negative Regelfehler (Leerlauftendenz).

Zusammenfassend ist festzustellen, daß der im Rahmen dieser Arbeit realisierte Spaltweitenregler in Verbindung mit der entwickelten DDC-Interfacekarte die notwendige Dynamik für die Extrembereiche großer Regelfehler aufweist und gleichzeitig für die notwendige Prozeßruhe im Bereich kleiner Regelfehler sorgt. Für die spätere automatische Optimierung stehen die Vorwärtsverstärkung k_v, Rückwärtsverstärkung k_r und Sollwert für die Zündverzögerungszeit t_{dsoll} zur Verfügung.

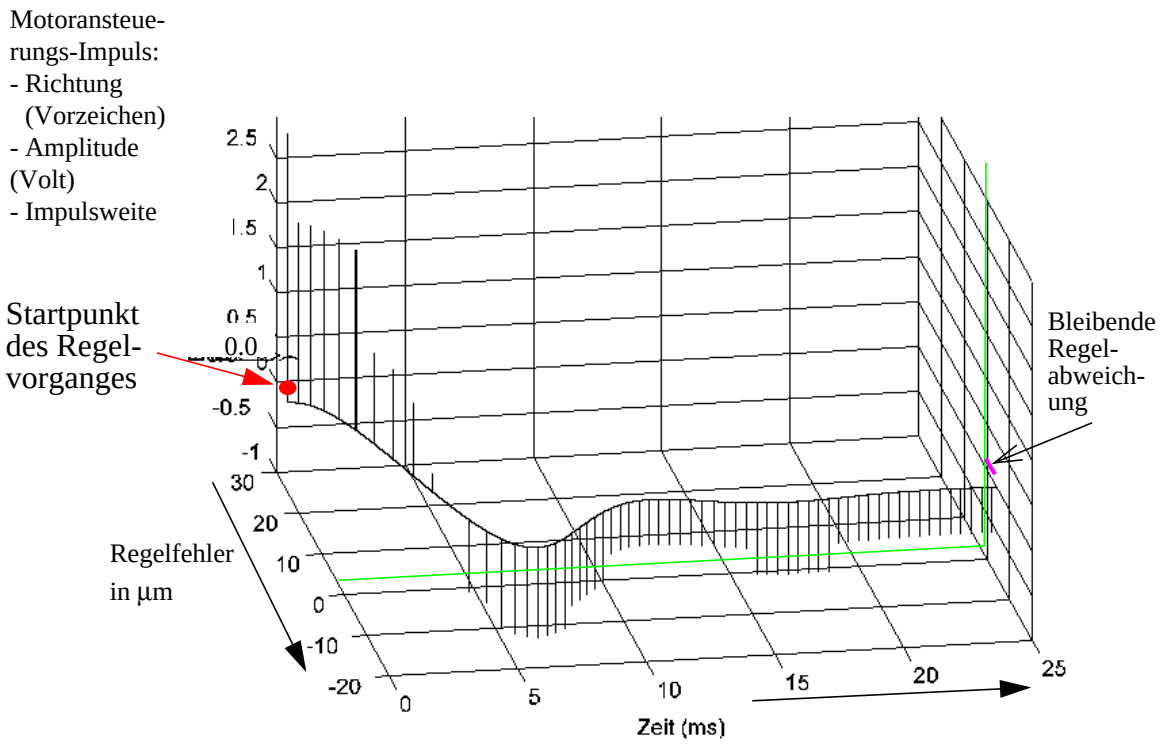


Bild 7-7: ***Regelverhalten des Digitalen Nichtlinearen Spaltweitenreglers in der Simulation am Beispiel einer Positionsregelung***

7.1.3. Bewegungsspülung als Micro-Oszillations-Spülung

Die automatisierte Bearbeitung verbietet in vielen Fällen die sogenannte Zwangsspülung, da sie kaum reproduzierbare Arbeitsergebnisse liefert. So können ein paar Grad Änderung des Einspritzwinkels oder geänderte Spülmenge die Maßhaltigkeit drastisch verschlechtern. Deshalb findet bereits seit geraumer Zeit verstärkt sogenanntes "Bewegungsspülen" Anwendung. Dabei wird die Elektrode entweder in festen Zeitintervallen (Timer) vom Werkstück abgehoben oder es wird mittels einer intelligenten Strategie prozeßangepaßt auf Prozeßverschlechterung aufgrund von Verunreinigungen reagiert. Die eigentliche Abhebebewegung besteht in den allermeisten Fällen aus einer einfachen Rückzugsbewegung mit anschließender Zustellbewegung auf eine Position in der Nähe des vorigen Arbeitspunktes. Während des Spülvorgangs wird der Erodiervorgang unterbrochen, die Partikel werden aufgrund der auftretenden Druck- und Saugspülung zu einem gewissen Prozentsatz aus dem Spalt geschwemmt und der Spalt bekommt Zeit, abzukühlen und zu deionisieren.

Ist die prozeßangepaßte Auslösung der Bewegungsspülung gewährleistet, so ist zu ermitteln, wie die eigentliche Bewegung der Werkzeugelektrode aussehen müßte, um möglichst viele Abtragspartikel aus dem Funkenspalt zu befördern. Hierzu sind die Geschwindigkeit der Elektrode, deren Arbeitsfläche und die gegebene Viskosität des Dielektrikums die bestimmenden Faktoren für die Wirkung der Spülbewegung. Dabei muß zusätzlich zwischen Rückzugsbewegung (Saugkräfte) und Vorwärtsbewegung (Druckkräfte) unterschieden werden. Offensichtlich existiert für die Einstellung der genannten

Parameter ein abtragsoptimaler Wert, der Sauberkeit und "Zündwilligkeit" des Spaltes vorteilhaft kombiniert. Folgende Faktoren sind von zentraler Bedeutung:

- Die **Geschwindigkeit** der Pinolenbewegung, unterschieden nach Vorwärts- und Rückzugsbewegungtechnologie, ist grundsätzlich bestimmt durch die Antriebsleistung des Motors und die Bearbeitungsgeometrie
- Der **Abhebeweg**, d.h. die Strecke, die von der Pinole während des Abhebens zurückgelegt wird, ist bestimmt von der Einsenktiefe und dem damit verbundenen Prozeßzustand
- Der **Abhebetakt** legt die Anzahl der Prozeßunterbrechungen pro Zeiteinheit fest und ist bestimmt von der Einsenktiefe und dem damit verbundenen Prozeßzustand

Die Einstellparameter der Bewegungsspülung sollten idealerweise an den fortschreitenden Erodierprozeß angepaßt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Einstellparameter in fester Beziehung zueinander stehen. So bewirkt beispielsweise eine größere Geschwindigkeit bei konstantem Abhebeweg eine kürzere Prozeßunterbrechung. Ein kürzerer Weg hat bei konstanter Geschwindigkeit ebenfalls eine kürzere Prozeßunterbrechung zur Folge. Tabelle 7-2 stellt den Zusammenhang der drei Spülparameter in ihrer Wirkung auf die Prozeßunterbrechung dar.

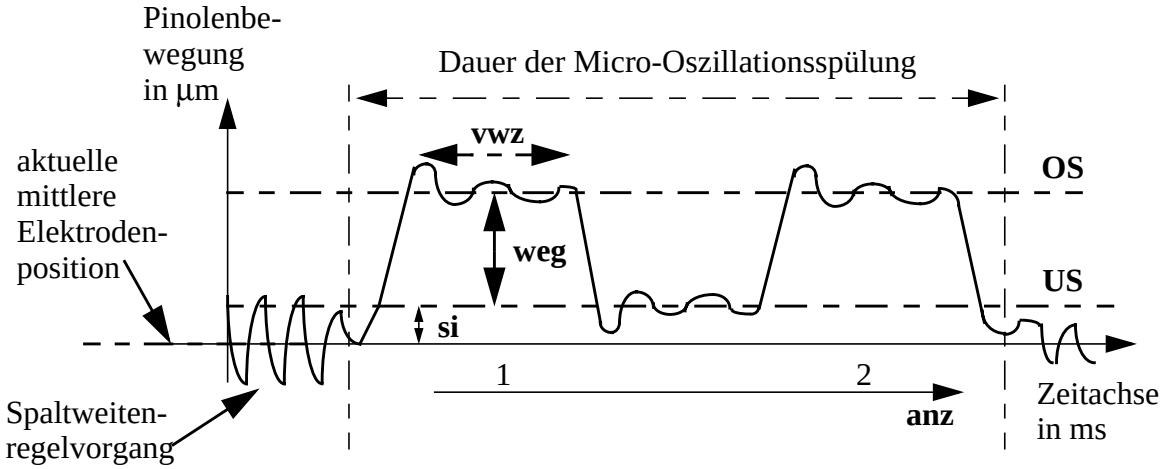
Bezugsgrößen	Abhebegeschwindigkeit	Abhebeweg	Abhebetakt
variable Abhebegeschwindigkeit		Eine Erhöhung der Geschwindigkeit bewirkt eine kürzere Prozeßunterbrechung bei konstantem Weg	Die Abhebegeschwindigkeit kann so lange erniedrigt werden, bis der Abhebweg in der durch den Takt vorgegebenen Zeit realiserbar ist
variabler Abhebeweg	Eine Vergrößerung des Abhebeweges führt zu einer längeren Prozeßunterbrechung bei konstanter Geschwindigkeit		Der Weg muß in der durch den Takt festgelegten Zeit realisierbar sein. Je länger der Weg, desto länger die Prozeßunterbrechung
variabler Abhebetakt	Der Abhebetakt darf ein Maximum nicht überschreiten, damit der Weg noch verfahren werden kann. Je höher der Takt, desto größer wird die Gesamtunterbrechungszeit	Der maximale Takt bestimmt die Weglänge.	

Tabelle 7-2: Wechselwirkung der Parameter der Bewegungsspülung

Bekannte Abhebebewegungen mit den genannten Einstellparametern bewirken einen Erodierprozeß mit geringer Lichtbogentendenz und relativ stabilem Abtragsverhalten. Die Abtragsleistung kann sich dabei allerdings erheblich verschlechtern. Im Rahmen die-

ser Arbeit wurde deswegen versucht, eine Bewegungsspülung zu realisieren, die mit minimaler Prozeßunterbrechung auskommt und gleichzeitig augeprägte reinigende Wirkung auf den Funkenspalt hat. Die entwickelte Spülstrategie, im weiteren als "Micro-Oszillations-Spülung" (MOS) bezeichnet, bewirkt, daß das Werkzeug bei einem geringfügig vergrößerten Arbeitsspalt mit Amplituden von wenigen Mikrometern oszilliert. Nach einer einstellbaren Anzahl von Oszillationen wird der Arbeitsspalt wieder auf das zuletzt gemessene Arbeitsmaß verkleinert. Hierbei kommt es zwangsläufig auch während des Spülvorganges zu Funkenüberschlägen, so daß der Erodierprozeß i.d.R. nie vollständig zum Erliegen kommt.

Während eines MOS-Zyklusses führt die Pinole unter Einhaltung eines Sicherheitsabstandes *si* eine Pendelbewegung zwischen zwei absoluten Schranken (*US, OS*) aus, die in Abhängigkeit von der mittleren momentanen Pinolenposition vorgegeben werden. Die Amplitude der Oszillation *w* ergibt sich, wie in Bild 7-8 dargestellt, als Differenz der beiden Schranken *US* und *OS*.



vwz: Verweilzeit abhängig vom eingestellten maximalen Regelfehler
weg: Amplitude der Oszillation
si: Sicherheitsabstand zur mittleren Werkzeugposition
anz: Anzahl der Oszillationen

OS : Obere Schwelle der Oszillationsamplitude
US : Untere Schwelle der Oszillationsamplitude

Bild 7-8: Wirkungsweise der Micro-Oszillations-Spülung

Die Oszillationsbewegung ist eine Folge von geregelten Sollwertsprüngen zwischen den Schranken *US* und *OS*. Das bedeutet *US* und *OS* werden abwechselnd als Sollwerte für den Regelvorgang eingestellt. Die Güte des Regelvorgangs, der durch einen Schrankenwert für den Regelfehler beschrieben wird, kann mittels eines Parameters eingestellt werden. Bei einem Schrankenwert von z.B. 1µm bricht der Regelprozeß ab, wenn der Regelfehler kleiner als 1µm wird. Ein weiterer Einstellparameter ist die Verweilzeit *vwz*. Sie bestimmt die Anzahl der Reglerdurchläufe nach erstmaligem Unterschreiten des Schrankenwertes. So würde z.B. bei *vwz=1* die erstmalige Unterschreitung des Regelfehlers von 1µm (Schrankenwert für den Regelfehler) zum Abruch des Regelvorganges führen und

es würde ein neuer Sollwert eingestellt. Bei *vwz=2* bliebe der Sollwert gleich und der Regelvorgang würde fortgesetzt bis zur nächsten Unterschreitung der Fehlerschranke. Nach Umsteuerung wird jeweils die nächste Schranke *US* oder *OS* als neuer absoluter Positionssollwert geregelt angefahren. Die Anzahl der Umsteuerungen ist im Einstellparameter *a* festgelegt. In der Realisierung der MOS liegt die Startwerteinstellung bei *wwg=10*, *anz=3* und *vwz= 3*. Wie in Kapitel 7.2 dargestellt, können diese Einstellparameter der MOS von der Prozeßoptimierung an die aktuellen Prozeßverhältnisse angepaßt werden. Ein weiteres Signal der Prozeßoptimierung, das *oszWait*-Signal, entspricht dem Schwellwert für eine Anzahl von Folgelichtbögen, z.B. 4, ab dem die MOS aktiviert wird.

Die Momentaufnahme in Bild 7-9 zeigt die Pinolenposition über der Zeit. Dabei ist zu sehen wie die Pinole zunächst ca. 12,5 µm zurückzieht, um dann zwischen den Schranken *US* und *OS* eine geregelte Oszillation mit einer Gesamtamplitude von 4µm auszuführen.

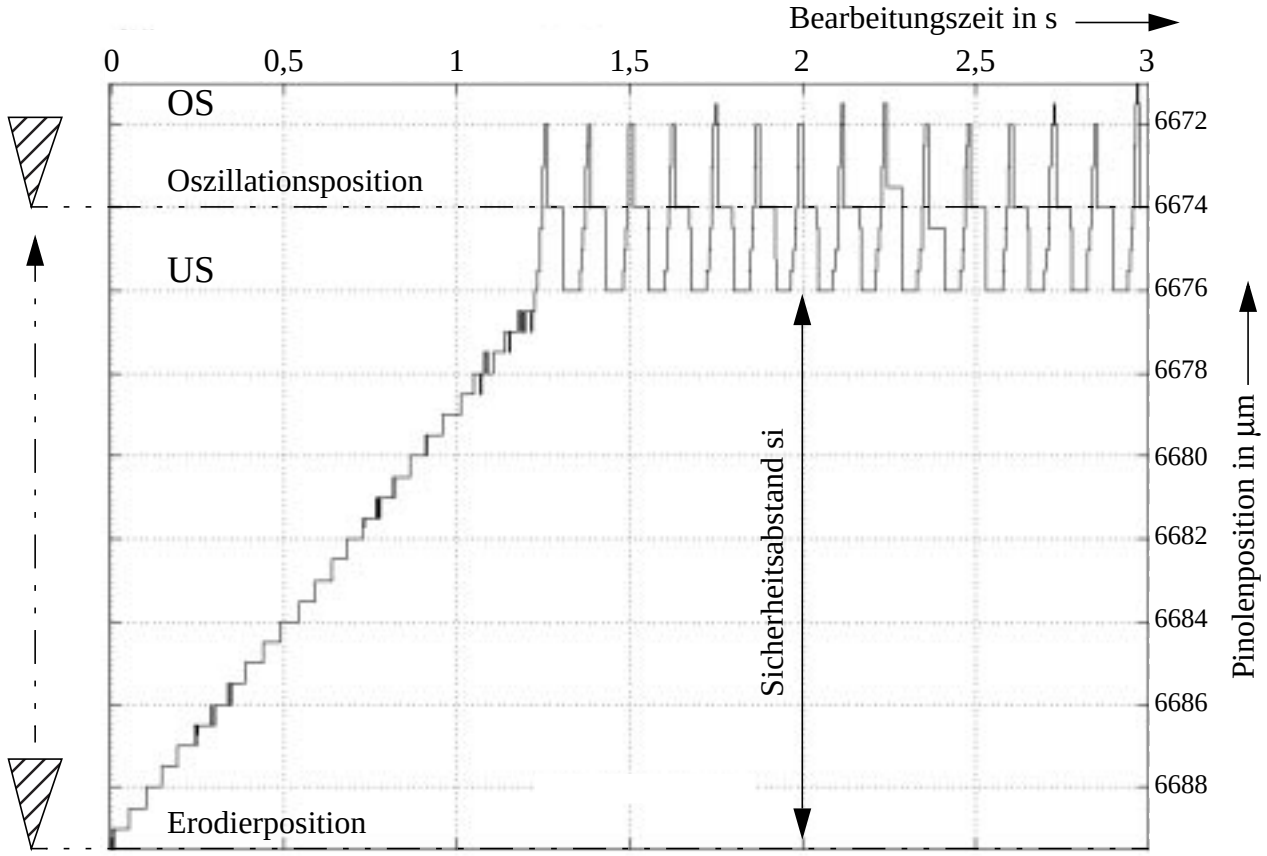


***Bild 7-9:* Protokoll eines Ausschnittes eines Micro-Oszillations-Zyklusses**

Die in der Praxis verwandten Amplituden liegen zwischen 2µm und 200µm. Somit ist sehr schnell zu sehen, daß bei Spaltweiten im Bereich bis 20µm, der eigentliche Erodierprozeß auch während des MOS-Zyklusses nicht zum Erliegen kommen muß. Ausgiebige Versuche zeigten, daß die Reinigungswirkung der MOS sehr gut ist. Zusätzlich zur Reinigungswirkung, die auf eine Art „Pumpeffekt“ zurückzuführen ist, wird eine sehr gute Durchmischung des Dielektrikums bereits bei kleinsten Oszillationsamplituden erreicht. Dies verbessert die Prozeßstabilität und die Abtragsleistung nachweislich.

7.1.4. Wirkungsanalyse der kombinierten Prozeßstabilisierung

Ziel der Prozeßstabilisierung muß es sein, möglichst maximalen Abtrag unter Einhaltung vorgegebener Verschleißwerte und Oberflächenqualitäten zu erhalten. Verfahrenstechnisch bedeutet die Forderung, daß die Energieeinleitung in den Abtransport immer so beschaffen sein muß, daß weder die Elektrode (erhöhter Verschleiß) noch das Werkstück (Lichtbogen-,Kurzschlußbildung) überlastet werden. Die Analyse der Prozeßstabilisierung, wie in Bild 7-10 illustriert, ist von folgenden Überlegungen bestimmt:

- welche Parameter bestimmen die Prozeßstabilität beim Funkenerodieren ?

- wie ist der Wirkungsbereich der Elemente der Stabilisierung zu beurteilen ?

- ergänzen oder schwächen sich die stabilisierenden Maßnahmen gegenseitig ?

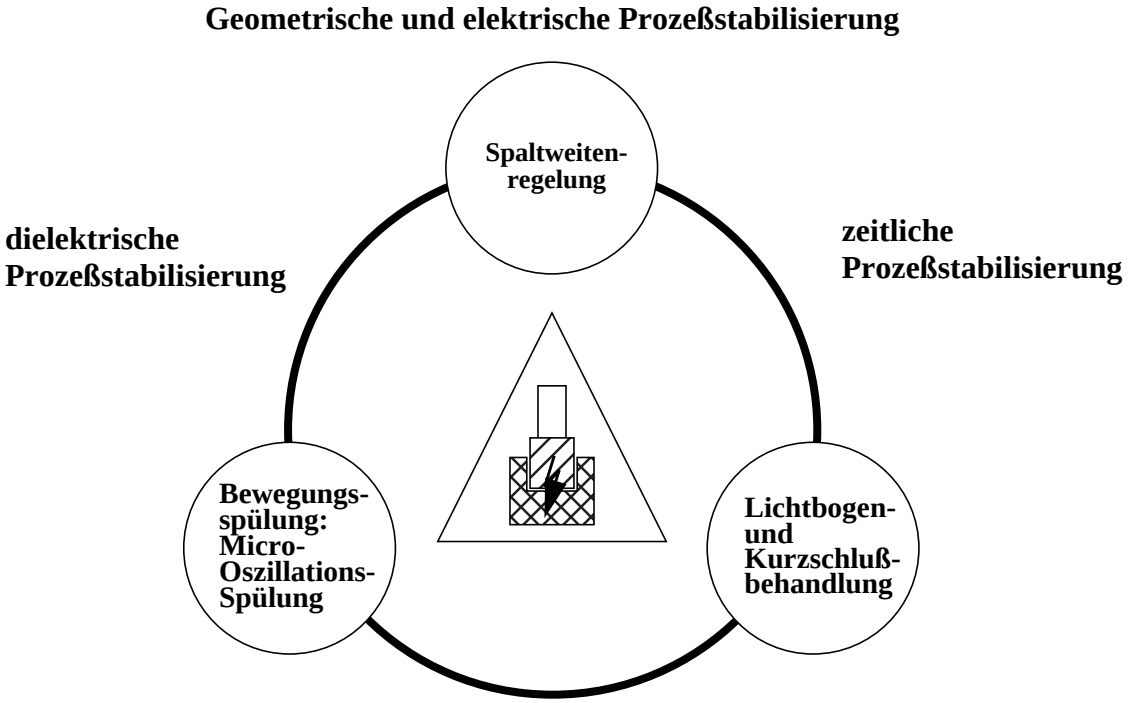


Bild 7-10: Komponenten der Prozeßstabilisierung

Hierbei werden drei Einwirkungsbereiche unterschieden:

Zeitliche Prozeßstabilisierung

Dieser Bestandteil wirkt sich direkt auf den zeitlichen Verlauf der Entladungsimpulse aus. Grundlage dieser Komponente ist die Lichtbogen-, und Kurzschlußerkennung und -behandlung, die im Falle einer Prozeßentartung sehr schnell und sicher reagieren muß.

Dielektrische Prozeßstabilisierung

Hierbei wird indirekt die Leitfähigkeit des im Spalt vorhandenen Dielektrikums beeinflußt. Grundlage dieser Komponente ist die enge Kopplung an die Lichtbogen- und Kurzschlußerkennung zur Sicherstellung einer prozeßangepaßten Spülung.

Geometrische und elektrische Prozeßstabilisierung

Die Spaltweitenregelung wirkt direkt auf die geometrischen und indirekt auf die elektrischen Entladungsbedingungen. Die ständige abtragsfördernde Spaltanpassung verlangt nach speziellen Regelalgorithmen, die die dynamischen Besonderheiten der Funkenerosion berücksichtigen.

Die in Bild 7-10 dargestellten Komponenten sind entweder über ihre Wirkung auf den Abtragsprozeß oder direkt über steuerungsseitige Befehlsketten verknüpft. Die Wirkung der Prozeßstabilisierung resultiert aus dem Zusammenspiel der einzelnen Komponenten. Ziel der Stabilisierungsstrategie ist es, möglichst alle drei Wirkkomponenten gleichmäßig an der Stabilisierung zu beteiligen, um insgesamt einen abtragsintensiven Prozeßverlauf zu erzielen. Dabei wird ein möglichst „ruhiger“ Prozeß angestrebt. „Ruhig“ bedeutet in diesem Zusammenhang, daß häufige Eingriffe der MOS-Bewegungsspülung und große Ausregelbewegungen des Spaltweitenreglers vermieden werden und der Prozeß der empirischen Wahrnehmung nach als „ruhig laufend“ bezeichnet werden kann.

7.1.4.1 Einzelwirkungen der Elemente der Prozeßstabilisierung

Ein stabiler Abtragsverlauf ist nur möglich, wenn die überlagerte Wirkung der autarken Einzelkomponenten der Prozeßstabilisierung ausgenutzt wird. Da der Überlagerungssatz als charakteristisches Merkmal für lineare Systeme für die Prozeßstabilisierung in der Funkenerosion nicht gilt, erfolgt eine knappe qualitative Analyse der Einzelwirkungen und deren Überlagerung.

Wirkung der Spaltweitenregelung

Tabelle 7-3 gibt den qualitativen Zusammenhang der für den Spaltweitenregler relevanten Einstellparameter des Spaltweitenreglers und der Prozeßstabilität wieder.

Einstellung (Nr.) / Merkmale	I hohe Verstärkungen und großer t_d-Sollwert	II hohe Verstärkungen und kleiner t_d-Sollwert	III kleine Verstärkungen und großer t_d-Sollwert	IV kleine Verstärkungen und kleiner t_d-Sollwert
Prozeßruhe	sehr unruhig	unruhiger	ruhiger	sehr ruhig
Prozeß-sicherheit	Lichtbogengefahr minimal, Kurzschlußgefahr klein	Lichtbogengefahr klein, Kurzschlußgefahr klein	Lichtbogengefahr mittel, Kurzschlußgefahr mittel	Lichtbogengefahr hoch, Kurzschlußgefahr hoch
Abtrag	gering	gut	gut	mittel bis gut
Verschleiß	mittel	normal	normal	normal bis hoch

Tabelle 7-3: Wirkung der Spaltweitenregelung auf die Prozeßstabilität

Allgemein gilt, daß die ständige Bewegung der Elektrode, die von der Spaltweitenregelung ausgeht, quasi als Abhebespülung wirkt und so die Lichtbogenhäufigkeit verringert.

Aufgrund der schnellen Zustellung werden allerdings Kurzschlüsse provoziert, die letztendlich mit der großen Totzeit des Antriebes in Verbindung mit dem Mittelwertbildner zustande kommen. D.h. der Antrieb stellt noch zu, obwohl die aktuelle mittlere Zündverzögerungszeit bereits auf einem sehr kleinen Wert ist. Dieser Effekt wirkt sich um so stärker aus, je kürzer die Brenndauer t_e ist, da während der konstanten Totzeit des Antriebes von z.B. 800µs entsprechend mehr Impulse während der Zustellphase mit sehr klein werdendem Arbeitsspalt zünden können. Eine Folge ist, daß Reglereinstellungen nach Spalte I und II für die Feinbearbeitung nicht zu gebrauchen sind, obwohl relativ lichtbogenfrei erodiert werden kann.

Die Spalten II und III geben eine Einstellung wieder, die sich in Abhängigkeit von der Bearbeitungsaufgabe bewährt hat. Wichtig ist, daß der Regler immer eine gewisse „Restdynamik“, d.h. eine Stellreserve, behält. Diese Stellreserve gewährleistet, daß der Regler im Falle einer Prozeßentartung möglichst rasch reagiert, um sicher zu gehen, daß auf eine detektierte Lichtbogentendenz reagiert werden kann. Diese Restdynamik kann entweder über Verstärkungsfaktoren oder einen genügend großen t_d-Sollwert erreicht werden. Die Prozeßruhe hängt für diese Einstellung sehr stark von den anderen Komponenten der Prozeßstabilisierung ab. In Spalte IV ist eine Einstellung angegeben, die für Feinbearbeitung sehr vorteilhaft ist, um den dabei vorherrschenden sehr ungünstigen Spaltionisierungsbedingungen gerecht zu werden.

Im Versuch zeigte sich, daß es bearbeitungsspezifische Einstellungen für den Spaltweitenregler gibt, die eine hohe Prozeßstabilität erzeugen, welche allerdings weit entfernt von optimaler Abtragsleistung sind. Prinzipiell hat die Reduzierung der Reglerdynamik unweigerlich das erhöhte Risiko der Prozeßentartung zur Folge, was mit Maßnahmen anderer Komponenten der Prozeßstabilisierung kompensiert werden muß. Im Kontext komplexerer Bearbeitungsaufgaben spielen die Abhängigkeiten von Geometrie, Einsenktiefe und Arbeitsstrom eine wichtige Rolle. Dabei stellt der an dieser Stelle nicht diskutierte Parameter Zündspannung (U_z) eine ganz wesentliche weitere bestimmende Größe dar, deren Einfluß in einem Referenzversuch in Kapitel 8 vertieft wird. Kann im Schruppbetrieb bis hinunter zu ca. 15A mit relativ wenig Aufwand, d.h. passender Einstellung des Spaltweitenreglers, bereits ein stabiler und abtragswirksamer Prozeß erreicht werden, so steigen die Schwierigkeiten unter 10 A in sehr starkem Maße an. Für die Wahl der Geometrie des Werkzeugs und der Spülbedingungen gilt dasselbe. So sind Sacklöcher, die eventuell ein Spülloch aufweisen, unter nahezu allen Bedingungen zu erodieren. Für aufwendigere Erodieraufgaben ist nur im Zusammenspiel der gesamten Prozeßstabilisierung eine effiziente Erosion möglich.

Wirkung der Lichtbogen-/Kurzschluß-Behandlung

Grundsätzlich wird nach Detektion einer lichtbogenartigen Prozeßentartung oder eines-Kurzschlusses der Energiefluß in den Arbeitsspalt unterbrochen. Je nachdem wie schnell die Energie unterbrochen werden kann, ist die negative Wirkung auf den Prozeßverlauf zu beurteilen. Diese einfache, aber sehr wirkungsvolle Strategie reicht vollkommen aus, um sogenannte „harte“, d.h. niederohmige Kurzschlüsse zu bekämpfen. Wesentlich

schwieriger zu behandeln sind „weiche“ Kurzschlüsse oder lichtbogenartige Entladungen, die sich z.B. durch hochohmige Partikelbrücken bilden und zu sogenannten stehenden Lichtbögen führen können. Dort müssen ähnlich dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren zusätzliche charakteristische Entladungsgrößen herangezogen werden, die entscheiden können, ob die Entladung im Bereich des normalen Zünders liegt oder als schädlich erachtet werden muß. Auch hier ist die gesamte Prozeßstabilisierung gefordert, die einmal durch längere bzw. Zwangspausen dem Entstehen von Lichtbögen oder Kurzschlüssen vorbeugt oder den Spalt durch gezielte Bewegungsspülung sauber hält.

Wirkung der Bewegungsspülung

Grundsätzlich tauscht die Bewegungsspülung mit Abtragspartikeln durchsetztes Dielektrikum hoher Leitfähigkeit gegen sauberes gereinigtes aus. Je nach dem Funktionsprinzip und der momentanen Einstellung wird ein mehr oder minder großes Arbeitsspaltvolumen von Dielektrikum ersetzt. Zu dem Ersetzen des Dielektrikums kommt die Durchmischung durch die Elektrodenbewegung, die auf gleichmäßige Leitfähigkeit abzielt und damit sozusagen die Homogenität des Dielektrikums wiederherstellt. Daraus resultiert für die Bewegungsspülungen der im Rahmen dieser Arbeit definierte Sammelbegriff dielektrische Prozeßstabilisierung. In jedem Fall sinkt durch eine Spaltspülung die Zündwilligkeit der Entladungen, und die räumliche Verteilung der Entladungen über die erodierende „Kontaktfläche“ wird favorisiert. Ein weiterer Effekt ist, daß die Lichtbogengefahr und die Kurzschlußhäufigkeit deutlich abnehmen und gleichzeitig die Abtragsleistung, d.h. die Ausbeute an abtragswirksamen Impulsen, zunimmt.

7.1.4.2 Betrachtung der überlagerten Wirkungen

Die beschriebenen drei Komponenten der Prozeßstabilisierung sind komplementär, d.h. die erzielbaren Wirkungen auf die Prozeßstabilität unterstützen sich gegenseitig oder haben wechselseitigen kompensatorischen Einfluß. Ziel einer Prozeßoptimierung, wie sie im folgenden Kapitel vorgestellt wird, muß es sein, die prozeßstabilisierende Wirkung der Einzelkomponenten stets so zu kombinieren, daß maximaler Abtrag bei möglichst ruhigem Prozeß erreicht wird. Dazu bedarf es einer ständigen Korrektur der Einzelparameter, was letztendlich zu einer adaptiven Prozeßoptimierung führt. Tabelle 7-4 beschreibt die für den Abtragsprozeß förderlichen Einstellkombinationen. Die Spülwirkung kann bei zahlreichen MOS-Zyklen pro Zeiteinheit zu einem sehr leerlaufartigen Prozeß führen. Demgegenüber birgt ein „sehr ruhiger“ Spaltweitenregler die Gefahr von Lichtbögen, da die natürliche Reinigungswirkung des Funkenspalts durch Regelbewegungen fehlt. Die Lichtbogenreaktion kann schließlich in ihrer „Sensitivität“ an den Prozeß angepaßt werden, wobei die eigentliche Lichtbogendetektion stets alle Lichtbögen erkennt. Die möglichen Kombinationen der einzelnen Einstellungen bestimmen die Effizienz des Abtragsprozesses. Zum Teil kompensieren sich die Einstellungen oder sie verstärken sich ungewollt. Als sehr vorteilhaft hat sich eine mittlere Spülwirkung mit hoher Sensivität und ruhigem Prozeßverlauf erwiesen. Abtragsfördernd wirkt sich eine sehr ruhige Spaltweitenregelung aus. Dabei ist allerdings eine entsprechend eingestellte Spülwirkung zwingend.

	Micro-Oszillations-Spülung	Lichtbogenbehandlung	Spaltweitenregelung
1	starke Spülwirkung	hohe Sensivität	sehr ruhig
2	mittlere Spülwirkung	mittlere Sensivität	ruhig
3	geringe Spülwirkung	geringe Sensivität	sehr unruhig

***Tabelle7-4*: Mögliche Kombinationen der Elemente der Prozeßstabilisierung**

Zusammenfassend ist zu sagen, daß eine Prozeßstabilisierung, die auf der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Kombination von Spaltweitenregelung, Bewegungsspülung und Lichtbogenbehandlung basiert, stets einen sicheren Prozeßverlauf garantiert. Die Abtragsmaximierung beruht letztlich auf der an den aktuellen Abtragsprozeß angepaßten Kombination der stabilisierenden Elemente. Hierzu ist eine „adaptive“ Nachführung erforderlich, die auf einer Prozeßbeurteilung basiert und danach alle drei Elemente der Prozeßstabilisierung gleichmäßig an die aktuellen Prozeßgegebenheiten anpaßt.

7.2. Prozeßoptimierung

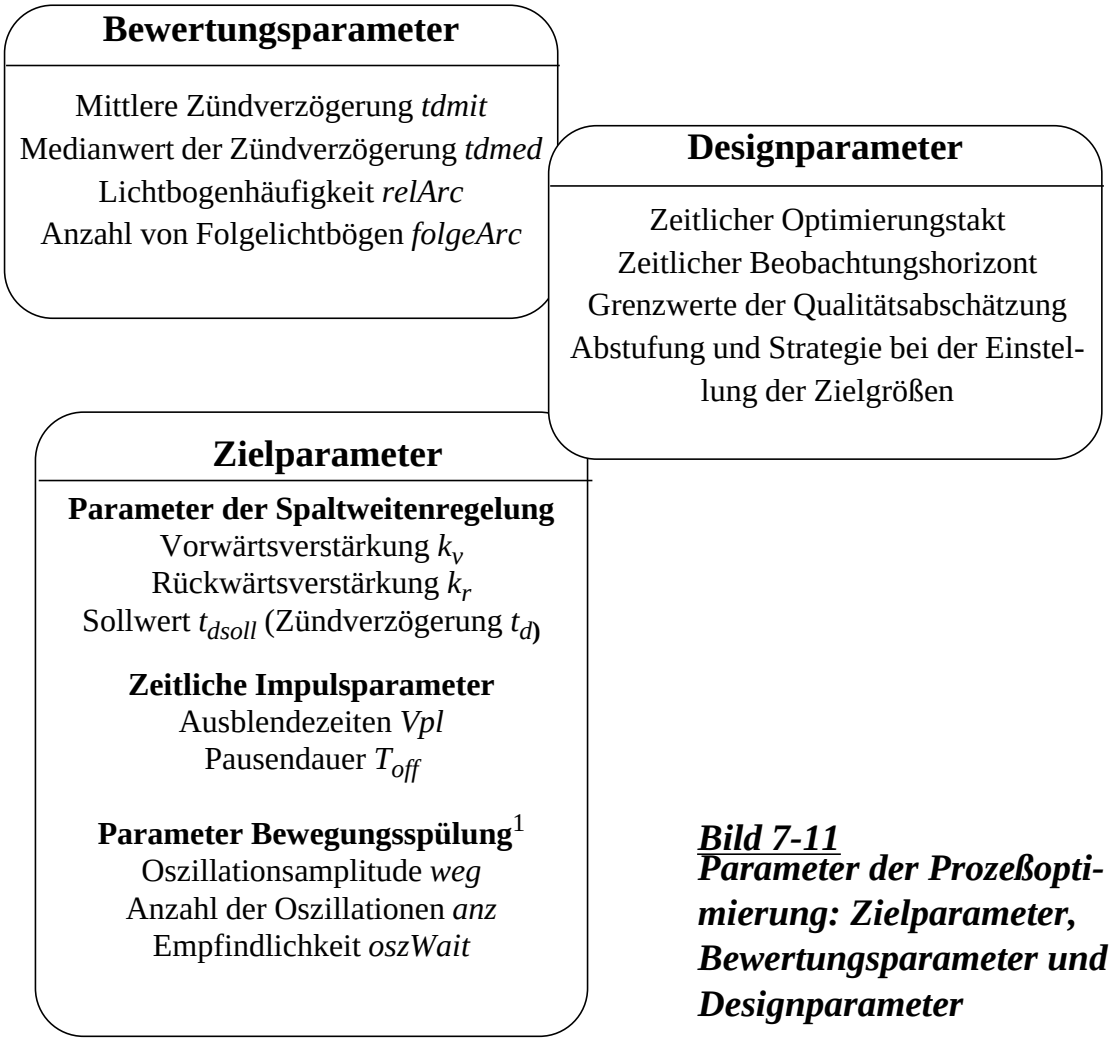
Die Prozeßoptimierung hat die Aufgabe, die Arbeitsparameter der Prozeßstabilisierung so an die aktuellen Arbeitsbedingungen anzupassen, daß ein möglichst „ruhiger“ und abtragsintensiver Erodierprozeß realisiert wird. Die stark wechselnden Bearbeitungsaufgaben, die unterschiedlichen Geometrien und Materialpaarungen bedingen eine Prozeßoptimierung, die sich auf Startwerten abstützt, welche auf Anwendererfahrungen beruhen. Die Generierung dieser Startwerte wird im Rahmen dieser Arbeit von einem Fuzzy-Expertensystem geleistet, das aus bekannten Technologietabellen, gezielten Benutzerbefragungen und eigenen Erodierversuchen zur Technologieanpassung entstanden ist. Grundsätzlich ist die Qualität der Optimierung abhängig von den Startwerten. Da allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht im industriellen Umfang Technologieversuche gefahren wurden, ist in der Startwertgenerierung noch ein erhebliches Potential zur Verbesserung der absoluten Arbeitsergebnisse zu sehen.

7.2.1. Kriterien und Parameter der Optimierungsaufgabe

Neben einer Reihe von *Basisparametern*, wie maximaler Arbeitsstrom und Brenndauer, die das Arbeitsergebnis beschreiben, existieren *Einstellparameter*, die sich direkt oder indirekt auf die Prozeßstabilität auswirken. Unter der Zielsetzung der Abtragsmaximierung muß zu jeder Zeit die „globale Prozeßstabilität" gewährleistet sein. Da sich die Bedingungen zur Aufrechterhaltung der Prozeßstabilität während des Abtragens z.B. durch zunehmende Eindringtiefe ständig ändern, muß die Optimierung in der Lage sein, die für die Prozeßstabilität und die Abtragsleistung relevanten *Einstellparameter*, wie Vorschubparameter, Pausendauer oder Spüleinstellungen, so nachzuführen, daß möglichst hoher Abtrag bei den vorgegebenen festeingestellten *Basisparametern* erreicht wird. Zudem sind die *Einstellparameter* dahingehend zu überprüfen, ob die nachgeordnete Prozeßstabilisierung nicht zu sehr eingreifen muß. Dies würde auf eine Fehlanpassung der

Einstellparameter hindeuten.

Die Auswahl der **Zielgrößen** zur Optimierung, die in Bild 7-11 angegeben sind, resultiert aus den technischen Möglichkeiten der Versuchsanlage und wurde anhand von Versuchen und Literaturangaben vorgenommen. Die **Meßgrößen** müssen den Prozeßverlauf möglichst zuverlässig im Hinblick auf Stabilität und Abtragsleistung beschreiben. Aufgrund der stochastischen Schwankungen der Einzelimpulse kann hier nur auf eine wie auch immer geartete Mittelwertbildung zurückgegriffen werden, die über einen bestimmten Zeitraum Daten sammelt und verdichtet. Der damit erhaltene Satz von **Bewertungsgrößen** liefert die Entscheidungsbasis für die Variation von Prozeßparametern. Die Architektur der Optimierung wirkt auf Basis einer Bewertung des Prozeßzustandes flexibel auf einen Satz von Zielgrößen ein. In der Bewertung der Eingangsgrößen und in der anschließenden Auswahl einer angepaßten Reaktion verbirgt sich die Qualität der Optimierung. Der Aufbau wird bestimmt von **Designparametern**, die innerhalb der Optimierungsarchitektur variabel gewählt werden können.



[1]Mikro-Oszillationsspülung (MOS)

Bild 7-11
Parameter der Prozeßoptimierung: Zielparameter, Bewertungsparameter und Designparameter

Die Charakterisierung des Prozeßzustandes basiert auf Prozeßbeobachtung, Merkmalsextraktion und Fassung der empirischen Kenntnisse in ein entsprechendes Regelwerk.

Dabei wird, wie in Kapitel 7.2.2 dargestellt, ein Fuzzy-Algorithmus verwendet, der die "Unscharfe Prozeßbeurteilung" realisiert. Die Umsetzung der unscharfen Bewertung in eine Beeinflussungsstrategie erfolgt in Form einer "Flexiblen Antwort". Dazu wird ein Einstell-Algorithmus bereitgestellt, der die Wirkung der Strategie schrittweise verstärkt. Die Strategie zur Wahl der Wirkungsmechanismen wird im Anschluß erläutert.

Die Bewertungsparameter sind eine Auswahl von Meßgrößen, die Aufschluß über den Verlauf des Erodierprozesses geben. Dabei geht man davon aus, daß sich die Spülbedingungen mit zunehmender Einsenkung der Werkzeugelektrode verschlechtern. Die Verschlechterung ist gekennzeichnet durch eine Zunahme von Lichtbögen. Entsprechend wird man tendenziell kürzere Zündverzögerungszeiten und eine deutliche Verschiebung der Häufigkeitsverteilung aller Zündverzögerungszeiten nach unten feststellen. Ebenso ist das Ansteigen der lichtbogenartigen Entladungen bzw. des Prozentsatzes Lichtbögen an der Gesamtzahl der Entladungen ein sicheres Indiz. Da ein lichtbogenartiger Prozeß mit zahlreichen Leerläufen u.U. exakt die gleichen Mittelwerte für die Zündverzögerungszeit liefert wie ein optimaler Prozeß, reicht die mittlere Zündverzögerung für die Prozeßbeurteilung nicht aus. Vielmehr müssen zusätzlich weitere Bewertungsparameter hinzugenommen werden. Frühere Ansätze [Slo89], [Deh92] versuchten, die prinzipbedingte Unzulänglichkeit der Zündverzögerung als Prozeßbeurteilungsgröße mit sogenannten t_d-Klassenbildungen zu kompensieren. Aus Sicht vorliegender Arbeit muß eine mehrdimensionale Prozeßbeurteilung unbedingt Prozeßentartungen einbeziehen. Insbesondere anspruchsvolle Erodieraufgaben schreiben eine umfassende Prozeßbeurteilung vor, was nur auf der Auswertung der Zündverzögerungszeit basierende Systeme nicht zu leisten vermögen.

Mit der Spaltweitenregelung kann der Abtragsprozeß um einen Arbeitspunkt herum eingestellt werden. Ist ein stabiler Arbeitspunkt mit der Spaltweitenregelung nicht mehr zu halten, so erfolgt die Anpassung der zeitlichen Parameter. Dabei ist zuerst die einstellbare Einstreuung von Zwangspausen vorgesehen, die insgesamt zu einer Erniedrigung des Spaltenergie- und Verschmutzungsniveaus führt. Eine Verlängerung der Impulspausendauer kommt als zweites Mittel zur längerfristigen Prozeßstabilisierung in Frage. Die Micro-Oszilllationsspülung ist der Spaltweitenregelung unterlagert. Sie arbeitet automatisch in Abhängigkeit von den in Folge auftretenden Lichtbögen und streut Bewegungsspülzyklen in den Prozeßverlauf ein.

Die Optimierung ihrerseits kann nach Maßgabe der Klassifizierung und der Betrachtung der Optimierungshistorie die Parameter Oszilllationsamplitude, Oszillationsanzahl und Empfindlichkeit der MOS an die Arbeitsbedingungen anpassen. Wechseln sich Lichtbögen mit regulären Entladungen in einem vernünftigen Verhältnis ab, so hat auch eine erhöhte absolute Anzahl von Lichtbögen keine erhöhte Spülaktivität zur Folge. Der Strategie liegt die Erfahrung zu Grunde, daß nur lichtbogenartige Entladungen, die in Folge auftreten, zu Prozeßinstabilitäten führen, wohingegen einzelne Lichtbögen kaum Einfluß auf die globale Stabilität haben, zumal Lichtbögen generell mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren nahezu sofort wirkungslos gemacht werden.

Die *Designparameter* der Optimierung umfassen alle variablen Optimierungsparameter, die während des Abtragsprozesses nicht verändert werden. Aufgrund der großen Anzahl von Optimierungskomponenten werden nur die wichtigsten Designparameter angesprochen. Dazu gehört die Anzahl der in einer Stichprobe enthaltenen Meßwerte zur Prozeßbeurteilung (z.Z. 20.650 Werte). Dieser Umfang, auch zeitlicher Beobachtungshorizont genannt, ist letztendlich ein Maß für die statistische Sicherheit der Stichprobe. Wählt man allerdings die Anzahl der für eine Stichprobe aufgenommenen Werte zu groß, kann man Gefahr laufen, eine scheinbare Gleichverteilung zu bekommen, die insbesondere für die auf die Zündverzögerungszeit bezogenen Größen zu einem Verlust an Aussagekraft führen. Ein zu klein gewählter Beobachtungshorizont hingegen kann auf „lokale“ Extremwerte führen. Zufällige sprunghafte Veränderungen der Erodierbedingungen, wie sie z.B. bei der plötzlichen Geometrieänderung während einer Bearbeitung auftreten, führen dann zu falschen mittelfristigen Prozeßbeurteilungen. Die Erfahrung zeigt überdies, daß der Prozeß eine Art „Einschwingzeit“ braucht, um sich auf neue Parameter einzustellen. Ferner ist zu beobachten, daß der Prozeß bei kritischen Bearbeitungsaufgaben, z.B. nach einem Bewegungsspülzyklus, für eine charakteristische Zeitdauer sehr ruhig und abtragsintensiv läuft. Diese Zeitdauer nimmt mit voranschreitender Arbeitstiefe ab. Insgesamt wäre ein variabler Stichprobenumfang wahrscheinlich von Vorteil. Bei stabilem Prozeß scheint ein größerer Stichprobenumfang vorteilhafter, wohingegen unter schwierigen Arbeitsbedingungen kleinere Stichproben bei gleichzeitiger Erhöhung der Wiederholrate vorzuziehen sind.

Ein weiterer Parameter der Optimierung ist deren Wiederholrate oder auch Takt, der, wie ausgeführt, flexibel gestaltet ist. Vorliegende Optimierung besitzt sozusagen drei Taktquellen: den manuellen Anstoß der Optimierung vor allem für Testzwecke, den fest eingestellten Zeitgeber-gesteuerten Optimierungstakt und den von der Prozeßstabilisierung ausgelösten Interrupt-gesteuerten Optimierungstakt.

Eine weitere Klasse von Designparametern bilden die Grenzwerte für die Qualitätsabschätzung des Prozesses. Hierunter fallen die Klassifizierungen der Prozeßzustände, die Auswahl und das Design der Zugehörigkeitsfunktionen und der Fuzzy-Regelbasen sowie schließlich die Verknüpfung der zum Teil widersprüchlichen Prozeßtrends zu einer Ausgangsgröße, dem sogenannten Stabilitätsfaktor STABFAK. An folgenden drei Stellen, die im Verlauf dieses Kapitels noch erläutert werden, sind die Schwellwerte zur Klassifizierung frei wählbar: Bei der Beurteilung des Prozeßfortschritts, bei der Klassifizierung der Bewertungsparameter in den Zugehörigkeitsfunktionen und bei der Zuordnung der Maßnahmen zur Prozeßbeeinflussung zum ermittelten Stabilitätsfaktor.

7.2.2. Die Architektur der Prozeßoptimierung

Die Prozeßoptimierung erlaubt die automatische Anpassung ausgewählter Steuerparameter der Prozeßführung während des Erodierens. Die Struktur der Prozeßoptimierung kann in drei Hauptbestandteile zerlegt werden:

- Arbeitsfortschrittsbewertung mit Datenverdichtung und zeitlicher Steuerung

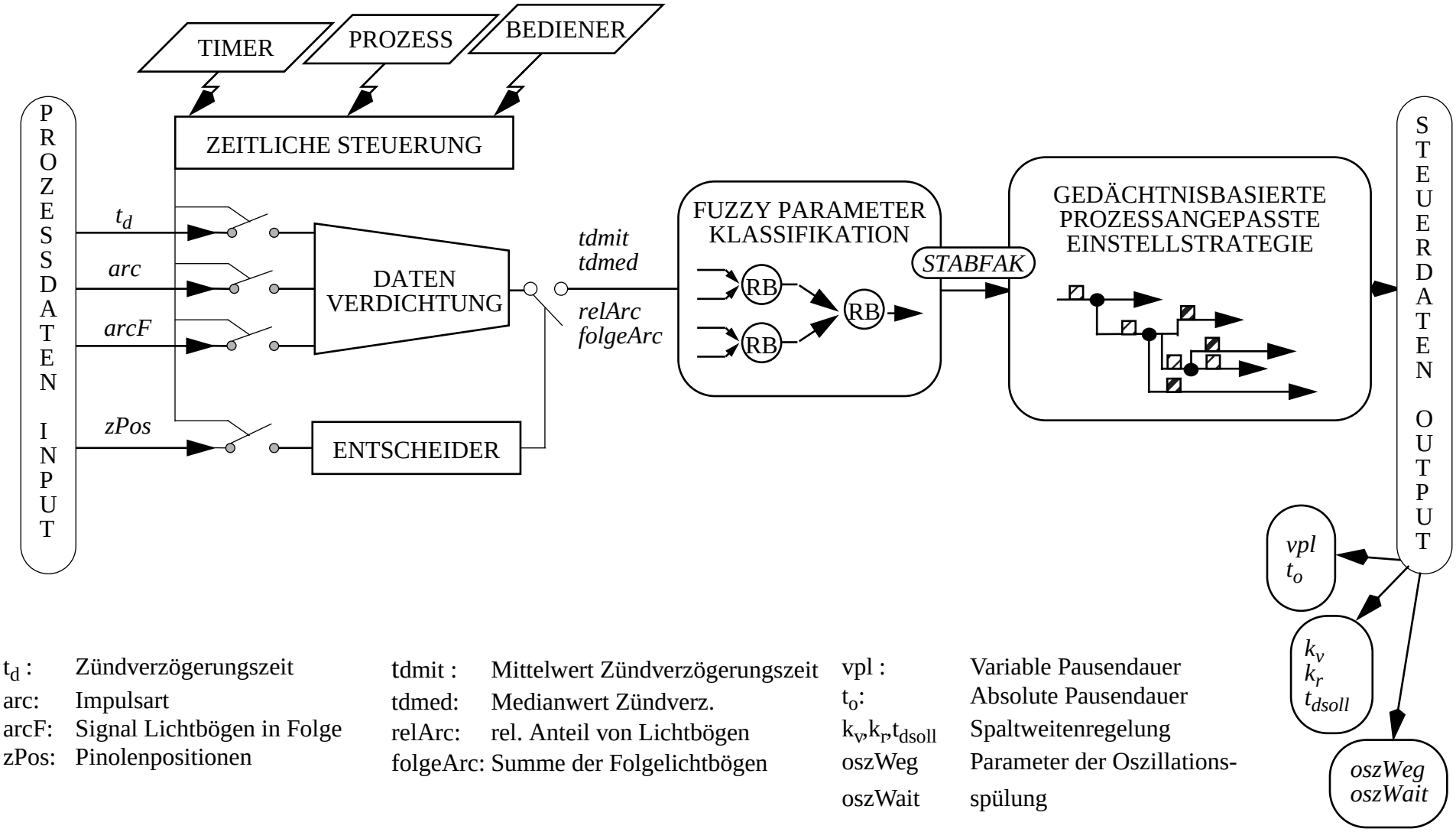
- Prozeßklassifikation basierend auf den Bewertungsgrößen
- Einstellstrategie für die Zielgrößen

Das Blockdiagramm in Bild 7-12 stellt die realisierte Optimierungsstruktur dar. Ausgehend von einem Satz von Prozeßdaten (*Prozeßdaten Input*), die den Prozeßzustand wiedergeben, vergleicht ein Algorithmus (*ENTSCHEIDER*) den gemessenen aktuellen Arbeitsfortschritt mit vorherigen Werten. Die Bewertung des tatsächlichen Arbeitsfortschrittes entscheidet über die Notwendigkeit, eine Optimierung einzuleiten. Für diesen Fall erfolgt zuerst eine Datenreduktion. Ergebnis der Reduktion sind vier Größen (tdmit, tdmed, relArc, folgeArc). Anschließend wird mittels dieser vier Größen die Prozeßgüte klassifiziert (*FUZZY-PARAMETER KLASSIFIKATION*). Die Fuzzy-Klassifikation basiert auf heuristischem Wissen über die Zusammenhänge von Abtragsleistung, Prozeßqualität und -sicherheit. Ergebnis der Fuzzy-Klassifikation ist der sogenannte Stabilitätsfaktor. Dieser Stabilitätsfaktor wird als Eingangsgröße für eine anschließende Strategie zur Einstellung der Prozeßsteuerparameter verwandt. (*GEDÄCHTNISBASIERTE PROZESSANGEPASSTE EINSTELLSTRATEGIE*). Entsprechend der Prozeßklassifikation wird dabei „prozeßangepaßt“ reagiert. „Prozeßangepaßt“ bedeutet, daß auf leichte Abweichungen vom idealen Prozeßverlauf sehr „sanft“, auf starke Entartungstendenzen entsprechend intensiv reagiert wird. Dazu stehen mehrere Steuer- bzw. Zielparameter zur Verfügung, die sich in ihrer Wirkung auf den Prozeßverlauf unterscheiden. Ergebnis der Einstellstrategie ist ein neuer Wert des zu verändernden Steuerparameters, der entweder direkt in den Prozeß eingespeist oder im Falle der Parameter der Spaltweitenregelung über einen Adaptionsalgorithmus geführt wird (*FUZZY-ADAPTION DES SPALTWEITENREGLERS*). Insgesamt handelt es sich bei der entwickelten FE-Prozeßoptimierung um eine Kombination von einer Datenverdichtung mittels statistischer Methoden, einer Fuzzy-Klassifikation basierend auf heuristischem Prozeßwissen und einer gedächtnisbasierten Einstellstrategie. Dieses hybride System vereinigt die Vorteile der Fuzzy-Technik mit zum Teil bekannten Methoden der adaptiven Prozeßoptimierung.

7.2.2.1 Eingangsgrößen der Prozeßoptimierung

Die pro Optimierungslauf auszuwertende Stichprobe von 20165 Impulsen stellt einen guten Kompromiß zwischen statistischer Sicherheit und Rechenzeit dar. Die Auswertung ergibt die *Zündverzögerungszeit* t_d sowie die Impulsart *arc*, unterschieden in *Guter Impuls*, *Frühzünder* und *Lichtbogen*, die Anzahl von Lichtbögen in Folge *arcF* sowie die zu jedem Erodierimpuls gehörende Position der Pinole *zPos*. Die Zündverzögerungszeit t_d ist für den Kurzschlußfall 0, für reguläre Zünder liegt sie zwischen 50ns bis 30µs.

Die Pinolenposition wird zyklisch gemessen und für jeden Impuls der Stichprobe aufgezeichnet. Während der Aufnahme der Impulsparameter für eine Stichprobe nimmt die Pinolenposition wegen der niedrigen Einsenkgeschwindigkeit kaum zu. Zur Gewinnung einer plausiblen Aussage über den Prozeßfortschritt werden deswegen die vorangegangenen drei Einsenkgeschwindigkeiten ständig gespeichert.



t_d :	Zündverzögerungszeit	tdmit :	Mittelwert Zündverzögerungszeit	vpl :	Variable Pausendauer
arc:	Impulsart	tdmed:	Medianwert Zündverz.	t_o:	Absolute Pausendauer
arcF:	Signal Lichtbögen in Folge	relArc:	rel. Anteil von Lichtbögen	k_v,k_r,t_{dsoll}	Spaltweitenregelung
zPos:	Pinolenpositionen	folgeArc:	Summe der Folgelichtbögen	oszWeg	Parameter der Oszillations-
				oszWait	spülung

***Bild 7-12*: Blockdiagramm der FE-Prozeßoptimierung**

7.2.2.2 Datenverdichtung

Die Verdichtung der Meßdaten umfaßt die arithmetische Mittelwertbildung über alle Werte der Zündverzögerungszeit t_d der Stichprobe und liefert den Parameter *tdmit*. Diese einfache Mittelung für die sehr ungleichmäßige Verteilung der Zündverzögerungszeiten, wie z.B. in Bild 7-5 dargestellt, liefert einen unpräzisen statistischen Wert. Deswegen wird zusätzlich der Median-Wert *tdmed* berechnet. Dieser Wert wird üblicherweise bei statistischen Erhebungen eingesetzt, da er weniger empfindlich gegenüber Ausreißern innerhalb der Stichprobe von Meßwerten ist [Har85]. Der Median einer Stichprobe oder Beobachtungsreihe ist dadurch charakterisiert, daß jeweils mindestens 50% der Meßwerte *x1,...,xn* einen Wert kleiner oder gleich dem Median annehmen. Daraus folgt, daß Werte, die weit von allen übrigen entfernt liegen, den Medianwert kaum beeinflussen. Für die t_d-Verteilung, gekennzeichnet durch eine Anhäufung von Werten um 5µs und einer kleinen Zahl von Leerläufen als Ausreißer, liefert der Median-Wert deutlich präzisere Aussagen über die tatsächliche t_d-Verteilung.

Die Auswertung der Lichtbogensignale erfolgt durch Ermittlung des prozentualen Anteils von Lichtbögen in der Stichprobe und führt zu der Größe *relArc*. Die Größe *folgeArc* ist das Ergebnis der Aufsummierung aller Signale (*arcF*) für Folgelichtbögen. Trotz der Verwandtschaft ist die Verwendung beider Größen vorteilhaft, da sie die Differenzierung des Prozesses nach Einzellichtbogenhäufigkeit und Folgelichtbogenhäufigkeit zulassen.

7.2.2.3 Zeitliche Steuerung der Optimierung

Die Steuerung umfaßt sowohl die Entscheidung, ob eine Optimierung aufgrund der Prozeßlage durchgeführt werden soll, als auch die globale zeitliche Einplanung des Optimierungsmoduls innerhalb der Prozeßsteuerung. Prinzipiell existieren zwei Möglichkeiten, die Prozeßoptimierung zu aktivieren:

- ereignisgesteuert
- zeittaktgesteuert

Im Fall der Ereignissteuerung stellt auf der Ebene der Prozeßstabilisierung ein Algorithmus fest, daß die Prozeßgüte unter eine Schranke fällt. Daraufhin würde ein Interrupt an die Prozeßsteuerung abgesetzt, der zu einem Optimierungszyklus führt. Eine zweite Möglichkeit besteht in der periodischen Einplanung des Optimierungsmoduls. Dabei bildet ein einstellbarer Zeittakt die Basis für eine zyklische, periodische Optimierung. Treten außerhalb des Zeittaktes signifikante Prozeßverschlechterungen auf, so kann eine ausschließlich zeittaktgesteuerte Optimierung darauf jedoch nicht reagieren.

In vorliegender Arbeit wurden deswegen beide Formen der Optimierungseinplanung vorgesehen. Generell existiert ein Zeittakt, der eine einstellbare Periodendauer besitzt. Somit läuft die Optimierung mit einem festen „Optimiertakt“. Zusätzlich kann die unterlagerte Prozeßstabilisierung zu jeder Zeit eine sogenannte Optimierungsunterbrechung (Optimierungs -Interrupt) generieren. Die Verbindung beider Strategien bedeutet maximale Sicherheit bei relativ geringer Belastung des Prozeßrechners. Die realisierte Kombination aus Interruptsteuerung und Zeittaktsteuerung bietet dabei ein erhebliches

Maß an Flexibilität und schafft die Gewähr, daß die Steuerung des Abtragsprozesses stets an die aktuellen Gegebenheiten angepaßt wird.

Wie im Blockschaltbild der Optimierung in Bild 7-12 dargestellt, gehören zur Optimierungssteuerung zwei Module, die ZEITLICHE STEUERRUNG und der ENTSCHEIDER. Die zeitliche Steuerung koordiniert drei unterschiedliche Optimierungsanforderungen und steuert den Programmablauf der Prozeßsteuerung. Die Optimierungsanforderungen kommen vom:

- TIMER - - PROZESS - - BEDIENER -

Der TIMER stößt Optimierung periodisch an. Mit PROZESS ist die erwähnte Interruptanforderung von der unterlagerten Prozeßstabilisierung gemeint. Wird festgestellt, daß unmittelbar nach einer durchgeführten Bewegungsspülung innerhalb einer vorgebbaren Anzahl von Entladungen (z.B. 100) eine Schranke von Folgelichtbögen (von z.B. 20) überschritten wird, so wird daraufhin ein Optimierungs-Interrupt erzeugt und an die Prozeßsteuerung abgeschickt. Der „BEDIENER“ repräsentiert die manuelle Quelle der Aktivierung und ist vorrangig der Inbetriebnahme und Testzwecken vorbehalten.

Neben der Auslösung der Optimierung ist die Ablaufsteuerung des Optimierungsmoduls zu betrachten. Zu Beginn einer jeden Optimierung wird der tatsächliche Arbeitsfortschritt ermittelt und mit den drei vorangegangenen verglichen. Der ENTSCHEIDER ermittelt daraus die Notwendigkeit einer Optimierung.

Im ENTSCHEIDER werden die Pinolenposition *zPos*, die Zündverzögerungszeit t_d, die Impulspause t_o und die feste Brenndauer t_e verarbeitet. Die Ermittlung des Arbeitsfortschritts aus der Stichprobe erfolgt mittels einer linearen Regression. Die sich ergebende Gerade besitzt eine Steigung *m*, die den Arbeitsfortschritt wiedergibt. Würde man die einzelnen Steigungen über der Zeit auftragen, so erhielte man ein Schaubild, wie in Bild 7-13.

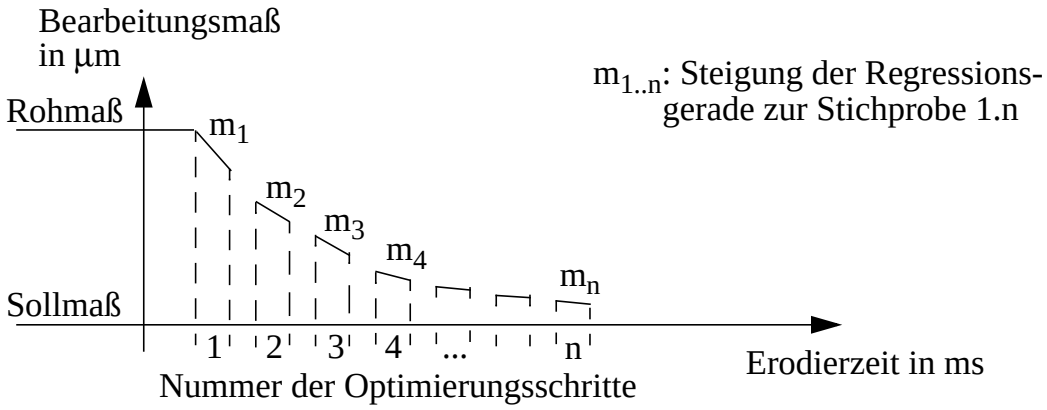


Bild 7-13: Entwicklung des Arbeitsfortschritts über der Bearbeitungszeit

Der Vergleich mit den vorangegangenen drei Steigungen entscheidet, ob eine Optimierung durchgeführt werden soll. Dabei wird berücksichtigt, daß zu Beginn der Bearbeitung immer der maximale Bearbeitungsfortschritt zu beobachten ist. Erfahrungsgemäß

nimmt die Geschwindigkeit des Voranschreitens der Pinole, d.h. der Abtrag pro Zeiteinheit, im Laufe der Bearbeitung ständig ab. Im Entscheider- Algorithmus ist die Abnahme von ca. 5% der aktuellen Steigung zum Mittelwert der drei vorangegangenen Steigungen hinreichend für die Einleitung einer Optimierung. Ferner wird zusätzlich bei Unterschreiten einer absoluten Schranke von 25% der anfangs ermittelten Steigung eine Optimierung eingeleitet. Die Stützpunkte der Regressionsgeraden werden aus den Zündverzögerungen, der eingestellten Brenn- und Pausendauer und der gespeicherten Position berechnet. Die Dauer T_{ges} zwischen zwei abgespeicherten Positionswerten ergibt sich dabei stets zu

$$T_{ges} = t_d + t_{on} + t_{off}$$

Im Erodierprozeß werden drei Arten Gesamtzeitdauern anhand ihrer Zündverzögerungszeit wie folgt unterschieden. Die Kurzschluß-Timeout $t_k = 13\mu s$ und Leerlauf-Timeout $t_l = 30\mu s$ sind von der Steuerung fest vorgegeben.

Kurzschlußfall	$T_{ges} = t_k + t_{off}$;
Reguläre Entladung	$T_{ges} = t_d + t_{on} + t_{off}$;
Nichtzünder	$T_{ges} = t_l + t_{off}$;

Durch Aufsummieren der Zeitspannen zwischen den Meßpunkten zu T_{ges} und der dazugehörigen Pinolenposition ergibt sich ein Satz von Punkten, der es erlaubt, die Einsenkbewegung über der verstrichenen Zeit, wie in Bild 7-13 dargestellt, aufzutragen. Ein Nebeneffekt der Ermittlung des Arbeitsfortschrittes ist die Möglichkeit, durch Extrapolation die zu erwartende Resterodierzeit angeben zu können. Dazu kann nach einigen Optimierungsschritten, ausgehend vom Maß des Rohlings, auf die zu erwartende Erodierzeit extrapoliert werden. Diese Möglichkeit kann besonders in der Einzelfertigung mit hohen Hauptzeiten als Planungsvorteil ausgenutzt werden.

7.2.2.4 Fuzzy-Parameter Klassifikation

Die Eingangsgrößen der Fuzzy-Parameter Klassifikation (**FPK**) sind die mittlere Zündverzögerungszeit *tdmit*, der Median der Zündverzögerungszeit *tdmed*, die relative Lichtbogenhäufigkeit in der Meßwertstichprobe *relArc* und die Anzahl der Folgelichtbögen *folgeArc*. Das Resultat der FPK ist ein sogenannter Stabilitätsfaktor *STABFAK*. In Bild 7-14 ist ein Blockdiagramm der FPK dargestellt.

Die FPK ist als kaskadiertes System mit zwei *Ebenen* (Layern) ausgeführt. In *Ebene 1* werden zwei Zwischengrößen (*TD_TREND*, *ARC_TREND*) berechnet. Diese beiden Größen bilden den Eingang zu *Ebene 2*, die daraus die Ergebnisgröße *STABFAK* ermittelt. Dazu werden die td-Größen *tdmit* und *tdmed* mittels der Regelbasis *td-Rules* zunächst in Ebene 1 bewertet. Eine zweite Regelbasis *arc-Rules* berechnet die Zwischengröße *ARC_TREND* aus relArc und folgeArc. Die dritte Regelbasis *stab-Rules* in Ebene 2 berechnet schließlich die Ausgangsgröße *STABFAK*. Vorteil dieser Kaskade aus zwei Ebenen ist, daß die Regelbasen ausschließlich zwei Eingänge und einen Aus-

gang besitzen. Diese 2-1-Regelbasen können mit einem Kennfeld sehr anschaulich graphisch als 3-D Diagramm dargestellt werden. Zudem sind Regeln, die einfache „und-Operationen“ mit zwei Operanden beinhalten, gut nachzuvollziehen. Ein gewünschter Nebeneffekt ist, daß durch die Kaskadierung ein natürlicher Glättungseffekt erreicht wird. Somit reagiert der Ergebniswert STABFAK weniger stark auf Prozeßschwankungen.

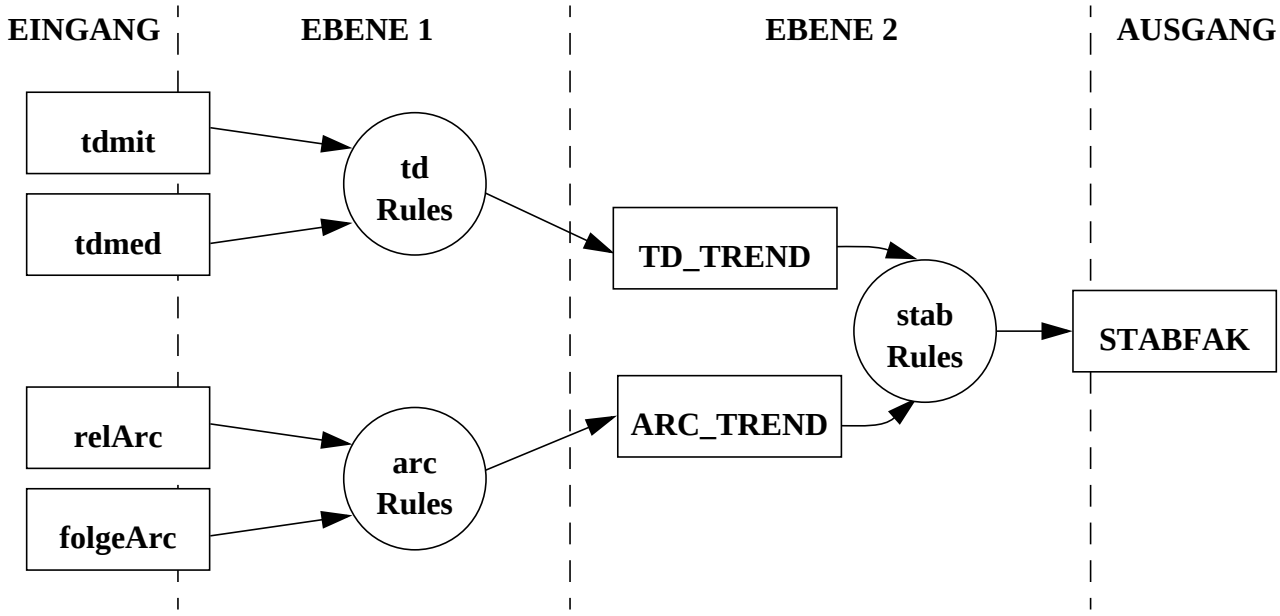


***Bild 7-14*: Aufbau der Fuzzy Parameter Klassifikation (FPK)**

Im Folgenden werden in den Bildern 7-15 bis 7-21 sämtliche Zugehörigkeitsfunktionen mit ihren Regelbasen gemäß Bild 7-14 dargestellt. Die Skalierung der Zugehörigkeitsfunktionen ist soweit wie möglich an die physikalische Skalierung angelehnt.

Ebene 1: (tdmit, tdmed) -> TD_TREND und (relArc, folgeArc) -> ARC_TREND

Die td-Größen *tdmit* und *tdmed* werden mit 5-wertigen Zugehörigkeitsfunktionen dargestellt. Dazu werden die Meßwerte in 5 Fuzzy-Mengen oder Klassen eingeteilt. In Bild 7-15 ist der Satz von Zugehörigkeitsfunktionen für die t_d-Größen dargestellt.

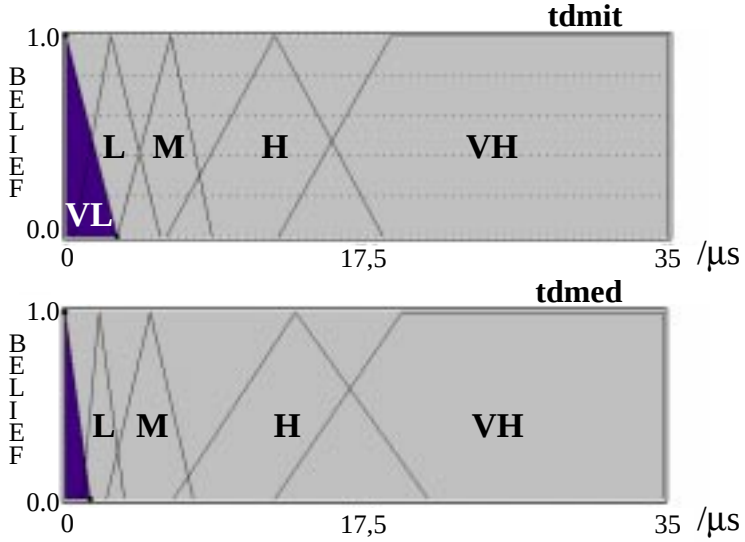


***Bild 7-15*: Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsgrößen tdmit und tdmed für die td-rules Regelbasis**

Der Wertebereich reicht jeweils von 0 bis 35, was unmittelbar dem Zeitbereich der Größen von 0 und 35µs entspricht. Die Zugehörigkeitsfunktionen besitzen eine Dreiecksform mit Überlappung.

Die Zwischengröße *TD_TREND* besitzt 7 Merkmalsausprägungen die, von links beginnend, den einzelnen Dreiecken zugewiesen und in Bild 7-15 dargestellt sind. Als Maßstab für *TD_TREND* wurde eine Skala von 0 bis 110 gewählt.

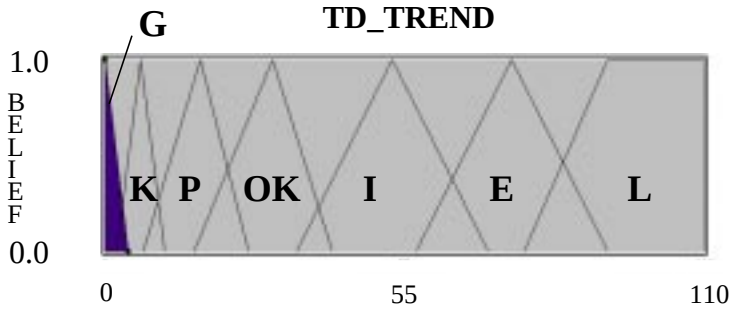


***Bild 7-16:* Zugehörigkeitsfunktion für die Ergebnisgröße TD_TREND der td-rules Regelbasis**

Dabei gilt die Zuordnung:

gefährlich(G):	Lichtbogengefahr sehr hoch	0..
kritisch(K).	Lichtbogengefahr kritisch	
problematisch(P):	Lichtbogengefahr	
ok(OK):	Prozeß in Ordnung	
ineffizient(I):	Leerlauftendenz	
erhöht(E):	Leerlauftendenz erhöht	
leerlaufend(L):	Leerlauftendenz sehr hoch	..110

Die td-Regelbasis *TD-RULES* führt über eine Fuzzy-UND-Verknüpfung der Eingangsgrößen *tdmit* und *tdmed* zu der Ausgangsgröße *TD_TREND*. Die Verknüpfung von *tdmit* und *tdmed* ist in folgender Tabelle 7-5 dargestellt.

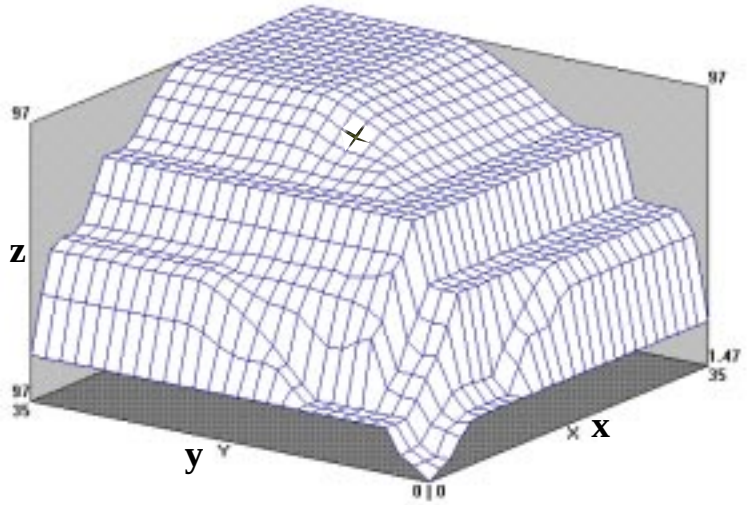
tdmit

tdmed	TD_ TREND	VL	LOW	MED	HIGH	VH
	VL	gefährlich	kritisch	problematisch	problematisch	problematisch
	LOW	kritisch	kritisch	problematisch	problematisch	erhöht
	MED	problematisch	problematisch	ok	erhöht	erhöht
	HIGH	problematisch	problematisch	erhöht	ineffizient	ineffizient
	VH	problematisch	erhöht	erhöht	ineffizient	leerlauf

***Tabelle 7-5* Die td-Regelbasis zur Generierung von TD-TREND**

Die Prozeßklassifizierung kann hieraus direkt abgelesen werden. So ergibt z.B. ein sehr kleiner Mittelwert für die Zündverzögerungszeit *tdmit* „VL“ *und* ein sehr kleiner Median *tdmed* „VL“ eine Prozeßbeurteilung *TD_TREND* von „gefährlich“. Als verwertbare Größe ergäbe sich aus Bild 7-16 nach der Defuzzifizierung z.B. ein Wert unter 4,1. Neben der tabellarischen Form der Regelbasis ist die 3-D Graphikdarstellung ein vorteilhaftes

Hilfsmittel zur Analyse des Verhaltens der Rulebase. Die in Bild 7-17 dargestellte t_d-Regelbasis basiert auf Tabelle 7-5. Für die folgenden Regelbasen wird auf die 3-D Darstellung verzichtet, da die Information vollständig in der jeweiligen Tabelle enthalten ist.



x: tdmit y: tdmed z: TD_TREND

Bild 7-17: 3-D Darstellung der td-rules Regelbasis nach Tabelle 7-5

Die zweite Gruppe von Eingangsgrößen der Prozeßoptimierung sind die Lichtbogensignale *relArc* und *folgeArc*. *Sie* werden über die Zugehörigkeitsfunktion in Bild 7-18 fuzzifiziert. Die Zugehörigkeitsfunktionen sind ebenfalls Dreiecksfunktionen. Die erste Eingangsgröße *relArc* besitzt fünf Merkmalsklassen. Die zweite Eingangsgröße *folgeArc* besitzt 6 Klassen. Entsprechend dem prozentualen Anteil von Lichtbögen an der Gesamtzahl der Impulse einer Stichprobe liegt relArc zwischen 0 und 100. Die Skalierung der Größe folgeArc gibt die Summe der Folgelichtbögen in einer Stichprobe an. Erfahrungsgemäß stellt eine Anzahl von 2000 Folgelichtbögen einen maximal möglichen Wert dar.

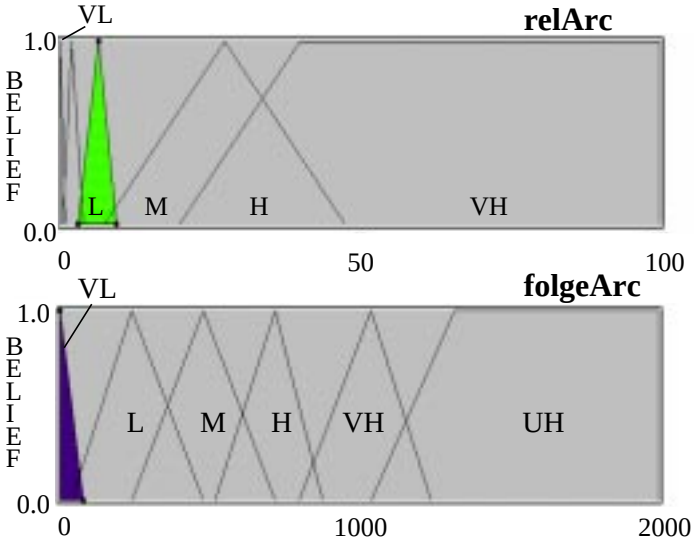
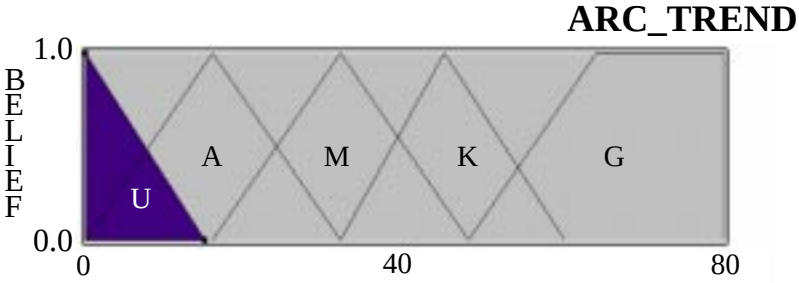


Bild 7-18: Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsgrößen relArc und folgeArc der arc-rules Regelbasis

Die Ausgangsgröße ARC_TREND besitzt, wie in Bild 7-19 dargestellt, 5 Ausprägungen und den Wertebereich zwischen 0 und 80. Je kleiner die Werte für ARC_TREND, desto

kleiner ist die Tendenz zu Lichtbögen.

***Bild 7-19:* Zugehörigkeitsfunktion für die Ergebnisgröße ARC_TREND der arc-rules Regelbasis**



Die Regelbasis *arc-Rules* sieht ebenfalls eine Fuzzy-UND-Verknüpfung vor, die in Tabelle 7-6 wiedergegeben ist. Dabei führt eine Fuzzy-UND-Verknüpfung von *relArc* und *folgeArc* zu der dargestellten *ARC_TREND* Größe

relArc

folgeArc

arc-Trend	VL	LOW	MED	HIGH	VH
VL	unkritisch	akzeptabel	mäßig	kritisch	kritisch
LOW	akzeptabel	akzeptabel	mäßig	kritisch	kritisch
MED	akzeptabel	mäßig	mäßig	kritisch	kritisch
HIGH	mäßig	mäßig	kritisch	gefährlich	gefährlich
VH	mäßig	kritisch	gefährlich	gefährlich	gefährlich
UH	kritisch	kritisch	gefährlich	gefährlich	gefährlich

***Tabelle 7-6* Die arc-rules Regelbasis zur Generierung von ARC_TREND**

Nach der Berechnung der Zwischengrößen *TD_TREND* und *ARC_TREND* in ***Ebene 1***, folgt in ***Ebene 2*** der Fuzzy-Parameter Klassifikation die Berechnung des Stabilitätsfaktors *STABFAK* mittels einer dritten Regelbasis.

Ebene 2: (TD_TREND, ARC_TREND) -> STABFAK

Aus den Zwischengrößen *TD-TREND* und *ARC-TREND* wird mit der Regelbasis STAB-Rules gemäß Tabelle 7-7 die Ergebnisgröße *STABFAK* berechnet.

TD-TREND

ARC TREND

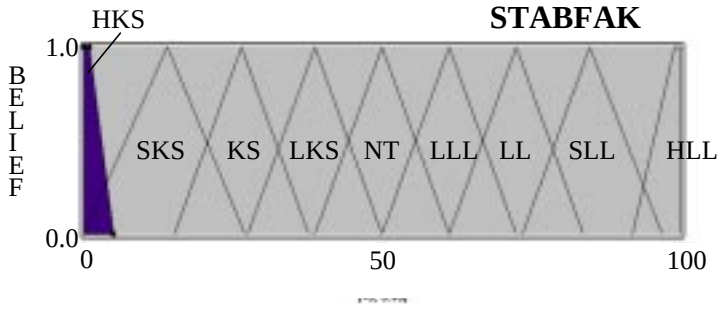
STAB FAK	gefährlich	kritisch	proble-matisch	ok	erhöht	ineffizient	leerlauf
VL	LKS	LKS	NT	NT	NT	SLL	HLL
LOW	KS	LKS	LKS	NT	LLL	LL	SLL
MED	SKS	KS	LKS	NT	LLL	LLL	LL
HIGH	HKS	SKS	KS	LKS	LLL	LLL	NT
VH	HKS	HKS	SKS	KS	NT	NT	NT

***Tabelle 7-7*: Die STABFAK-Regelbasis stab-Rules**

Die resultierenden Stabilitätsfaktoren sind direkt aus obiger Tabelle 7-7 zu entnehmen. So würde z.B. ein *TD_TREND*, der als „kritisch“ eingestuft wird, in Verbindung mit einem als „MED“ eingestuften *ARC_TREND* auf einen mit „KS“ (kurzschluß-/lichtbogenartig) charakterisierten Stabilitätsfaktor *STABFAK* führen.

Die Ausgangsgröße STABFAK besitzt laut Bild 7-20 neun Merkmalsklassen (HKS .. HLL), welche für den weiteren Verlauf der Optimierung besonders wichtig sind.

***Bild 7-20:* Zugehörigkeitsfunktion für die Ergebnisgröße der stab-rules Regelbasis STABFAK**



Die Skalierung von *STABFAK* reicht von 0 bis 100. Hier wurden relativ viele Zugehörigkeitsfunktionen verwandt was eine feine Auflösung der Prozeßstabilität zur Folge hat. Die anschließende Anpassung der Zielgrößen der Optimierung kann somit sehr präzise auf leichte Stabilitätsveränderungen reagieren.

7.2.2.5 Gedächtnisbasierte prozeßangepaßte Einstellstrategie

Die Einstellstrategie besitzt ein sogenanntes „Gedächtnis“, das alle Veränderungen der anzupassenden Zielparameter in Form einer „Historie“ abspeichert. Generell besitzt jeder Zielparameter eine Bandbreite, die an Hand von Erfahrungswerten fest vorgegeben ist. Die zweite Eigenschaft ist die prozeßangepaßte Veränderung der Steuerparameter bzw. Zielgrößen der Optimierung. Dies besagt, daß auf kleine Abweichungen der Prozeßgüte von einem mittleren Wert mit schwachen Maßnahmen reagiert wird. Falls diese Maßnahmen dem festgestellten Prozeßtrend nicht ausreichend entgegenwirken, so werden entsprechend Bild 7-21 die Parameter der nächsthöheren Stufe der Einstellstrategie verändert. Die Parameter des Spaltweitenreglers bilden die *Stufe I*. Die zeitlichen Bearbeitungsparameter sind Inhalt der Stufe II. An oberster Stelle der Wirkungshierarchie stehen in Stufe III die Parameter der Micro-Oszillationsspülung. Ein Eingriff in die Spülung kann dabei erfahrungsgemäß sehr ernste Folgen für den Prozeßverlauf bis hin zum Prozeßabbruch haben, wohingegen die Änderung der Reglerparameter des Spaltweitenreglers in den vorgegebenen Grenzen lediglich die Abtragsrate beeinflußt. Aus diesem Grund wird generell zuerst der Spaltweitenregler (*Stufe I*) angepaßt. Charakteristisch für die Einstellstrategie sind folgende Merkmale:

- Die Einstellung der Zielparameter erfolgt „on-line“ zum Abtragsprozeß
- Die Zielparameter besitzen definierte Wertebereiche, die nicht über- oder unterschritten werden können.
- Die „prozeßangepaßte“ Zielgrößeneinstellung spiegelt sich in der Einstellstrategie wieder.

- Jeder Zielparameter verfügt über ein Gedächtnis, worin die erfolgten Variationen und Werte gespeichert sind. Die darin abgespeicherte Historie entscheidet, ob eine in der Wirkhierarchie weiter oben liegende Zielgröße variiert wird.

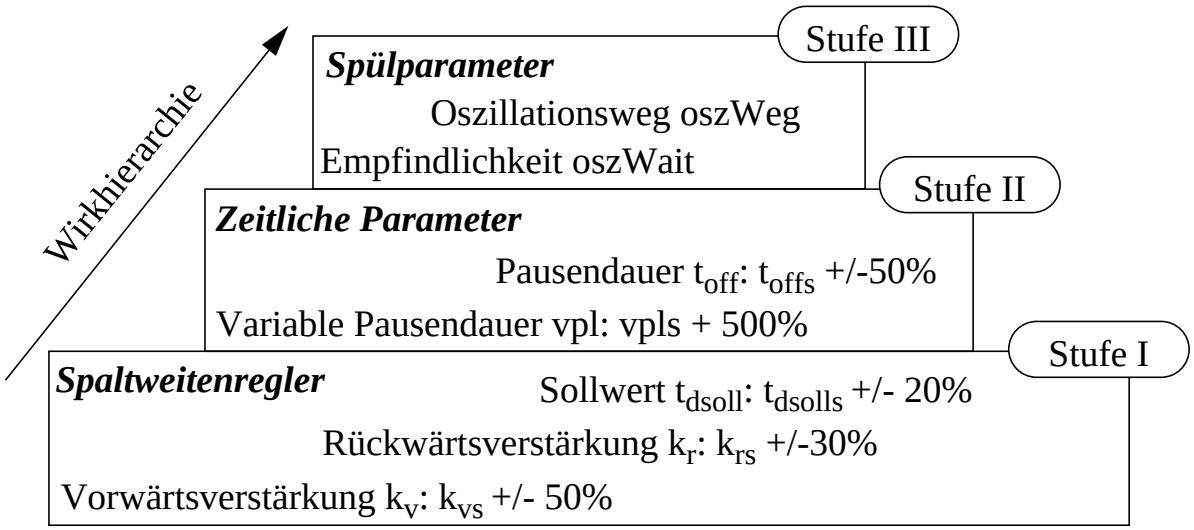


***Bild 7-21*: Die Einstellhierarchie der Prozeßoptimierung mit der prozentualen Anpassungsbandbreite der einzelnen Zielgrößen bezogen auf den Startwert des Bearbeitungsganges**

Die Zielparameter besitzen jeweils einen sogenannten Startwert, der auf Erfahrungswissen beruht oder mittels eines Fuzzy-Expertensystems ermittelt wird. Dort fließen die Werkstoffpaarungen, die abtragsbestimmenden Größen „Brenndauer“ und „Arbeitsstrom“ sowie die Geometrie der Bearbeitungsaufgabe ein. Für eine spezielle Bearbeitungsaufgabe bzw. den aktuellen Bearbeitungsgang entsteht somit ein Satz von Startwerten für die Zielgrößen, die in Bild 7-21 im Index mit (s) gekennzeichnet sind. Die Optimierung paßt im Verlauf des Abtragsprozesses die Zielgrößen auf Basis der Startwerte an.

Die zulässige Variationsbandbreite kann als Maß für die Dynamik der Einstellstrategie betrachtet werden. So bedeutet ein sehr kleiner Variationsbereich eine hohe Dynamik, da bei Ausschöpfung der Anpassungsmöglichkeiten einer Zielgröße sehr schnell die in der Hierarchie nächsthöhere Zielgröße variiert wird. Die Bandbreite der Parametervariation des Spaltweitenreglers ist z.B. für die Vorwärtsverstärkung 50%. Für den Startwert k_{vs}=40, ist die Variation zwischen minimal $k_v=20$ und maximal $k_v=60$ möglich. Entsprechendes gilt für die Rückwärtsverstärkung k_r und den Sollwert der Zündverzögerungszeit t_{dsoll}. Die Ausschöpfung der Bandbreite bedeutet, daß für Stufe I alle drei Zielparameter vor der Anpassung der höhergelegenen Einstellstufe ihren Extremwert angenommen haben müssen. Die Parameteranpassung erfolgt in drei bis fünf Schritten. So kann die Vorwärtsverstärkung z.B. dreimal erhöht werden, bis der zulässige Maximalwert erreicht wird. Mit dem Überschreiten der Bandbreite der *Stufe I* wird der Parameter *vpl* der nächsthöher gelegenen *Stufe II* verändert. Gleichzeitig werden die Parameter der darunter liegenden *Stufe I* wieder auf ihren Startwert zurückgesetzt und die Zielgrößenanpassung beginnt erneut auf der untersten Hierarchiestufe I.

Die zeitliche Anpassung der *Stufe II* arbeitet ebenfalls nach dem Ausschöpfungsprinzip. Allerdings werden die zeitlichen Parameter *vpl* und t_{off} beim Erreichen der nächsthöheren Hierarchiestufe, in diesem Fall der Spülparameteranpassung in *Stufe III*, nicht zurückgesetzt. In Stufe III werden der Reihe nach Einstellkombinationen für *Empfindlichkeit* und *Oszillationsweg* der MOS eingestellt. Erfahrungsgemäß wird der Oszillationsweg nur sehr wenig variiert. Die Amplitude der MOS liegt zwischen 5µm und 20 µm. Die Variation der sogenannten „*Empfindlichkeit*“ aus Kapitel 7.1.3 kann aufgrund ihrer sehr feinen Stufung sehr vorteilhaft eingesetzt werden.

Dem Grundproblem der Konvergenz adaptiver Prozeßoptimierungen wird zum einen mit einer eingeschränkten Variationsbandbreite, zum anderen mit dem Rücksetzen der einzelnen Einstellparameter Rechnung getragen. Ein sogenanntes Abbruchkriterium protokolliert darüber hinaus die Parametervariationen innerhalb der *Stufe I*. Hierbei wird die Gesamtzahl der Veränderungen für jeden Parameter überwacht. Überschreitet die Zahl der Veränderungen eines Parameters der *Stufe I* eine *Schranke K* für Tendenz „kurzschlußartig“ oder eine *Schranke L* für Tendenz „leerlaufartig“ so wird automatisch der Parameter *vpl* der *Stufe II* entsprechend verändert. Die Parameter der *Stufe I* werden dabei auf ihren Startwert zurückgesetzt. Damit wird sogenannten „grenzstabilen“ Schwingungen entgegengewirkt. Insgesamt führt die automatische Optimierung damit immer zu einstellbaren Zielparametern, die einen stabilen Abtragsprozeß garantieren.

7.2.2.6 Ausgangsgrößen der Prozeßoptimierung

Die Ausgangsdaten umfassen die Zielparameter der Prozeßoptimierung.

Parameter der Spaltweitenregelung
Vorwärtsverstärkung k_v
Rückwärtsverstärkung k_r
Sollwert für die Zündverzögerungszeit t_{dsoll}

Zeitliche Parameter
Länge der variablen Pausendauerverlängerung *vpl*
Impulspausendauer t_{off}

Parameter der Bewegungsspülung
Empfindlichkeit der Auslösung einer Bewegungsspülung *oszWait*
Oszillationsweg (Spitze-Spitze Weg der Oszillation) *oszWeg*

Die Parameter der Spaltweitenregelung durchlaufen vor der Ausgabe an den Spaltweitenregler einen speziellen Fuzzy-Adaptionsalgorithmus, der, wie im anschließenden Kapitel dargestellt, bei Bedarf eine zusätzliche Korrektur der Parameter vornimmt. Die Zielparameter der anderen beiden Gruppen werden direkt an die entsprechenden Stellglieder ausgegeben.

Die Vorteile der Fuzzy-Technologie für eine Prozeßführung in der Funkenerosion ergeben sich auf natürliche Art und Weise. So ist der Fuzzy-Entscheidungsprozeß i.d.R.

lückenfrei, d.h. für jede mögliche Eingangskombination wird automatisch ein Ausgangswert erzeugt. Diese Eigenschaft resultiert aus der Kennfeldgenerierung. Dabei wird üblicherweise jedem Feld der Regelbasismatrix ein Ausgangswert zugeordnet.

Ein weiteres Problem sind Eingangskombinationen, die widersprüchlich oder physikalisch nicht realisierbar sind. Der Grund kann z.B. in einem Meßfehler oder einem Datenübermittlungsfehler liegen. Im Falle des FE-Prozesses können extreme Parametervariationen auftreten, die eine Prozeßbeurteilung nach menschlichem Ermessen sehr schwer machen. Eine klassische Prozeßwertung, die z.B. auf einem Entscheidungsbaum aufgebaut ist, würde mit derartigen Aussagen zur Prozeßgüte nicht zu einer eindeutigen Entscheidung gelangen können. Eventuell würde sogar eine fehlerhafte Ausgabe zustande kommen. Trifft man in der Regelbasis auf widersprüchliche Eingangskombinationen, so liegt es nahe, einfach keine Entscheidung zu treffen. Dafür ist in der Zugehörigkeitsfunktion explizit eine Klasse „*nichts tun*“ vorgesehen. In der anschließenden Prozeßeinstellstrategie ist dafür eigens ein Eingang vorgesehen, der die Klassifikation „*nichts tun*“ behandelt. Dieser Fall würde z.B. eintreffen, wenn sich der *TD_TREND* „*Leerlauf*“ ergibt und gleichzeitig der *ARC_TREND* den Prozeßzustand als „*kritisch*“ oder „*gefährlich*“ klassifiziert.

Zur Sicherstellung der erwähnten Lückenfreiheit werden physikalisch unmögliche Eingangskombinationen oder Lücken mit nullwertigen Regeln „*nichts tun*“ aufgefüllt.

Insgesamt stellt die beschriebene Fuzzy-Parameter Klassifikation ein Instrument dar, das erlaubt, aus einer Stichprobe von Prozeßdaten nach einer Datenverdichtung die aktuelle Prozeßgüte zu ermitteln und darauf mittels einer Einstellstrategie prozeßangepaßt zu reagieren. Die Einstellstrategie, die mit Hilfe eines parameterbezogenen Gedächtnisses auf eine oder mehrere Zielgrößen einwirkt, legt dabei den Arbeitspunkt der unterlagerten Prozeßstabilisierung fest.

7.2.3. Fuzzy-Adaption des Spaltweitenreglers

Die Fuzzy-Adaption der Spaltweitenregelung ist der eigentlichen Prozeßoptimierung nachgeordnet. Ziel der Adaption ist die Berücksichtigung des aktuellen Spaltzustandes bei der Einstellung des Spaltweitenreglers. Damit wird das Problem des sehr großen „Zeithorizontes“ der Optimierung kompensiert. Würde die Optimierung z.B. aufgrund einer erkannten Leerlauftendenz eine Erhöhung der Vorwärtsverstärkung k_v vorgeben, so ergäben sich abhängig vom ermittelten *RisikoFaktor* drei Möglichkeiten der Risikoabstimmung:

- Der Risikofaktor zeigt ebenfalls Leerlauftendenz.
- Die Risiko-Regelbasis stößt auf Widersprüche oder mittlere Werte.
- Der Risikofaktor zeigt Kurzschlußtendenz.

Im ersten Fall würde die Vorwärtsverstärkung zusätzlich erhöht, da der von der Optimierung analysierte Leerlauftrend noch anhält. Im zweiten Fall würde die Vorwärtsverstärkung nach Justierung und Datenformatanpassung übernommen. Im dritten Fall

würde die Adaption der Optimierung entgegenwirken und die Erhöhung der Vorwärtsverstärkung abgeschwächen. In Bild 7-22 ist das Blockdiagramm der Fuzzy-Adaption mit Risikoabschätzung dargestellt.

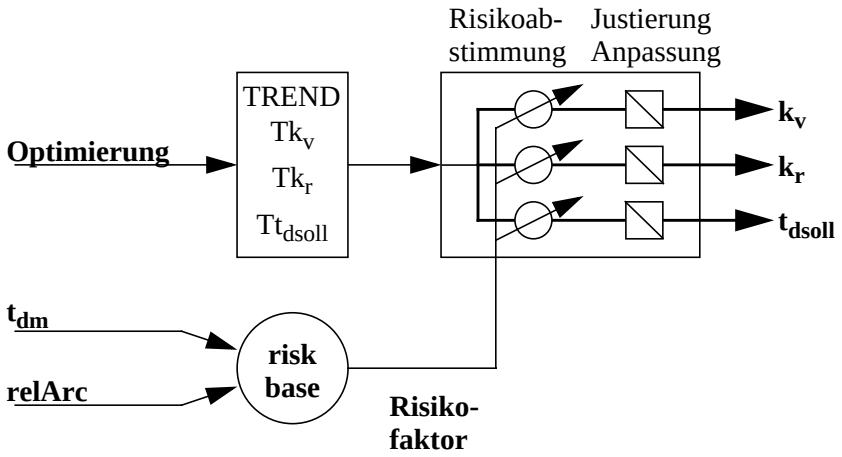


Bild 7-22: Blockdiagramm der Fuzzy-Adaption des Spaltweitenreglers

Hierbei werden die Steuerparameter der Optimierung (Tk_v, Tk_r, Tt_{dsoll}) nach entsprechender Anpassung an die Stellglieder der Prozeßsteuerung ausgegeben. Mittels der Risikoabstimmung erfolgt die Feinanpassung an den „aktuellen“ Prozeßzustand.

Wie ausgeführt, wird die Prozeßoptimierung zyklisch oder prozeßgesteuert aufgerufen. Am Ende einer Optimierung findet, wie in Bild 7-23 skizziert, je nach zu variierender Zielgröße die Adaption des Spaltweitenreglers statt.

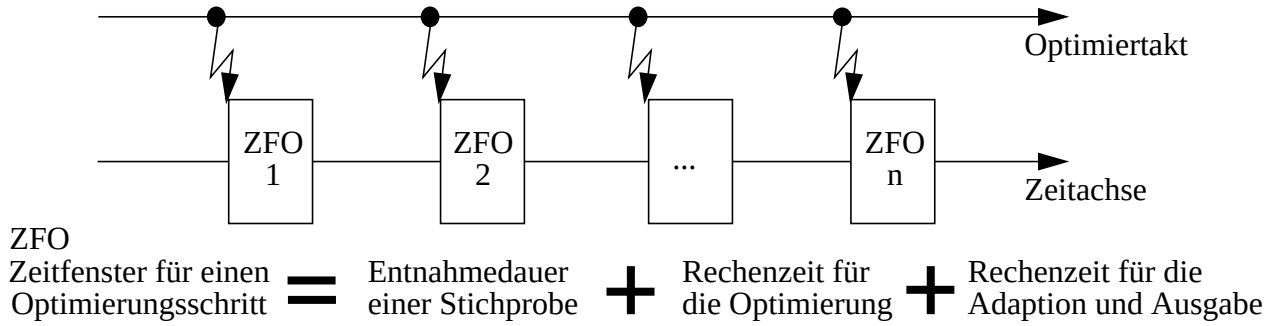


Bild 7-23: Zeitlicher Ablauf der Optimierung und Adaption bei festem Optimiertakt

Dabei können zwischen dem Aufnahmezeitpunkt der Stichprobe und der Ausgabe der neuen Reglerparameter Zeiträume von bis zu mehreren hundert Millisekunden liegen. Deswegen könnte sich der Prozeßzustand während der Stichprobenentnahme für die Optimierung von demjenigen zum Zeitpunkt der Zielgrößenanpassung stark unterscheiden. Diese Problematik verschärft sich mit zunehmender Rechendauer und Stichprobenumfang. Zur Behebung dieser Unwägbarkeit wurde deswegen eine zusätzliche Prozeßklassifizierung zum Ausgabezeitpunkt der Zielgrößen eingeführt. Ergebnis der Adaptions-Klassifizierung ist ein *RISIKOFAKTOR*. Die Arbeitsweise des Fuzzy-Adaptierers sieht vor, Ausgangsgrößen der Optimierung k_v, k_r, t_{dsoll} entsprechend dem Risikofaktor zu gewichten. Dazu entnimmt der Adaptierer eine eingeschränkte Stichprobe von Meßwerten von ca. 10% der Größe der Optimierungsstichprobe. Der Aufbau des Fuzzy-Teils des Ad-

aptieres entspricht einer 2-1-Regelbasis mit zwei Eingängen (*tdmittel*, *relArc*) und einem Ausgang (*RISIKOFAKTOR*), wie in Bild 7-24 abgebildet.

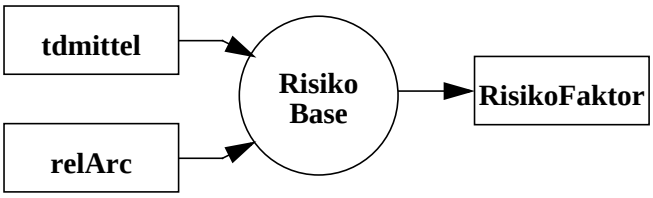


***Bild 7-24*: Der Aufbau des Fuzzy-Adaptieres als 2-1-Regelbasis**

In Tabelle 7-8 ist die Regelbasis des Fuzzy-Adaptierers dargestellt. Hierbei ist wiederum für nicht eindeutig identifizierbare bzw. widersprüchliche Prozeßinformationen ein „NICHTS TUN“-Ausgang vorgesehen.

TDMITTEL

RELARC	Risiko-Faktor	WINZIG	KURZ	MITTEL	ERHOEHT	HOCH
	KAUM	NICHTS	NICHTS	SLL	SLL	ULL
	WENIG	NICHTS	NICHTS	LL	SLL	ULL
	MAESSIG	SKS	KS	NICHTS	LL	SLL
	ERHOEHT	UKS	SKS	KS	KS	KS
	VH	UKS	UKS	SKS	KS	KS

***Tabelle 7-8*: Die Risiko-Regelbasis**

Auf die Zugehörigkeitsfunktionen für die Ausgangsgröße *RISIKOFAKTOR* und die 3D-Darstellung wurde verzichtet. Insgesamt stellt die Fuzzy-Adaption eine ergänzende Einrichtung dar, die es erlaubt, die Parameter der Spaltweitenregelung noch exakter an die aktuellen Prozeßerfordernisse anzupassen.

7.3. Technische Beschreibung der Realisierung

Inhalt dieses Kapitels ist die Beschreibung der technischen Umsetzung der in den vorigen Kapiteln beschriebenen Methoden und Verfahren. An erster Stelle steht das Prozeßrechensystem mit der Darstellung der Rechnerarchitektur und der realisierten Kommunikationsstrukturen. Im zweiten Teil ist die Softwarearchitektur dargestellt. Anschließend wird die entwickelte Spaltweitenregelung und Lichtbogensensorik mit ihren spezifischen Bestandteilen in Kürze vorgestellt [Wit95a].

7.3.1. Prozeßrechnerarchitektur und Kommunikationsstrukturen

Die Prozeßrechnerarchitektur ist gemäß dem Entwurf hierarchisch aufgebaut. Dabei gilt, daß die prozeßnahen Komponenten maximale Verarbeitungsgeschwindigkeit, maximalen Datendurchsatz und den höchsten Spezialisierungsgrad aufweisen. In Bild 7-25 ist das Blockschaltbild des Prozeßrechners dargestellt.

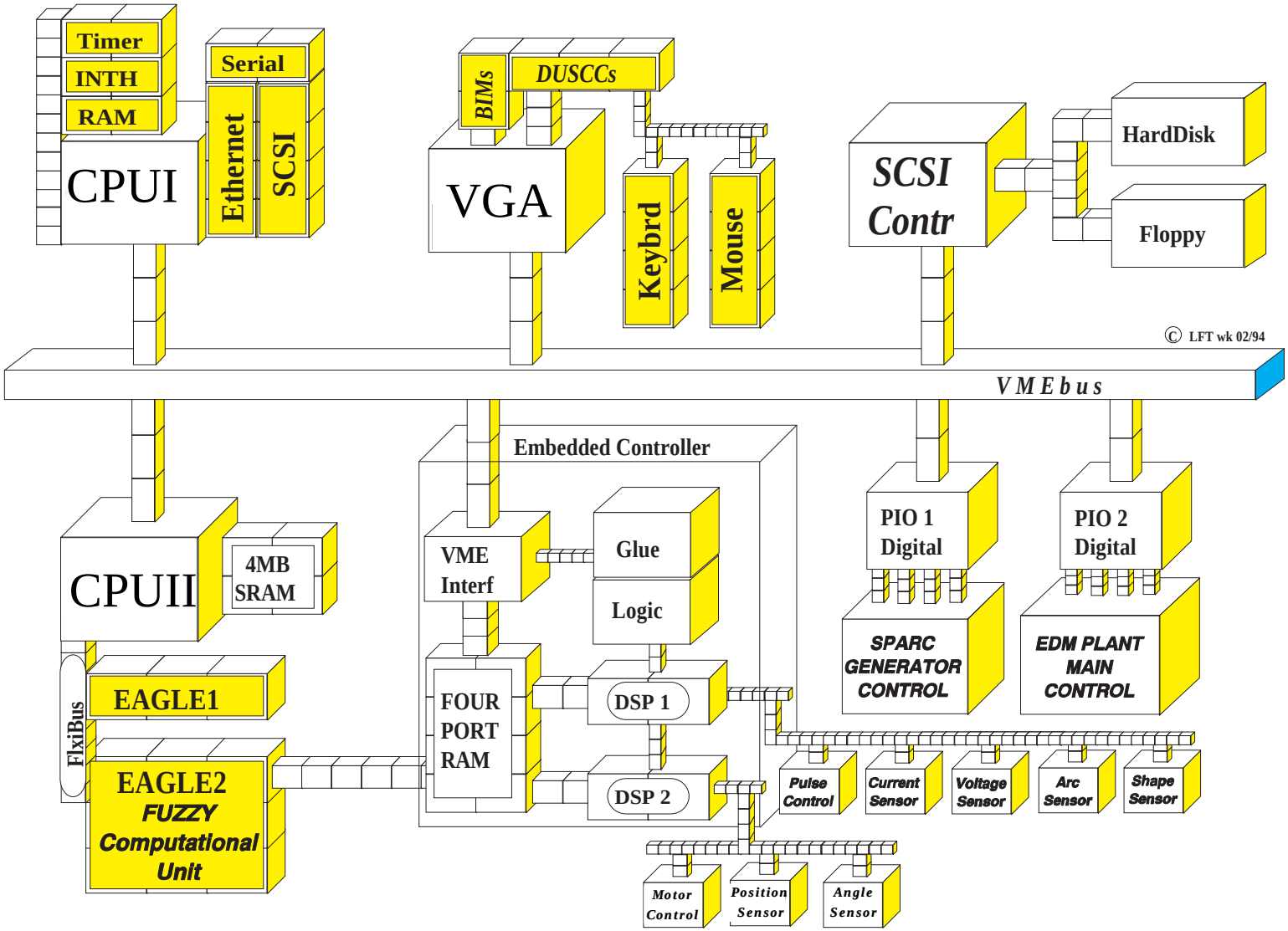


***Bild 7-25*: Blockschaltbild der Prozeßrechnerarchitektur**

Der Prozeßrechner ist ein VMEbus-System [VME93], das einen spezifizierten Daten- und Adreßbus mit standardisierten Interrupt und Adressierungsprotokollen besitzt. Das entwickelte und ausschließlich benutzte System besitzt mindestens eine Standard-CPU-Karte, eine Graphikkarte, Festplattenspeicher und den Prozeßrechnerkern mit zwei parallelen I/O-Bussystemen für die Verbindung zur Sensorik und Aktorik. Weitere VME-Karten dienen der Ein- und Ausgabe von Steuerdaten [Wit96].

Der „embedded controller“, ist eine Rechnerkarte, die über zwei digitale Signalprozessoren (DSP) verfügt, welche im Master-Slave Modus betrieben werden und in Teilen bereits in früheren Arbeiten verwandt wurde [Ode95]. Der Signalprozessor 1 (DSP#1) ist der Master und Signalprozessor 2 (DSP#2) ist der Slave Prozessor. Die beiden Prozessoren teilen sich die Aufgaben der Prozeßsteuerung.

DSP#1 steuert und kontrolliert die gesamte elektrische Meßtechnik zur Überwachung des Funkenspalts. Er steuert die Taktgenerierung (Pulse Control), die in Verbindung mit dem Zündsensor (Shape Sensor) autark die isoenergetische Impulserzeugung verwirklicht. Die Verarbeitung der Lichtbogen- und Kurzschlußsignale sowie die Protokollierungs- und Initialisierungsroutinen sind ebenfalls auf DSP#1 programmiert.

DSP#2 ist ausschließlich für die Achssteuerung zuständig. Man könnte ihn als Einachs-CNC Rechner bezeichnen. Über entsprechende Peripherie, wie Wegmeß- und Übertragungssysteme, verfügt er ständig über das aktuelle Wegsignal der Pinole. Der Spaltweitenregler mit seiner spezifischen Ansteuerung für den Achsantrieb und Steuerung der Micro-Oszillationsspülung ist ebenfalls auf DSP#2 implementiert. Die beiden DSPs teilen sich einen gemeinsamen Speicherbereich, der insgesamt vier Zugriffsmöglichkeiten bietet (FourPort-RAM), mit dem VMEbus-Rechner.

PIO-Karten

Zur Steuerung und Überwachung der Erodieranlage ist der VMEbus mit zwei digitalen VMEbus-Interfacekarten ausgerüstet. Die erste I/O-Karte (PIO 1) dient der Steuerung und Überwachung der Leistungsquelle der Erodieranlage. Darüber werden unter anderem Arbeitsstrom und Zündspannung eingestellt und alle Überwachungssignale des Generators abgefragt. Aufgabe der zweiten Karte (PIO 2) ist die automatische Bedienung und Überwachung der Bestandteile der Senkanlage, wie Füllpumpen, Notauskreis, Signalgeber für Endabschalter, Füllstand- oder Brandmelder usw.

SYSTEMKOMPONENTEN

Das VMEsystem selbst verfügt über mindestens eine Standard-Rechnerkarte (CPU I), die ihrerseits alle Masterfunktionen zur Steuerung des VMEsystems bereithält. Diese Karte besitzt ein Netzwerkinterface (Ethernet), Arbeitsspeicher (16-64MB), sämtliche Standardschnittstellen, wie seriell, parallel und SCSI. Eine spezielle Hochleistungsgraphikkarte (VGA) erlaubt die Maschinenbedienung und Prozeßvisualisierung. Optional kann der bestehende Prozeßrechner zusätzlich mit einer zweiten CPU-Karte (CPU II) bestückt werden, die über einen sogenannten Mezzanine-Bus (FlxiBus) verfügt, für den im Rahmen einer Hardwareentwicklung eigens eine Fuzzy-Hardware (EAGLE 2) realisiert

wurde [BWi94a]. Zur offline-Datenauswertung und Protokollierung ist der Prozeßrechner über Ethernet zusätzlich mit einer Workstation verbunden, die über entsprechende Software sowohl die Bedienung als auch die Protokollierung und Auswertung von Meßdaten aus dem laufenden Erodierprozeß erlaubt. Die äußerst flexible Architektur erlaubt den direkten Durchgriff von den höheren Ebenen der Steuerung bis hinunter zu den Sensoren und Aktoren. Aufgrund der Flexibilität der Kommunikationsstrukturen ist es möglich, z.B. neuartige Sensoren in Verbindung mit den bekannten Sensoren im Erodierprozeß zu testen und deren Signale zu korrelieren. Für die Beherrschung von Problemen der elektromagnetischen Verträglichkeit erwies sich das VME-Trägersystem als sehr vorteilhaft [BWB95a].

Kommunikationsstrukturen im Prozeßrechensystem

Der Prozeßrechnerkern nimmt, wie in Bild 7-26 dargestellt, über parallele Datenbusse sowohl die Spaltparameter t_d, arc und ub (DSP#1) als auch die Verfahrinformationen z_{pos} und φ auf. Letzterer ist der Motorwinkel, der für die Prozeßführung nicht weiterverarbeitet wird. Das System aus Bild 7-26, ist in der Lage, diese Prozeßparameter für jeden einzelnen Erodierimpuls aufzunehmen und abzuspeichern. Dazu wurde eine Kommunikationsstruktur realisiert, die drei parallele Busse (VME, Expansion Bus 1 und 2) mit jeweils eigenem Controller (VME-CPU, DSP#1 und DSP#2) über einen gemeinsamen Speicherbereich (FPR) verbindet.

t_d: Zündverzögerungszeit;
z_{pos}: Lineare Pinolenposition
arc: Lichtbogensignal;
φ:Drehwinkel Motorachse
ub:Brennspannungssignal

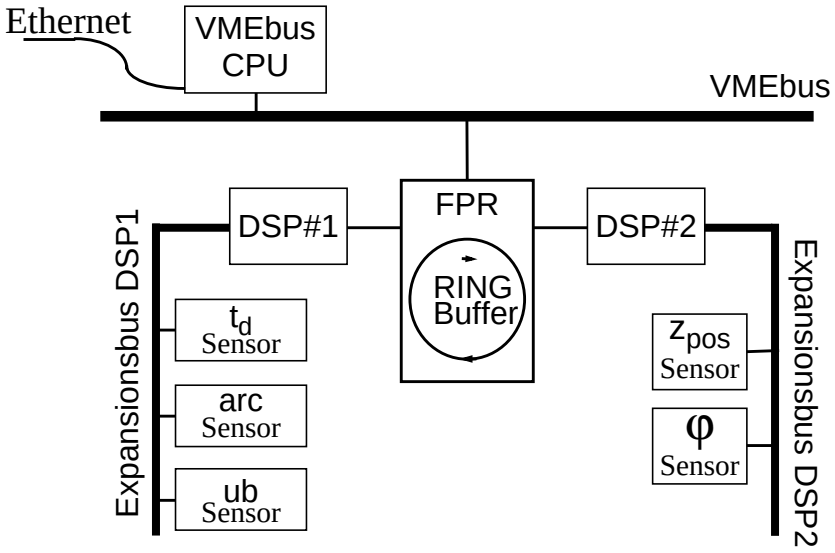


Bild 7-26:
Die Kommunikationsstruktur des Prozeßrechensystems

Der Datentransfer zum VME-Rechner beruht auf einer „Ring-Buffer“ Struktur, die in Bild 7-27 dargestellt ist. Die Mittelwertbildung aus z.B. 20 t_d-Werten erfolgt mittels einer FIFO-Struktur, die ebenfalls als "Ring Buffer" Datenstruktur realisiert ist. Systemtechnisch ist der FourPort RAM Bereich über feste Adressen in den VMEbus-Speicherbereich integriert. Der Datentransfer beginnt mit dem Einlesen der Sensorparameter [t_d, z_{pos}, arc, u_b] über die Expansion-Busse der DSPs #1 und #2. Zur Erreichung der notwendigen Geschwindigkeit wurde das Einlesen der Sensorparameter über einen DMA-Zyklus (Direct Memory Access) realisiert, der parallel zum eigentlichen Programm ab-

läuft und über entsprechende Programmierung bis zu 20Mb/s erlaubt. Die "aktuellen Entladungsparameter" werden synchron über eine DSP-Interfacekarte (VDIC) eingelesen. Auf dieser Interfacekarte, in Bild 7-25 als Verbindung der Sensorblöcke mit DSP#1 angedeutet, werden die einzelnen Sensorparameter gesammelt und zwischengespeichert, um jeweils nach Beendigung der aktuellen Zündverzögerung bzw. nach Ende der eingestellten Leerlaufdauer eingelesen werden zu können.

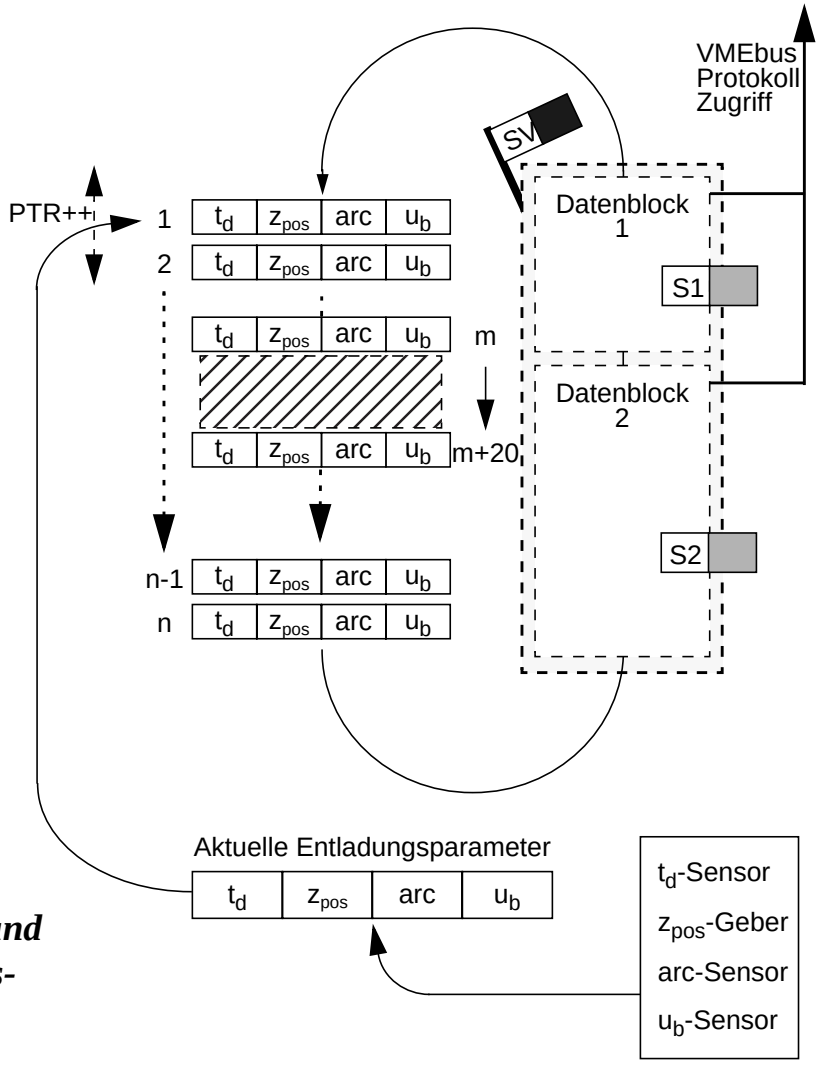


***Bild 7-27:* Datentransfer- und Protokollierungs-struktur**

Die weitere Steuerung des Datenflusses wird von DSP#1 übernommen und beinhaltet folgende Punkte:

- Ständige Umspeicherung der aktuellen Entladungsparameter in die Ringpuffer-Struktur (Datenblock 1 und 2) unter Sicherstellung der fortlaufenden Konsistenz der Daten.
- Berechnung des "Gleitenden Mittelwertes" der Zündverzögerungszeit t_d aus zur Zeit 20 Einzelentladungen und Übergabe des Mittelwertes an DSP#2 zur Spaltweitenregelung
- Steuerung der Protokollierung einer beliebigen Anzahl von Ringpuffer-Daten.

Die Synchronisation erfolgt hierbei über Semaphoren. Der Ablauf beginnt mit einer Protokollierungsanfrage der VMEbus-CPU, der mittels der *Semaphore SV* asynchron an DSP#1 gemeldet wird. Daraufhin setzt der DSP#1 die Semaphore desjenigen Blockes, der gerade beschrieben wird. Schreibt z.B. DSP#1 im Moment der Aktivierung von SV gerade in Datenblock 1, so wird am Ende von Datenblock 1 S1 gesetzt, was der VME-Protokollierungsroutine signalisiert, daß Datenblock 1 ausgelesen werden kann. Nach dem Auslesen von Datenblock 1 wartet die VME-Protokollierungsroutine, bis DSP#1 mittels S2 den zweiten Datenblock zum Lesen freigibt. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, wie die VMEbus-Protokollierungsroutine ihren Protokollierungswunsch mittels der Protokoll-Semaphore aufrechterhält. Die Grenzen der Protokollierung liegen zum einen im Arbeitsspeicher der VMEbus-CPU, der je nach Rechnerkarte zwischen 4MB und 64 MB groß ist, zum anderen in der möglichen maximalen Geschwindigkeit, mit der der Ringpuffer von DSP#1 beschrieben wird. So steht als Beschreibungsperiodendauer die Summe aus minimaler Brenndauer und Pausendauer zur Verfügung. Die minimale Brenndauer kann technisch nicht unter 1µs liegen, was eine vom Generator vorgegebene minimale Pausendauer von 4 µs bedingt. Damit kann alle 5 µs ein neuer Wert in den Ringpuffer geschrieben werden. Der Ringpuffer ist 1792 Vierer-Tupel groß. Daraus würde sich für die Zeitdauer einer kompletten Beschreibung ca. 8,9 ms ergeben. Die Aufteilung des Ringpuffers für die VMEbus-Routine in zwei Teile im Verhältnis 1:4 erfordert damit ca. 1,8 ms Zeit für das Auslesen von Datenblock 1.

Die Taktkarte mit angeschlossenem Td-Sensor *(Pulse Control)* wertet die Td-Sensorsignale aus. Ergebnis der Auswertung ist die Feststellung, welche charakteristische Impulsform (Kurzschluß, Leerlauf, Brenner, Frühzünder) vorliegt. Die Zählereinheiten stellen die Zündverzögerungszeit t_d (14 BIT, Auflösung 50ns) und die im Rahmen dieser Arbeit nicht relevante Deionisierungszeit Tdio (14 Bit, Auflösung 50ns) zur Verfügung. Die Taktkarte ist als Busteilnehmer auf dem Expansion-Bus des DSP#1 an die bereits erwähnte Sensor-Interfacekarte (VDIC) angeschlossen.

Die Übertragung der Prozeßparameter sowie deren zeitliche Steuerung und Synchronisation sind in Bild 7-28 dargestellt. Zum Verständnis der realisierten Implementierung ist deswegen das zeitliche Verhalten relativ zum Entladungsvorgang dargestellt. Dabei sind die für die einzelnen Sensoren geltenden aktiven Zeitintervalle schraffiert eingezeichnet.

Die beiden Steuerleitungen SSN (Zentraler Generatortakt) und INT0 (DMA-Interruptanforderung) an DSP#1 bilden die Grundlage der zeitlichen Ablaufsteuerung. Entsprechend dem Generatorsteuertakt SSN wird die Zündspannung an den Spalt gelegt ("**1**"). Der Spalt zündet nach der Zündverzögerungszeit t_d, die entsprechend gemessen und gespeichert wird ("**2**"). Parallel zur td-Messung wird die Spaltspannung mittels eines Lichtbogensensors (ARC) ausgewertet und nach 4 µs die Klassifizierung nach "Gutem Impuls", "Frühzünder" und "Lichtbogenartiger Entladung" vorgenommen ("**3**"). Die klassifizierte Art der Entladung wird abgespeichert. Im Falle eines Lichtbogens wird der Generatorsteuertakt unterbrochen.

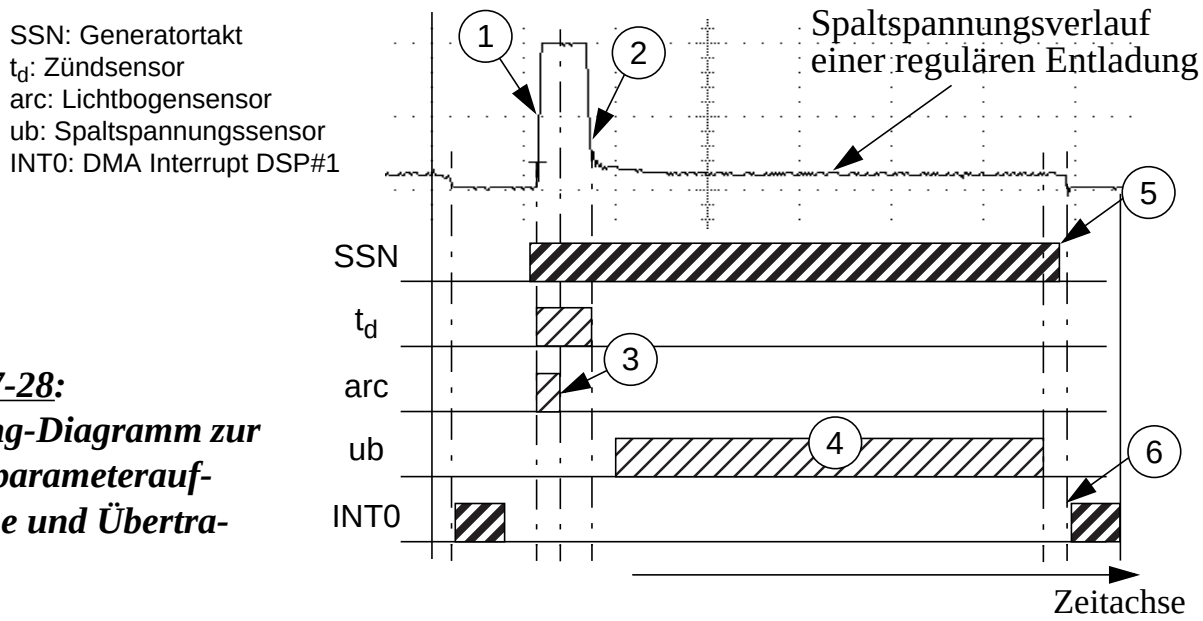


Bild 7-28:
Timing-Diagramm zur Spaltparameterauf-nahme und Übertra-gung

Die Klassifizierung wird abgespeichert und im Falle eines Lichtbogens wird der Generatorsteuertakt unterbrochen. Das dritte Meßsignal (ub) gibt die Brennspannung wieder ("**4**"). Hierbei können entweder Informationen über die Frequenzanteile (Spektrum) oder über die Amplitude (Minimal-, Maximal, und Mittelwert) aufgenommen werden. Nach dem Ende des Entladungsimpulses, der durch "SSN inaktiv" ("**5**") signalisiert wird, erzeugt die Taktsteuerung einen Interrupt (INT0, "**6**") auf dem DSP#1. Die entsprechende Interrupt-Service Routine initiiert daraufhin einen DMA-Zyklus (Direct Memory Access), der die Taktkarte und die Interfacekarte über den Expansion-Bus adressiert. Die zwischengespeicherten Meßwerte werden dabei ausgelesen und in den gemeinsamen Speicher (FourPort RAM) übertragen. Dort stehen die Meßwerte, ergänzt um die momentane Position, als "Aktuelle Parameter“ zur Verfügung. Da der Datentransfer während der Entladungspausen stattfindet, beträgt der Minimalwert für die Impulspause ca. 4 µs. In der praktischen Erosion stellt dieser Wert ein absolutes Minimum dar, das im Rahmen der Erodierversuche allerdings nicht erreicht wurde.

Die Datenverarbeitungskapazität dieser Prozeßführung geht weit über die normalerweise in Erodieranlagen anzutreffende Leistung hinaus [Wit95b]. Dies ist notwendig, da die Anlage nicht nur eine Werkzeugmaschine ist, sondern als Versuchsanlage zur Implementierung unterschiedlichster Komponenten, wie Sensoren, Aktoren oder Spaltweitenregler und Prozeßoptimierungsstrategien, dient. Entsprechend hoch ist der sogenannte „Overhead“ an Datenkanälen, Protokollierungs- und Auswertemöglichkeiten.

7.3.2. Programmarchitektur und Multi-Tasking Organisation

Die Prozeßrechnerarchitektur unterscheidet, wie im Entwurf spezifiziert, drei Ebenen, die sich im Datendurchsatz, in ihrer Verarbeitungsgeschwindigkeit sowie dem Grad der Standardisierung unterscheiden. Generell nimmt die Komplexität der Steuerungsprogramme zu, je weiter entfernt sich die Komponente vom eigentlichen Erodierprozeß be-

findet. In Bild 7-29 sind die einzelnen Systemebenen dargestellt. Die dem Prozeß am nächsten gelegene Ebene ist die Sensor-Aktor-Ebene. Auf dieser Ebene wird die programmtechnische Lösung mittels EPLS (erasable programmable logic devices) realisiert [ISD93]. Darin sind entweder Zustandsmaschinen, sogenannte FSMs (Finite State Machines) oder einfache Boolsche Gleichungen programmiert. Der Programmablauf ist zustandsgesteuert. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Prozeßdaten ist den Prozeßreaktionszeiten angepaßt und stellt, wie in Kapitel 6.2 bereits spezifiziert, die höchste Zeitanforderung im System dar.

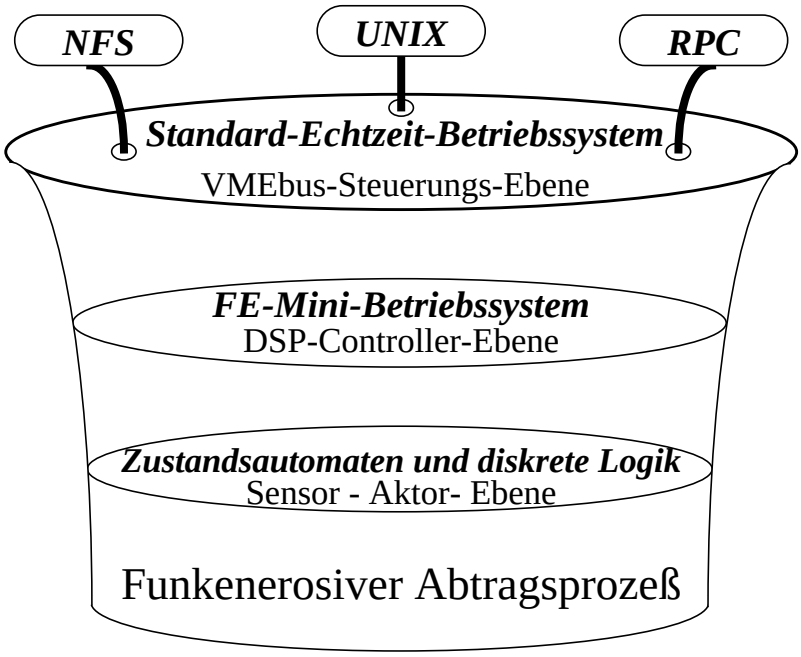


***Bild 7-29*: Systemebenen des Prozeßführungssystems**

Die darüberliegende Ebene, umfaßt die DSP-Controller mit ihren Kommunikationswegen. Dieser Teil, auch als Prozeßrechnerkern bezeichnet, stellt die Verbindung zwischen der SENSOR-AKTOR-Ebene und dem VMEbussystem her. Aufgrund der noch sehr hohen Zeitanforderungen mit Übertragungsraten bis zu 20MBaud laufen die Programme unter einem Mini-Betriebssystem ab. Der Betriebssystemrumpf ist dabei eine Endlos-Schleife, die entweder ereignis-gesteuert oder über einen Semaphoren-Zugriff unterbrochen werden kann. Im Verbund der beiden DSPs übernimmt DSP#1 mit seinem Programmcode die Master-Funktion. Dabei wird die Möglichkeit der DSPs zur Parallelbearbeitung von CPU-Zyklen und sogenannter DMA-Transferzyklen sehr vorteilhaft ausgenutzt. Praktisch bedeutet dies, daß der gesamte zeitkritische Datenverkehr zur Aufnahme von Meßwerten in einem ereignis-gesteuerten DMA-Zugriff erledigt wird. Die den DSPs zugeordneten Programmabläufe sind bis auf Synchronisierungspunkte vollkommen unabhängig. Der Datenaustausch zwischen dem CNC-DSP#2 und dem Prozeß-DSP#1 erfolgt direkt über den gemeinsamen Speicher. Die Programmierung des Prozeßrechenkerns erfolgt in ANSI C und ASSEMBLER.

Die dritte Ebene der Programmarchitektur bildet der VMEbus-Rechner mit Steuerprogrammen. Dort ist der gesamte Bedien- und Protokollierungsteil mit Filetransfer und Netzwerkanbindung realisiert. Die Prozeßoptimierung, Initialisierung, Maschinenparametrierung und Überwachung werden komplett auf dem VMEbus erledigt. Aufgrund der Komplexität der Programme wird ein Standard-Echtzeitbetriebssystem eingesetzt, das alle Konstrukte der Echtzeitprogrammierung inklusive Filetransfer und Netzwerkprotokolle und Dienste zur Verfügung stellt [WRS95].

Die Prozeßführung ist ein Multi-Tasking System, dessen Ablauf mit festen Taskprioritäten, wie in Bild 7-30 illustriert, und Semaphoren gesteuert wird.

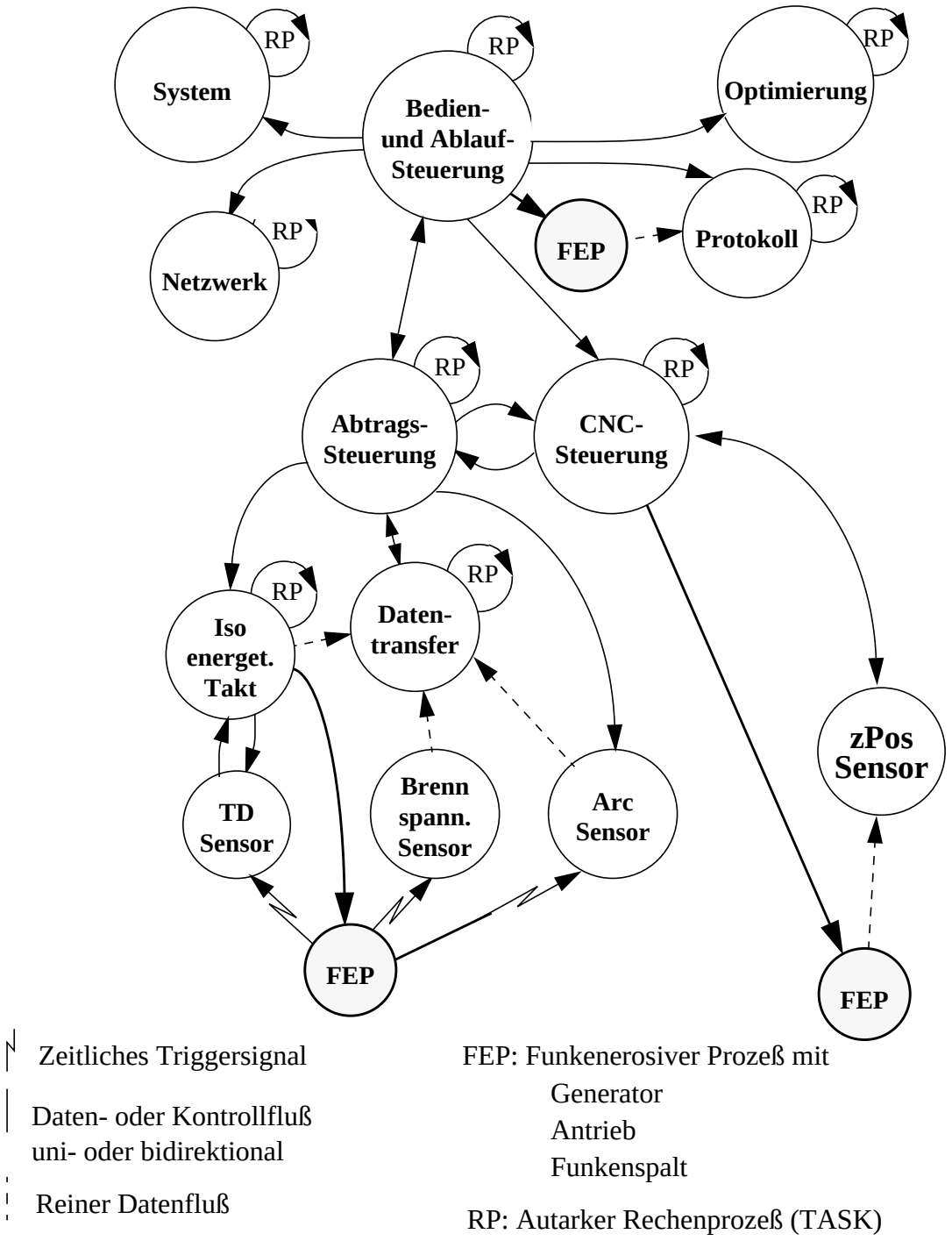


Bild 7-30: Vereinfachtes Zustandsdiagramm der FE-Prozeßführung

Insgesamt ist die Multitasking-Architektur durch zahlreiche parallel ablaufende Programme (Nebenläufigkeiten) und zum Teil sehr kleine Synchronisierungszeitfenster ausgezeichnet. Die Nebenläufigkeit hat zur Folge, daß ein dynamisches System entsteht, dessen Zustände mitunter in Programmverklemmungen (Dead-Locks) oder in nicht vorgesehene Zustände übergehen können. Zur Vermeidung dieser für das Systemverhalten fatalen Zustände ist die Organisation streng hierarchisch aufgebaut. Das bedeutet, die Rechenprozesse der obersten Ebene, wie die Bedien- und Ablaufsteuerung mit ihren umgebenden Prozessen, besitzen im System die höchste Priorität. Die einzige Ausnahme bilden Notfallbehandlungsroutinen, die z.B. zur Abschaltung der Erodieranlage führen. Ansonsten sind die Steuerprozesse der obersten Ebene so programmiert, daß jeder Prozeß einer unteren Ebene zu jeder Zeit unterbrochen oder angehalten werden kann. Wie in Bild 7-30 dargestellt, sind die Prozesse der unteren Ebenen kaum als „autarke Rechenprozesse“ (RP) realisiert. Vielmehr handelt es sich um rein ereignisgesteuerte Teilrechenprozesse, die für eine vorbestimmte Zeitdauer aktiv sind, ihre Aufgabe erledigen und dann wieder inaktiv werden.

Die zweite spezifische Eigenschaft des Programmsystems betrifft die vom FE-Prozeß (FEP) ausgehenden zeitlichen Randbedingungen. Das gesamte Programmsystem muß demnach in der Lage sein, alle Rechenprozesse, die auf das zufällige zeitliche Prozeßverhalten aufsetzen, innerhalb der sehr kleinen Zeitfenster zu synchronisieren. Dabei bestimmt das Geschehen im Funkenspalt unmittelbar die Länge der Zeitfenster.

7.3.3. Antriebssteuerung für die Spaltweitenregelung

Die Versuchsanlage besitzt nur eine Arbeitsachse (Z-Achse) und erlaubt deswegen ausschließlich eine einfache Senkerosion. Entsprechend steht auch nur ein Wegsignal, die Z-Position (z_{pos}), zur Verfügung.

Das Antriebssystem besteht insgesamt aus drei Hauptkomponenten:

- Elektrischer Antrieb, mit Zahnriemen und Kugelumlaufspindel
- Wegmeßsystem mit Anzeige, Datenübertragung und Wandlung
- Reglereinheit (DSP#2) mit DDC (Direct Digital Control) Interface

Der Antrieb ist ein Synchronmotor mit permanent erregtem Rotor. Die Geschwindigkeitsregelung mit unterlagerter Stromregelung ist analog ausgeführt. Zur Steuerung besitzt das Reglerteil drei Eingänge, die durch eine Höchstdrehzahl von 1500, 3000 und 6000 U/min gekennzeichnet sind. Die Ansteuerung erfolgt mit einer geschwindigkeitsproportionalen Spannung von +/-10V. Im Rahmen dieser Arbeit kam für die Pinolensteuerung im Erodierbetrieb ausschließlich der Eingang mit der Maximaldrehzahl von 3000 U/min zur Anwendung. Für den Einrichtbetrieb wurde der Eingang mit 1500 U/min eingesetzt. Die Kraftübertragung von der Motorachse an die Kugelumlaufspindel der Z-Achse übernimmt ein Zahnriemen. Die Untersetzung beträgt 15:82. Die Kugelumlaufspindel besitzt eine Steigung von 5mm/U. Die Betrachtung der mechanischen Aspekte des Antriebsstranges wurde bereits in [Ode95] ausführlich dargestellt und soll hier nicht weiter vertieft werden.

Das verwendete Wegmeßsystem mißt den tatsächlichen Verfahrweg der Pinole (z_{pos}). Die Aufnahme der Position erfolgt über einen Haidenhain Glasmaßstab, Meßwertwandler und Anzeige [Hei94]. Das damit gewonnene BCD-Wegsignal wird mittels eines Codewandlers in Hexadezimal-Format gewandelt und über den Expansion-Bus des DSP#2 eingelesen. Es dient als Eingangsparameter für die Micro-Oszillationsspülung und die Prozeßoptimierung.

Die Spaltweitenregelung hingegen arbeitet ausschließlich mit der mittleren Zündverzögerungszeit, die aus einer Mittelung über die jeweils letzten 20 t_d-Werte hervorgeht. Signaltechnisch sind die in Bild 7-31 dargestellten Zuordnungen von Schaltungsaufbau und Motordaten vorgegeben. Der entwickelte nichtlineare Regler generiert zwei Stellgrößen, die zusammen, wie in Kapitel 7.1.2 dargestellt, den Energiegehalt der Stellimpulse bestimmen.

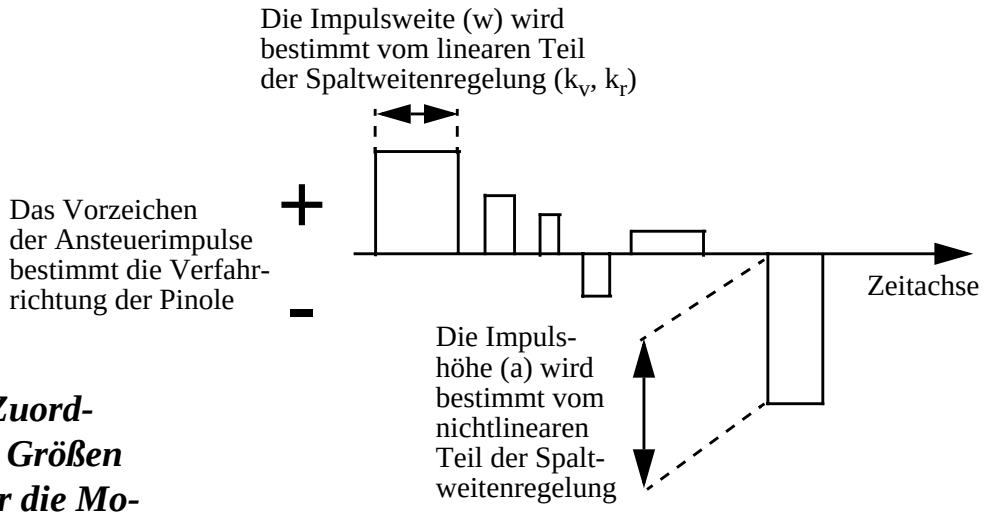


Bild 7-31:
Signaltechnische Zuordnung der digitalen Größen zur Impulsform für die Motoransteuerung mit DDC

In Bild 7-32 ist exemplarisch ein Oszillogramm der Stellsignale (U_{stell}) während des Erodierprozesses abgebildet.

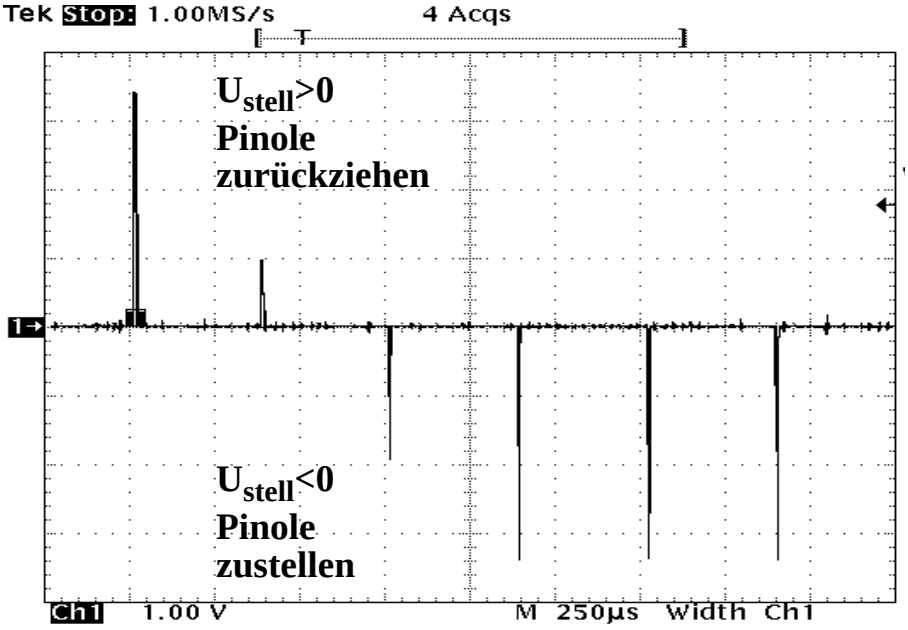


Bild 7-32:
Oszillogramm der Antriebs-Stellsignale während der Erosion

Aufgabe der Hardware ist die Umsetzung zweier digitaler Signale zur Beschreibung einer Pulsweiten- und Amplitudeninformation, so daß insgesamt ein analoger Stellimpuls mit feiner Auflösung zur Verfügung steht. Dazu wurde eine spezielle DDC (Direct Digital Control) Interface Karte entwickelt. Sie realisiert im Zusammenspiel mit der seriellen Schnittstelle und den eingebauten Timern des Controller DSP#2 die Signalumsetzung. Die beiden Größen Impulsweite *w* und Impulsamplitude *a* bestimmen den Energiegehalt des Stellimpulses. Das Vorzeichen gibt die Drehrichtung und damit die Pinolenverfahrrichtung vor. Die Wertbereiche für die Impulsparameter sind wie folgt definiert:

Impulsbestandteil	**Auflösung**	**Bereich**	**Datenformat**
Weite (w)	125 ns	0ns - 23^2 *125ns	32 Bit
Amplitude (a)	39 mV	0mV - 255 * 39mV	8 Bit

Der Motorcontroller DSP#2 [TXI94] ist mit einer seiner beiden seriellen Leitungen mit der DDC-Karte verbunden. Die Erzeugung und Übertragung der Stellweite *w* und Stellamplitude *a* ist mittels der DDC-Karte unabhängig voneinander möglich.

7.3.4. Spaltsensorik zur Lichtbogendetektion

Die Spaltsensorik, wie in Kapitel 7.1.1 behandelt, überwacht den zeitlichen Verlauf der Spaltspannung in einem fest vorgegebenen Zeitfenster. Das Zeitfenster beginnt zum Zeitpunkt des Anlegens der Zündspannung an den Arbeitsspalt und ist ca. 4 µs lang. Bei der Einstellung der Länge des Zeitfensters wird berücksichtigt, daß lichtbogenartige Entladungen innerhalb der Ionisierungs- bzw. spätestens in der Zündphase detektiert werden können. Der Lichtbogensensor ist so aufgebaut, daß er die charakteristischen Frequenz- und Dämpfungseigenschaften des Funkenspaltes während der allerersten Phasen der Entladung bestimmen und daraus mittels eindeutiger Kriterien die Klassifizierung der Funkenentladung nach „Lichtbogen“, „Frühzünder“ oder „Guter Impuls“ vornehmen kann. Die Reaktion auf eine erkannte lichtbogenartige Entladung ist die unverzügliche Generatorabschaltung, die den Spalt sehr schnell stromlos macht. Die Schaltung zur Detektion unerwünschter Entladungen besteht aus zwei parallelen Zweigen mit jeweils drei Stufen. Die parallelen Zweige unterscheiden sich ausschließlich in ihrer Dimensionierung.

Stufe 1:Tastkopf

Die direkt am Spalt eingesetzten sogenannten „Tastköpfe“ sind hochohmige Ankopplungsschaltungen, die vergleichbar mit einem Differenzierer die Wechselanteile in der Spannung, die über dem Arbeitsspalt liegen, herausfiltern. Entsprechende RC-Kombinationen und Klemmdioden mit Längswiderständen erlauben die Ankopplung der Tastköpfe an den Funkenspalt, ohne die Spannungsverhältnisse im Spalt zu beeinflussen. Erfahrungsgemäß sind für den Tastkopf des ersten Zweiges eine Grenzfrequenz von maximal 2 MHz und für den Tastkopf des zweiten Zweiges eine Grenzfrequenz von mindestens 10 MHz gute Werte.

Stufe 2:Verstärker und Wandler

Die zweite Stufe bildet ein Verstärkerelement zur Pegelanpassung pro Zweig, das die einstellbare breitbandige Verstärkung der mit Hilfe der Tastköpfe gewonnenen Wechselspannung erlaubt. Das verstärkte Wechselsignal wird einem Schmitt-Trigger zugeführt, der aus dem sinusförmigen Wechselsignal eine Impulsfolge auf 5V-Pegel (TTL) erzeugt.

Stufe 3: Auswerteteil

Die Auswertelogik ist in EPLDs als Zustandmaschine realisiert. Entsprechend der beiden Zweige existieren zwei parallel arbeitende Auswerteschaltwerke. Hauptaufgabe der Auswertelogik ist die zeitlich korrekt getriggerte Zählung der eingehenden Impulse. Eine entsprechende Kontrollogik stellt die Synchronisation der Schaltwerke und die Einhaltung der Zeitfenster sicher. Die Taktraten der EPLDs betragen dabei 40 MHz. Entsprechend den erreichten Zählerständen der beiden Zweige wird im EPLD eine Klassifizierung der Entladung vorgenommen. Bei detektiertem Lichtbogen unterbricht das EPLD den Generatorsteuertakt für die verbleibende Restzeit der eingestellten Brenndauer. Ferner werden Folgen von auftretenden Lichtbögen gezählt. Dieser spezielle Zähler wird mit jedem Lichtbogensignal inkrementiert und bei einem Frühzünder oder „Gutem Impuls“ dekrementiert. Ab einer einstellbaren Schwelle von z.B. 4 Lichtbögen in Folge generiert die Zusatzschaltung ein Signal für die überlagerte Steuerung. Die Prozeßstabilisierung und die Prozeßoptimierung verwenden dieses mit *folgeArc* bezeichnete Signal, wie in den jeweiligen Kapiteln dargestellt, als Indikator für einen „schlechten“ Prozeß.

Der genaue Aufbau und die Wirkungsweise der Schaltung sind in der Patentanmeldung [BWB95b] dargestellt. Es ist nach dem Stand der Technik kein anderes Verfahren bekannt, das ähnlich präzise und schnell auf Fehlentladungen reagiert. Einzig das Verfahren [Ott95] arbeitet mit vergleichbarer Geschwindigkeit, greift allerdings während einer anderen Phase der Funkenentladung ein und bietet auch eine ähnliche, in der Erosion nachgewiesene Prozeßsicherheit. Die entwickelte Technologie zur Lichtbogendetektion und Behandlung umfaßt den dargestellten Teil der reinen Detektion und die im Rahmen vorliegende Arbeit nicht eingesetzte Lichtbogenvorhersage [BWB95b]. Da bereits die einfache Detektion sehr vorteilhaft zur Lichtbogenerkennung eingesetzt wurde und die nachgeschaltete Strategie der Prozeßstabilisierung damit sehr gute Resultate lieferte, wurde auf die Kombination der Erkennung und Vorhersage für die aktuelle Prozeßführung im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.