VI. KONZEPTION DER HIERARCHISCHEN PROZEßFÜHRUNG

Die Elemente der Prozeßführung für die Funkenerosion müssen sehr spezifischen Anforderungen genügen. Die Anforderungen resultieren aus der erodierspezifischen Kombination eines zeitkritischen verfahrenstechnischen Prozesses mit den Anforderungen einer hochpräzisen Werkzeugmaschine.

6.1. Anforderungen an die FE-Prozeßführung

Der Entwurf der Prozeßführung beinhaltet zum einen die grundlegende Konzeption der Automatisierungsstruktur mit den spezifischen Aufgaben der Prozeßsteuerung und zum anderen die steuerungstechnische Struktur, d.h. die regelungstechnische Organisation der Prozeßführung.

6.1.1. Technische Spezifikation des Prozeßführungssystems

Der regelungs- und steuerungstechnische Entwurf basiert auf der Einteilung der Aufgaben in folgende Bereiche.

Prozeßstabilisierung

- Lichtbogen- und Kurzschlußerkennung sowie Reaktion
- Bewegungsspülung
- Spaltweitenregelung

Prozeßoptimierung

- Datenaufnahme und -speicherung
- Datenverarbeitung und prozeßangepaßte Reaktion

Prozeßperipherie

- Spaltsensorik (Zündungserkennung, Fehlentladungen)
- Spezialkomponenten (Filter, Ablaufsteuerung)

Typisch für den Erodierprozeß sind stark unterschiedliche Reaktionszeiten von wenigen 10ns bis hin zu einigen 10ms. Entsprechend müssen die kürzesten Sensorzeiten in den Bereichen um 10ns liegen, so daß in jedem Fall eine korrekte Spaltzustandserfassung gewährleistet ist. Die Zeiten für die Aktorik resultieren zum Teil aus physikalischen Gegebenheiten. Herausragend langsam ist hierbei die Zeitkonstante der Zwangsspülung von mehreren Sekunden. Die Zeitkonstanten der Prozessorik sind in hohem Maße betriebssystem- und applikationsabhängig. Im Falle des im Rahmen dieser Arbeit verwandten Echtzeitbetriebssystems können dessen Systemzeitkonstanten, falls notwendig, nahezu eliminiert werden.

Entsprechend den drei Hauptkomponenten Antrieb, Generator und Prozeß ist in Bild 6-1 die Struktur eines ersten Grobentwurfs der hierarchischen Prozeßführung dargestellt. Auf Prozeßebene sind die Hauptkomponenten: Antrieb (AC SERVO), Abtragssystem (ERODIERSPALT) und Energiequelle (ENERGIE PULS) dargestellt. Jeder Komponente ist ein Aktor-Sensorelement zugeordnet. Die Kommunikation der Sensor-Aktor-Ebene mit dem Prozeßrechnerkern geschieht über einen sogenannten Sensor-Aktor-Bus.

Der Prozeßrechenkern sollte mit zwei bis drei Standard Mikrocontrollern das gesamte Datenaufkommen verarbeiten können. Die oberste Ebene des Prozeßrechnerentwurfs sieht ein Standard-Industriesystem vor, das neben einer Anzahl von Rechnereinheiten (CPU), Ein- /Ausgabe (I/O), Festplattenspeicher (DISK) und die Bedienkonsole bereithält. Die darüberliegende Ebene zur Offline-Prozeßanalyse ist bereits nicht mehr Bestandteil des eigentlichen Prozeßrechners. Sie ist allerdings für die Erforschung neuartiger Verfahren und Methoden zur Prozeßbeurteilung und Datenauswertung notwendig.

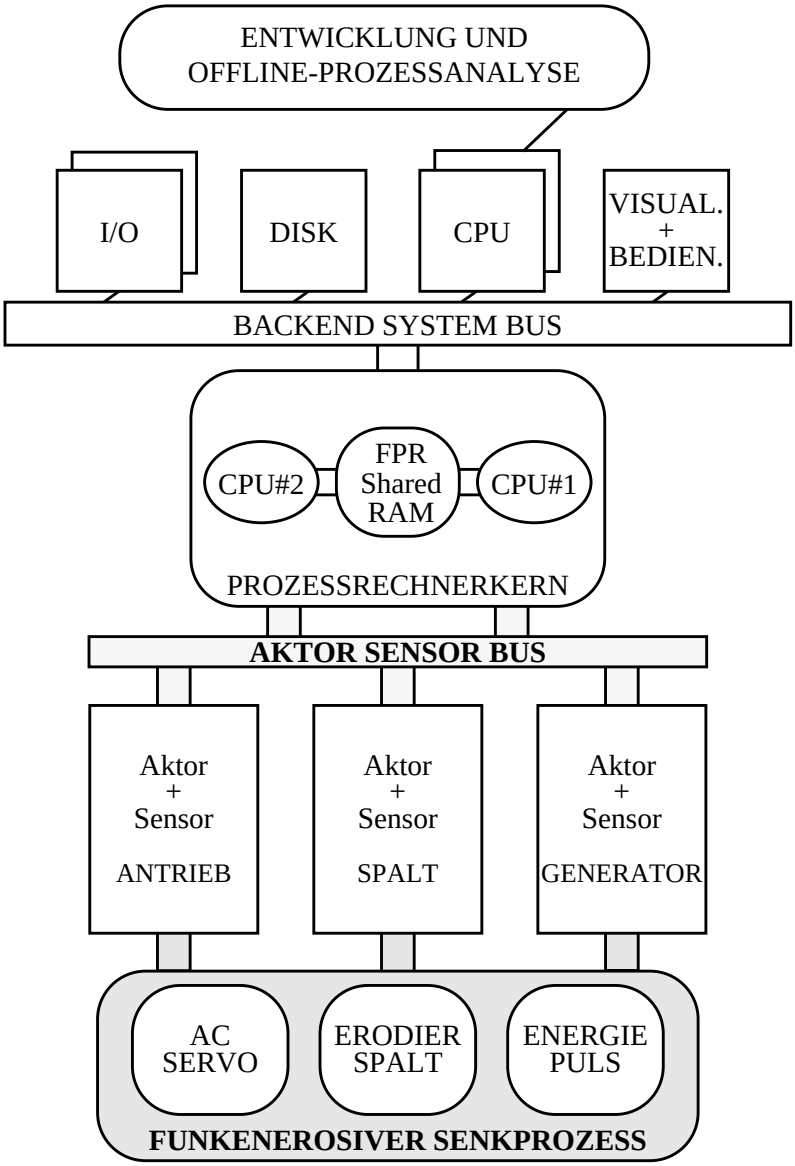


***Bild 6-1*: Grobentwurf der hierarchischen Prozeßführung**

Er basiert auf folgenden Entwurfsleitlinien.

1. **Hierarchische Architektur**: Hierbei gilt, daß die prozeßnahen Komponenten sehr schnell einfache Berechnungen ausführen. Die in der Hierarchie höher liegenden Prozeßführungsbestandteile sind intelligenter, aber auch langsamer. Der Datenfluß wird beim Systemdurchgang von unten nach oben komprimiert, um eine durchgängig hohe Verarbeitungsleistung aufrechtzuerhalten.

2. **Spezialisierung**: Basis des Entwurfs ist das Konzept „Verteilte Intelligenz“. Hierzu sollen die einzelnen hochspezialisierten Hierarchieebenen gemäß den jeweils geltenden zeitlichen Anforderungen und Datenaufkommen definierte Teilaufgaben der Prozeßdatenverarbeitung übernehmen. Diese Aufgabenteilung führt zu der notwendigen hohen Systemperformanz.
3. **Parallelisierung**: Zur Erreichung höchster Verarbeitungsgeschwindigkeiten sind die Prozeßführungsaktivitäten auf mehrere Rechenprozesse zu verteilen, die auf unterschiedlichen CPUs ablaufen. Dabei findet aufgrund der gleichen Reaktionszeiten der Elemente einer Ebene der Steuerungshierarchie die Verteilung bevorzugt horizontal statt. Es werden alle Aufgaben des Systemmanagements, die nicht unmittelbar mit der Aktor-Sensor-Ebene zusammenarbeiten, soweit oben wie möglich angesiedelt, um die tieferliegenden Prozeßrechnerkomponenten zu entlasten.

Tabelle 6-1 stellt die einzelnen Anforderungen im Kontext der funktionellen Anlagenbestandteile dar.

Nr.	Anforderungen	Anlagen-komponente	Referenz
1 2 3	Schwingungsarmes Präzisionsmaschinengestell Mindestens eine Arbeitsachse elektrisch geregelt verfahrbar I.d.R. 4-Achs-CNC für Planetär- und Bahnerosion	Maschinen-gestell,An-lagenaufbau	im Rahmen dieser Arbeit nicht vertieft
4 5	Variabel einstellbare Leistungsquelle für Impulsströme- und -spannungen 0-60A; 80V-300V Bevorzugt Stromquelle mit geregeltem Arbeitsstrom, digital fein abgestuft einstellbar Elektronische Schalter; Verlustleistung minimiert	Energie-quelle	Kap. 5.1
6 7 8	On-line Spaltzustandserfassung (Minimale Zeitkonstanten) Vorverarbeitung und Speicherung relevanter Parameter Störfreie und den Prozeß nicht beeinflussende Sensorik	Sensorik	Kap. 6.2 Kap. 7.3.1 Kap. 7.3.4
9 10 11	Lichtbogen- bzw. Kurzschlußerkennung und Behandlung Prozeßangepaßte Bewegungsspülung Dynamisch angepaßte Spaltweitenregelung	Prozeßsta-bilisierung	Kap. 7.1 Kap. 7.3
12 13 14	Prozeßzustandserfassung mit angepaßten Zeitkonstanten Mehrgrößenoptimierung geeigneter Steuerparameter Schnell konvergierende wirkungsangepaßte Strategie	Prozeß-optimierung	Kap. 7.2

Tabelle 6-1: Anforderungsliste an die Prozeßführung

6.1.2. Steuerungs- und regelungstechnischer Systementwurf

Das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten der Prozeßführung ist als Blockschaltbild in Bild 6-2 dargestellt. Der eigentliche physikalische Abtragsprozeß ist darin als „Funkenerosives Abtragssystem“ bezeichnet. Damit ist der Funkenspalt mit den

Werkzeug- und Werkstückelektroden und dem Dielektrikum gemeint. Das Abtragssystem wird mittels der dargestellten Sensoren auf Zündung, Kurzschluß, Brennspannung, Lichtbogen und Position ständig überwacht. Betrachtet man den Abtragsprozeß, so sind dazu die energietragenden Größen Arbeitsstrom I_a und Zündspannung U_z in Verbindung mit der Brenndauer t_e maßgebend für den Energieeintrag. Voraussetzung ist ferner die Anpassung der Spaltweite. Diese Aufgabe übernimmt ein td-basierender Spaltweitenregler, der die dafür notwendigen Stellsignale für die Vorschubbewegung berechnet. Der Regelfehler (*error*) berechnet sich als Differenz des Mittelwertes einer Anzahl von Zündverzögerungszeiten t_{dmist} und des vorgegebenen Sollwertes t_{dmsoll}. Die Mittelwertbildung ist als Filter dargestellt. Die Basisfunktionalität, bestehend aus Spaltweitenregelung und gepulster Energiezufuhr, ermöglicht bereits eine Erodierbearbeitung. Ein abtragsintensiver Prozeßverlauf verlangt darüber hinaus weitere Elemente der Prozeßstabilisierung. Für Prozeßentartungen sind eine Reihe von Sensoren vorgesehen. Sie überwacht den zeitlichen Verlauf und die Amplitude der Spaltspannung. Die Bewegungsspülung als drittes Element der Prozeßstabilisierung wirkt als eigenständiger Mechanismus direkt auf die Vorschubeinrichtung und sorgt für die Reinigung des Spaltes. Eine Bearbeitungsaufgabe verlangt eine sogenannte Startwert-Technologie, die als Fuzzy-Experten-System realisiert werden kann. Auf Basis der Startwerte übernimmt die Prozeßoptimierung im Verlauf der Bearbeitung die Anpassung ausgewählter Steuerparameter an die aktuellen Abtragsbedingungen. Die Bestandteile in Bild 6-2 sind wie folgt spezifiziert:

Fuzzy-Experten-System Startwert-Technologie

Dient der benutzerdefinierten Ermittlung der aufgabenbezogenen Startparameter Arbeitsstrom, Zündspannung, Brenn- und Pausendauer

Prozeßangepaßte, gedächtnisbasierte Fuzzy-Prozeßoptimierung

Ermittelt aufgrund einer aktuellen kontinuierlichen Prozeßbeurteilung die vorherrschenden Abtragsbedingungen und berechnet daraus über einen mehrstufigen Algorithmus und eine Einstellstrategie neue Arbeitsparameter des Spaltweitenreglers $t[k_v, k_r, td_{soll}]$, neue Spülparameter $s_p[p_1, p_2]$ und neue Pausendauern t_o. Der „Entscheider“, mit dem Buchstaben E symbolisiert, schaltet nach Prozeßbeginn von der Startwert-Einstellung auf den Optimierer um.

Fuzzy Sollwert-Anpassung

Dieser Bestandteil der Prozeßführung gehört zur Prozeßoptimierung. Dort werden die Parameteränderungen, die als Trend-Vektor $t[k_v, k_r, t_{dsoll}]$ von der Optimierung vorgegeben werden, in tatsächliche Reglerverstärkungen k_v, k_r und den Sollwert für die mittlere Zündverzögerungszeit t_{dmsoll} umgerechnet. Dazu erfolgt eine „Risikoabschätzung“ der vorgeschlagenen Trendwerte unter Einbeziehung des aktuellen Prozeßzustandes. Die aktuellen Zündverzögerungszeiten t_d und ein Signal der Lichtbogenbehandlung *li1* beschreiben den aktuellen Prozeßzustand. Der Unterschied zur Optimierung ist der wesentlich kleinere Zeithorizont, der eine korrekte Prozeßberücksichtigung garantieren soll.

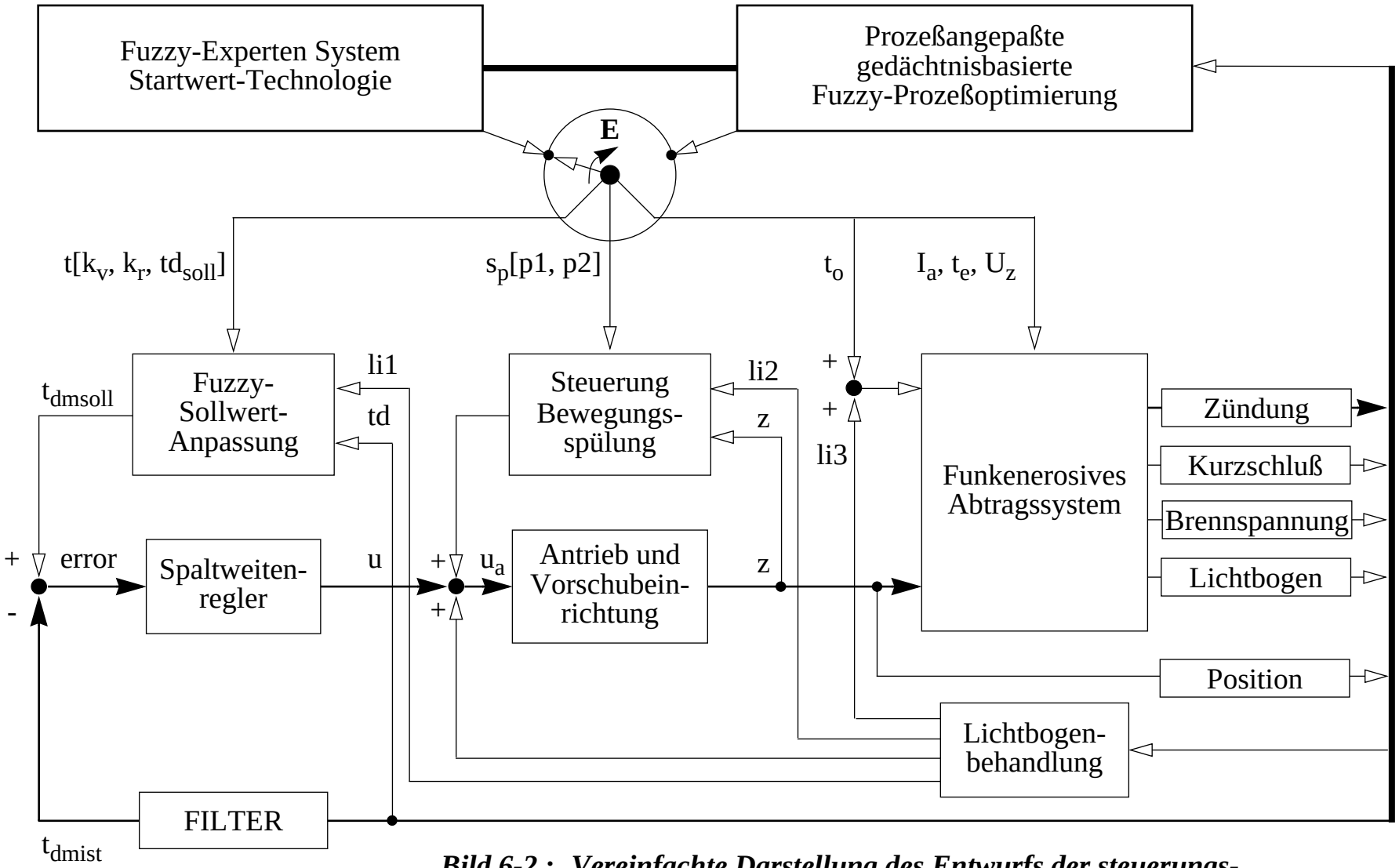


Bild 6-2 : ***Vereinfachte Darstellung des Entwurfs der steuerungs-technischen Struktur der FE-Prozeßführung***

Spaltweitenregler

Der Spaltweitenregler verarbeitet den Regelfehler *error*, gebildet aus der Differenz von Soll- und Istwert (t_{dmsoll}-t_{dmist}), für die mittlere Zündverzögerungszeit t_{dm}. Der Stellbefehl u führt zu einer Bewegung der Pinole, d.h. zu einer neuen Position z. Auslöser einer Pinolenbewegung kann neben der Spaltweitenregelung auch die Bewegungsspülung oder die Lichtbogenbehandlung sein.

Steuerung Bewegungsspülung

Die Bewegungsspülung als unverzichtbarer Bestandteil der Prozeßstabilisierung ist eine eigenständige Einheit, die direkt von der Lichtbogenbehandlung gesteuert wird. Neben *li2* als Auslösesignal wird bei der Bewegungsspülung die Position z ausgewertet. Als Bewegungsspülung kommt eine neuartige „Micro-Oszillationsspülung“ zum Einsatz (Kapitel 7.1.3).

Antrieb und Vorschubeinrichtung

Hierzu zählen der elektrische Antrieb mit den Leistungsverstärkern, die Elemente der Drehzahlreduktion, wie z.B. Zahnriemen, und die mechanischen Bestandteile zur Kraftübertragung, wie Spindel und Pinole. Es handelt sich bei dem Stellsignal u_a um ein geschwindigkeitsproportionales Signal. Der Verfahrweg z wird an der Pinole gemessen.

Filter

Darunter ist im einfachsten Fall ein Mittelwertbildner zu verstehen, der z.B. zwanzig aufeinanderfolgende Zündverzögerungszeiten mittelt, um daraus den Regelfehler für den Spaltweitenregler zu bestimmen. Aufwendigere Verfahren verwenden digitale Filter, die eine Gewichtung der vergangenen Mittelwerte erlauben [BOW92] [Ode95].

Lichtbogenbehandlung

Die Lichtbogenbehandlung soll die aufbereiteten Sensorsignale *Lichtbogen*, *Brennspannung* und *Kurzschluß* verarbeiten. Die Verarbeitung erfolgt während des Prozeßverlaufs. Das Ausgangssignal *li3* trägt zu einer Verlängerung der Pausendauer t_o bei. Ein zweiter Ausgang, der mit *li2* bezeichnet ist, wirkt als „Triggersignal“ direkt auf die Steuerung der Bewegungsspülung. Ein weiterer mit *li1* bezeichneter Ausgang, ist für die -Sollwertanpassung des Spaltweitenreglers vorgesehen.

6.2. Zeitliche Analyse und Entwurf des Prozeßführungssystems

Grundlage des Entwurfs des Steuerungssystems ist die Kenntnis der prozeßbedingten zeitlichen Restriktionen. Hierzu ergeben sich folgende Zeitkonstanten.

- Physikalische Zeitkonstanten (PHY)
- Zeitkonstanten der Sensorik (SE)
- Zeitkonstanten der Aktorik (AT)
- Zeitkonstanten der Prozessorik (PRO)

Der Abtragsprozeß legt die „kleinste Zeitkonstante“ fest. Alle anderen Zeitkonstanten im System müssen die Zeitanforderungen des Prozesses in jedem Fall befriedigen. Bild 6-3 gibt die einzelnen Zeitkonstanten wieder, die in den folgenden Tabellen 6-1 bis 5 spezifiziert werden. Die in den Tabellen angegebenen Größenordnungen sind Anhaltspunkte für heutige Technologien der Meßdatenerfassung und -auswertung. Die Programmlaufzeiten in Tabelle 6-5 sind abhängig vom Funktionsumfang, der einem einzelnen Rechenprozeß zugeteilt wird.

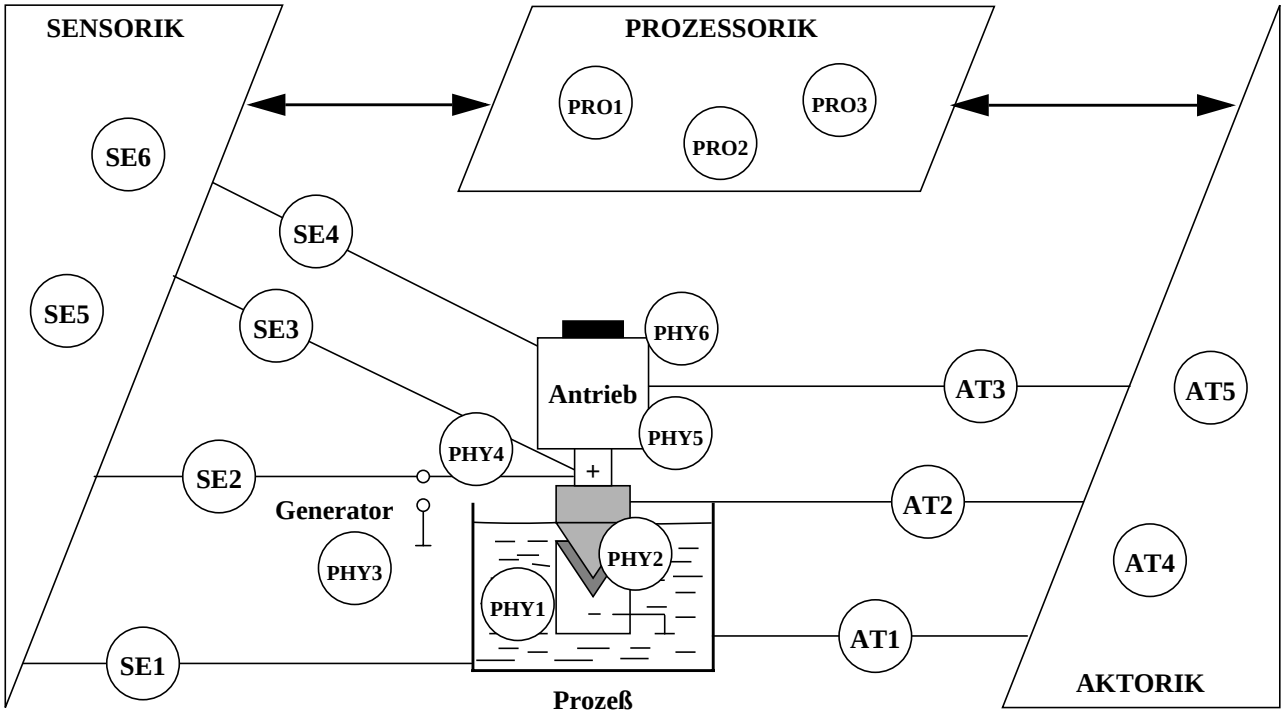


Bild 6-3: Relevante Zeitkonstanten für die FE-Prozeßführung

Die Spaltspannungserfassung ist direkt an die Prozeßzeitkonstanten angebunden. Sie ist so zu konzipieren, daß der tatsächliche Spannungswert mit der Impulsfrequenz erfaßt und ausgewertet werden kann. Die einzelnen Zeitkonstanten beinhalten zum Teil Totzeiten, die für eine konstante zeitliche Verschiebung der Meßsignale verantwortlich sind.

ID	Spezifikation	Größen-ordnungen
PHY1	Zeitkonstante für den Energiegehalt und Verschmutzungsgrad des Dielektrikums	100µs - 100ms
PHY2	Zeitkonstante für den elektrischen Spaltzustand (Isolation)	10ns - 400µs
PHY3	Gesamtschaltzeiten der Leistungsschalter mit Ansteuerlogik	400ns - 2µs
PHY4	Laufzeiten auf Leitungen (Energieübertragung)	10ns - 200ns
PHY5	Interne Verzögerungen bzw. Totzeiten (Im Antrieb: Magnetisierung, Schlupf etc.)	400µs - 2ms
PHY6	Signalumwandlung- und Übertragung	500ns - 1µs

Tabelle 6-2: Spezifikation der relevanten physikalischen Zeitkonstanten

ID	Spezifikation	Größen-ordnungen
SE1	Zeitkonstante der Leitwertmessung im Dielektrikum	10µs - 10ms
SE2	Zeitkonstante der Spaltspannungsüberwachung	10ns - 1ms
SE3	Zeitkonstante der Messung der Zündverzögerungszeit	10ns - 1µs
SE4	Zeitkonstante der Positionsmessung	<500ns
SE5	Zeitkonstante der Vorverarbeitung	100ns - 15µs
SE6	Zeitkonstanten der Schnittstelle	5ns - 500ns

***Tabelle 6-3*: Spezifikation der relevanten Sensorzeitkonstanten**

ID	Spezifikation	Größen-ordnungen
AT1	Zeitkonstante der Zwangsspülung	>1s
AT2	Zeitkonstante der Generatoransteuerung	200ns - 1ms
AT3	Zeitkonstante der Antriebsansteuerung	10µs
AT4	Zeitkonstante der Ausgabenverarbeitung	<500ns
AT5	Zeitkonstante der Schnittstellen	<900ns

***Tabelle 6-4*: Spezifikation der relevanten Aktorzeitkonstanten**

So kann für den Antriebsstrang knapp 1ms Totzeit[1] angesetzt werden. Der Generator reagiert auf einen Stellbefehl mit ca. 700ns Totzeit[2]. Die Sensorik zur Messung und Abspeicherung der Zündverzögerungszeit besitzt eine „konstante Meßverzögerung“ von knapp 2µs.

ID	Spezifikation	Größen-ordnungen
PRO1	Zeitkonstante der Rechenzeiten für die Ausführung von Systemprogrammen	100ns - 10ms
PRO2	Zeitkonstante der Rechenzeiten für die Ausführung von Steuerprogrammen	100ns - 100ms
PRO3	Zeitkonstante der Schnittstellen	<300ns

***Tabelle 6-5*: Spezifikation der relevanten Zeitkonstanten der Prozessorik**

Die Totzeiten oder konstanten Verzögerungszeiten, die einem bekannten systematischen Meßfehler entsprechen, können für die weitere Verarbeitung rechnerisch eliminiert wer-

1. Gemessen für die Ansteuerung eines AC-Servomotors, wie er im Rahmen der Arbeit verwendet wird.
2. Gemessen an der geregelten Prozeßstromquelle nach [BWB95a] als Zeit zwischen der Ausgabe des logischen Steuersignals „IMPULS EIN“ und Spannungsanstieg am Erodierspalt.

den. Im Falle variabler Zeitkonstanten kann nur eine „Worst-Case“ Betrachtung angestellt werden. So muß die Impulstaktung mit Steuerungshardware und entsprechender Software so ausgelegt sein, daß sie kürzeste spezifizierte zeitliche Anforderungen bewältigen kann. Für eine Feinschlichtbearbeitung (t_e=4µs, t_o=1µs) ergibt sich exemplarisch folgende Berechnung zur zeitlichen Abschätzung.:

Zeitkonstanten der Sensorik und Signalauswertung
- 50ns Meßwertaufnahme
- 100ns Weiterleitung des Signals an die Taktsteuerung
- 100ns Auswertung des ankommenden Signals (z.B. Signalflanke)
- = *250ns* (Meßzeit)

Impulsbeginn:
- 20ns Start des Brenndauerzählvorganges
- = *270ns* (Schaltzeit)

Impulsende:
- 20ns Ende-Signal von der Taktsteuerung
- 130ns Ausgabe des Stellwertes an den Generator
- = *420ns* (Schalt- und Übermittlungszeit)

Abspeicherung des Meßwertes für den Spaltweitenregler (hier: t_d-Regler)
- 10ns Schnittstelle auf den Systembus
- 200ns Schnittstelle prozessorseitig auf den Systembus
- 250ns Datenzugriff und Abspeicherung
- = *880ns* (Gesamtzeit)

Bei der im Beispiel spezifizierten Impulspause von 1µs würden zur Prozeßdatenverarbeitung bei sequentieller Bearbeitung gerade noch 120ns übrigbleiben. Dieses einfache Beispiel zeigt für den Extrembereich kleinster Impulszeiten, welche zeitlichen Randbedingungen für die Taktsteuerung gelten.

Insgesamt bildet die zeitliche Analyse und Systemauslegung eine umfassende Grundlage für die Realisierung. Bild 6-2 gibt die steuerungstechnische Struktur wieder und gilt als Leitlinie für die gesamte weitere Implementierung.

6.3. Neue regelungstechnische Konzepte: Fuzzy Logic - Fuzzy Control

Die Fuzzy-Technologie oder Fuzzy Control eröffnet für die Regelungstechnik zum Teil vollkommen neue Perspektiven [Zad93]. So ist damit die mathematisch geschlossene Formulierung von nichtlinearen oder scheinbar regellosen Zusammenhängen zum Zweck der Regelung möglich. Fuzzy-Regelungen zeichnen sich durch hohe Transparenz und Verständlichkeit aus [BrR79]. Die Fuzzy-Technologie erleichtert die Formulierung von sogenanntem „unscharfen“ Prozeßwissen. Dabei reicht es aus, einen Teil der Zusammenhänge mittels Fuzzy-Entscheidungs- oder Regelalgorithmen zu formulieren, um damit zu einem globalen Regler-Kennfeld zu gelangen. Dieses Kennfeld reicht über den gesamten Ereignisraum. Somit entsteht aus bruchstückhaftem Prozeßwissen ein für den

gesamten Wertebereich gültiger Entscheidungsalgorithmus. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit der Integration widersprüchlicher Aussagen.

6.3.1. Grundlagen der Fuzzy-Mengen/Logik Theorie

Die Anwendungen der Fuzzy-Theorie in der Regelungstechnik bauen auf dem Begriff der Fuzzy-Mengen auf. Die Umsetzung der Fuzzy-Mengen-Theorie in die Fuzzy-Logik und schließlich in die Fuzzy Control wird analog zur klassischen Mathematik vollzogen. Die Fuzzy-Mathematik stellt dabei eine Erweiterung dar, die es erlaubt, menschliche Formulierungen mathematisch exakt wiederzugeben, ohne dabei die menschliche intuitive Präzision zu verlieren [Zad65]. Die Leistung der Fuzzy-Technologie besteht nun darin, die verbale intuitive Beschreibung in mathematisch exakte und vor allem von Mikrorechnern verarbeitbare Formulierungen umzusetzen. In [Zad73] werden zur Verdeutlichung des Fuzzy-Ansatzes zwei Prämissen angegeben:

> „Systeme, die ähnlich komplex sind wie „menschliche Systeme“ der Entscheidungsfindung, können nicht mehr durch quantitative Methoden beschrieben werden. Je komplexer Systeme werden, desto schwieriger bzw. unmöglich wird es, deren Eigenschaften präzis und aussagekräftig zu beschreiben.“
>
> „Die Kernelemente der menschlichen Denkweise sind nicht Zahlen, sondern die Bezeichnungen von Fuzzy-Mengen. Fuzzy-Mengen sind Klassen von Objekten. Die Zugehörigkeit eines Objektes zu einer Klasse oder eines Elementes zu einer Menge ist dabei nicht durch *zugehörig* oder *nichtzugehörig* definiert, sondern besitzt einen stetigen Übergang von *zugehörig* zu *nichtzugehörig*.“

Analog zur klassischen Mathematik existieren Definitionen, die sich im wesentlichen auf den Begriffen der Mengenlehre abstützen.

Die Fuzzy-Menge (Fuzzy Set)

X sei eine Ansammlung von Objekten x. Die Fuzzy-Menge A ist dann definiert als die Menge der geordneten Paare $(x, \mu_A(x)$ für die gilt:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \varepsilon X\}$$

Der Term $\mu_A(x)$ heißt Zugehörigkeitsfunktion (Membership Function MBF) des Objektes x zur Menge A. Sie gibt für jedes Element x der Menge A den Grad der Zugehörigkeit zur Menge A an. Der Zugehörigkeitsgrad liegt zwischen 0 und 1. Die klassische Mengentheorie besitzt den Zugehörigkeitsgrad 0, was der Aussage *„ist nicht Element von“* gleichkommt oder den Zugehörigkeitsgrad 1, was bedeutet *„ist Element von“*. Die Ansammlung von Objekten X wird als Betrachtungsraum (universe of discourse) bezeichnet. In der Technik, die i.allg. mit analogen kontinuierlichen Größen arbeitet, treten meist kontinuierliche Räume auf. So ist z.B. der Druck in einem Kessel oder der Spannungsabfall über einem Widerstand kontinuierlich. Aus den Mengenoperatoren werden analog zur klassischen Mathematik die für die Logik notwendigen Operatoren, wie in Tabelle 6-5 dargestellt, abgeleitet. Die Mengen A und B besitzen die Zugehörigkeitsfunktionen $\mu_A(x)$ und $\mu_B(x)$. Die Variablen a, b seien gewöhnliche boolsche Variablen.

Operation	Mengenoperator	Logischer Operator	Fuzzy-Operator
Untermenge	$A \subset B$	nicht vorhanden	$\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$
Vereinigungsmenge	$A \cup B$	ODER $a \vee b$	$max(\mu_A(x), \mu_B(x))$[1]
Schnittmenge	$A \cap B$	UND $a \wedge b$	$min(\mu_A(x), \mu_B(x))$[1]
Komplementbildung	$\bar{A}_B$	NICHT $\neg a$	$\mu_{CA}(x) = 1 - \mu_A(x)$

[1] Der Operator min(a,b) liefert den kleineren max() Wert der beiden Argumente a,b; max(a,b) ergibt den größeren Wert.

***Tabelle 6-5:* Mengenoperatoren zur Verknüpfung von klassischen Mengen und für Zugehörigkeitsfunktionen zur Verknüpfung von Fuzzy-Mengen.**

Fuzzy-Variable

Sogenannte *Fuzzy-Variablen* oder auch *Linguistische Variablen* bilden die Grundlage der Fuzzy-Berechnungen. Eine Fuzzy-Variable ist z.B. ein Wort der natürlichen Sprache. Nimmt man das Wort FARBE als Fuzzy-Variable so sind die Ausprägungen *rot*, *grün*, *blau*, *gelb* die möglichen Werte dieser Fuzzy-Variablen. Gleichzeitig sind die Ausprägungen Bezeichner von Fuzzy-Mengen. Man würde damit den Wert der Fuzzy-Variablen FARBE mit Hilfe der natürlichen Sprache, z.B. mit *gelb*, angeben. Exemplarisch sei die linguistische Variable KÖRPERGRÖSSE betrachtet. Als Ausprägungen oder Fuzzy-Mengen kommen die Adjektive *groß, klein, mittel* in Betracht. Für die Arbeit mit Fuzzy-Variablen bzw. zur Verknüpfung von Fuzzy-Mengen stehen die Operatoren aus Tabelle 6-5 zur Verfügung. Ein Beispiel für die Berechnung von verknüpften Zugehörigkeitsgraden könnte z.B für eine Körpergröße x = 172 cm, wie folgt aussehen:

Verbale Formulierung:
(*Körpergröße* (x=172) ist *klein*) *ODER* (*Körpergröße* (x=172) ist *mittel*)
Fuzzy-Berechnung: $\max(\mu_{klein}(172), \mu_{mittel}(172)) = \max(0.2, 0.5) = 0.5$

Darüber hinaus existieren z.B. Fuzzy-Relationen, Fuzzy-Analysis und Fuzzy-Wahrscheinlichkeitsrechnung [Zim90]. Am meisten verbreitet sind folgende Anwendungsbereiche:

- Fuzzy-Logik (Allgemein: Logiksynthese)
- Fuzzy-Experten-Systeme und Fuzzy-Regelungstechnik (Fuzzy Control)
- Fuzzy-Mustererkennung (Pattern Recognition)

Im Rahmen vorliegender Arbeit wird ausschließlich der Bereich der Fuzzy-Expertensysteme und Fuzzy-Regelungstechnik angewandt. Beiden Anwendungen ist gemein, daß „unscharfes Prozeßwissen“ in Form von sprachlichen Regeln, sogenannten Heuristiken,

formuliert wird. Ein derartiges Expertensystem, das aus einer beliebigen Anzahl solcher Regeln besteht, wertet eine Eingangsinformation aus, indem die Regeln Schritt für Schritt zur Anwendung kommen. Die übliche Vorgehensweise sieht dazu einen „Knowledge Engineer“ vor. Er eignet sich mittels Befragung Expertenwissen an und setzt es in ein Fuzzy-Expertensystem um. Der Anwender kann das Expertensystem, wie in Bild 6-4 dargestellt, nach Fertigstellung benutzen, ohne die einzelnen Fuzzy-Regeln zu kennen.

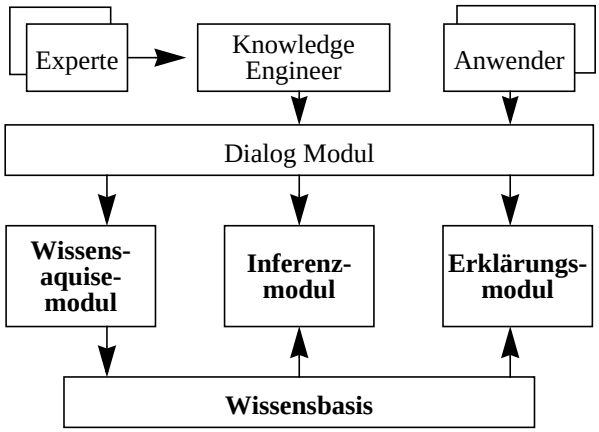


Bild 6-4: Struktur eines Fuzzy-Expertensystems

Das Dialogmodul gewährleistet den syntaktisch korrekten Aufbau der Wissensbasis. Sie beinhaltet das gesamte Expertenwissen. Das Inferenzmodul repräsentiert einen Mechanismus, der es erlaubt, Informationen aus der Wissensbasis zu entnehmen und daraus Schlüsse zu ziehen. Der Begriff „Inferenz“ beschreibt die Auswertung von Wenn-Dann-Regeln nach den Gesetzen der Fuzzy-Logik.

Fuzzy Controller, wie in Bild 6-5 dargestellt, besitzen eine Wissensbasis oder Regelbasis, die um einen Inferenzmechanismus erweitert ist. Zur Rückübersetzung der Ergebisse wird als Erklärungsmodul die „Defuzzifizierung“ eingesetzt. Die Skalierung der Fuzzifizierung und Defuzzifizierung ist an den technischen notwendigen Wertebereichen und Auflösungen für einzelne Prozeßgrößen und Stellwerte orientiert. Nach Fertigstellung des Fuzzy-Reglers wird dieser im Prozeß mit Ist-Parametern gespeist und erzeugt gemäß seiner Regelbasis Ausgangsdaten, die als Stellwerte in den Prozeß rückgespeist werden können.

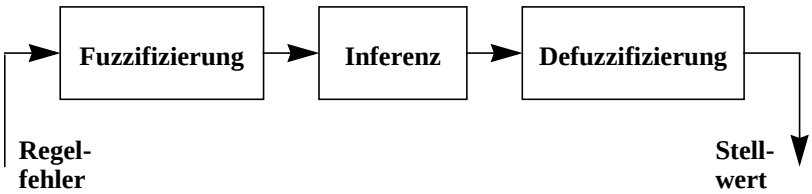


Bild 6-5: Struktur eines Fuzzy-Reglers

Die Fuzzifizierungskomponente wandelt diesen „Echtwelt“- oder „Crisp-Wert“ in einen Fuzzy-Wert um. Hierfür werden die bereits erwähnten Zugehörigkeitsfunktionen verwandt. Dazu kann man sich als Regelgröße z.B. eine Temperatur T, wie in Bild 6-6 skizziert, vorstellen. Die Fuzzyfizierung einer Regelgröße ist die Bestimmung des gültigen Zugehörigkeitswertes $\mu_T(x)$. Für einen realen Temperaturwert ergibt sich z.B. für 20 ^oC

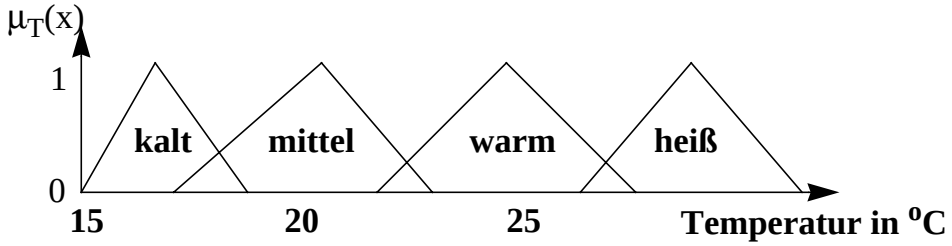


Bild 6-6: Zugehörigkeitsfunktionen für die Regelgröße Temperatur

ein Zugehörigkeitswert zu Fuzzy-Menge *mittel* von eins und für alle anderen Fuzzy-Mengen von null. Stellt man sich nun eine zweite Regelgröße, wie z.B. die Luftfeuchtigkeit vor, die ebenso wie die Temperatur über einen Satz von eigenen Zugehörigkeitsfunktionen fuzzifiziert wird, so kommt man mit der Kombination beider Regelgrößen zu einem echten Inferenzsystem, dessen Grundlage eine Regelbasis bildet. Diese Regelbasis ist eine Ansammlung vorformulierter Regeln, die im Prinzip die Eingangsgrößen, im Beispiel die Regelgrößen Temperatur und Luftfeuchtigkeit, zueinander in Beziehung setzen und daraus eine Ausgangsgröße ableiten. Diese Ausgangsgröße, hier ein Stellbefehl, ist ebenfalls in Form von Zugehörigkeitsfunktionen ausgedrückt. Der Ausgabewert der Inferenz kann im Beispiel die Stellung einer Lüfterklappe sein, die mit drei Zugehörigkeitsfunktionen *offen*, *mittel* und *geschlossen* dargestellt ist. Die Rückgewinnung der verwertbaren Steuergröße mittels Defuzzifizierung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit über die „center of gravity“ oder zu deutsch Schwerpunktmethode [Zim90].

6.3.2. Integration der Fuzzy-Technologie in die FE-Prozeßführung

Der Vorteil von Fuzzy-Technologien, sogenanntes „heuristisches“, d.h. in Form von Regeln vorliegendes Wissen, in eine mathematische geschlossene Form zu überführen, soll für die FE-Prozeßführung ausgenützt werden [BWi93] [BWi94d] [BWi95b]. Bild 6-7 zeigt eine mögliche Einteilung der Anwendungsbereiche von Fuzzy-Technik in der Funkenerosion.

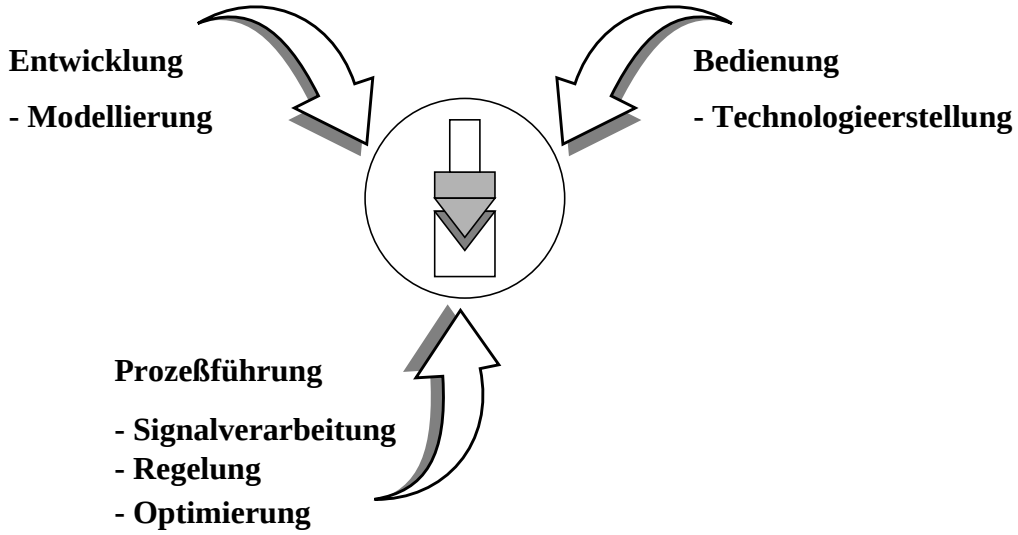


Bild 6-7: Einsatzgebiete von Fuzzy-Techniken in der Funkenerosion

Fuzzy-Algorithmen sind mit wenigen Ausnahmen auf digitalen Bausteinen implemen-

tiert, so daß Fuzzy-Regler meist „digitale Regler“ sind. Die Komplexität von Fuzzy-Algorithmen hat aufwendige Fuzzy-Regelprogramme zur Folge. Meist entscheidet man sich für herkömmliche Rechner, die als Plattform für sehr spezialisierte Fuzzy-Programmsysteme dienen. Hierzu liegen im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Entwicklungen vor, die zu einer hochschnellen Fuzzy-Plattform geführt haben [BWi94a], [BWi95b], [BWi94c]. Ziel der Entwicklungen war die Bereitstellung einer industriell einsetzbaren modularen Hardwareplattform, die auf einem kommerziellen digitalen Fuzzy-Schaltkreis aufbaut [VLS93a] [VLS93b]. Dabei gelang die Entwicklung eines Prototyps für industrielle Prozeßrechenanwendungen mit sehr hoher Rechenleistung [BWi95c]. Nach Abschluß der Voruntersuchungen zeigte sich allerdings, daß zur Ausführung der Fuzzy-Steuerungsprogramme die Rechenleistung nicht benötigt wird, so daß von einer Integration der entwickelten Fuzzy-Hardware in das Prozeßführungssystem abgesehen wurde. Der Trend, der allgemein bei industriellen Applikationen zu beobachten ist, zeigt, daß einfachere Fuzzy-Hardware (8 BIT) in erster Linie bei „Low-Cost“ Lösungen etwa im Bereich von Consumer Produkten eingesetzt wird. Technisch anspruchsvolle Lösungen (32 BIT) arbeiten bis auf wenige Ausnahmen, wie z.B. [Bei96] [BWi94b] [Wit94b], mit Fuzzy-Softwarelösungen. Zur Verwendung des Fuzzy-Algorithmusses innerhalb einer Prozeßführung bieten heutige Fuzzy-Werkzeuge die Möglichkeit der automatischen Umsetzung in einen C-Quellcode, der nahtlos in das Programmsystem zur Prozeßführung integrierbar ist [TIL93]. Der gewonnene C-Code kann nach Anpassung und Kompilierung auf einem Prozeßrechner unter dem Echtzeitbetriebssystem VxWorks [WRS95] [Wit94a] eingesetzt werden.

Da die Fuzzy-Technik ein sehr breites Spektrum abdeckt, sollen zunächst die möglichen Integrationsmöglichkeiten von Fuzzy-Technologien in die funkenerosive Prozeßsteuerung umrissen werden. Grundlage aller Ansätze ist das Blockschaltbild in Bild 6-8, das die im ersten Teil dieses Kapitels vorgestellten Bestandteile enthält.

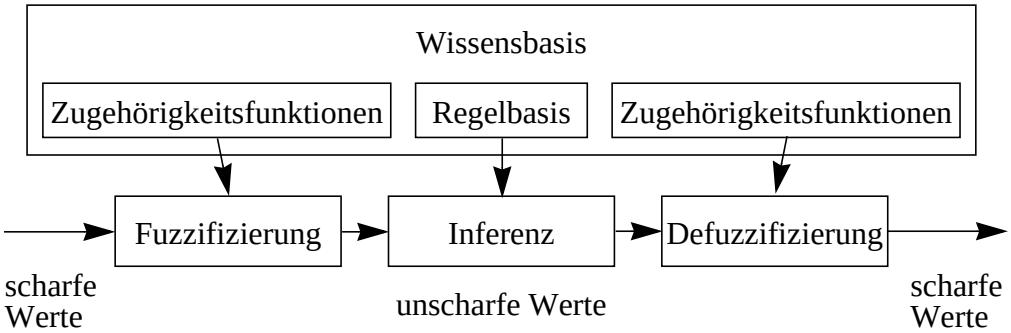


Bild 6-8: Grundlegendes Schema des Fuzzy-Entscheidungssystems

Fuzzy-Regelung (Fuzzy Control)

Der reine „Fuzzy-Regler“ erfüllt die Aufgaben eines konventionellen Reglers. Ab zwei Eingangsgrößen stellt sich die Übertragungsfunktion eines Fuzzy-Reglers als Kennfeld dar, das aus zwei Eingangsgrößen eine oder auch mehrere Ausgangsgrößen bildet. Das Spektrum von Fuzzy-Reglern reicht von Eingrößenreglern bis hin zu mehrdimensionalen Zustandsreglern. Die Eigenschaften des Fuzzy-Reglers in bezug auf Einschwingverhal-

ten und Dämpfung sind dabei im wesentlichen frei wählbar. An dieser Stelle setzt das sogenannte „Tuning“ ein, worunter die Optimierung eines Fuzzy-Reglers für eine bestimmte Regelaufgabe nach dem „Try-and-Error“ Prinzip verstanden wird. Anhand von Simulationen und im Test mit realen Strecken kann allerdings gezeigt werden, daß die Regelqualität eines Fuzzy-Reglers für lineare, identifizierbare Strecken die Qualität klassischer Ansätze in keinem Fall übertrifft [Wit93a] [Wit93b]. Nachteilig ist, daß für Fuzzy-Ansätze keine allgemeinen Stabilitätsbeweise geführt werden können, was insbesondere bei kritischen Anwendungen dazu führt, daß keine Fuzzy-Regler eingesetzt werden können [Kie93a] [Kie93b]. Ein zweiter Aspekt, der bei Fuzzy-Reglern nur teilweise lösbar ist, besteht in der Kompensationseigenschaft eines Reglers. Dabei ist zu sehen, daß eine Regelstrecke, wie z.B. ein technischer Prozeß, ein ihr eigenes dynamisches Verhalten besitzt. Ein Fuzzy-Regler besitzt a priori keine dynamischen Elemente, denn er basiert immer auf einem statischen Kennfeld. Daher müssen über geeignete Vorfilter entsprechende Dynamisierungen vorgenommen werden.

Für die *Fuzzy-Regelung* in der Funkenerosion bietet sich eine Reihe von zum Teil bekannten Vorgehensweisen an [MIK89]. Als erste Alternative wäre ein „*Energieregler*“ denkbar, der abhängig von charakteristischen Spaltgrößen, z.B. Amplitude oder Anstiegsflanke des Arbeitsstromes oder Höhe der Zündspannung regelt. Eine derartige Regelung würde allerdings bisher nicht verfügbare Stellglieder im Generator notwendig machen. Ferner ist die Geschwindigkeit der Fuzzy-Berechnungen auch auf schnellster Hardware eingeschränkt, so daß hier nur ein analog aufgebauter Fuzzy-Regler mit Zykluszeiten im Bereich unter 100µs, in Frage käme. Die zweite Möglichkeit ist ein „*Spülregler*“ bzw. „*Durchflußregler*“ für eine Zwangsspülung. Aufgrund der systembedingt langen Antwortzeiten der Spüleinrichtungen bei FE-Anlagen wäre dieses regelungstechnisch sehr gut mit einem Fuzzy-Regler auszuführen. Als Regelgrößen für eine Fuzzy-Regelung kommen Temperatur und Leitwert des Dielektrikums in Frage. Letzter ist mit der Verschmutzung des Dielektrikums gleichzusetzen. Bekannte Verfahren [Peu81], [Rau84] schlagen eine Konstanthaltung der Durchflußmenge vor. Dabei wird zunächst diejenige Durchflußmenge ermittelt, für die der Prozeß „ruhig“ verläuft, um dann auf diese Durchflußmenge anzupassen. Bei stetigem Einsinken der Elektrode müßte allerdings dieser Arbeitspunkt des besonders „ruhigen“ Erodierens ständig den aktuellen Erodierbedingungen nachgeführt werden. Die Regelung des Leitwertes im Dielektrikum scheint nach dem Stand der Technik [Peu81], [DEP81] sehr aufwendig. Zudem setzt diese Regelung die Homogenität des Dielektrikums voraus. Geht man davon aus, daß lokale Leitwertänderungen, z.B. in erster Linie durch Gasblasen im Funkenspalt, entstehen, die sich sehr schnell abbauen, so ist aus physikalischer Sicht eine zuverlässige Aufnahme eines repräsentativen Leitwertes, der für eine Regelung in Frage kommt, kaum zu realisieren. Ein dritte Möglichkeit des Einsatzes von Fuzzy-Reglern ist der „*Spaltweitenregler*“. Für den Fall, daß der Positionsregler als Lageregler arbeitet, ist mit Sicherheit ein Fuzzy-Regler, wie in [DFG94] dargestellt, einem konventionellen Regler im Hinblick auf Einschwingverhalten und Dynamik unterlegen. Handelt es sich allerdings um die Spaltweitenregelung auf der Basis von Prozeßgrößen, wie der mittleren Zündverzöge-

rung, welche nicht unmittelbar mit der geometrischen Position der Elektrode zusammenhängt, so kann ein Fuzzy-Ansatz durchaus erfolgreich sein. Allerdings scheint ein einfacher Fuzzy-Regler, der einem bekannten Proportionalregler nachempfunden ist, hier keine Vorteile zu bringen. Eine andere Methode, wie sie in [Boc93a] [Boc93b] dargestellt wird, geht über die einfache Regelung hinaus. Dort ist ein Bestandteil die bekannte einfache Spaltweitenregelung, die z.B. die mittlere Spaltspannung bzw. die mittlere Zündverzögerungszeit mit einem aktuellen Sollwert vergleicht und daraus einen Stellwert generiert. Zusätzlich ist eine sogenannte „Instabilitätsauswertung“ eingefügt, die aus einer Reihe von Signalen einen weiteren Wert generiert, der zusammen mit dem Stellbefehl des „normalen“ Spaltweitenreglers in einen Fuzzy-Algorithmus eingespeist wird, der daraus den letztlich an den Antrieb geleiteten Stellbefehl erzeugt. Dieser industrielle Ansatz stellt aus Sicht der Integration von Fuzzy-Techniken in eine bestehende Erodieranlage eine sehr gelungene Lösung dar.

Kernstück einer Fuzzy-Optimierung, als Spezialfall der Fuzzy-Regelung, ist eine Regelbasis, die in der Lage ist, verschiedene Prozeßverläufe zu erkennen und entsprechende Steuerparameter so an die aktuellen Erfordernisse anzupassen, daß das Abtrags- und Verschleißverhalten optimiert wird. Diese Anwendung verzichtet im Gegensatz zum Fuzzy-Regler auf eine direkte Rückkopplung der Ausgangsgrößen. Somit kommt der für Regler in einer geschlossenen Regelstrecke wichtige Aspekt der Dynamik kaum zum Tragen.

Die zeitlichen Randbedingungen sind hierbei so beschaffen, daß selbst sehr aufwendige Algorithmen ohne Probleme abgearbeitet werden können. Hierzu existiert eine Reihe Lösungen, die auf eine Prozeßoptimierung oder Adaption von Steuerparametern angelegt ist. Beispielsweise schlägt [EPA92] aufgrund einer Prozeßklassifikation die Variation der Pausendauer, des Abhebweges und des Abhebtaktes vor. Ein anderer Ansatz [Rab96] basiert auf einer Fuzzy-Auswertung der Zündverzögerungszeit td und einer entsprechenden Einstellung eines Satzes von Steuerparametern zur Prozeßoptimierung.

Fuzzy-Modellierung (Fuzzy Modelling)

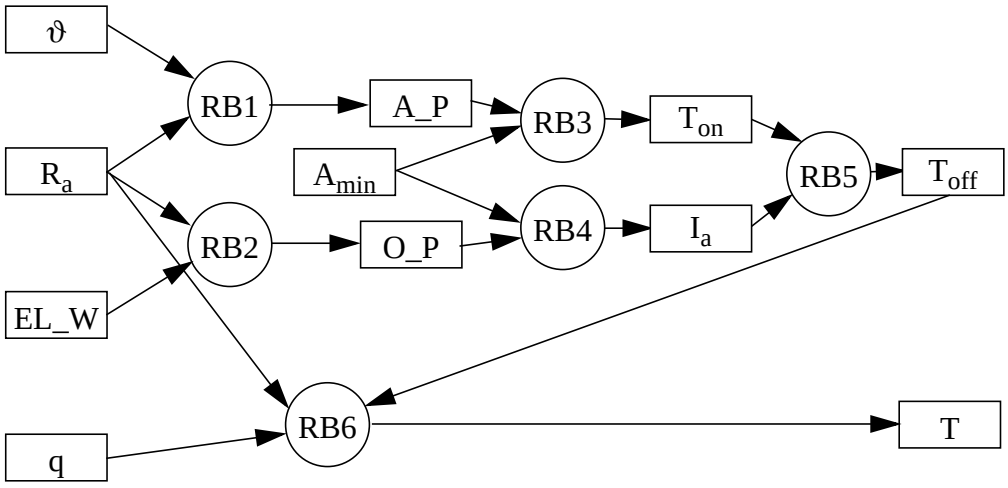
Ist die regelungstechnische Identifikation bzw. Modellierung einer Übertragungsstrecke aufgrund von Nichtlinearitäten, Stochastiken oder verkoppelten Regelkreisen nicht möglich, so bietet sich eine Fuzzy-Modellierung an. Sie ist mit bekannten Wirkungszusammenhängen zwischen Ein- und Ausgangsgrößen oder nachvollziehbaren Störungsreaktionen prinzipiell anwendbar. Praktisch wird dazu in entsprechenden Fuzzy-Werkzeugen i.d.R. ein „*Künstliches Neuronales Netz*“ eingesetzt [TIL92]. Es ist in der Lage, aus Datensätzen, die Systemeingangsdaten und Ausgangsdaten beinhalten, eine Fuzzy-Regelbasis zu erstellen. Nach einer Anzahl von Lernzyklen, die eine fortlaufende Einspeisung von Systemeingangsdaten mit ihren jeweiligen Ausgangsdaten beinhalten, entsteht eine Fuzzy-Regelbasis, die den Zusammenhang zwischen einer Anzahl Eingangsvariablen und mindestens einem Ausgang in geschlossener Form als Regelbasis bzw. als Kennfeld beschreibt. Im Ergebnis liefert diese Vorgehensweise eine Beschreibung, die für die Gesamtheit der möglichen Eingangswerte Gültigkeit besitzt. Für den Bereich der Entwicklung von Anlagen, Prozeßführungsstrategien und für die technische

Simulation [BSL96] ist die *Fuzzy Modellierung* ein geeignetes Mittel. In der Funkenerosion würden Datensätze, bestehend aus z.B. der Zündverzögerungszeit und der Anzahl der aufgetretenen Kurzschlüsse, die Eingangsgrößen bilden. Als Ausgangsgröße käme z.B. der Stellbefehl für den Antrieb in Frage. Damit ist beispielsweise die Simulation von Algorithmen der Regleradaption möglich [DFG94].

Wissensbasierte Fuzzy-Systeme (Fuzzy Expert Systems)

Der Vorteil der Fuzzy-Technik liegt, wie bereits erwähnt, in der Wissenserwerbskomponente. Bei unscharfen Expertensystemen wird der Wissenserwerb wesentlich vereinfacht, da ein Fuzzy-System direkt mit den verbalisierten, unscharfen Experteninformationen „gefüttert“ werden kann. Die einzige Aufgabe des Wissensingenieurs besteht darin, mit dem Experten zusammen die Zugehörigkeitsfunktionen bezüglich Wertebereich und Form einmalig festzulegen. Vorteilhaft ist auch, daß die Regelbasis zur Entscheidungsfindung wesentlich mehr Freiheitsgrade aufweist als z.B. ein binärer Entscheidungsbaum. Darüber hinaus bietet ein Fuzzy-System stets die Möglichkeit, Einzelheiten im System zu verifizieren und gegebenenfalls zu verändern.

Dieser Ansatz zur Integration von Fuzzy-Technik wurde zur Erstellung einer Technologiedatenbank für die Vielzahl von Bearbeitungsaufgaben benutzt. Darin sind die vom Hersteller ermittelten optimalen Einstellwerte abgelegt. Der Endanwender wählt üblicherweise eine Voreinstellung, die seinen Anforderungen nahekommt, aus und parametriert die Anlage damit. Die Technologiedatenbank ist i.d.R. nicht veränderbar und deckt natürlich nur einen Teil der in der Praxis auftretenden Bearbeitungsfälle ab. An dieser Stelle ist der Einsatz eines *Fuzzy-Expertensystems zur Technologieerstellung*, wie exemplarisch in Bild 6-9 dargestellt, von Vorteil.



ϑ: gewünschter rel. Verschleiß in %
R_a: vorgegebene Endrauhigkeit in mm
EL_W: Anzahl von Elektrodenwechseln
q: Spülparameter (mit/ohne Zwangsspülung)

A_P, O_P: Interne Hilfsparameter
A_{min}: Minimale Elektrodenstirnfläche
$t_e(=T_{on})$, $t_o(=T_{off})$: Brenn- Pausendauer
I_a: Arbeitsstrom; T: Spülparameter

Bild 6-9: Fuzzy-Architektur des FE-Technologie-Expertensystems

Dort besteht die Möglichkeit, das Expertenwissen nicht in Form von festen Zuordnungen, sondern in Form von Regeln einzugeben, die von den Anwendern zu jeder Zeit nachoptimiert werden könnten. Das dem FE-Technologie-Expertensystem zugrundeliegende Fuzzy-System beinhaltet insgesamt 6 Regelbasen, die aus zwei bzw. drei Eingangsgrößen eine Ausgangsgröße generieren. Die vom Anwender erwarteten Eingaben zur Definition der Bearbeitungsaufgabe sind die wirksame Elektrodenfläche A_{min}, die gewünschte Rauhigkeit R_a, die Anzahl der Elektrodenwechsel ELW und die relative Verschleißhöhe ϑ.

Das Fuzzy-Expertensystem bestimmt daraus die Startwerte für die Steuerparameter der Erodieranlage. Wie in [DFG94] [BWi94a] und [BWi95a] dargestellt, stellt dieser Ansatz eine gangbare Möglichkeit dar, die Anlage am Beginn der Bearbeitung zu parametrieren und gleichzeitig dem Anwender Gelegenheit zu geben, sein Spezialwissen direkt in die Prozeßsteuerung einzubringen.

Fuzzy-Klassifikation (Fuzzy Classification)

In der Mustererkennung wird anhand von Regeln, die bestimmte Auswahlkriterien für das zu erkennende Muster abbilden, nach gleichen oder ähnlichen Merkmalsausprägungen gesucht. Diese Vorgehensweise wurde bereits 1989 [XSS89] für die Funkenerosion verwendet. Dort wurde die Impulsform der funkenerosiven Entladung bewertet, um so Rückschlüsse auf den Prozeßverlauf zu gewinnen.

Meist wird eine Kombination von Fuzzy-Klassifizierern und Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) eingesetzt [Bra93]. Eine Anwendung der Fuzzy-Klassifikation in der Funkenerosion ist die Prozeßbewertung als Grundlage für eine anschließende Optimierung.

Bei allen Ansätzen ist die Wahl geeigneter Meßgrößen zur Prozeßbewertung und Steuergrößen zur Prozeßmanipulation für die Realisierung einer geschlossenen Ursache-Wirkungsrelation, wie in Bild 6-10 dargestellt, das zentrale Entwurfskriterium. Die Kernfragen lauten:

1. ***Welche Prozeßparameter repräsentieren das Prozeßgeschehen ?***

2. ***Welche Steuerparameter sollten angepaßt werden ?***

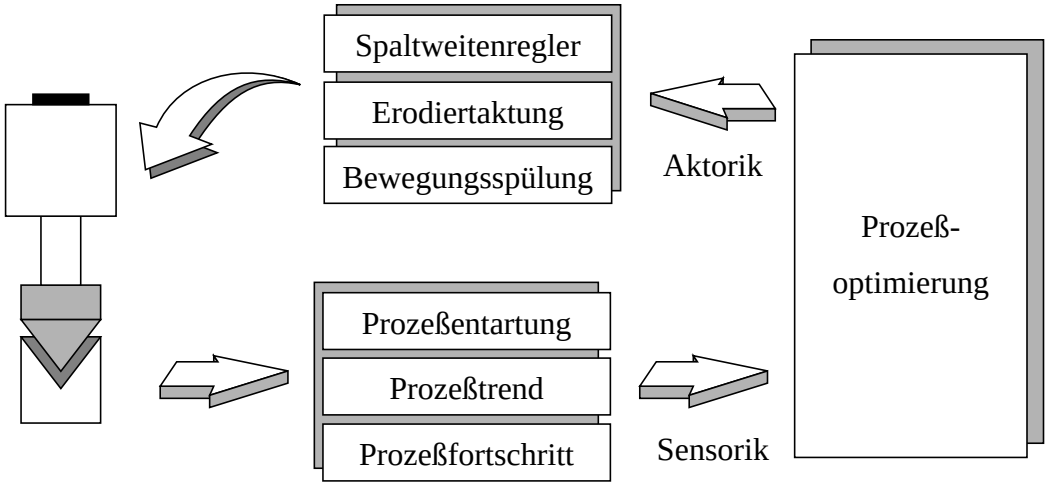


***Bild 6-10**: Ursache-Wirkungskreislauf mit Prozeßinformationen (Sensorik) und ausgewählten Steuereinrichtungen (Aktorik) zur Prozeßoptimierung*

Die erste Frage betrifft die im System vorhandene oder zu entwickelnde Prozeßsensorik. Hierzu sind verschiedene Möglichkeiten denkbar. Für den vorteilhaften Einsatz einer Fuzzy-Prozeßoptimierung für die Funkenerosion sollten nach dem Kenntnisstand vorliegender Arbeit folgende Prozeßgrößen verarbeitet werden:

- ein oder mehrere Prozeßsignale, die das Auftreten von Prozeßentartungen, wie Kurzschlüsse und insbesondere Lichtbögen, anzeigen,
- ein Signal, das die kontinuierliche Prozeßentwicklung wiedergibt, wie etwa die mittlere Zündverzögerungszeit t_{dm} oder die mittlere Spaltspannung U_s,
- eine Größe, die den Prozeßfortschritt bzw. die Prozeßunruhe wiedergibt. Hierzu eignet sich die Pinolenposition der Haupterodierachse, d.h. die Achse, die vom Spaltweitenregler geregelt wird.

Die zweite Frage betrifft die Ausgangsgrößen, die „optimiert“ bzw. „adaptiert“ werden sollen, um eine echte Prozeßverbesserung zu erreichen. Hierzu existiert eine enorm große Anzahl von Vorschlägen, die z.B. in [Sch88] oder [Kön90] sehr anschaulich dargestellt ist. Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen in Übereinstimmung mit bekannten Erkenntnissen, daß folgende Größen aus der Menge aller möglichen Steuerparameter die größte Wirkung auf den Abtragsprozeß haben:

- die Parameter des Spaltweitenreglers, die Verstärkungen in Vorwärtsrichtung k_v, Rückwärtsrichtung k_r und der Sollwert für die Zündverzögerungszeit t_{dsoll},
- die zeitlichen Impulsparameter Pausendauer t_o und eine weitere Größe *vpl*, die man als variable Impulsausblendung bezeichnen könnte,
- die Parameter der Bewegungsspülung, wobei ein Parameter die Empfindlichkeit darstellt, mit der die Bewegungsspülung auf „schlechte“ Prozeßbedingungen reagiert und ein zweiter, der die Art der Bewegungsspülung vorgibt.

Wie im anschließenden Kapitel 7 ausgeführt, sind im Rahmen vorliegender Arbeit *drei* Komponenten der Prozeßführung mit Hilfe von Fuzzy-Technologien realisiert:

1. Die Fuzzy-Technologieerstellung für vollautomatisierte Startwertgenerierung.
2. Die Fuzzy-Prozeßoptimierung, die den Prozeßzustand ermittelt und, falls notwendig, eingreift und entsprechende Steuerparameter verändert.
3. Die der Optimierung nachgeschaltete Fuzzy-Adaption des Spaltweitenreglers.

Die Realisierung der Fuzzy-Technologieerstellung ist bereits ausgeführt und wird nicht weiter vertieft. Die Fuzzy-Prozeßoptimierung mit anschließender Fuzzy-Adaption basiert auf einer speziell angepaßten Spaltweitenregelung, einer neuen Methode zur Erkennung und Behandlung von Prozeßentartungen, und einer neuartigen Bewegungsspülung. Diese Kombination der Elemente der Prozeßstabilisierung mit entsprechender eigens dafür entwickelter Sensorik und Aktorik ermöglicht erstmalig eine „integrale“ Fuzzy-Prozeßoptimierung als echte „multivariable“ Optimierung.