

4 Aufbau der entwickelten Versuchsanlage

Aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften stellt der Erosionsprozeß hohe Anforderungen an die Komponenten einer funkenerosiven Senkanlage. So machen die geringen geometrischen Erodierspaltweiten (bis zu $1\mu\text{m}$) ein schwingungsarmes Präzisionsmaschinengestell mit hochauflösendem Wegmeßsystem notwendig. Schnelle Regel- und Spülbewegungen verlangen hochdynamische Vorschubantriebe. Impulszeiten von wenigen μs und die schnelle Reaktion auf Prozeßentartungen stellen hohe Ansprüche an das Echtzeitverhalten des Prozeßführungssystems. Um eine korrekte Spaltzustandserfassung zu gewährleisten, ergibt sich die Forderung nach hoher Meßwert-Auflösung für die Sensorik. Für die elektronischen Komponenten des Prozeßführungssystems kommt erschwerend die elektromagnetische Störeinstrahlung durch den Abtragsprozeß hinzu [WLG98]. So müssen für diese Bauteile besondere Maßnahmen für einen störresistenten Aufbau getroffen werden. Außerdem ist es notwendig, diese Komponenten mit Überwachungsmechanismen auszustatten, um Fehlfunktionen zu erkennen und zu beheben.

Bild 4.1 zeigt die entwickelte Versuchsanlage. Das Maschinengestell entstammt einer kommerziell verfügbaren Erodiermaschine der Fa. Zimmer+Kreim (PEG 600). Es verfügt über vier verfahrbare Achsen (X, Y, Z, C), Dielektrikumsversorgung und Wegmeßsystem. Das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Prozeßführungssystem ist in der Lage, sämtliche Maschinenfunktionen zu steuern.



Bild 4.1: Darstellung der Versuchsanlage

Um den zeitlichen Anforderungen gerecht zu werden, die der Erosionsprozeß an das Prozeßführungssystem stellt, wurde auf der Aktor- / Sensor-Ebene ein modulares Konzept verfolgt. Die einzelnen Sensoren/Aktoren sind dabei „intelligente“ Knoten in einem Netzwerk, die jeweils autark eine hochspezialisierte Aufgabe ausführen. Dadurch wird eine weitgehende Parallelisierung erreicht, damit schnelle Reaktionszeiten und hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten erzielt werden können. Als zentrale Koordinationseinheit in dieser Struktur dient der Prozeßrechner, an den die „intelligenten“ Aktoren/Sensoren angebunden sind. Bild 4.2 zeigt den schematischen Aufbau dieses Prozeßführungssystems mit seinen Hauptkomponenten.

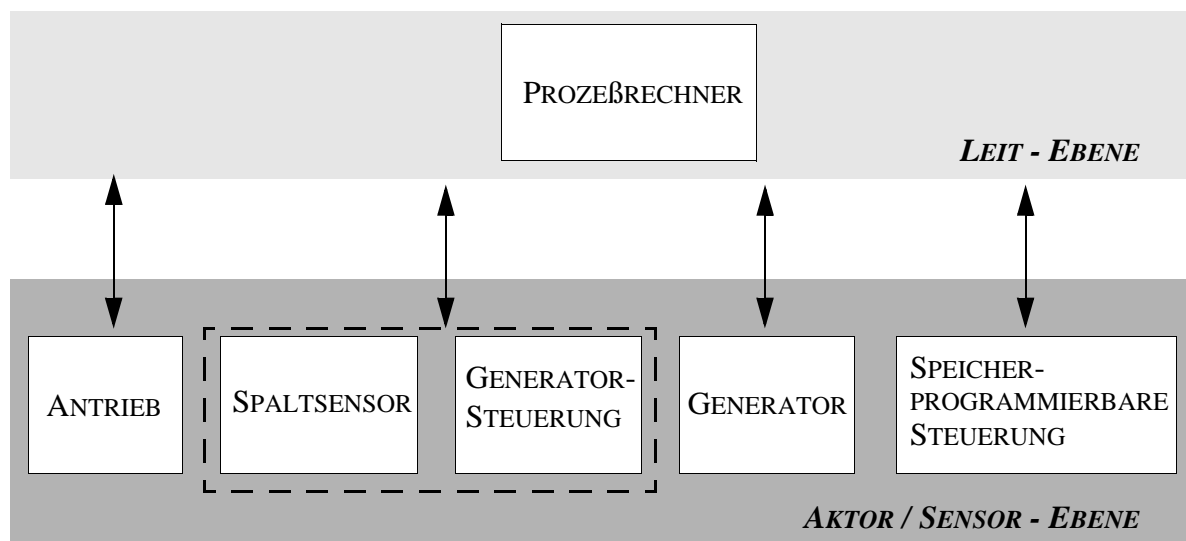


Bild 4.2: Schematischer Aufbau des Prozeßführungssystems

Nachfolgend werden zunächst die Module dieses Prozeßführungssystems anhand ihrer Funktionalität beschrieben, um dann die Kommunikationsbeziehungen zu betrachten.

4.1 Prozeßrechner

Die Hauptaufgabe des Prozeßrechners besteht in der Steuerung und Optimierung des funkenerosiven Senkprozesses. Dies beinhaltet die Spaltweitenregelung sowie die Regleradaption und Optimierung. Darüber hinaus müssen für die mehrachsige Bearbeitung eine Bahninterpolation und eine NC-Satzbearbeitung auf dem Prozeßrechner erfolgen.

Um diese Aufgaben zu erfüllen, ist eine ständige Kommunikation mit allen Sensoren und Aktoren erforderlich. Für die Regelung ist der Empfang von Prozeßdaten und das Senden von Verfahrbefehlen an die Antriebe notwendig. Außerdem müssen permanent die Achspositionen sowie Statusinformationen über Betriebszustände abgefragt werden. Dazu sind zum einen umfangreiche Schnittstellen unumgänglich, zum andern stellen diese Aufgaben hohe Anforderungen an das Echtzeitverhalten. Der Prozeßrechner ist deshalb als VMEbus-Rechnersystem ausgeführt [NN93]. Ein Echtzeitbetriebssystem übernimmt die Planung und Synchronisation der zeitkritischen Aufgaben [NN99b].

Zur Analyse des funkenerosiven Senkprozesses können Prozeßdaten auf dem Prozeßrechner gesammelt und verdichtet werden, um sie dann über das lokale Rechnernetz (Ethernet) auf einer SUN-Workstation in Echtzeit zu visualisieren. Dazu mußten auf dem Prozeßrechner umfangreiche Netzwerk-Protokollmechanismen implementiert werden. Eine Speicherung von Daten zur späteren statistischen Auswertung ist ebenfalls möglich.

4.2 Antriebssystem

Um ein hochgenaues und dynamisches Verfahren der einzelnen Achsen zu ermöglichen, wurden die im Maschinengestell herstellerseitig eingesetzten DC-Motoren durch AC-Synchronmotoren ersetzt. Ein in der Servosteuerung des Antriebs vorhandener spezieller Regelungsprozessor [KiSc93] ermöglicht die vollständig digitale Antriebsregelung. Auch die Ermittlung der Achsposition aus den Signalen des Wegmeßsystems sowie die Lageregelung erfolgt im Antrieb. Dadurch werden kürzeste Zykluszeiten innerhalb des Lagereglers realisiert.

Die Kommunikation zwischen Prozeßrechner und Antriebssystem erfolgt mittels Feldbustechnik. Lage- und Geschwindigkeitsinformationen können somit in digitaler Form ausgetauscht werden, ohne daß Verfälschungen durch Signalwandlung oder Störeinflüsse auftreten können.

4.3 Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)

Das Maschinengestell verfügt über umfangreiche Hilfsaggregate (Pumpen, Tankmotor etc.), die gesteuert und überwacht werden müssen. Auch die Leistungsversorgung von Generator und Antriebssystem muß koordiniert werden. Dazu kommen Kontrollfunktionen im Zusammenhang mit der Sicherheitssensorik (Temperaturfühler, Not-Aus etc.). Dieser Aufgabenbereich erfordert umfangreiche Ein- und Ausgabefunktionalitäten und wird deshalb von einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) übernommen, die unabhängig vom Prozeßrechner als externe Einheit realisiert wurde. Da es notwendig ist, durch den Prozeßrechner Schaltfunktionen innerhalb der SPS auszulösen und den aktuellen Maschinenstatus abzufragen, wurde ein Kommunikationsprotokoll zwischen SPS und Prozeßrechner implementiert.

4.4 Generator

Als Prozeßstromquelle findet ein Generator Verwendung, der nach dem Prinzip einer geregelten Stromquelle arbeitet [BWB95]. Wesentliche Eigenschaft dieses Generators sind die steilen Flanken bei Strom- und Spannungsanstieg (Bild 4.3). Diese Eigenschaft führt zu einer erhöhten Zündwilligkeit des Funkenspaltes, wodurch sich stark verkürzte Zündverzögerungszeiten ergeben.

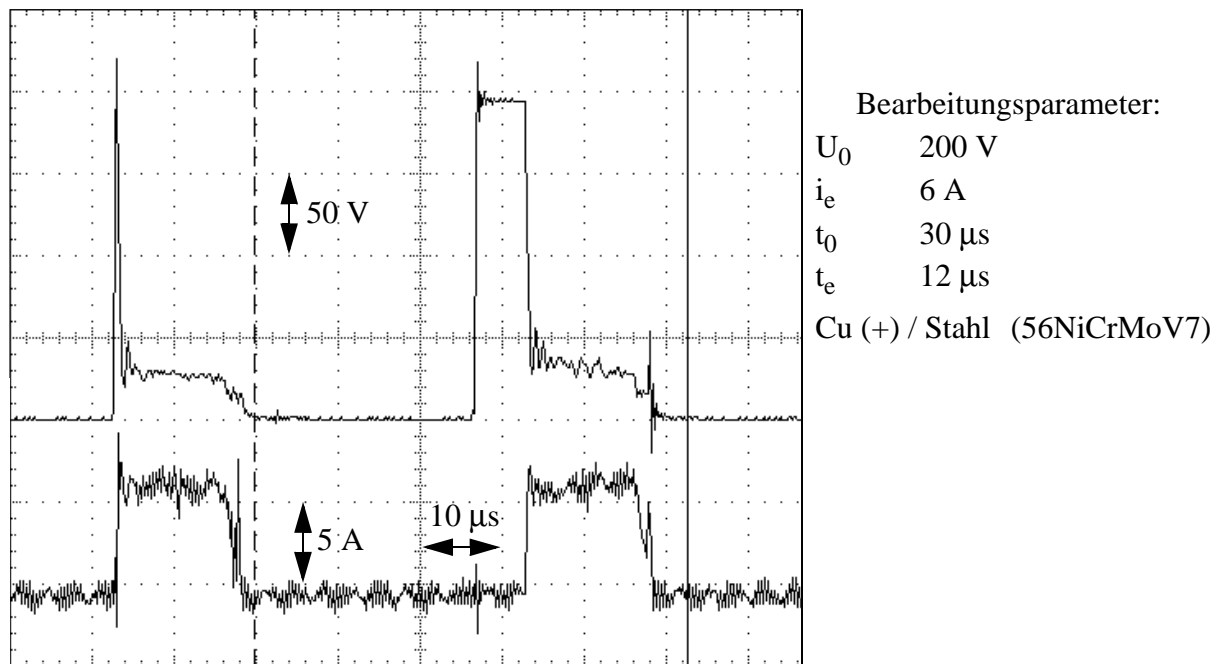


Bild 4.3: Spannungs- und Stromverlauf bei dem eingesetzten Generator

Eine Analyse der Zündverzögerungszeiten von Impulsen mit gleichen Dauern und Amplituden aus unterschiedlichen Erodiergeneratoren ergab, daß mit zunehmender Flankensteilheit der Zündspannung und des einsetzenden Arbeitsstromes die Zündverzögerungszeit stark zurückgeht. So lag die Mehrzahl der Zündverzögerungszeiten bei Verwendung eines statischen Impulsgenerators bei Impulsen von 100 μ s Entladedauer um 10 μ s, wohingegen bei dem eingesetzten Generatortyp bei gleicher Entladedauer ein Großteil der Impulse eine Zündverzögerungszeit von nur 5 μ s aufwies.

Dieser Umstand hat erhebliche Auswirkungen auf die gesamte Prozeßführung, da er die Strategien zur Lichtbogenerkennung sowie zur Spaltweitenregelung und Regleradaption unmittelbar beeinflusst. Innerhalb dieser Arbeit wird auf die sich daraus ergebenden Konsequenzen noch ausführlich eingegangen.

Die Parametrierung und Überwachung des Generators erfolgt durch den Prozeßrechner. Zündspannung und Soll-Strom sind auf diese Weise einstellbar. Die Erodierimpulse werden von einem externen Taktsignal gesteuert.

4.5 Spaltsensor und Generatorsteuerung

Diese Komponente stellt die Schnittstelle des Prozeßrechners zum Erosionsprozeß dar. Sie ist sowohl Akteur, als auch Sensor. Der Erosionsprozeß stellt hohe zeitliche Anforderungen an dieses Modul (Reaktionszeiten, Meßauflösung etc.). Deshalb mußte diese Komponente mit Hilfe von logischen Schaltwerken realisiert werden.

Folgende Aufgaben werden von diesem Sub-System erfüllt:

- Isoenergetische Takt-Steuerung des Generators
- Lichtbogen-Erkennung und -Unterdrückung
- Erkennung und Behandlung von Kurzschlüssen und Leerläufen
- Messung der Zündverzögerungszeit (t_d)
- Vorverarbeitung und Filterung von Prozeßdaten
- Aufzeichnung von Prozeßdaten
- Kommunikation mit dem Prozeßrechner

Für den Aufbau des Moduls wurde ebenfalls das Konzept von Hierarchisierung und Parallelisierung angewandt. So befindet sich auf unterster Ebene eine elektronische Schaltung zur Spaltzustandserfassung. Programmierbare Logikbausteine in FPGA-Technik (Field Programmable Gate Array) dienen der hochschnellen Verarbeitung von prozeßnahen Signalen und ermöglichen eine präzise Zeitmessung sowie eine Reaktionszeit im ns-Bereich bei der Behandlung von Kurzschlüssen, Leerläufen und Lichtbögen. Der Mikro-Prozessor auf oberster Ebene bietet den Vorzug der einfachen Programmierbarkeit und ermöglicht damit ein hohes Maß an Flexibilität.

Außerdem wird erst durch den Mikro-Prozessor das Sensor- /Aktor-Modul zu einer intelligenten Komponente des Prozeßführungssystems. Damit sind die Voraussetzungen für die Ankopplung an den Prozeß-Leitrechner über ein höheres Kommunikationsprotokoll erfüllt.

Die Implementation des Moduls „Spaltsensor und Generator-Steuerung“ ist in Bild 4.4 zu sehen. Nachfolgend wird die Funktionalität der Sub-Komponenten beschrieben.

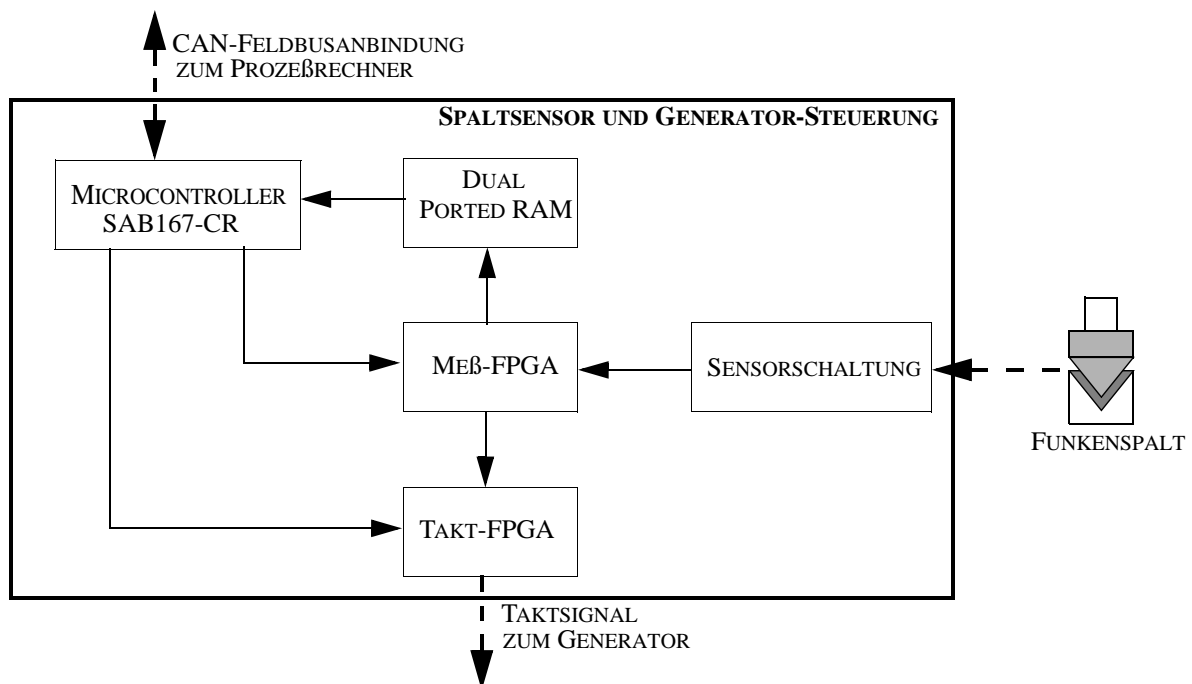


Bild 4.4: Schematischer Aufbau der Spalt-Sensorik und Generator-Steuerung

4.5.1 Sensorschaltung

Aufgabe dieser Schaltung ist der Vergleich der Spaltspannung mit verschiedenen Komparator-Schwellwerten. Um jeden Erodier-Impuls möglichst kennzeichnend zu charakterisieren, wurden vier Komparator-Schwellwerte innerhalb der Sensor-Schaltung implementiert (Bild 4.5).

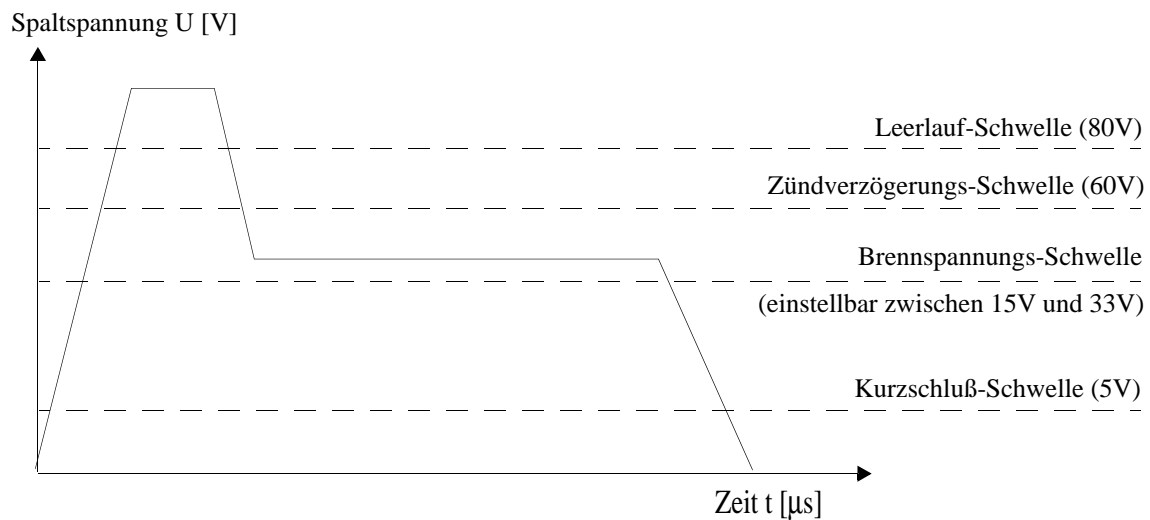


Bild 4.5: Von der Spaltsensorik detektierte Schwellwerte

Mittels dieser Schwellwerte ist es möglich, Leerläufe und Kurzschlüsse zu erkennen, die Zündverzögerungszeit zu messen sowie verschiedene Lichtbogenkriterien auszuwerten.

4.5.2 Meß-FPGA

Aufgabe dieses Logik-Schaltwerkes ist die Registrierung des Über- bzw. Unterschreitens von Komparatorschwellwerten. Dabei erfolgt bei jeder Über- bzw. Unterschreitung eines Schwellwertes die Protokollierung der Zeit. Anhand von Bild 4.6 wird erkennbar, wie auf diese Weise Impulskenngrößen (hier die Zündverzögerungszeit) ermittelt werden.

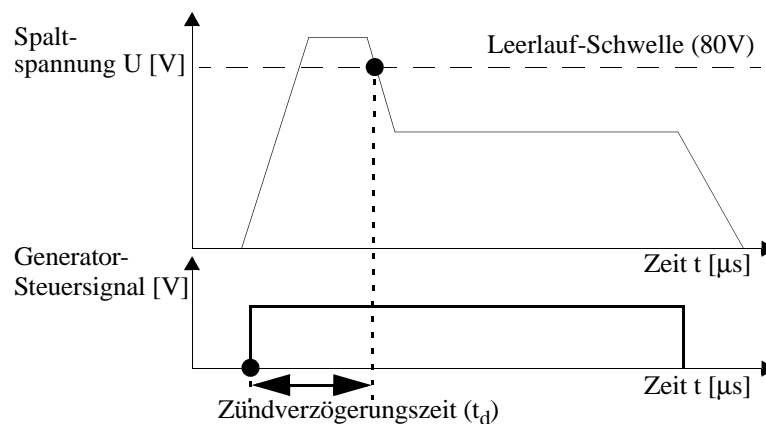


Bild 4.6: Ermittlung der Zündverzögerungszeit (t_d)

Kurzschlüsse und Leerläufe werden ebenfalls von diesem Logik-Baustein erkannt und behandelt, indem das Überwachen zeitlicher Grenzwerte in die Schwellwert-Beobachtung einbezogen wird. Das Schaltwerk ist in der Lage, das Generator-Steuersignal zu deaktivieren und damit einen Impuls abzubrechen, unmittelbar nachdem eine lichtbogenartige Fehlentladung erkannt wurde. Damit ist eine schnelle Reaktion auf Prozeßentartungstendenzen sichergestellt. Als Fehlentladungskriterium wird die Brennspannungsschwelle herangezogen (siehe auch Kapitel 5 "Erkennung lichtbogenartiger Fehlentladungen"). Zur späteren Auswertung der detektierten Schwellwerte, der gemessenen Zeiten und der erkannten Lichtbögen werden die gesammelten Informationen für jeden Impuls in einen Speicher (Dual-Ported-RAM) übertragen.

4.5.3 Takt-FPGA

Dieser FPGA-Baustein erzeugt das isoenergetische Steuersignal für den Generator. Entladedauer (t_e) und Pausendauer (t_0) lassen sich in weiten Grenzen durch den Mikrocontroller einstellen. Um Fehler-Toleranz zu erreichen und um Fehlfunktionen aufgrund elektromagnetischer Störeinflüsse zu vermeiden, überwacht dieser Baustein das Meß-FPGA.

4.6 Mikrocontroller

Nach jedem Erodier-Impuls übernimmt der Mikrocontroller die Meßergebnisse aus dem Dual-Ported-RAM. Anschließend wird die Vorverarbeitung dieser Daten durchgeführt, indem die Zündverzögerungszeiten, Leerläufe, Kurzschlüsse und Lichtbögen aufaddiert werden. Es ist auch möglich, für ganze Impulsfolgen die Meßergebnisse im Speicher des Mikrocontrollers abzulegen, um sie später vollständig zum Prozeßrechner zu übertragen. Der Mikrocontroller kommuniziert ständig über seine CAN-Feldbusschnittstelle mit dem Prozeßrechner, um Prozeßdaten, etwa zum Zwecke der Spaltweitenregelung, weiterzugeben.

Die weitergehende Behandlung lichtbogenartiger Fehlentladungen geschieht ebenfalls im Mikrocontroller. Durch die Impulsklassifikation erlangt der Controller Kenntnis von einer Fehlentladung, die durch das Meß-FPGA detektiert und abgeschaltet wurde. Über Kettenzähler ermittelt der Mikrocontroller die Anzahl der in Folge aufgetretenen Lichtbögen. Überschreitet der Wert der Folgelichtbögen einen einstellbaren Grenzwert N_{VPL} , dann unterbricht der Mikrocontroller die Takterzeugung für einen wählbaren Zeitraum und erzeugt damit eine verlängerte Pausenzeit (T_{VPL} - variable **P**ausen**l**änge). Ereignen sich nach dieser Pause weitere Lichtbögen in Folge, übermittelt der Mikrocontroller nach dem Überschreiten des nächsten Grenzwertes $N_{spül}$ eine Lichtbogenwarnung an den Prozeßrechner, die dieser in eine Spülbewegung umsetzt.

4.7 Kommunikationsbeziehungen innerhalb des Prozeßführungssystems

Der hierarchische Aufbau des entwickelten Systems aus intelligenten Aktoren/Sensoren, die an einen zentralen Prozeßrechner angebunden sind, setzt leistungsfähige Kommunikationsmechanismen voraus. Durch die elektromagnetischen Emissionen des funkenerosiven Senkprozesses werden zusätzliche Anforderungen hinsichtlich Störresistenz sowohl an das Übertragungsmedium, als auch an das Übertragungsprotokoll gestellt. An die Kommunikationsverbindung zu den Sensoren / Aktoren, die unmittelbar in den Vorgang zur Regelung der Spaltweite involviert sind, werden höchste Anforderungen hinsichtlich des Zeitverhaltens gestellt. So müssen in kurzen Zyklen Daten zuverlässig und mit hoher Geschwindigkeit übertragen werden. Zusätzlich müssen in bestimmten Situationen priorisierte Meldungen ohne Verzug abgesetzt werden, um schnelle Reaktionen sicherzustellen.

Bild 4.7 zeigt die Struktur des Prozeßführungssystems sowie die verwendeten Datenpfade. Die Anbindung der Sensoren /Aktoren wurde durchgängig über Feldbussysteme an den VMEbus realisiert.

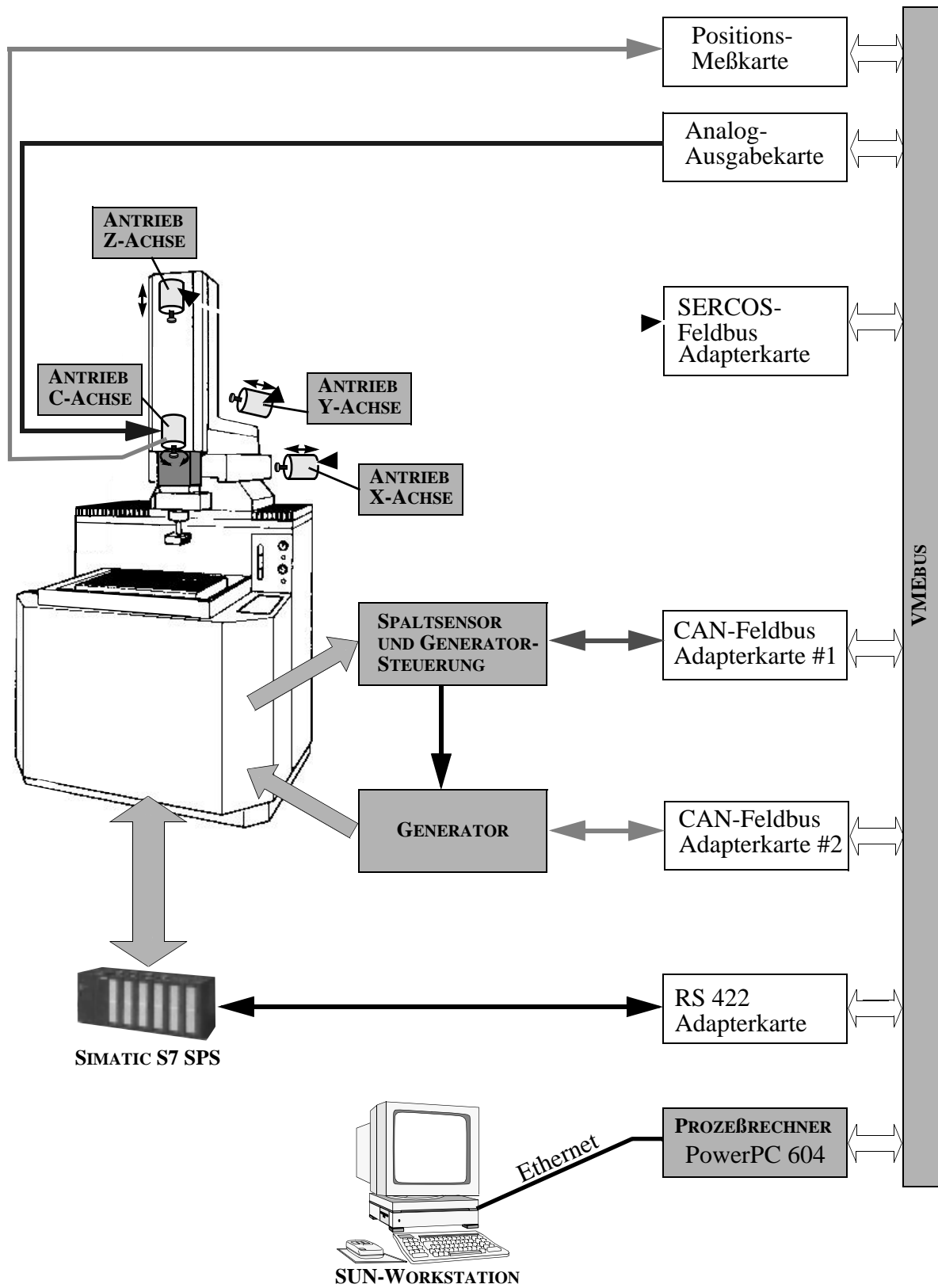


Bild 4.7: Blockschaltbild des Prozeßführungssystems

Die Auswahl des jeweiligen Feldbussystems richtet sich nach dem von der Kommunikationsverbindung geforderten Anforderungsprofil:

Anzubindender Sensor / Aktor	Anforderung	Feldbussystem
Achsantriebe	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Übertragungsrate • in festen Zyklen werden definierte Datensätze übertragen (Positions- und Geschwindigkeits-Ist- und Sollwerte) • Mehrere Kommunikations-Teilnehmer • Exakte zeitliche Synchronisation bei der Übergabe von Ist- und Sollwerten 	SERCOS
Generator	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Übertragungsrate • Übergabe von Strom- und Spannungs- Sollwerten • zyklische Diagnosefunktion • Mehrere Kommunikations-Teilnehmer (wenn mehrere Generatoren parallel geschaltet sind) 	CAN
Spaltsensor und Generatorsteuerung	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Übertragungsrate • in festen Zyklen Übergabe von Prozeßdaten • schnelles versenden priorisierter Nachrichten (z.B. Lichtbogenwarnung) • Parametrierung und Start der Generatorsteuerung (t_0, t_e etc.) 	CAN
Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	<ul style="list-style-type: none"> • Punkt zu Punkt Kopplung • geringe Übertragungsrate • Übergabe von Befehlen zur Maschinensteuerung • Maschinenstatusabfrage 	RS 422

Tabelle 4.1: Anforderungsprofil an die Feldbusanbindung der Sensoren /Aktoren

Während des Erosionsvorganges mit kurzen Impulsperioden entsteht ein hohes Datenvolumen, da für jeden Impuls zahlreiche Meßwerte anfallen. Zur Bewältigung dieser Informationsmengen sind leistungsfähige Bussysteme erforderlich, um den Spaltsensor anzukoppeln [BeWi94]. Damit diese Ankopplung auch über ein Feldbussystem realisiert werden kann, muß der Spaltsensor über eigene Rechenleistung verfügen, so daß die Daten vor dem Versenden verdichtet werden können. Nur auf diese Weise ist es möglich, bei einer CAN-Übertragungsrate von 1 Mbit/s den Spaltsensor an den Prozeßrechner anzubinden.

Bild 4.8 zeigt den Aufbau der zyklisch übertragenen Datenpakete, die unter Berücksichtigung des CAN-Protokoll-Overheads minimal alle $111 \mu\text{s}$ versandt werden können. Durch die Ankopplung des Spaltsensors über einen Feldbus ist größtmögliche Flexibilität bei der Wahl der Hardwareplattform für den Prozeßrechner gewährleistet, da CAN-Feldbusadapter für alle gängigen Systeme (VME, PCI etc.) verfügbar sind.

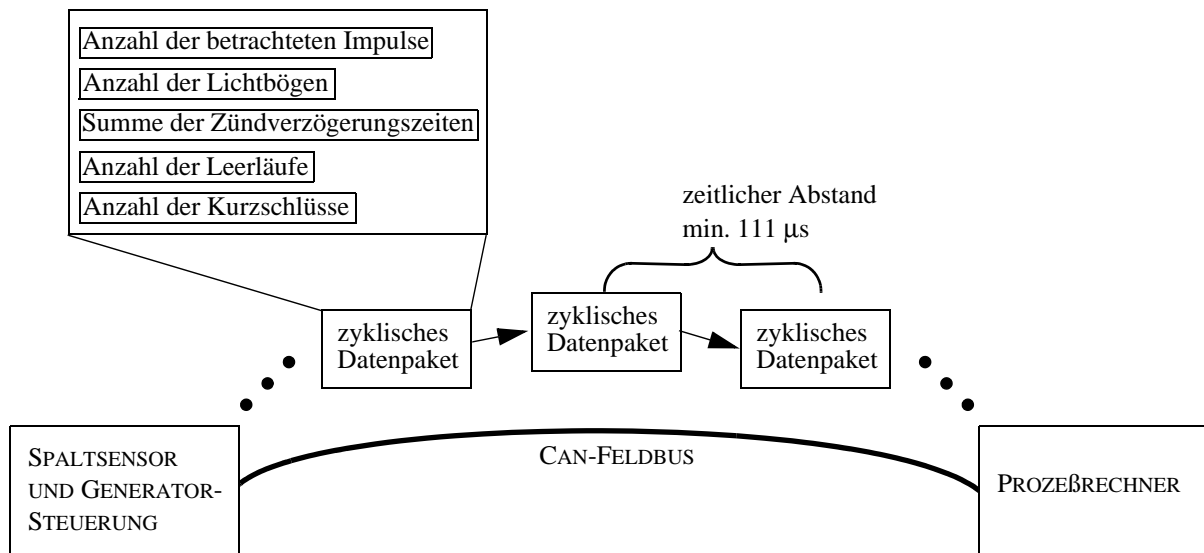


Bild 4.8: Kopplung zwischen Spaltsensor und Prozeßrechner über CAN-Feldbus