

## 8 Numerische Bahnsteuerungen für die Funkerosion

Durch eine numerische Steuerung (NC) erhöht sich die Flexibilität einer Fertigungseinrichtung, indem Art und Reihenfolge der Fertigungsvorgänge für ein Werkstück in einem Steuerprogramm festgelegt werden können [Wec89]. Moderne NC-Systeme auf der Basis von Mikrocomputern sind in der Lage, mehrere Maschinenachsen gleichzeitig anzusteuern und mittels geometrischer Interpolation eine Bahnbewegung zu erzeugen.

Der Funkerosion eröffnen sich durch die mehrachsige Bearbeitung neue Anwendungsfelder. Beispielsweise wird bei der Planetärerrosion dem Einsenkvorgang eine orbitale Kreisbewegung überlagert [Bon79]. Dadurch verbessern sich die Spülbedingungen und die Stabilität des Abtragsprozesses wird erhöht [KöBe85]. Dies ist besonders bei schwierigen geometrischen Verhältnissen von Bedeutung. Die Planetärerrosion vereinfacht außerdem die Elektrodenherstellung. Bei der Erosion mit nur einer Achse müssen für die Schrupp- und Schlichtbearbeitung Elektroden unterschiedlicher Größen verwendet werden. Dies wird notwendig, weil sich während der Schruppbearbeitung eine größere Erosionsspaltweite einstellt und die Schrupp-Elektrode demnach ein größeres Untermaß als die Schlicht-Elektrode aufweisen muß. Bei der Planetärerrosion kann bei einem Schlichtvorgang die gleiche Elektrode zum Einsatz kommen wie bei der vorangegangenen Schruppoperation. Die unterschiedlichen Erosionsspaltweiten bei der Schrupp- und Schlichtbearbeitung werden durch die Planetärbewegung kompensiert. Bild 8.1 zeigt verschiedene Planetärstrategien.

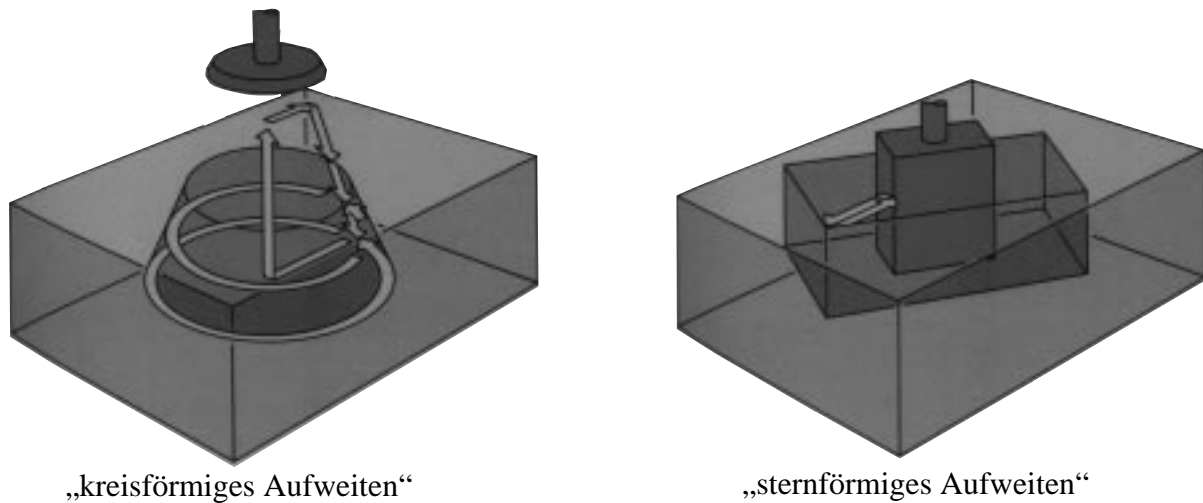


Bild 8.1: Unterschiedliche Planetärstrategien nach [NN88]

Die Möglichkeit, das funkenerosive Senken auch als echtes formgebendes Verfahren einzusetzen, ergibt sich durch die Bahnerosion [Sch79]. So ist es etwa mit einfachen Stiftelektroden möglich, ähnlich dem NC-Fräsen komplexe Geometrien zu erzeugen [Waß92]. Darüber hinaus sind mit dieser Technologie Hinterschnitte und die Herstellung von Schraubformen möglich.

Die in funkenerosiven Senkanlagen eingesetzten numerischen Steuerungen unterscheiden sich jedoch erheblich von Standardsteuerungen. So müssen umfangreiche technologische Parameter für Generator, Impuls- und Pausendauer, Spaltweitenregler und Spülung über Datensätze durch die Steuerung einstellbar sein. Der Vorschub erfolgt nicht nach einer vorgegebenen Geschwindigkeit, sondern wird durch einen Spaltweitenregler dem Prozeßverlauf angepaßt.

Neben einer Vorwärtsbewegung im Sinne der Bahnkontur reagiert der Spaltweitenregler auf Kurzschlußtendenzen mit einer Vergrößerung der Spaltweite und leitet eine Rückzugsbewegung entlang der vorgegebenen Bahn ein. Um Prozeßentartungen zu begegnen, ist es notwendig, Spülbewegungen durchzuführen und die programmierte Bahn kurzfristig für eine Abhebebewegung zu verlassen. Diese Besonderheiten machen Spezialsteuerungen für die mehrachsige Bahnerzeugung in funkerosiven Senkanlagen notwendig.

Das Ziel dieser Arbeit war es, die bislang durch die Senkerosion gewonnenen Erkenntnisse auch innerhalb der Bahn- und Planetärerosion anzuwenden. Dadurch ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die zu verwendende numerische Steuerung:

- Die Entwicklung und Erprobung von unterschiedlichen Verfahren zur Spaltweitenregelung und Prozeßoptimierung muß durch die numerische Steuerung unterstützt werden.
- Es müssen Möglichkeiten zur Aufzeichnung und Visualisierung charakteristischer Prozeßkenngrößen während der Bearbeitung vorhanden sein, um Prozeßführungsstrategien untersuchen zu können.
- Die im Eigenbau entwickelten Schaltungen zur Impuls-Steuerung und Erfassung von Prozeßkenngrößen müssen eingebunden werden.
- Die vorhandene Versuchsanlage in ihrer gegenwärtigen Aggregate-Konfiguration (Antriebe, Pumpen, Generator etc.) muß vollständig unterstützt werden.

Nur durch eine Eigenentwicklung auf dem Gebiet der numerischen Steuerungen für die Funkerosion konnten alle genannten Anforderungen erfüllt werden.

### **8.1 Gliederung einer numerischen Steuerung in Funktionsblöcke**

Der Steuerungskern einer numerischen Steuerung läßt sich nach [NN85] in drei Funktionsblöcke gliedern:

#### *I Bedien- und Steuerdaten Ein- / Ausgabe*

Dieser Funktionsblock umfaßt sämtliche für die Kommunikation Mensch-Steuerung erforderlichen Funktionen [Kle84]. Die NC-Steuerdaten werden hier zumeist noch in einer für den Bediener gut lesbaren Art repräsentiert (z.B. nach DIN 66025).

#### *II NC-Datenverwaltung und -aufbereitung*

In diesem Funktionsblock werden die Daten aus ihrer bedienerorientierten Darstellung in eine zur effizienten Weiterverarbeitung geeignetere Form konvertiert. Dabei erfolgt auch die Verarbeitung von Programmierhilfen wie Unterprogrammtechnik, Zyklen und Parameterrechnung [Stu80].

#### *III Geometriedatenverarbeitung*

Die Aufgabe dieses Funktionsblocks ist das kontrollierte Bewegen von einer oder mehreren Achsen.

Diese Aufteilung entspricht dem Grundausbau einer numerischen Steuerung. Bei Bedarf müssen weitere Funktionsblöcke beispielsweise zur Diagnose ergänzt werden.

Der Funktionsblock *Geometriedatenverarbeitung* hat eine besondere Bedeutung. Bereits durch seinen alleinigen Einsatz ist es möglich, durch einfache Befehlsfolgen Achsen zu bewegen und Basisfunktionen einer numerischen Steuerung zu erfüllen. Er wird deshalb im Folgenden eingehender beschrieben:

Nach [Wal87] sind die wesentlichen Bestandteile dieses Funktionsblockes die Funktionen zur Sollwerterzeugung, Sollwertbeeinflussung und Lageregelung. Bild 8.2 zeigt den vereinfachten Datenfluß zwischen den genannten Grundfunktionen.

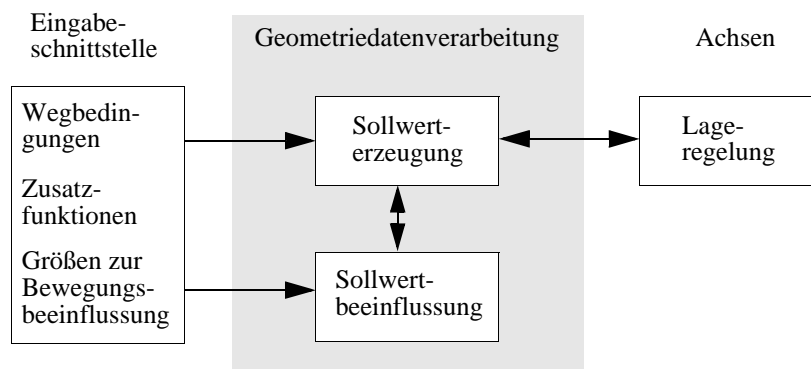


Bild 8.2: Vereinfachter Datenfluß zwischen den Grundfunktionen der Bahnsteuerung

Durch den NC-Datensatz wird der Verfahrensweg definiert, indem die Zielkoordinate in Verbindung mit einer Information über die Art der Bahn angegeben wird. Nach [Bin79] ist es die Aufgabe der *Sollwerterzeugung* oder Interpolation, auf der programmierten Bahn Stützpunkte zu berechnen, die an die Lageregelung weitergegeben werden. Bei der Stützpunktberechnung unterscheidet man nach Art und Verfahren.

Die Interpolationsart beschreibt die Ordnung des vom Interpolator zu erzeugenden Konturverlaufs. Gebräuchlich sind Geraden- und Kreisinterpolation. Für spezielle Anwendungen (z.B. Freiformflächen) kommen weitere Arten in Betracht z.B. *Splines*. Das Interpolationsverfahren kennzeichnet den verwendeten Algorithmus. Um eine schnelle Berechnung auch bei kostengünstiger Mikroprozessortechnik zu gewährleisten, werden möglichst einfache Rechenoperationen eingesetzt. Interpolationsverfahren für die Geradeninterpolation sind nach [Wec89] das *Suchschrittverfahren* und der *Digital Differential Analyzer (DDA)* Algorithmus. Letzterer eignet sich auch zur Interpolation von Kreisen. Bei leistungsfähigen Prozessoren kann die Interpolation auch durch direkte Funktionsberechnung erfolgen.

Die *Sollwertbeeinflussung* hat die Aufgabe, Bahnverzerrungen zu reduzieren. Dies kann etwa durch eine Beschleunigungsbegrenzung erreicht werden. Häufig wird über die Sollwertbeeinflussung auch eine Möglichkeit realisiert, um extern auf die Bahngeschwindigkeit einzuwirken (*Vorschub-Override*).

Neben den genannten Grundfunktionen übernimmt die Geometriedatenverarbeitung oftmals auch weitere Aufgaben, etwa zur Korrektur oder Überwachung. Korrekturfunktionen dienen vorwiegend dazu, mechanische Unzulänglichkeiten der Achsen auszugleichen (z.B. Spindelsteigungsfehler, Maschinenformfehler oder Nachgiebigkeit). Durch eine Überwachung können Fehler frühzeitig erkannt und behandelt werden. Auch die Realisierung anwendungsabhängiger Sonderfunktionen innerhalb der Geometriedatenverarbeitung ist denkbar.

## 8.2 Konzeption einer numerischen Steuerung für Funkerosion

Bei einer konventionellen numerischen Steuerung erfolgt der Vorschub entsprechend einer vorgegebenen Bahngeschwindigkeit. Diese Geschwindigkeit wird durch den NC-Datensatz definiert und kann gegebenenfalls durch den Benutzer von außen angepaßt werden (durch den sog. *Vorschub-Override*). Der Maschinendatensatz gibt für die einzelnen Maschinenachsen das maximal mögliche Beschleunigungsvermögen vor. Damit kann für jeden NC-Datensatz ein Geschwindigkeitsprofil errechnet werden, wie es in Bild 8.3 dargestellt ist.

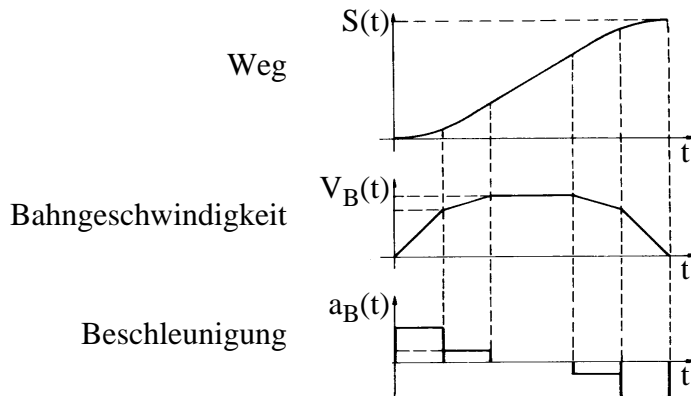


Bild 8.3: Geschwindigkeitsverlauf bei einer Beschleunigung in zwei Stufen

Der vorgegebene Geschwindigkeitsverlauf vereinfacht die Bahnberechnung. So kann der Interpolator etwa in der Phase konstanter Geschwindigkeit von einem festen Weginkrement ausgehen, das pro Interpolationstakt zurückgelegt wird. Erweiterungen sind notwendig, wenn die Geschwindigkeiten einzelner Achsen sich plötzlich stark ändern (z.B. beim Verfahren von Ecken und Kanten). Aufgrund des begrenzten Beschleunigungsvermögens der Vorschubantriebe können dann Abweichungen von der programmierten Kontur entstehen. Diesem Problem wird innerhalb einer modernen numerischen Steuerung durch eine vorausschauende Geschwindigkeitsführung begegnet. Diese Funktion wird im allgemeinen als *Look Ahead* bezeichnet. Dabei werden NC-Datensätze vor ihrer Verarbeitung auf plötzliche Wechsel im Geschwindigkeitsverlauf der Achsen überprüft, um dann die Bahngeschwindigkeit entsprechend zu korrigieren.

Bei der Funkerosion ist der Bahngeschwindigkeitsverlauf durch den Prozeß vorgegeben. Im Falle eines leerlaufartigen Prozeßverlaufes muß die Werkzeug-Elektrode in Bahnrichtung verfahren werden. Bei gehäuft auftretenden Kurzschlüssen ist ein Rückzug der Werkzeug-Elektrode entlang der Bahn notwendig. Die Elektrodenbewegung wird von einem Spaltweitenregler bestimmt, der in die numerische Steuerung integriert werden muß. Weil der Erosionsprozeß schnelle Reaktionen verlangt, muß die Spaltweitenregelung in der Lage sein, innerhalb weniger Millisekunden die Bahngeschwindigkeit zu ändern. Konzepte für numerische Steuerungen, die von einem weitgehend konstanten Geschwindigkeitsverlauf während eines NC-Datensatzes ausgehen, sind für die Funkerosion nicht verwendbar.

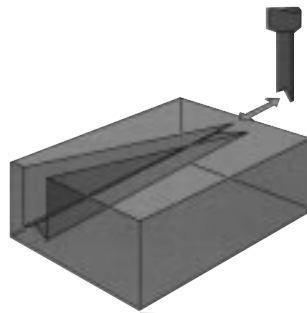


Bild 8.4: Funkenerosive Bearbeitung entlang einer Linie in 3-D

Die Anbindung der Vorschubantriebe an die numerische Steuerung erfolgte über eine digitale Schnittstelle in Form eines SERCOS-Feldbussystems. Dieser Feldbus wurde unter Mitwirkung des VDW (Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V.) mit dem Ziel spezifiziert, eine herstellernerneutrale Kommunikationsschnittstelle zwischen einer numerischen Steuerung und den Antrieben bereitzustellen.

Der SERCOS Feldbus verwendet einen Lichtwellenleiter als Übertragungsmedium und erreicht damit eine hohe Resistenz gegenüber elektromagnetischer Störeinstrahlung, wie sie besonders im Umfeld funkenerosiver Senkanlagen anzutreffen ist. Die Feldbus-Topologie basiert auf einer Ring-Struktur (siehe Bild 8.5) und besteht aus einem sog. *Busmaster* (der numerischen Steuerung) und den sog. *Busslaves* (den Antriebsreglern für die einzelnen Vorschubachsen).

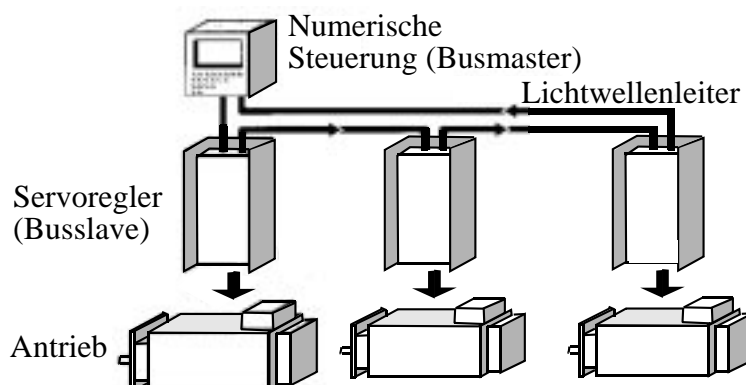
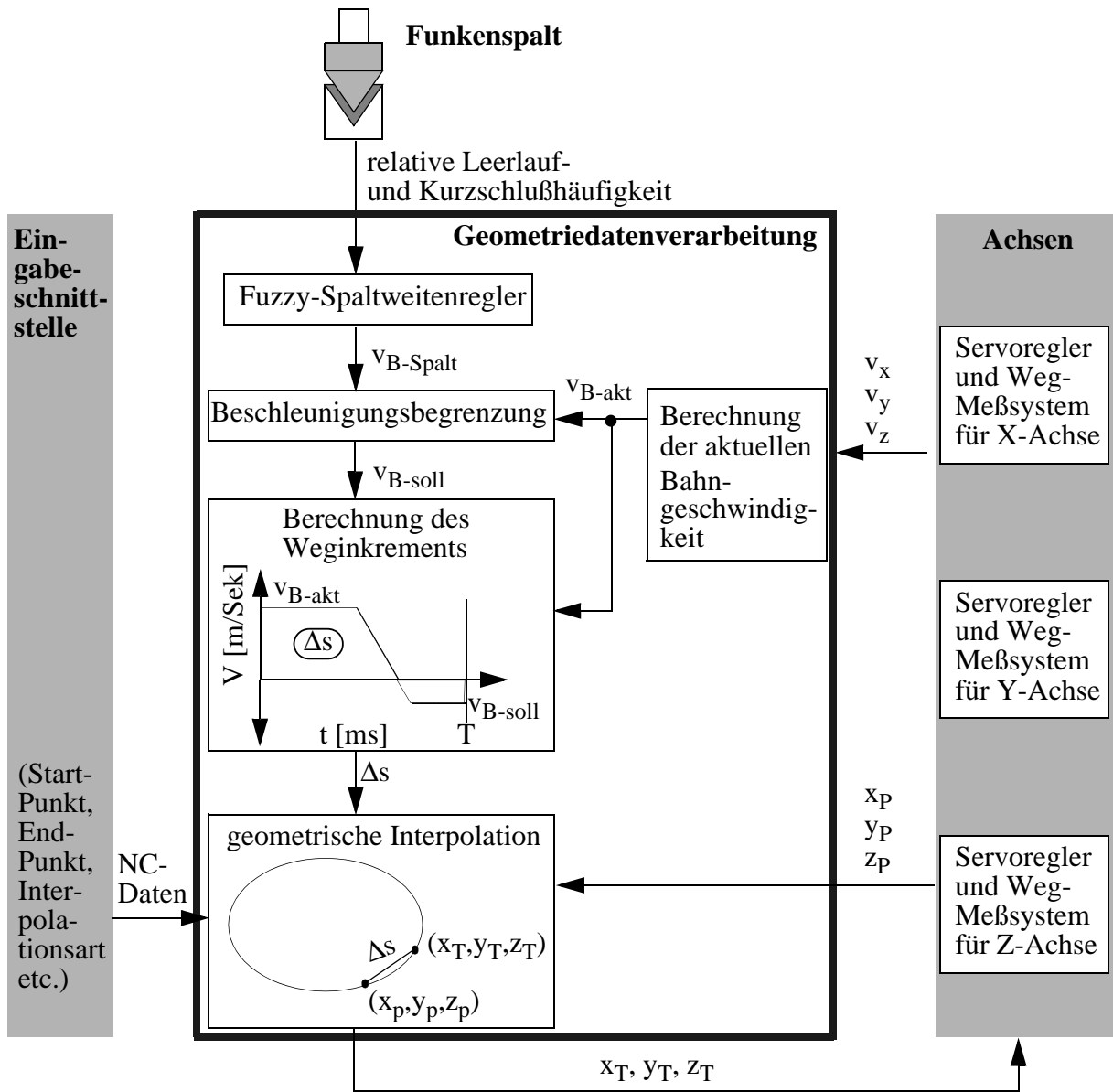


Bild 8.5: Aufbau eines SERCOS-Rings zur Ansteuerung von Vorschubantrieben

Besonderer Wert wird auf die exakte Synchronisation der einzelnen Kommunikationsteilnehmer gelegt (die Zeitpunkte für die Meßwertaufnahme und die Sollwertübernahme sind genau definiert). Die Datenübertragung erfolgt zyklisch. In jedem Kommunikationszyklus übermitteln die Vorschubachsen jeweils ihre momentane Geschwindigkeit und Position an die numerische Steuerung. Diese sendet das sog. *Master-Datentelegramm* gleichzeitig an alle Antriebe. Aus diesem Datentelegramm gehen die Lagesollwerte für die einzelnen Vorschubantriebe hervor. Dadurch übernehmen jeweils die Lageregler in den Antrieben zur selben Zeit ihre Sollwerte. Konturfehler aufgrund von unterschiedlichen Zeitpunkten zur Sollwertübernahme können somit ausgeschlossen werden.

Bild 8.6 zeigt den Datenfluß innerhalb des entwickelten NC-Systems für die Funkenerosion.



<b>Legende:</b>	$v_x, v_y, v_z$	aktuelle Geschwindigkeit der X-, Y- und Z-Achse
	$x_p, y_p, z_p$	aktuelle Position der X-, Y- und Z-Achse
	$x_T, y_T, z_T$	Ziel-Positionen jeweils für X-, Y- und Z-Achse
	$v_{B-akt}$	aktuelle Bahngeschwindigkeit
	$v_{B-Spalt}$	Soll-Bahngeschwindigkeit errechnet vom Spaltweitenregler
	$v_{B-soll}$	Soll-Bahngeschwindigkeit nach der Korrektur durch die Beschleunigungsbegrenzung
	T	Zykluszeit der numerischen Steuerung
	$\Delta s$	Weg-Inkrement für den aktuellen NC-Zyklus

Bild 8.6: Datenfluß des entwickelten NC-Systems für die Funkenerosion

Durch die festen Übertragungszyklen innerhalb des SERCOS-Felbussystems ergeben sich automatisch auch die Rechenzyklen für die numerische Steuerung. So erfolgte innerhalb des implementierten Steuerungssystems die Geschwindigkeitsführung mit einem konstanten Zeitraster (NC-Zykluszeit). Anhand von Bild 8.6 ist zu erkennen, welche Rechenschritte in jedem NC-Zyklus durchgeführt werden müssen:

1. Der Spaltweitenregler berechnet aufgrund aktueller Prozeßdaten (relative Leerlauf- und Kurzschlußhäufigkeiten) die einzustellende Bahngeschwindigkeit  $v_{B\text{-spalt}}$ .
2. Die aktuelle Bahngeschwindigkeit  $v_{B\text{-akt}}$  wird auf der Basis der von den Achsen gemeldeten Geschwindigkeiten ( $v_X, v_Y, v_Z$ ) bestimmt.
3. Um Bahnfehler zu verhindern, wird geprüft, ob die beabsichtigte Geschwindigkeitsänderung möglich ist. Gegebenenfalls wird die Ziel-Geschwindigkeit angepaßt.
4. Entsprechend dem ermittelten Geschwindigkeitsverlauf wird der im Berechnungszyklus auf der Bahn zu verfahrende Weg  $\Delta s$  bestimmt.
5. Ausgehend von der aktuellen Bahnposition ( $x_P, y_P, z_P$ ) und dem zu verfahrenden Weg  $\Delta s$  wird entsprechend der festgelegten Interpolationsart der nächste Bahnpunkt errechnet.
6. Die errechneten Zielkoordinaten ( $x_T, y_T, z_T$ ) werden den Vorschubantrieben übergeben.

Mit dem entwickelten Bahninterpolator kann sowohl eine Gerade- als auch Kreisbahn in 3-D generiert werden. In beiden Fällen erfolgt die Interpolation der Bahnstützpunkte durch direkte Berechnung der Funktionswerte. Im Fall der Geradeninterpolation wird die Bahnfigur durch Angabe von Start- und Endpunkt definiert. Um ausgehend von der aktuellen Position ( $x_P, y_P, z_P$ ) und der zu verfahrenden Bahnstrecke  $\Delta s$  den nächsten Bahnpunkt zu berechnen, muß zunächst die aktuelle Position auf die zu verfahrende Gerade projiziert werden. Auf diese Weise können für den Fall, daß die aktuelle Position nicht exakt auf der zu verfahrenden Geraden liegen sollte, Folgefehler vermieden werden. Die Zielposition ( $x_T, y_T, z_T$ ) ergibt sich dann unter Verwendung des für diese Bahnfigur vorab berechneten normalisierten Richtungsvektors ( $x_N, y_N, z_N$ ) wie folgt:

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{bmatrix} + \Delta s \cdot \begin{bmatrix} x_N \\ y_N \\ z_N \end{bmatrix} \quad ; \quad \begin{array}{ll} (x_S, y_S, z_S) : & \text{projizierter Bahnpunkt} \\ \Delta s : & \text{Weginkrement} \\ (x_N, y_N, z_N) : & \text{normalisierter Richtungsvektor} \end{array} \quad (\text{Gl 8.1})$$

Für die Definition einer kreisförmigen Bewegung müssen zusätzlich zu den Start- und Endpunkten auch der Kreismittelpunkt ( $x_M, y_M, z_M$ ) sowie die Drehrichtung angegeben werden (Bild 8.7). Vor Satzbeginn errechnet der Interpolator dann den Kreisradius und die Kreisebene. Weil die Kreisinterpolation in einer Ebene stattfindet, muß die aktuelle Position ( $x_P, y_P, z_P$ ) immer zunächst in die Kreisebene transformiert werden.

Der Radius kann in der Kreisebene aus Anfangs- und Mittelpunkt bestimmt werden:

$$r = \sqrt{(x_M - x_A)^2 + (y_M - y_A)^2} \quad (\text{Gl 8.2})$$

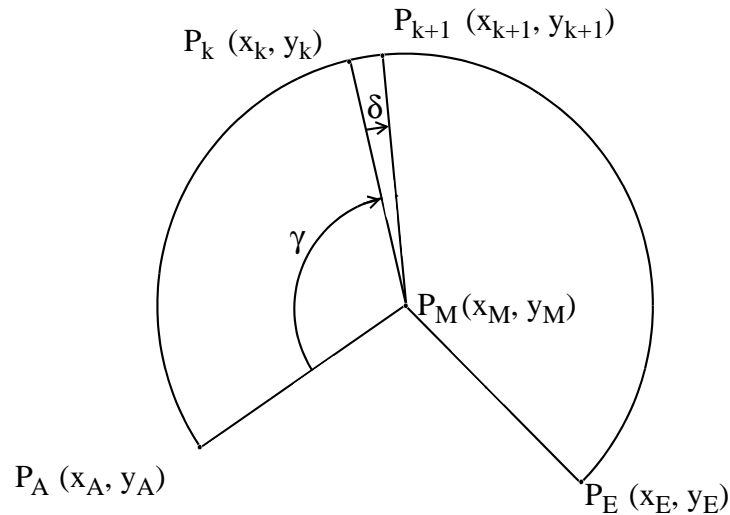


Bild 8.7: Kreisinterpolation mit direkter Funktionsberechnung

In jedem NC-Zyklus muß dann zur Generierung der Kreisbahn für den aktuellen Bahnpunkt  $P_K$  zunächst der Winkel  $\gamma$  bestimmt werden (siehe Bild 8.7). Für den Winkelschritt  $\delta$  gilt:

$$\delta = \frac{\Delta s}{r} \quad ; \Delta s : \quad \text{Weginkrement} \quad (\text{Gl 8.3})$$

$r : \quad \text{Radius}$

Die Koordinaten des Zielpunktes  $P_{k+1}$  in der Kreisebene ergeben sich dann durch die allgemeinen Interpolationsgleichungen:

$$x_{k+1} = r \cdot \cos(\gamma + \delta) \quad (\text{Gl 8.4})$$

$$y_{k+1} = r \cdot \sin(\gamma + \delta) \quad (\text{Gl 8.5})$$

Der auf diese Weise in der Kreisebene errechnete Bahnpunkt muß abschließend noch in Raumkoordinaten  $(X, Y, Z)$  umgerechnet werden.

Um den Bahnweg zu berechnen, der während der NC-Zykluszeit zurückgelegt wird, wird ein vereinfachtes Modell des Antriebssystems eingesetzt. Anhand des Geschwindigkeitsverlaufes läßt sich mit Hilfe dieses Modells der Bahnweg ableiten. Den Achsen kann ein verzögerndes Verhalten zugeordnet werden [Tön95]. Das Modell trägt diesem Umstand im Geschwindigkeitsverlauf Rechnung. So wird im Modell bei Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen zunächst die momentane Bahngeschwindigkeit ( $v_{B\text{-akt}}$ ) beibehalten, bevor eine Geschwindigkeitsänderung auf  $v_{B\text{-soll}}$  erfolgt (verzögernde Wirkung). Diese Verzögerungszeit wurde experimentell mit 4 ms ermittelt. Anschließend wird mit vorgegebener Beschleunigung die Geschwindigkeit geändert. Die NC-Zykluszeit wurde auf 5 ms festgelegt, um für diese Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge ausreichend Zeit bereitzustellen. Der zurückgelegte Bahnweg ergibt sich durch Integration des Geschwindigkeitsverlaufes (siehe Bild 8.8).



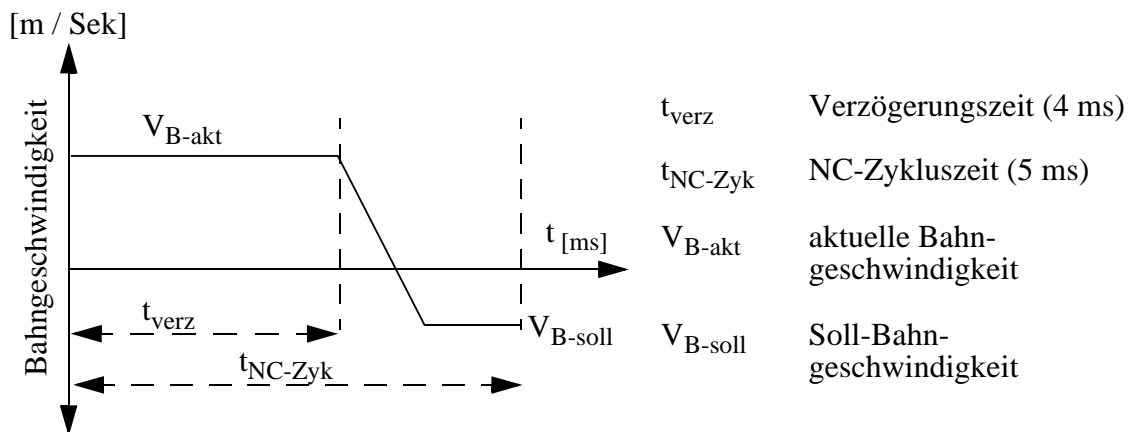


Bild 8.8: Modellierung des Geschwindigkeitsverlaufes

Die wesentlichen Parameter dieses Modells wurden in Versuchen ermittelt (Verzögerungszeit, Beschleunigung). Da während der funkenerosiven Bearbeitung überwiegend geringe Bahngeschwindigkeiten auftreten, ist dieses Modell ausreichend, um das Weginkrement für einen NC-Zyklus zu bestimmen. Eigene Untersuchungen anhand des Modells ergaben, daß bei Geschwindigkeitsänderungen bis zu einer Bahngeschwindigkeit von 140 mm / Minute der innerhalb einer NC-Zykluszeit zurückgelegte Weg mit einer Genauigkeit von 1  $\mu$ m bestimmt werden kann.

Auch die Bearbeitung der NC-Datensätze bedarf einer besonderen Anpassung für das funkenerosive Senken. Durch den in Bild 8.6 vorgestellten Algorithmus zur Geometriedatenverarbeitung kann der Spaltweitenregler im Kurzschlußfall einen Rückzug auf der Bahn veranlassen, indem er eine negative Bahngeschwindigkeit vorgibt. Eine besondere Situation ergibt sich jedoch, wenn unmittelbar nach Beendigung eines NC-Datensatzes und bei Beginn des nächsten Datensatzes ein Kurzschluß auftritt. Soll nun die Werkzeugelektrode auf der Bahn rückwärts bewegt werden, so muß die NC-Satzbearbeitung zum letzten NC-Datensatz zurückkehren, um die Bahninformation für den Rückzugsweg zu erhalten. Bild 8.8 veranschaulicht diese Problematik.

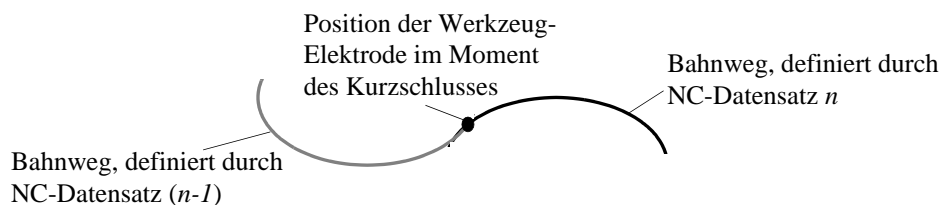


Bild 8.9: Kurzschlußbehandlung unmittelbar nach dem NC-Datensatz-Wechsel

Um diese Problematik zu lösen, muß der Kontrollfluß so gestaltet werden, daß bei Bedarf ein Wechsel in den letzten NC-Datensatz möglich wird (*Look-Behind-Technik*).

Neben der Regelbewegung zur Einstellung der Erosionsspaltweite muß das NC-System Möglichkeiten bereitstellen, um eine Spülbewegung auszuführen. Eine Bewegungsspülung kann etwa durch die Lichtbogenerkennung ausgelöst werden und erfordert die Ausführung definierter Bewegungsmuster zur Reinigung des Erosionsspalt von Abtragspartikeln. Während der Spülbewegung kann die programmierte Bahn verlassen werden. Nach Beendigung des Spülzyklus muß die NC-Steuerung dann den letzten Bahnpunkt wiederherstellen und die Bearbeitung fortführen.

### 8.3 Die offene Steuerungsarchitektur OSACA

Voraussetzung für die bestmögliche Planung, Steuerung und Überwachung der Produktion ist eine durchgängige Informationsverarbeitung und -bereitstellung [Tho91]. Damit gewinnt die rechnergestützte Vernetzung aller an der Prozeßkette beteiligten Bereiche zunehmend an Bedeutung. Bei der Betrachtung der Durchlaufzeiten eines Fertigungsloses übersteigen in der Praxis die Liegezeiten die effektiven Bearbeitungszeiten bei weitem [Ehm93]. Insbesondere durch eine verbesserte informationstechnische Einbindung der Funkenerosion, die mit ihren langen Bearbeitungszeiten als ein „Flaschenhals“ anzusehen ist, ergeben sich Möglichkeiten, um die Durchlaufzeiten zu reduzieren.

Eine Kopplung mit anderen Fertigungssystemen (z.B. spanende Hochgeschwindigkeitsbearbeitung) kann dazu dienen, die funkenerosive Bearbeitung auf die Anwendungsfälle zu beschränken, die anderweitig nicht bearbeitet werden können. Darüber hinaus bildet die rechnergestützte Vernetzung der Werkzeugmaschinen die Grundlage für die Anbindung an eine übergeordnete Planungs- und Leitebene, wie etwa ein Produktions-Planungs- und Steuerungs-System (PPS), oder ein DNC-System (*Distributed Numerical Control*) zur Verwaltung von NC-Programmen sowie eines MDE- / BDE-Systems (Maschinen- Betriebsdaten Erfassungssystem) zur Erfassung von Rückmeldungen aus der Fertigung [Blö97]. Aus diesem Grund ist auf Seiten der Anwender die Forderung nach offenen Steuerungssystemen aufgekommen, um so die informationstechnische Einbindung und Verknüpfung der Fertigungseinrichtungen in das betriebliche Umfeld sicherzustellen.

Für die Hersteller von Werkzeugmaschinen ergeben sich durch offene Steuerungssysteme erhebliche Vereinfachungen bei der Anpassung einer Maschinensteuerung an unterschiedliche Anwendungen und Anforderungen [Pri92]. So können durch offene Steuerungssysteme Spezialsteuerungen einfacher aus Standard-Steuerungen abgeleitet werden, indem lediglich einzelne Module verändert oder hinzugefügt werden. Übertragen auf den Bereich der Funkenerosion würde es die Implementation prozeßnaher Steuerungsfunktionen erheblich erleichtern, wenn einer Standard-Steuerung lediglich Module zugefügt werden müßten (beispielsweise zur Generatorsteuerung), um ein erosionstaugliches Steuerungssystem zu erhalten.

Nach [PrSp97] zeichnet sich eine offene Steuerung durch folgende Eigenschaften aus:

- Portierbarkeit Ein Modul kann in verschiedenen Steuerungssystemen eingesetzt werden.
- Austauschbarkeit Neue Module können in die Steuerung eingefügt werden.
- Skalierbarkeit Module können gegen andere mit vergleichbarer Funktionalität ausgetauscht werden.
- Interoperabilität Die Module des Steuerungssystems kooperieren miteinander, indem diese z.B. Daten austauschen.

Am Markt befinden sich Lösungen, die Offenheit jeweils auf unterschiedliche Weise interpretieren und realisieren. Typischerweise ermöglichen diese Steuerungen dem Anwender einen Zugriff auf Systemfunktionen, indem spezielle Entwicklungs- und Konfigurationswerkzeuge bereitgestellt werden (u.a. Siemens [NN95]). Allerdings sind die verwendeten Systemschnittstellen nicht herstellerneutral und erfüllen deshalb die Forderung nach Portier- und Austauschbarkeit nur begrenzt [WKK93].

Die Definition von herstellerneutralen Schnittstellen für offene Steuerungen ist deshalb zum Gegenstand zahlreicher Forschungsanstrengungen geworden. Als beispielhaft für dieses Bestreben kann das System „Cosmos 2000“ angeführt werden [WeLa91]. Dieses System zeichnet sich durch seine modulare Architektur aus. Es bietet die Möglichkeit, applikationsspezifische Erweiterungen zu integrieren. Hervorzuheben ist die Definition von neutralen Modulen mit einheitlichen Schnittstellen, die nur durch Einbindung applikationsspezifischer Software an ihre jeweilige Aufgabe angepaßt werden können. Eine Weiterentwicklung dieses Konzeptes stellt die offene Steuerungsarchitektur von *OSACA* (*Open System Architecture for Controls within Automation Systems*) [NN96b] dar.

*OSACA* definiert für Steuerungsapplikationen eine einheitliche Programmierschnittstelle (API - *application programming interface*). Dabei erfolgt eine vollständige Trennung zwischen eingesetzter Hardware und dem Betriebssystem. Abhängigkeiten, die zwischen Steuerungsfunktionen und der Verteilung der Anwendung auf unterschiedliche Rechnerplattformen bestehen, werden durch *OSACA* so weit wie möglich verhindert, damit Portierbarkeit gewährleistet werden kann. Um Austauschbarkeit und Skalierbarkeit zu ermöglichen, definiert *OSACA* Richtlinien für den Aufbau von Anwendungen. So muß die Anwendung in funktional zusammengehörige Teile zerlegt und sog. *Architektur-Objekten* (AO) zugeordnet werden. Ein Kommunikationsmechanismus sorgt für Interoperabilität, indem er die Daten vermittelt, die zwischen den AO's ausgetauscht werden.

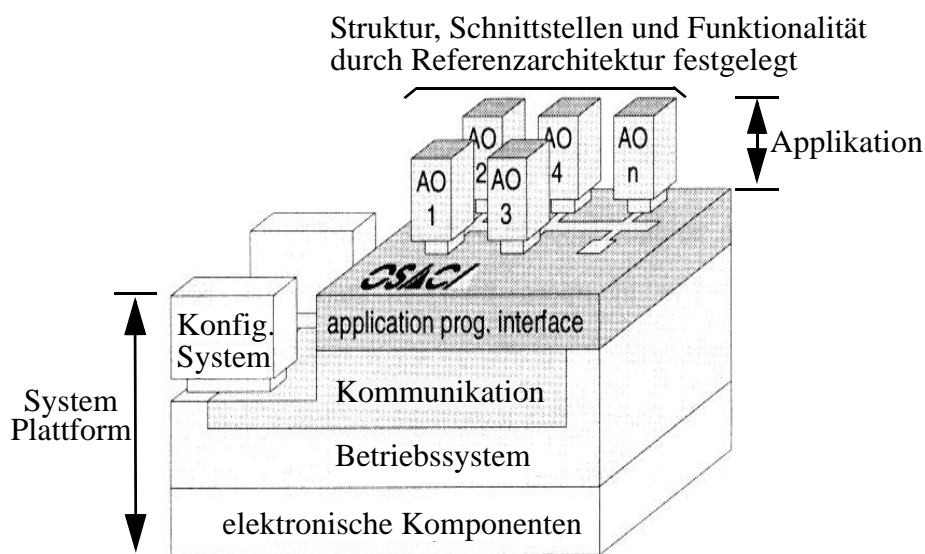


Bild 8.10: Aufbau der *OSACA* System-Plattform nach [PSL97]

Die Hauptkomponenten der *OSACA* Architektur sind (siehe Bild 8.10):

- Das Konfigurationssystem: Fügt zur Startzeit die AO's zu einem Gesamtsystem zusammen.
- Das Kommunikationssystem: Ermöglicht die Betriebssystem- und Hardware-unabhängige Kommunikation zwischen den AO's über eine einheitliche Schnittstelle.
- Die Referenzarchitektur: Definiert die Funktionseinheiten einer numerischen Steuerung und legt fest, welche Schnittstellen diese aufzuweisen haben.

Eine Besonderheit stellt die Referenzarchitektur dar, denn erst durch sie wird sichergestellt, daß die AO's verschiedener Hersteller zusammenarbeiten können [Brü97]. Die Kommunikation der AO's untereinander ist zwar standardisiert, aber die Austauschbarkeit kann nur gewährleistet werden, wenn die AO's verschiedener Hersteller die gleiche Funktionalität bereitstellen. Die Basisfunktionalität einer numerischen Steuerung, wie man sie beispielsweise in einer Fräsmaschine vorfindet, wird durch die *OSACA* Referenzarchitektur in verschiedene Funktionsbereiche unterteilt und Architekturobjekten zugeordnet. Damit sind auch die Schnittstellen der Funktionsbereiche spezifiziert.

Nachfolgend werden die Architekturobjekte (AO) anhand ihrer Aufgaben beschrieben, die entsprechend der *OSACA* Referenzarchitektur dem NC-Kern zuzuordnen sind:

#### *Motion Control (MC):*

Der Aufgabenbereich des Architekturobjektes *Motion Control* reicht von der Interpretation des NC-Programms über Korrektur-Berechnungen (z.B. Korrektur des Werkzeugradius) und Transformationen bis hin zur Interpolation. Für die zugeordneten Maschinenachsen werden die Zielkoordinaten erzeugt. Bei Werkzeugmaschinen, deren kinematische Struktur es erlaubt, die vorhandenen Achsen und Spindeln in unterschiedlicher Art und Weise zu unabhängigen Achsgruppen zusammenzufassen (z.B. Mehrspindeldrehmaschinen), müssen mehrere *Motion Controller* existieren. Jeder dieser *Motion Controller* ist damit nur für die ihm zur Bewegungserzeugung zugeordnete Achsgruppe verantwortlich.

#### *Spindle Control (SC):*

Während die Maschinenachsen im Sinne von Nebenantrieben der Erzeugung von Vorschub- und Stellbewegungen dienen, generiert eine Spindel die für den Wirkvorgang zwischen Werkzeug und Werkstück leistungsbestimmende Bewegung. Das Architekturobjekt *Spindle Control* definiert eine Schnittstelle für den Zugriff auf eine oder mehrere Spindeln (z.B. zum Setzen der Drehgeschwindigkeit). Bei der Funkenerosion resultiert der Materialabtrag aus der Wirkung elektrischer Energie. Die Bedeutung des Architekturobjektes *Spindle Control* ist deshalb für diese Bearbeitungsform entsprechend gering.

#### *Axes Control (AC):*

Das Architekturobjekt *Axes Control (AC)* dient als Schnittstelle zu den Antrieben. Im Falle von konventionellen Antrieben mit analoger Geschwindigkeitsvorgabe (+/- 10V) erfolgt die Lageregelung innerhalb dieses Architekturobjektes. Bei Verwendung digitaler Antriebe wie im vorliegenden Fall dient der *Axes Controller* lediglich zur Übergabe der Lage-Sollwerte an den Servoregler und zur Abfrage der Lage- und Geschwindigkeits-Ist-Werte (der Lageregler befindet sich in diesem Fall im Servoregler).

#### *Motion Control Manager (MCM):*

Der *Motion Control Manager* bildet eine Schnittstelle, um auf verschiedene Operationsmodi zuzugreifen. Dies kann den Wechsel zwischen unterschiedlichen Achsgruppen bedeuten, aber auch die Änderung der Betriebsart (z.B. Referenzfahrt). Übertragen auf die Funkenerosion kann das Umschalten von der Regelbewegung zur Spülbewegung als ein Wechsel der Betriebsart implementiert werden.

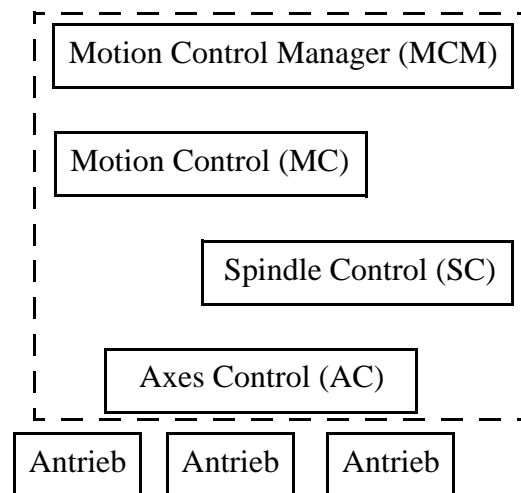


Bild 8.11: Beispiel der Anordnung von OSACA-Architekturobjekten zur Steuerung einer einfachen Maschinenanordnung

Die durch die OSACA-Referenzarchitektur definierte Funktionalität ist nicht ausreichend, um sämtliche Steuerungsaufgaben in einer Erodiermaschine zu erfüllen. Die technologischen Besonderheiten der Funkenerosion erfordern zusätzliche Funktionen. Im einzelnen müssen folgende Zusatzaufgaben von einer numerischen Steuerung für die Erosionsbearbeitung erfüllt werden:

- Das Management des Generators, um die Impulsparameter und Betriebsmodi einzustellen.
- Die Spaltweitenregelung zur ständigen Regulierung des Abstandes zwischen Werkzeug- und Werkstückelektrode, einschließlich der Erfassung der für diesen Regelvorgang notwendigen Eingangsgrößen.
- Die Prozeßoptimierung zur Anpassung der Parameter des Prozeßführungssystems an die sich ständig ändernden Bearbeitungsbedingungen.
- Die Durchführung von Spülbewegungen zur Reinigung des Funkenspaltes.

#### 8.4 Architektur der realisierten numerischen Steuerung

Die entwickelte numerische Steuerung für die Funkenerosion verfügt im Kern über einen Bahninterpolator für lineare und circuläre Bewegungen, der mit einer Spaltweitenregelung gekoppelt ist. Die Steuerung wurde auf einer VMEbus-CPU (PowerPC) unter dem Echtzeitbetriebssystem VxWorks [NN99b] implementiert. Die Aufteilung der Steuerung in funktionale Einheiten orientiert sich an der OSACA-Referenzarchitektur. Bild 8.12 zeigt die spezifischen Architekturobjekte des Steuerungssystems für das funkenerosive Senken.

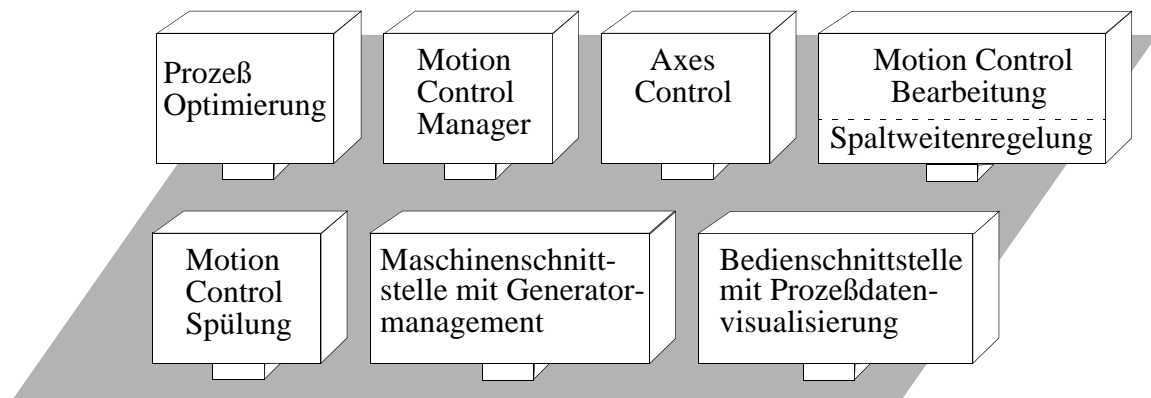


Bild 8.12: Spezifische Architektur der numerischen Bahnsteuerung für die Funkerosion

Folgende Funktionen werden von den Architekturobjekten ausgeführt:

Die *Prozeßoptimierung* adaptiert den Spaltweitenregler. Dieses Optimiersystem besteht aus einem Neuronalen Netz (siehe Kapitel 7).

Der *Motion Control Manager (MCM)* hat die Aufgabe, bei Folgen von lichtbogenartigen Fehlentladungen eine Spülbewegung auszulösen. Dies geschieht durch einen Wechsel zwischen der normalen Bahnbewegungs-Betriebsart und der Spülbewegungs-Betriebsart. Realisiert wird dies durch die Aktivierung der jeweiligen Motion-Control-Einheit zur Bearbeitung oder zur Spülung.

Das Architekturobjekt *Axes Control (AC)* dient lediglich als Schnittstelle zur Übergabe von Soll- und Ist-Werten an die Antriebe. Diese Antriebe sind über eine digitale *Sercos*-Schnittstelle vernetzt und führen jeweils autark die Lageregelung für eine Bewegungsachse durch.

Während der funkenerosiven-Bearbeitung ist das Architekturobjekt *Motion Control-Bearbeitung* aktiv. Es übernimmt die Aufgabengebiete der Geometriedatenverarbeitung und arbeitet nach dem in Bild 8.6 skizzierten Verfahren. Ein Modul zur Spaltweitenregelung ist integriert.

Während einer Spülbewegung wird das Architekturobjekt *Motion Control-Spülung* aktiviert. Zur Reinigung des Funkenspaltes wird ein vorgegebenes Bewegungsmuster durchgeführt, um dann anschließend den letzten Bahnpunkt wiederherzustellen, von dem der Erosionsvorgang erneut gestartet werden kann.

Über die *Maschinenschnittstelle* können die Hilfsaggregate mit Hilfe einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) gesteuert werden. Außerdem werden Zustandsänderungen an der Maschine (z.B. Temperaturüberwachung des Dielektrikums) überwacht. Eine Komponente zur Parametrierung des Generators ist integriert.

Durch die *Bedienschnittstelle* können die verschiedenen Einstellparameter des Erosionsprozesses sowie die zu verfahrenende Bahn festgelegt werden. Auf die vollständige Implementation einer NC-Beschreibungssprache wurde verzichtet und stattdessen lediglich eine Kernfunktionalität realisiert. Um die Forschungsanforderungen an die Steuerung zu erfüllen, wurde in die Bedienschnittstelle eine Komponente zur graphischen Visualisierung von Prozeßdaten (z.B.  $t_d$ -Mittelwert, Arbeitsfortschritt oder Lichtbogenhäufigkeit) während der Bearbeitung integriert.

## 8.5 Versuchsergebnisse

Die entwickelte numerische Steuerung ist an die technologischen Besonderheiten des Erosionsprozesses angepaßt. Der Interpolator kann sowohl lineare als auch kreisförmige Bahnbewegungen in drei Dimensionen berechnen. Aus diesen Grundelementen lassen sich zusammengesetzte Bahnfiguren erzeugen. Neben der Bahnerosion ist es mit dieser Steuerung auch möglich, unterschiedliche Planetärstrategien zu realisieren. Auf diese Weise sind die Voraussetzungen gegeben, um die Erkenntnisse zur Spaltweitenregelung (Kapitel 6) und Regleradaption (Kapitel 7) auf ihre Anwendbarkeit innerhalb der Bahn- und Planetärerosion zu prüfen.

In Bild 8.13 ist ein Versuch zur Planetärerosion dokumentiert. Dabei wurde die Strategie des sternförmigen Aufweitens angewendet.

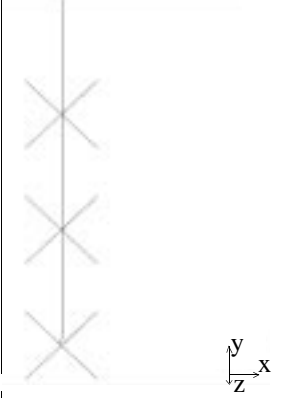
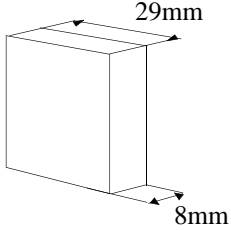
<p>Bahnbewegung beim sternförmigen Aufweiten</p> 	<p>Skizze der Elektrode</p> 	<p>Schruppbearbeitung</p> <p><math>i_e</math>: 40 A  <math>U_0</math>: 160 V  <math>t_e</math>: 200 <math>\mu</math>s  <math>t_0</math>: 20 <math>\mu</math>s  VPL: 500 <math>\mu</math>s  <math>B_s</math>: 22,5 V  <math>N_{VPL}</math>: 100  <math>N_{sp\ddot{u}l}</math>: 200  Einsenkttiefe: 9,65 mm</p>	<p>Schlichtbearbeitung</p> <p><math>i_e</math>: 6 A  <math>U_0</math>: 200 V  <math>t_e</math>: 10 <math>\mu</math>s  <math>t_0</math>: 30 <math>\mu</math>s  VPL: 500 <math>\mu</math>s  <math>B_s</math>: 21 V  <math>N_{VPL}</math>: 10  <math>N_{sp\ddot{u}l}</math>: 20  Einsenkttiefe: 10 mm</p>
<p>Versuchsbedingungen:</p> <p>Elektrode: E-Cu (+)  Werkstück: 56NiCrMoV7  Anzahl der Elektroden: 2</p>		<p>Parameter der sternförmigen Bahnbewegung:</p> <p>Auslenkung: 350 <math>\mu</math>m  Anzahl der Sternschritte: 3</p>	

Bild 8.13: Erosionsversuch zum sternförmigen Aufweiten

Dieser Versuch wurde sowohl mit der in Kapitel 5 beschriebenen  $t_d$ -basierten Spaltweitenregelung, als auch mit dem Fuzzy Regler durchgeführt. Außerdem wurde zum Vergleich noch ein Versuch mit der in Kapitel 7 beschriebenen Optimierung in Form eines Neuronalen Netzes unternommen. Die Versuchsergebnisse zeigt Tabelle 8.1.

	$t_d$ -basierter Regler	Fuzzy-Regler	Neuro-Fuzzy-Regler
Schruppbearbeitung	32 Minuten	30,5 Minuten	30 Minuten
Schlichtbearbeitung	218 Minuten	143 Minuten	122 Minuten

Tabelle 8.1: Versuchsergebnisse zum sternförmigen Aufweiten

Während bei der Schruppbearbeitung kaum Unterschiede festzustellen sind, ergibt sich bei der Schlichtbearbeitung ein deutlicher Zeitvorteil durch den Fuzzy-Regler. Die Vorzüge dieses Reglers werden vor allem zu Beginn jedes Planetärzyklusses deutlich. In dieser Situation sind die Spülbedingungen noch schlecht, da die laterale Auslenkbewegung gerade erst begonnen hat. Durch die geringe seitliche Spaltweite erhöht sich die Gefahr von Kurzschlüssen und Lichtbögen. Häufige Prozeßunterbrechungen durch Spülbewegungen sind die Folge. Der leerlauf-kurzschlußbasierte Fuzzy Regler vermeidet diese Prozeßunterbrechungen, indem er einen erhöhten Leerlaufanteil einstellt.

Mit fortschreitender lateraler Auslenkbewegung verbessern sich die Spülbedingungen im Arbeitsspalt. Die Unterschiede im Abtragsverhalten beider Reglertypen verringern sich. Eine weitere Verbesserung wird durch das Neuronale Netz erreicht. Diese Optimierung paßt den Spaltweitenregler an die teilweise schlechten Spülverhältnisse an und erreicht auf diese Weise eine zusätzliche Steigerung der Abtragsleistung.

Eine andere Planetärstrategie ist das spiralförmige Aufweiten. Diese Planetärstrategie ist in der industriellen Anwendung weit verbreitet. Aus ihr lassen sich andere Strategien ableiten (z.B. kugel- oder konusförmiges Aufweiten). Ein Versuch mit dieser Planetärstrategie bei unterschiedlichen Spaltweitenreglern ist in Bild 8.14 und Tabelle 8.2 dokumentiert.

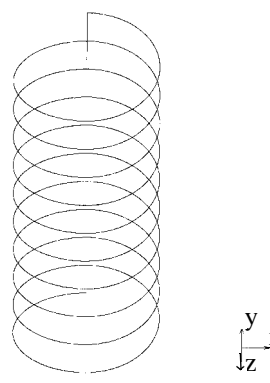
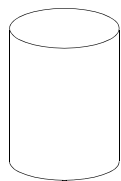
<p>Bahnbewegung beim spiralförmigen Aufweiten</p> 	<p>Skizze der Elektrode</p> <p>Durchmesser: 25,3 mm</p> 	<p>Schruppbearbeitung</p> <p><math>i_c</math>: 40 A  <math>U_0</math>: 160 V  <math>t_e</math>: 150 <math>\mu</math>s  <math>t_0</math>: 30 <math>\mu</math>s  VPL: 500 <math>\mu</math>s  <math>B_S</math>: 24 V  <math>N_{VPL}</math>: 100  <math>N_{sp\ddot{u}l}</math>: 200  Einsenktaiefe: 9,5 mm</p>	<p>Schlichtbearbeitung</p> <p><math>i_c</math>: 6 A  <math>U_0</math>: 200 V  <math>t_e</math>: 10 <math>\mu</math>s  <math>t_0</math>: 30 <math>\mu</math>s  VPL: 500 <math>\mu</math>s  <math>B_S</math>: 24 V  <math>N_{VPL}</math>: 50  <math>N_{sp\ddot{u}l}</math>: 100  Einsenktaiefe: 10 mm</p>
	<p>Versuchsbedingungen:</p> <p>Elektrode: Graphit (+)  (Körnung 20 <math>\mu</math>m)</p> <p>Werkstück: 56NiCrMoV7  Einsenktaiefe: 10 mm  Anzahl der Elektroden: 2</p>	<p>Parameter der spiralförmigen Bahnbewegung:</p> <p>Auslenkradius: 400 <math>\mu</math>m  Anzahl der Kreiswindungen: 10</p>	

Bild 8.14: Erosionsversuch zum spiralförmigen Aufweiten.

	$t_d$ -basierter Regler	Fuzzy-Regler
Schruppbearbeitung	56 Minuten	45 Minuten
Schlichtbearbeitung	205 Minuten	187 Minuten

Tabelle 8.2: Versuchsergebnisse zum spiralförmigen Aufweiten

Die Versuchsergebnisse zeigen erneut einen geringen Zeitvorteil bei der Schruppbearbeitung mit dem leerlauf-kurzschluß basierten Fuzzy Regler. Auch bei der Schlichtbearbeitung ergibt sich ein Zeitgewinn im Vergleich zum  $t_d$ -basierten Spaltweitenregler. Allerdings ist dieser Zeitgewinn deutlich geringer, als bei der sternförmigen Planetärstrategie. Die Ursache ist erneut im Lateralspalt zu sehen. Durch die spiralförmige Bewegung ist ständig ein vergrößerter seitlicher Spaltabstand gegeben. Die Spülbedingungen sind damit verbessert und die Kurzschluß- und Lichtbogengefahr reduziert. Der Vorteil, den der leerlauf-kurzschluß basierte Spaltweitenregler bei schlechten Spülbedingungen bietet, wird bei dieser Planetärstrategie weniger ausgenutzt. Aus diesem Grund wurde die Prozeßoptimierung mit Neuronalem Netz bei diesem Versuch nicht betrachtet, da keine wesentlichen Abtragssteigerungen zu erwarten sind. Das gleiche gilt für die nachfolgenden Versuche zur 3D-Bahnerosion.



Neben der Planetärerosion kann die numerische Steuerung auch für die Bahnerosion eingesetzt werden. Komplexe Geometrien können mit Hilfe dieser Methodik unter Verwendung einfacher Werkzeugelektrodengeometrien erzeugt werden. Bild 8.15 zeigt einen Erosionsversuch zur Bahnerosion, bei dem sich die Bahnbewegung aus einer in der Einsenktiefe geneigten linearen und einer kreisförmigen Bewegung zusammensetzt. Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 8.3 aufgeführt.

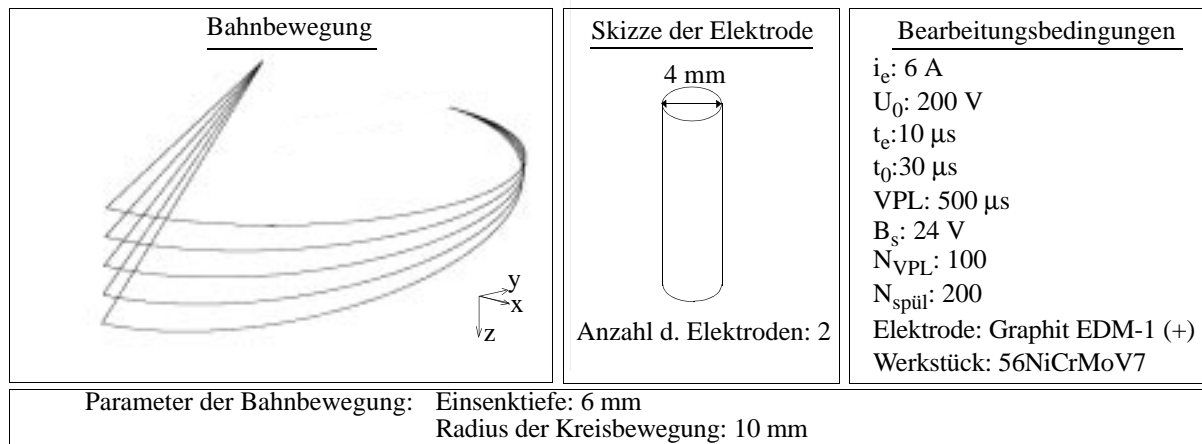


Bild 8.15: Erosionsversuch zur 3D-Bahnbewegung.

	$t_d$ -basierter Regler	Fuzzy-Regler
1. Elektrode	237 Minuten	215 Minuten
2. Elektrode	113 Minuten	108 Minuten

Tabelle 8.3: Versuchsergebnisse zum spiralförmigen Aufweiten

Auch bei der Bahnerosion verringert sich die Bearbeitungszeit bei Verwendung des leerlauf-kurzschluß basierten Fuzzy Reglers. Insbesondere bei der ersten Elektrode werden diese Zeitunterschiede deutlich. Die zweite Elektrode dient lediglich zur Kompensation des Elektrodenverschleißes der vorherigen Bearbeitung. Es muß deshalb nur wenig Material bei guten Spülverhältnissen abgetragen werden. Entsprechend reduzieren sich die Unterschiede beider Spaltweitenregler.

Aus den Versuchsergebnissen geht hervor, daß die bei der Senkerosion erzielten Erkenntnisse zur Spaltweitenregelung auch auf die Bahn- und Planetärerosion übertragbar sind. Vorteile ergeben sich durch den leerlauf-kurzschluß basierten Fuzzy-Spaltweitenregler immer dann, wenn schlechte Spülverhältnisse vorherrschen. Ein wesentlicher Vorzug der Planetärerosion ist es, durch einen vergrößerten Lateralspalt die Spülverhältnisse und damit die Bearbeitungsbedingungen zu verbessern. Dieser Effekt konnte auch in den beschriebenen Versuchen beobachtet werden. So verringerten sich mit zunehmender Verbesserung der Spülverhältnisse die Unterschiede zwischen einer  $t_d$ -basierten und leerlauf-kurzschluß basierten Spaltweitenregelung.