

## II. STAND DER TECHNIK

Die Entwicklung der Funkerosionsanlagen profitierte in hohem Maße vom rasanten Fortschritt im Bereich der Mikroelektronik. Die Funkerosionsanlagen erlebten weitreichende Erneuerungen, die auf den relativen Preisverfall von Leistungshalbleitern, Steuerungskomponenten und Mikrocomputern zurückzuführen sind. Die notwendigen CNC-Einheiten sowie die Prozeßoptimierungshardware bestehen bei modernen Maschinen aus Steckkarten, die kompatibel zu den PC-Bussystemen aufgebaut sind. Die Neuerungen in der Leistungselektronik bilden die Basis für eine vollkommen neue Generation von Erodiergeneratoren mit sehr hohen Leistungsdaten. Weitere Impulse für die FE-Anlagentechnik gehen auf Neuerungen im Bereich der Antriebstechnik zurück. Dort wurden Gleichstrommotoren durch verschleißfreie AC-Servomotoren ersetzt, die heute hinsichtlich Dynamik und Regelbarkeit neue Möglichkeiten eröffnen.

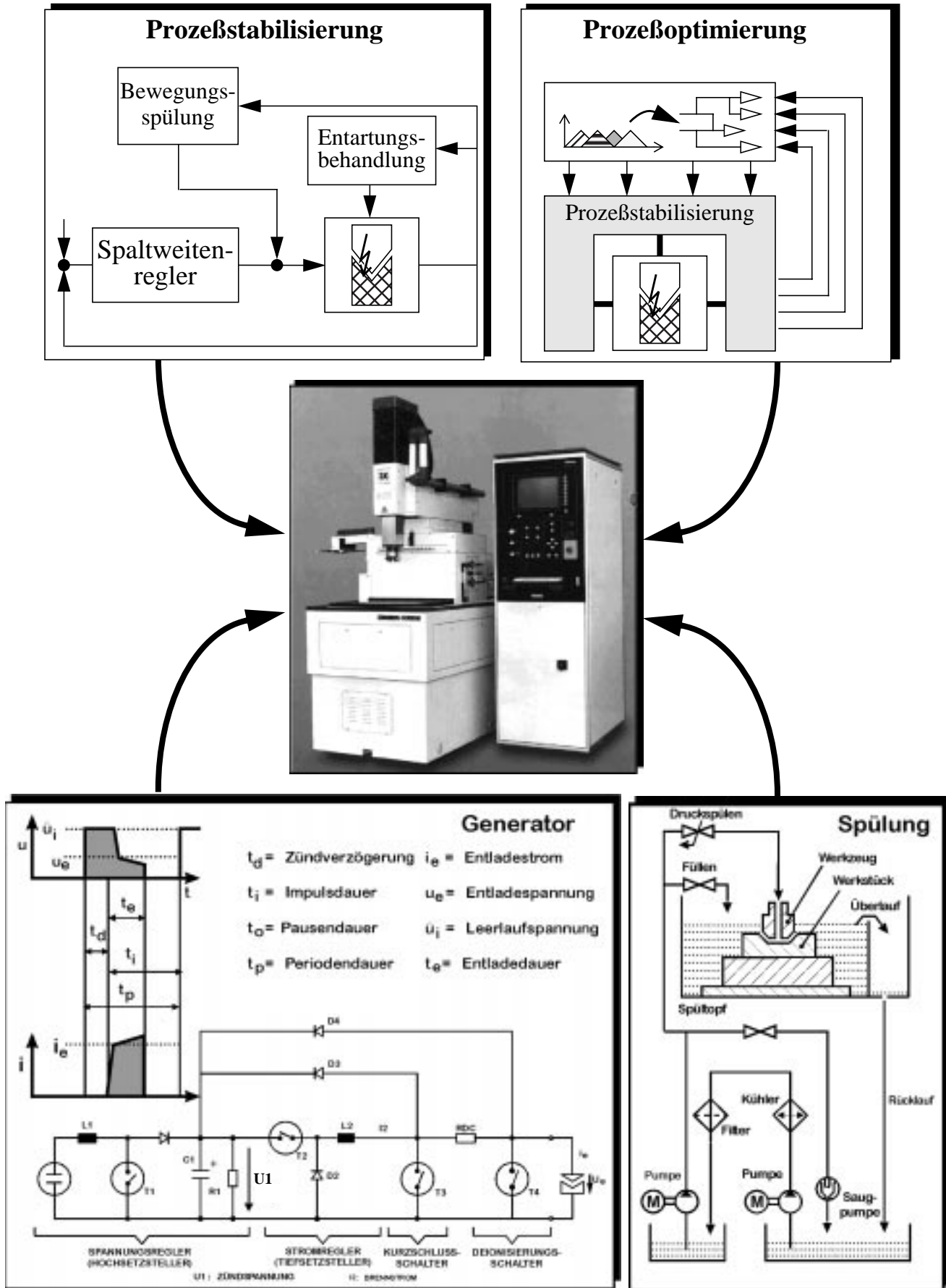
### 2.1. Aufbau und Funktion einer funkerosiven (FE) Senkanlage

Eine Funkerosionsanlage besitzt vier Hauptkomponenten (Bild 2.1):

- Der Generator als Energiequelle für den Abtragsprozeß
- Die Dielektrikumsversorgung für den Funkenspalt
- Das Vorschubsystem zur Einstellung der Spaltweite
- Die Prozeßstabilisierung und Optimierung

Die Bereitstellung der elektrischen Energie für den Abtragsprozeß ist Aufgabe des Generators. Dieser erzeugt eine zeitliche Folge von Spannungs- bzw. Stromimpulsen, die über Zuleitungen an den FE-Arbeitsspalt gelegt werden. Unter den Bauformen von Funkerosionsgeneratoren sind heute sogenannte „statische Impulsgeneratoren“ [VDI34] oder moderne stromgeregelter Generatoren zu finden. Für gewöhnlich kann ein Arbeitsstrom im Bereich von unter 1A bis 100A und die Zündspannung von 100V bis 300V eingestellt werden. Um eine definierte Werkstückoberfläche zu erhalten, sind die Amplitude des Arbeitsstromes  $I_a$  und die zeitlichen Impulsparameter, Brenndauer  $t_e$ , Pausendauer  $t_0$  einzustellen.

In Abhängigkeit von der Generatortechnologie sind die Einrichtungen zur Erkennung und Reaktion auf Prozeßentartungen auszulegen. Hierunter fallen Sensorschaltungen zur Kurzschluß-, und Lichtbogenerkennung. Die automatisierungstechnische Struktur der FE-Senkanlage faßt die Einrichtungen zur Vermeidung, Erkennung und Behebung derartiger Prozeßentartungen unter dem Sammelbegriff Prozeßstabilisierung zusammen. Weit verbreitet ist es, diese Prozeßstabilisierung dem Generator zuzurechnen, so daß der im Sinne der Automatisierungstechnik als Akteur wirkende Generator gleichzeitig zur Sensorik der Anlage gezählt werden kann. Diese Zusammenfassung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen. Vielmehr wird zwischen dem Generator als reinem Aktorglied und der Prozeßstabilisierung als intelligentem Sensorglied unterschieden.



**Bild 2-1:** Hauptbestandteile einer funkenerosiven Senkanlage

Der Vorschub darf in der Funkenerosion im Gegensatz zu anderen Werkzeugmaschinen nicht mit konstanter Geschwindigkeit erfolgen, sondern er dient dazu, die für den Erodierprozeß optimale Spaltweite einzustellen. Die sogenannte Spaltweitenregelung bedient sich entweder der mittleren Spaltspannung oder der mittleren Zündverzögerungszeit  $t_{dm}$ . Die sogenannte Zündverzögerungszeit  $t_d$  ist die Zeit, die ab dem Anlegen der Zündspannung an den Arbeitsspalt bis zum Einsetzen des Stromes verstreicht. Bei großen Abweichungen von einem Soll-Mittelwert der Zündverzögerung wird der Spaltweitenregler die Spaltweite anpassen. Heutige Anlagen können in allen drei Achsen senken und verfügen in der Z-Achse zusätzlich über eine C-Achse, die eine Rotation der Werkzeugelektrode erlaubt. Die im Rahmen dieser Arbeit verwandte Versuchsanlage verfügt nur über **eine** Arbeitsachse (Z-Richtung). Damit ist die heute übliche Planetärerosion zwar nicht möglich, es lassen sich allerdings grundlegende Mechanismen des FE-Prozesses hinreichend untersuchen; insbesondere Prozeßstabilisierung und Optimierung können mit einer Arbeitsachse untersucht werden. Für die Erkennung und Reaktion auf Prozeßentartungen existiert eine Vielzahl von Strategien und Methoden, die meist nicht auf einzelne Lichtbögen unverzüglich reagiert, sondern eine Folge von Prozeßentartungen detektiert und mit einer anschließenden Ausblendung einer gewissen Anzahl von Impulsen reagiert.

Eine weitere wesentliche Funktionsgruppe ist die Dielektrikumsversorgung. Beim Senken wird ein flüssiges auf Kohlenwasserstoff basierendes Dielektrikum eingesetzt. Anlagen mit deionisiertem Wasser befinden sich noch in der Erprobung [Klo97]. Neben den Zu- und Ableitungen und Pumpen zur ständigen Umwälzung des Dielektrikums im Erodierbetrieb gehören spezielle Filter und Kühlaggregate zur Funktionsgruppe Dielektrikumsversorgung. Allgemein üblich in CNC-Anlagen sind Anschlüsse für Druck-, und Saugspülungen, die mit steuerbaren Elektroventilen ausgestattet sind. Der Trend geht allerdings weg von speziellen zusätzlichen Spüleinrichtungen und deren Benutzung zur Unterstützung des Abtragsprozesses. Der Grund liegt darin, daß diese Zusatzspülung über Spüllöcher oder Zusatzdüsen zwar Abtragsverbesserungen bringt, aber nicht zu reproduzierbaren Ergebnissen führt. Die Einrichtung der Zusatzspülung hängt in sehr hohem Maße von der Erfahrung des Bedieners ab und kann in ungünstigen Fällen zu sogenannten Auswaschungen führen [ScW88]. Deswegen wird heute meist eine sogenannte „Bewegungsspülung“ eingesetzt, die durch definierte Abhebebewegungen der Werkzeugelektrode für den Austausch des Dielektrikums im Arbeitsspalt sorgt. Eine „Adaptive Bewegungsspülung“ kann sehr vorteilhaft in die Prozeßsteuerung integriert werden und sorgt als Programmbestandteil für reproduzierbare Abtragsergebnisse.

Die letzte wesentliche Funktionsgruppe umfaßt die Anlagenbedienung, die Prozeßoptimierung und die Prozeßtechnologie. Diese drei Untereinheiten sind sehr eng miteinander verknüpft. Die Bedienung heutiger FE-Anlagen erfolgt meist über graphische Bedienschnittstellen. Die Bedienung erfolgt menügesteuert und erlaubt über Softwaremodule die komplette Prozeßparametrierung und Visualisierung des Abtragsprozesses. Netzwerkanbindungen der FE-Anlagen gestatten den Datenaustausch mit Meß-, Programmier- und Konstruktionsarbeitsplätzen. Im Hinblick auf das in zunehmendem Maße

fehlende Fachpersonal, das mit der Erodieretechnik stark vertraut ist, werden der Komfort und die Sicherheit bei der Maschinenbedienung immer wichtiger. Hinter der Bedienoberfläche verbirgt sich neben entsprechenden Softwaremodulen auch die Technologie einer FE-Senkanlage, die eng verknüpft ist mit der Prozeßoptimierung. Technologie bedeutet, daß der Maschinenhersteller den Anwender mit kompletten Maschinenparametrierungen für eine große Anzahl von Erodieraufgaben versorgt. Der Anwender muß zum Teil nur noch seine Abmaße und gewünschte Oberflächengüte eingeben und bekommt ein komplettes Erodierprogramm geliefert, das Elektrodenwechsel und Stromstufenvariationen automatisch einbezieht. Das Ziel derartiger Entwicklungsanstrengungen ist, die Bedienung von FE-Senkanlagen auch Nicht-Fachpersonal zu ermöglichen.

Neben diesen vier Funktions- bzw. Baugruppen ist das Maschinengestell die Grundlage für die erreichbare Präzision der Bearbeitung. Da die Funkenerosion in erster Linie ein thermisches Abtragsverfahren ist, muß das Gestell keine unmittelbaren Prozeßkräfte aufnehmen. In geringem Umfang sind thermische Verzüge zu kompensieren. Lediglich die bei Abhebe- und Zustellbewegungen auftretenden Druck- und Saugkräfte erfordern eine hohe Steifigkeit des Maschinengestells. Bei schweren Werkzeugelektroden, die große dynamische Kräfte auf die Führungen und den Maschinenkörper übertragen, muß das Maschinengestell deswegen entsprechend ausgelegt werden. Jüngste Maschinengenerationen werden zur Erlangung ausreichender Steifigkeit als Massivgußteile ohne Verschraubungen oder als Polymerbetongestelle ausgeführt, die ebenfalls sehr hohe Steifigkeit besitzen. Besonders wichtig wird die konstruktive Auslegung des Maschinengestells beim Einsatz von drehmomentstarken Antrieben.

Im Zuge fortschreitender Automatisierung finden sich i.d.R. Werkzeugwechselsysteme an den Maschinen, die programmgesteuert ganze Erodiersequenzen unbemannt abarbeiten können. Bei Großserienanwendungen werden zusätzlich Werkstückwechsler in Form von Palettensystemen eingesetzt. Derartige Wechselsysteme arbeiten mit indexierten Paletten zur Aufnahme einer bestimmten Anzahl von Werkstücken und erfordern auf Seiten der Erodiersteuerung eine Werkzeug-Korrekturdaten-Verarbeitung, die in der Lage ist, über Referenzverfahren die exakte Position und Orientierung der Werkstücke in der Arbeitsaufspannung zu ermitteln. Dadurch wird eine erhebliche Reduzierung der Rüstzeiten und die Ausdehnung des unbeaufsichtigten Betriebes erreicht [WHH95].

## **2.2. Automatisierungsstruktur funkenerosiver Senkanlagen**

Der Automatisierungsgrad ist heute ein wichtiger, qualitätsbestimmender Faktor funkenerosiver Senkanlagen. Waren früher Arbeitsgeschwindigkeit, Oberflächenqualität oder mechanische Steifigkeit Qualitätsmerkmale, so sind bei modernen Anlagen zusätzlich die Verfügbarkeit von Wechsler- und Zuführsystemen für Elektroden und Werkstücke, die Bedienschnittstellen und die Vernetzungsfähigkeit im Verbund mit Meßmaschinen und Konstruktionsplätzen von vorrangiger Bedeutung. Dies liegt daran, daß Maschinen, die jetzt auf dem Markt sind, vergleichbare Abtragsleistungen mit ähnlichen Oberflächenqualitäten liefern. Neben dem Preis wird die Kaufentscheidung bestimmt durch den vorhandenen Maschinenbestand und die Lösung vom Kunden

vorgegebener Bearbeitungsaufgaben. Zur Erreichung eines hohen Automatisierungsgrades einer Senkanlage ist der modulare Aufbau des Automatisierungssystems „Funkerosionsanlage“ sehr von Vorteil. Deswegen soll in diesem Abschnitt die Automatisierungsstruktur funkerosiver Senkanlagen exemplarisch dargestellt werden. Optionale Peripheriegeräte, wie Wechselsysteme oder CAD-CAM-Kopplungen sind nicht Gegenstand der Betrachtung. Grundsätzlich besteht eine Erodieranlage, wie jedes Automatisierungssystem, aus den Komponenten:

### SENSORIK - AKTORIK - PROZESSORIK.

Die *Sensorik* ist hinsichtlich einer FE-Senkanlage weit verteilt und deckt ein breites Spektrum, was Art, Umfang und Geschwindigkeit der Signalerfassung angeht, ab. Aufgabe der Sensoren ist es, Meßgrößen aus dem Prozeß aufzunehmen, d.h. physikalische Größen, wie Temperatur, Strom, Spannung oder chemische Zusammensetzungen in analoge oder digitale elektrische Signale umzusetzen und diese einer Verarbeitung zuzuführen. Wird die Signalverarbeitung oder werden Teile davon bereits im Sensor vorgenommen, so bezeichnet man diese Art von Sensoren als intelligent. Innerhalb einer FE-Anlage findet man i.d.R. Sensoren, die in erster Linie Spaltspannung und -strom aufnehmen. Spezifisch für FE-Anlagen ist, daß die Sensoren zum Teil sehr eng mit entsprechenden Aktoren verbunden sind. Dies liegt daran, daß die einzelnen Funktionsgruppen innerhalb einer FE-Anlage, wie in Bild 2-1 dargestellt, größtenteils autark arbeiten. So ist beispielsweise die Antriebstechnik nicht direkt beeinflusst vom FE-Generator.

Die *Aktorik*, ist ebenfalls dezentral in den einzelnen Baugruppen verteilt. Auch hier gilt, daß die einzelnen Aktorsysteme unbeeinflusst voneinander ihre Arbeit verrichten. Die Verbindung der Aktorsysteme ist oftmals nur indirekt über entsprechende Steuerungsprogramme gegeben, die die Wirkung der verschiedenen Aktorsysteme, wie z.B. Antriebe und Generator, zusammenfügen, um den Abtragsprozeß zu realisieren. Charakteristisch für die in einer FE-Anlage anzutreffenden Aktorsysteme sind deren stark unterschiedliche „Zeitkonstanten“. So zeigt der Generator Antwortzeiten unter  $5\mu\text{s}$  wohingegen Antriebe im Bereich größer als  $500\mu\text{s}$  liegen. Diese innerhalb eines Automatisierungssystems stark differierenden Zeitkonstanten verlangen besondere Sorgfalt bei den Synchronisationsprozessen und stellen somit hohe Anforderungen an die Prozeßrechen-technik. Der zugrunde liegende Abtragsprozeß bedingt eine relativ komplizierte Automatisierungsstruktur. Folgende spezifischen Eigenschaften sind für die schwierige Handhabbarkeit des FE-Abtragsprozesses verantwortlich:

- Vorhandensein wesentlicher Nichtlinearitäten der energietragenden Größen Strom und Spannung, namentlich der Spannungszusammenbruch zum Zündzeitpunkt, einhergehend mit dem Stromanstieg entsprechend der elektrischen Randbedingungen.
- Vorhandensein massiver stochastischer Anteile in der Entladungsentwicklung, namentlich die starke Streuung der Zündverzögerungszeit  $t_d$ , deren Ausprägung bezogen auf den Einzelimpuls nicht vorhersagbar ist.

- Das Vorhandensein von zeitvarianten Systemparametern, die sich infolge von Temperatur- und hydrodynamischen Strömungsänderungen zeitlich auf kaum vorhersagbare Art und Weise ändern. Darunter fallen die Spülverhältnisse, die sich mit zunehmender Senktiefe drastisch verschlechtern können und das Dielektrikum selbst, das aufgrund von Temperaturänderung und von Verschmutzungsgrad seine Zündeigenschaften signifikant ändert.

Tabelle 2-1 ordnet die Funktionsgruppen in die Klassifizierung nach Sensoren, Aktoren und Prozeßrechner ein. Die *Prozessorik* unterliegt den Zwängen des FE-Abtragsprozesses, den Besonderheiten der Sensorik und den sehr unterschiedlichen Aktoren. Die hohe Datendichte bestimmt die Zeitanforderungen an den Steuerungsrechner.

Sensorik	Aktorik	Prozessorik
Spaltsensoren für: Strom Spannung Leitwert des Dielektrikums Zündungserkennung		Dezentrale intelligente Sensoren und kombinatorische Signalverarbeitung mit Kopplung an den Prozeßrechner
Sicherheitssensoren für: Temperaturen Füllstände Rauchentwicklung	Pumpen Kühlaggregat	Einfache Sicherheitsschaltkreise (Not-Aus-Kette) mit Prozeßrechnerkopplung
Dielektrikumssensoren für: Durchflußmengen		Prozeßrechner
Weg- und Drehgeber für: Vorschubsteuerung Positionierung	Antriebsstrang mit Spindeln, Getrieben und/oder Zahnriemen, Antriebe	Dezentrale Strom-, und Geschwindigkeitsregelung mit überlagerter Positionsregelung aus dem Prozeßrechner (CNC) neu:
Generatorinterne Sensoren für: Stromregelung Spannungsregelung	Leistungselektronische Stellglieder wie Halbleiterschalter	Dezentrale Strom-, und Spannungsregelung mit überlagerter Impulssteuerung aus dem Prozeßrechner

***Tabelle 2-1: Einteilung der Komponenten einer FE-Senkanlage***

Um auf der einen Seite die Prozeßanforderungen und auf der anderen Seite die für die FE charakteristischen Systemkomponenten zusammenzufügen, bedarf es einer dezentralen Struktur, die über genügend Transparenz und zahlreiche Kommunikationswege und ein hohes Maß an Systemredundanz verfügt. Letzteres fördert die Prozeßsicherheit und verringert die Ausfallwahrscheinlichkeit.

### **2.3. Fertigungswirtschaftliche Gesichtspunkte der FE-Bearbeitung**

Die Funkenerosion wird überall dort eingesetzt, wo andere Abtragsverfahren aufgrund der Bearbeitungsaufgabe nicht verwandt werden können. Aus Kostengründen werden

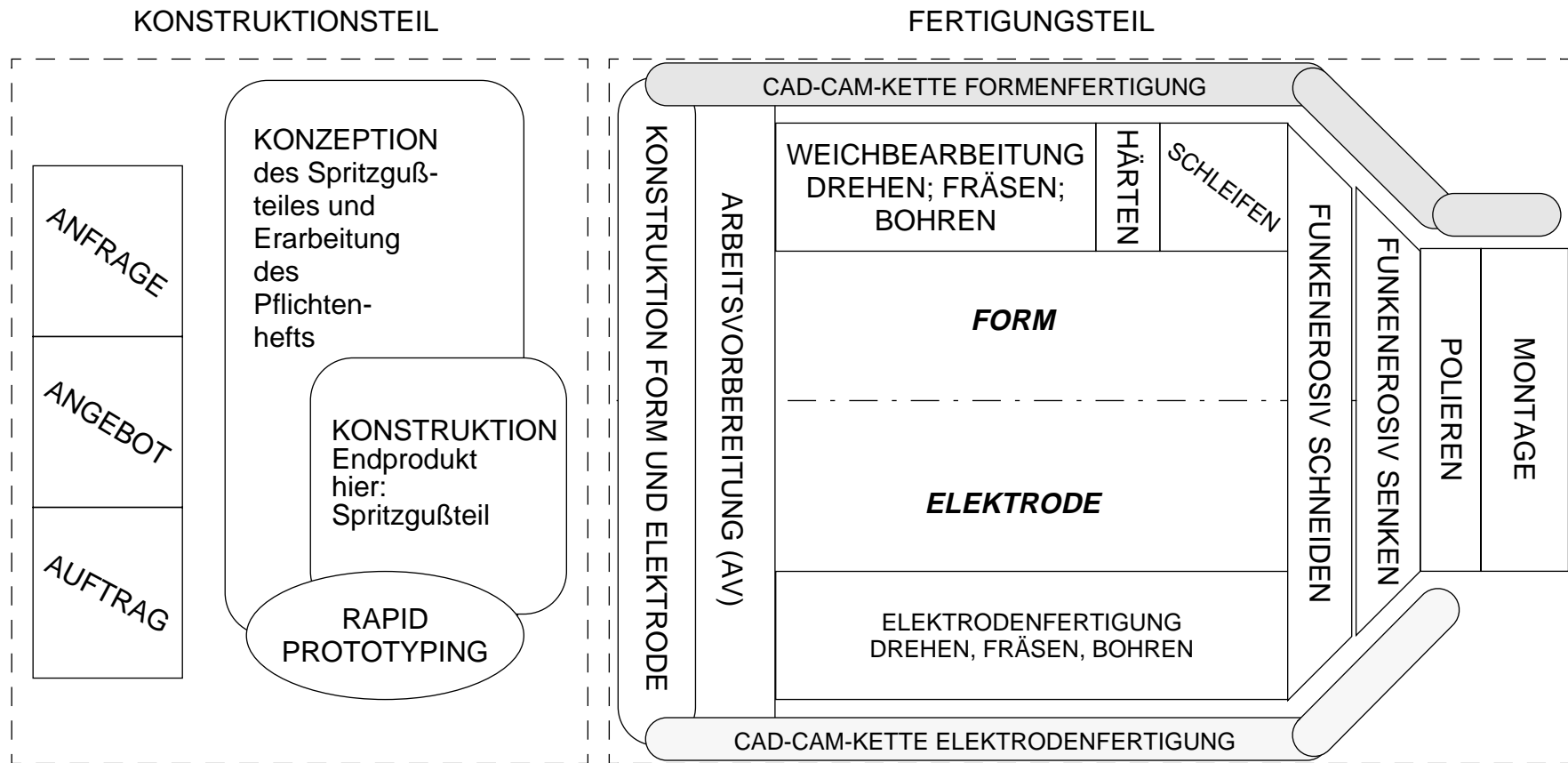
mit der funkenerosiven Fertigung möglichst optimale Maßhaltigkeit und Oberfläche angestrebt, um die manuelle Nachbearbeitung, wie z.B. Polieren, zu vermeiden.

### 2.3.1. FE-Bearbeitung innerhalb der Prozeßkette

Die Erodieretechnik im Formen- und Werkzeugbau wird zur Weich- und Hartbearbeitung eingesetzt. Letzteres wird typischerweise am Ende der Prozeßkette „Formenbau“ benötigt. Der Formenbau stellt Urformwerkzeuge und der Werkzeugbau Umformwerkzeuge her. Im Formenbau finden sich zur Metallverarbeitung vorwiegend Dreh-, Schleif-, Erodier-, Fräs- und Bohrmaschinen. Da die Formen zum Teil sehr unterschiedlich bzgl. ihrer Geometrie sind, ist der Formenbau i.d.R. keine Serienfertigung. Der Formenbau ist entweder Teil eines Produktionsbetriebes, in dem er als Abteilung oder als sogenanntes Profit Center funktioniert oder er ist externer selbständiger Dienstleister [Pol95]. Eine besondere Bedeutung kommt dem Formenbau und seiner Prozeßorganisation deshalb zu, weil die gesamte Produktentwicklung und Fertigung vom Werkzeug-, Betriebsmittel- oder Formenbau abhängt [EvS96] [GoF85]. Innerhalb des Formenbaus ist die Erodieretechnik die Schlüsseltechnologie, da die Fertigungsaufgaben zum Großteil technisch nicht auf andere Art und Weise gelöst werden können. Ingesamt wird die unmittelbare Auswirkung der Optimierung der FE-Bearbeitung in der Hauptzeit und in den Nebenzeiten für die gesamte Produktion in Bild 2-2 ersichtlich. In der typischen Prozeßkette eines Formenbaus wird eine Zweiteilung in Konstruktions- und Fertigungsteil vorgenommen. Darin werden zwei CAD-CAM-Ketten parallel dargestellt, die die Form- und Werkzeugfertigung zum Inhalt haben. Der Synchronisationspunkt für die parallel laufenden Fertigungsketten ist die Station des FE-Senkens in der Prozeßkette, die gleichzeitig mit dem richtig vorgearbeiteten Werkstück und der passenden Elektrode zur FE-Bearbeitung beschickt werden muß.

Der Konstruktionsteil der Prozeßkette beinhaltet sämtliche Vorgänge, die der eigentlichen Fertigung der Formen bis zur anschließenden Herstellung, z.B. des Spritzgußwerkstücks, vorangehen. Dazu gehören neben den elementaren kaufmännischen Vorgängen, wie Nachfrageabwicklung, Angebotserstellung und Auftragsbearbeitung, die konzeptionellen und konstruktiven Anteile der Spritzgußherstellung. Dieser Teil der Prozeßkette ist geprägt vom intensiven Kundenkontakt. Dabei wird versucht, eventuelle Fehlentwicklungen abzufangen und über entsprechende Mechanismen der Qualitätskontrolle frühzeitig auf die Produktentwicklung Einfluß zu nehmen. Neuartige Ansätze, wie etwa das sogenannte „Reverse Engineering“ [Wil93], sehen besonders in diesem Stadium der Produktentwicklung, aber auch später den Ansatz darin, den Kunden, in diesem Fall den Abnehmer des Spritzgußteils, aktiv in den Planungsprozeß miteinzubeziehen. Dies geht soweit, daß der eigentliche Planungsprozeß der Fertigung dabei ausschließlich vom Kunden bzw. vom Absatzmarkt ausgeht.

Neuere Fertigungsmethoden machen massiv Gebrauch von Methoden des sogenannten „Rapid Prototyping“, wie z.B. der Stereolithographie [Cel95]. Diese Techniken erlauben die Herstellung eines naturgetreuen Prototyps, z.B. des Spritzgußteils ohne vorherige aufwendige Formherstellung.



**Bild 2-2: Prozeßkette im Formenbau: Konstruktionsteil und Fertigungsteil**



Der Hauptvorteil besteht in der frühen Verfügbarkeit des Produktes, so daß funktionale und ästhetische Gesichtspunkte vor der eigentlichen Fertigung der Spritzgußform mit dem Kunden und den Produktdesignern vorab diskutiert und festgelegt werden können. Der Konstruktionsteil der Prozeßkette liefert eine vollständige Konstruktionsunterlage des Spritzgußteils. In der Prozeßkette folgt die Konstruktion der Spritzgußform und der passenden Elektrodentechnologie für die funkenerosive Bearbeitung. Aufgrund der Komplexität der Fertigungs-Prozeßkette werden üblicherweise parallel zwei CAD-CAM- Ketten eingesetzt, die zum einen die Spritzgußform und zum anderen ausschließlich die Erodiererelektrodenfertigung begleiten. Eine ganz wesentliche Aufgabe der Form-, und Elektrodenkonstruktion in enger Kopplung mit der Arbeitsvorbereitung ist die Aufteilung des Gesamtfertigungsaufwandes auf die dem Formenbau zur Verfügung stehenden Bearbeitungsmittel. Hierin ist ein sehr großes Einsparungspotential zu sehen, das zu drastischen Nebenzeit- und Hauptzeitverkürzungen führen kann [Sch96a].

Die Stationen der Formenfertigung beginnen mit der Weichbearbeitung, den klassischen spanenden Verfahren. Dem Härten zur Erreichung der gewünschten Verschleißeigenschaften folgt das Schleifen, das bei günstigen Geometrien formgebend verwandt, allerdings i.d.R. zur Oberflächenbearbeitung eingesetzt wird. Die Schleifbearbeitung kann u.U. auch nach der Erosion stattfinden. In Bild 2-2 folgt dem Schleifen die Drahterosion, die sowohl zur Formenfertigung als auch zur Elektrodenfertigung eingesetzt wird. Die formgebende Bearbeitung findet ihren Abschluß im funkenerosiven Senken, das die Teilprozeßketten Elektrodenfertigung und Formenfertigung zusammenführt. Die nahezu fertige Form wird im Anschluß poliert, um gewisse Oberflächengüten zu erreichen.

Um den Aufwand und die Aufgabenverteilung innerhalb der Prozeßkette zu illustrieren, ist in Tabelle 2-2 eine exemplarische Zusammenstellung der auf die einzelnen Technologien entfallenden Anteile an der Gesamtfertigungszeit angegeben.

Stations. Nr.	Bearbeitungsart	Zeitanteil
1	Fräsen, Bohren	11,3%
2	Drehen	1,3%
3	Härten	0,3%
4	Schleifen, Flach-,Profil-, Rund-, Koordinaten-	9,0%
5	Drahterodieren	21,0%
6	Senkerodieren	25,6%
7	Polieren	6,0%
8	Montieren, Abstimmen	13,3%
9	Messen	4,4%
10	Zusatzbearbeitung	7,8%

***Tabelle2-2: Exemplarische Zusammensetzung der Fertigungszeit einer Spritzgußform ohne Konstruktion und Arbeitsvorbereitung (AV) [Hos96]***

Diese exemplarische Verteilung zeigt, daß die Erosion (Draht-, und Senkerosion) eine Schlüsselrolle im Formenbau einnimmt. Da das manuelle Polieren sehr kostenintensiv ist, bringt eine Prozeßoptimierung der Senkbearbeitung im Hinblick auf bessere Oberflächen eine deutliche Ertragssteigerung. Das Ziel dabei ist die Verminderung sogenannter hochharter martensitischer oder auch „Weißer Schichten“, die aus dem thermischen Einwirken der Abtragserosion auf die Werkstückoberfläche resultieren. Ferner sind sogenannte Mikrorisse zu vermeiden, die durch Kerbwirkung zu frühzeitigem Verschleiß der Spritzgußform an besonders beanspruchten Stellen führen können [KWW74]. Abschließend werden die Spritzgußwerkzeuge montiert und zunächst als Muster an den Kunden übergeben.

### **2.3.2. Kostenfaktoren und Einsparpotentiale in der Senkerosion**

Dieser Abschnitt beschränkt sich auf die Senkerosion, gilt aber in den wesentlichen Aussagen gleichermaßen für die Drahterosion. Die Senkerosion erlaubt im Gegensatz zur Drahterosion eine präzise Verschleißaussage nicht, da der Elektrodenverschleiß von einer Vielzahl von Maschinenparametern und Werkstückdaten und -geometrien abhängt. Die Fertigungszeit als wesentlicher Kostenfaktor setzt sich aus Hauptzeiten und Nebenzeiten zusammen. Die sogenannten Hauptzeiten umfassen die eigentliche Bearbeitung, die Nebenzeiten beinhalten Rüstzeiten, Meßaufwendungen und sonstige Zeiten, die nicht unmittelbar der Werkstückbearbeitung dienen [Beh89]. Aus der Kostenzusammenstel-

lung ergeben sich drei Haupteinsparpotentiale zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Fertigungstechnologie „Funkenerosion“ in der Prozeßkette Formen-, Werkzeugbau:

a) *Hauptzeitreduzierung und Verfahrensoptimierung*

Die FE-Technologie ist von Natur aus ein sehr langwieriges Verfahren. Die Bearbeitungszeiten können je nach gewünschter Oberflächenqualität sehr stark anwachsen. So sind Bearbeitungszeiten in einer Aufspannung von bis 24h möglich. Daraus ergibt sich, daß bereits marginale Verkürzungen der Bearbeitungszeiten unter Beibehaltung der Oberflächenqualität von enormer Wirkung sind. Aus der Anlagenauslegung auf unbedingte Prozeßsicherheit folgt meist eine Abtragsminderung. Eine Maßnahme der Hauptzeitreduzierung besteht deswegen darin, die Zahl an abtragswirksamen Impulsen unter Beibehaltung absoluter Prozeßsicherheit zu erhöhen. Dies kann durch eine Verkürzung der Pausendauer, besondere Spültechniken oder neuartige Prozeßoptimierungsalgorithmen erreicht werden. Darauf können weitere Maßnahmen, wie z.B. die Stromstufenvariation in Verbindung mit Planetärbearbeitung, aufbauen.

b) *Erhöhung des Automatisierungsgrades der FE-Anlagen*

Moderne FE-Anlagen, insbesondere die Drahtschneidanlagen, verfügen über Schnittstellen zu entsprechenden CAD Arbeitsplätzen, die in der Lage sind, aus Konstruktionszeichnungen über programmtechnische Umsetzung entsprechende Fertigungsprogramme zu erzeugen. Meist werden dort bereits Strategien zur Verfahrensoptimierung durch Elektrodenwechsler miteinbezogen. Darüber hinaus existieren für die gängigen Maschinen am Markt Werkzeugwechsler und Werkstückwechsler, die eine vollautomatisierte Bearbeitung erlauben. Diese Palettiersysteme haben in jüngster Zeit aufgrund der deutlich verbesserten Genauigkeiten zu einer starken Erhöhung des Automatisierungsgrades von FE-Anlagen geführt. Ein Entwicklungspotential verbirgt sich in der Kopplung der in der Prozeßkette stehenden Bearbeitungsstationen. Ein weiterer Ansatz ist in neuartiger 3D-Erosion zu sehen, die auf einfachste Elektrodenformen abzielt. Die einzige am Markt derzeit verfügbare Anlage konnte sich allerdings bislang noch nicht durchsetzen [NN a].

c) *Organisatorische Optimierung und Nebenzeitreduzierung*

Grundsätzlich sind der Hauptzeitreduzierung mit den bekannten Technologien Grenzen gesetzt, da nur 100% der angelegten Erodierfunken abtragswirksam brennen können. Bei Nebenzeitreduzierung wirken sich wie bereits erwähnt, die Wechsel-, und Verbundsysteme für Elektroden und Werkstücke sehr günstig aus. Insgesamt führt eine Substitution der FE-Bearbeitung am ehesten zu relevanten Effizienzsteigerungen. Die Rüstzeiten spielen angesichts der langen Hauptzeiten eine nachrangige Rolle.

### 2.3.3. Konkurrierende Bearbeitungsverfahren

Die spezifischen Möglichkeiten der FE-Bearbeitung können mit anderen Verfahren nicht realisiert werden. Allenfalls möglich ist die Substitution von Teilen der FE-Bearbeitung. Die wichtigsten mit der FE-Bearbeitung konkurrierenden Bearbeitungsverfahren sind die Laserbearbeitung und die spanende Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (High Speed Cutting HSC) [Sch96b]. Die Laserbearbeitung wird vorwiegend zum Trennen eingesetzt. Die formgebende Bearbeitung, wie etwa das Erzeugen von Kavitäten analog zur Senkerosion, ist zwar auch möglich, kann allerdings aufgrund der fehlenden Genauigkeit kaum eingesetzt werden. Dasselbe gilt für die schneidende Laserbearbeitung, die ebenfalls ungenau ist und relativ schlechte Oberflächen produziert. Die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung scheint die Funkenerosion in bestimmten Anwendungen ersetzen zu können. Die Besonderheit von HSC besteht darin, daß mit entsprechenden Schneidstoffen, wie TiC auch hochharte und gehärtete Stähle bearbeitet werden können und daß dabei sehr feine Oberflächen möglich werden [Hoc96], [Jan96]. Damit werden in Zukunft sicherlich alle Außenbearbeitungsaufgaben, die den Einsatz rotierender Schnittwerkzeuge aufgrund ihrer Geometrie zulassen, bearbeitet. Dort wird insbesondere die Senkerosion durch HSC ersetzt. Die Erzeugung komplexer Kavitäten wird jedoch mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit eine Domäne der Funkenerosion bleiben. Denkbar wäre eine Kombination beider Verfahren, die eine Vorbearbeitung mittels HSC vorsieht und lediglich die Endkonturen erosiv erzeugt. Als vorteilhaft erweist sich auch die HSC-Nachbearbeitung zur Verbesserung der Oberflächenqualität funkenerosiv erzeugter Oberflächen [NN b]. Der breiteren Einführung von HSC steht im Moment der relativ hohe Preis von HSC-Bearbeitungszentren entgegen. Mit zunehmendem Preisverfall wird HSC aus heutiger Sicht eine der Schlüsseltechnologien im Formenbau werden.