

6 Vorschubregelung

Die Qualität der Spaltweitenregelung übt großen Einfluß auf die Leistungsfähigkeit einer Erodiermaschine aus. Die Regelstrategie sollte abgestimmt sein auf die eingesetzte Generator-technologie und um eine Einrichtung zur Lichtbogenerkennung ergänzt werden, damit Prozeß-entartungstendenzen frühzeitig erkannt und behandelt werden können. Bei der Vielzahl der praktischen Anwendungsfälle des funkenerosiven Senkens muß der Spaltweitenregler einen sicheren und abtragsintensiven Prozeßverlauf gewährleisten. Da die elektrisch wirksame Spaltweite während der Bearbeitung aufgrund der Oberflächenrauheit der Elektroden und der lokal unterschiedlichen Eigenschaften des Dielektrikums nicht meßbar ist, werden andere Kenngrößen zur Spaltweitenregelung eingesetzt.

6.1 Bewertung der Zündverzögerungszeit als Reglereingangsgröße

In der industriellen Anwendung besonders verbreitet ist die Verwendung der Zündverzögerungszeit t_d als Reglereingangsgröße. Der Einsatz zur Spaltweitenregelung basiert auf der Erkenntnis, daß die Zündverzögerungszeit von der Durchbruchfeldstärke beeinflusst wird. Demnach verursacht bei konstanter Spaltverschmutzung eine verringerte geometrische Spaltweite ein erhöhtes elektrisches Feld und damit eine reduzierte Verzögerungszeit beim Zünden der Entladestrecke.

Der Vorteil der Zündverzögerungszeit gerade für mikrocomputer-basierte Prozeßsteuerungen ist die einfache Messung. So kann diese Größe etwa mittels Komparatoren aus der Spaltspannung abgeleitet werden. Außerdem können über die Zündverzögerungszeit unterschiedliche Entladungsformen vom Kurzschluß bis hin zum Leerlauf gekennzeichnet werden.

Der wesentliche Nachteil bei Verwendung der Zündverzögerungszeit zur Spaltweitenreglung besteht in der beträchtlichen Schwankungsbreite dieser Größe. Diese Schwankungen resultieren aus der chaotischen Natur des Erosionsvorgangs. So ist die Aussage, daß bei konstanter Spaltverschmutzung und vergrößerter Spaltweite auch eine erhöhte Zündverzögerungszeit zu beobachten ist, nur für Einzelentladungen relevant. Beim realen Erosionsvorgang ist keine der genannten Einflußgrößen konstant, da Folgen von Entladungen vorliegen, die einander gegenseitig beeinflussen. Durch die abtragende Wirkung erhöht jede Entladung die Spaltverschmutzung. Gasblasen im Funkenspalt, die durch Verdampfungsvorgänge während einer Entladung entstehen, beeinträchtigen durch ihren Einfluß auf die elektrische Feldstärke die Zündverzögerungszeiten aller nachfolgenden Entladungen. Die geometrische Spaltweite wird zum einen ständig durch den Abtragsvorgang vergrößert, zum anderen bewirkt der Antriebsmechanismus ebenfalls eine Änderung der Spaltweite. Eine externe Spülung (Saug- oder Druckspülung) vermag den Effekt der zunehmenden Spaltverschmutzung durch Abtragspartikel zu kompensieren, jedoch müssen Bohrungen in einer der Elektroden angebracht werden.

Weil die Formgebung durch Spülbohrungen beeinflusst wird, ist diese Art der Spülung jedoch häufig nicht einsetzbar. In der praktischen Anwendung der Erosionstechnologie überwiegt die Bearbeitung ohne externe Spülung. Demzufolge sind ausgeprägte Schwankungen der Zündverzögerungszeit zu beobachten. Bild 6.1 zeigt den großen Bereich, in dem die Zündverzögerungszeit t_d für eine konstante geometrische Spaltweite schwanken kann. Die Schwankungsbreite reicht von Kurzschlüssen (gekennzeichnet durch $t_d = 0 \mu\text{s}$) bis hin zu Leerläufen (gekennzeichnet durch $t_d = 30 \mu\text{s}$)

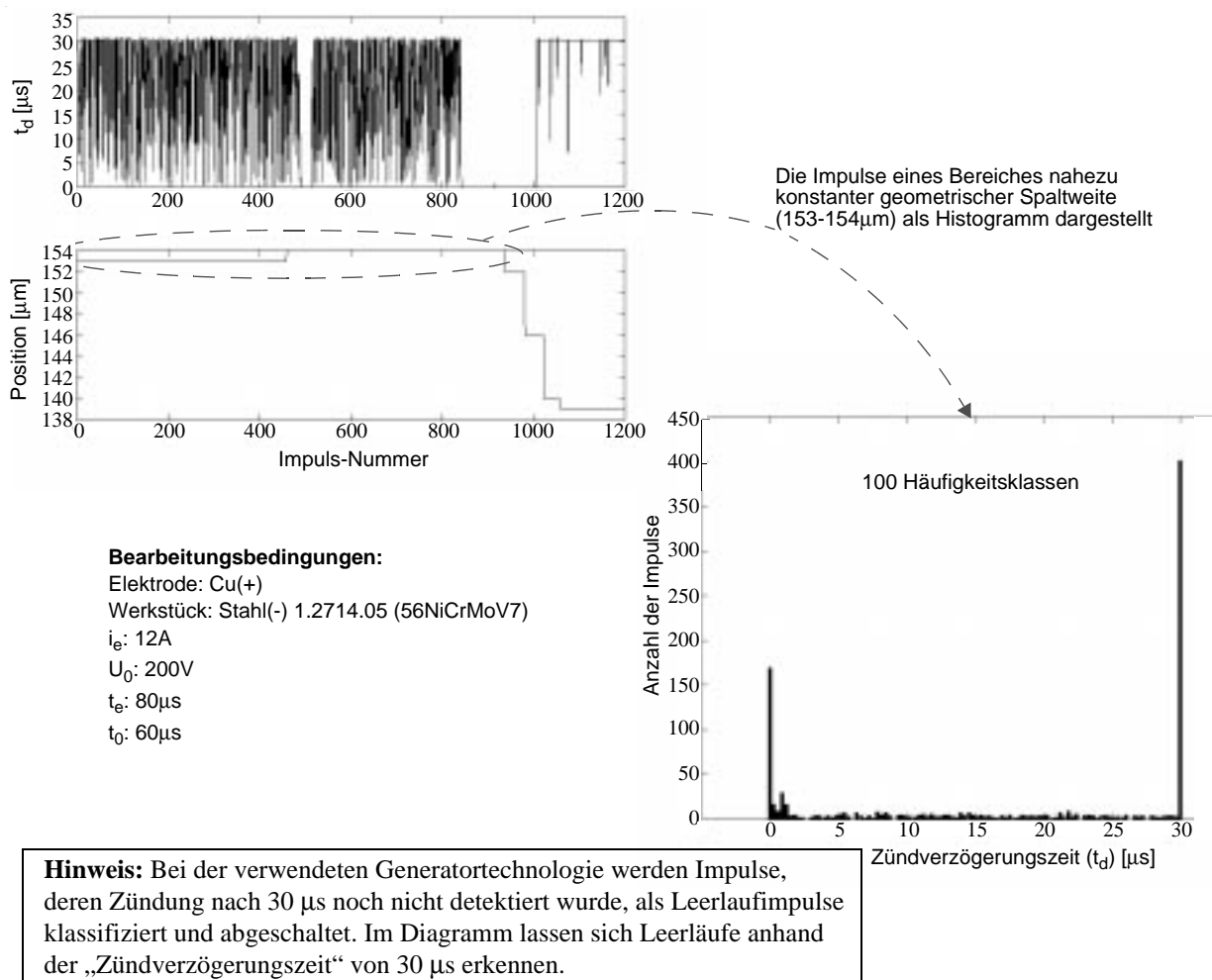


Bild 6.1: Schwankung von t_d bei konstanter geometrischer Spaltweite

Um die Schwankungen der Zündverzögerungszeit auszugleichen, werden die für Einzelimpulse gemessenen Zeitwerte zunächst gefiltert und erst dann zur Spaltweitenregelung eingesetzt. Ein solcher Filter kann im einfachsten Fall durch einen arithmetischen Mittelwert realisiert werden, aber auch komplexere Methoden der Filterung sind denkbar (z.B. *Noisy Gradient Follower* [WiSt85]). Dennoch führt die schwankende Reglereingangsgröße Zündverzögerungszeit t_d häufig zu unruhigen Pinolenbewegungen. Bild 6.2 zeigt die oszillierenden Bewegungen der Pinole während eines auf Basis der mittleren Zündverzögerungszeit geregelten Einsenkvorgangs.

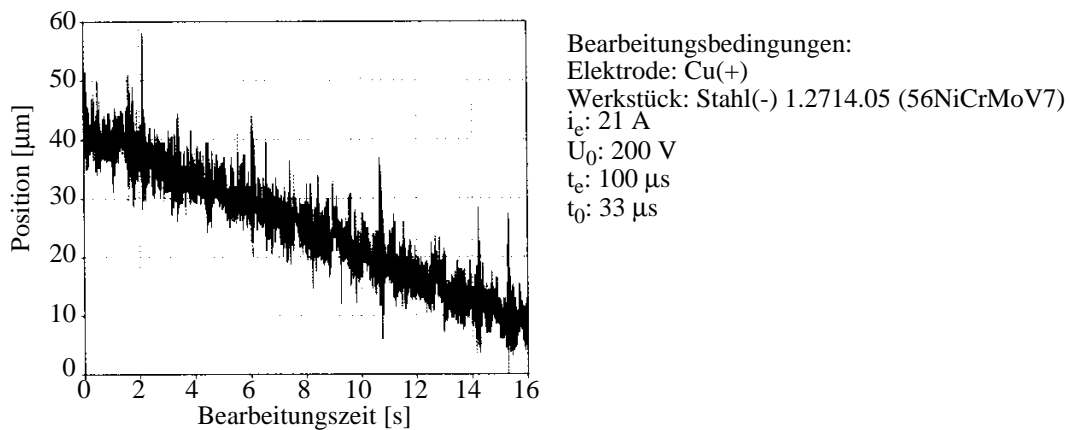


Bild 6.2: Einsenkbewegung eines t_d -basierten Spaltweitenreglers

Bei der Schruppbearbeitung sind diese geringen Unruhen in der Pinolenbewegung zu vernachlässigen, da hier in einem relativ großen Spaltweiten-Bereich ein stabiler Prozeß möglich ist. Für die Anwendung in der Schlichtbearbeitung sowie bei Mikroerosion ist ein stabiles Prozeßverhalten jedoch nur in einem engen Bereich der ohnehin sehr geringen geometrischen Spaltweite gegeben. Wenn die Regelung aufgrund der schwankenden Eingangswerte die Pinole häufig in den Bereich leerlauf- oder kurzschlußartiger Erosion überschwingen läßt, ergeben sich daraus Stabilitätsprobleme. Unruhige Pinolenbewegungen führen dann zu Prozeßentartungen in Form von Lichtbögen und Kurzschlüssen [Luo97].

Die Fortschritte in der Generatortechnik verschärfen diese Problematik. Moderne Generatoren produzieren häufig Impulse mit steilen Anstiegsflanken bei der Zündspannung und erreichen damit eine erhöhte Zündwilligkeit des Funkenspaltes. Ein schnelles Durchzünden der Entladestrecke ist vorteilhaft, da während der Zündverzögerungszeit kein Energieeintrag in das Werkstück erfolgt und diese Verzögerungszeit somit gering gehalten werden muß. Als Konsequenz verringert sich der Wertebereich auftretender Zündverzögerungszeiten und die Wirkung der zufälligen Schwankungen verstärkt sich. Dadurch wird die Eignung der Größe t_d für die Spaltweitenregelung verringert. Auch der innerhalb der Versuchsanlage eingesetzte moderne Generatortyp ist nach dem Prinzip einer geregelten Stromquelle ausgeführt und produziert Spannungsimpulse mit großer Flankensteilheit. Die beobachteten Zündverzögerungszeiten sind entsprechend geringer als bei statischen Impulsgeneratoren älterer Bauart.

6.2 Alternative Reglereingangsgrößen

Die Nachteile der Zündverzögerungszeit gaben den Anlaß, alternative Eingangsparameter für die Spaltweitenregelung zu untersuchen, die besser an den verwendeten Generatortyp angepaßt sind und einen stabilen Prozeßverlauf auch im Schlichtbetrieb ermöglichen. Eine Lösungsmöglichkeit besteht darin, die relativen Häufigkeiten der Leerläufe und Kurzschlüsse, jeweils betrachtet für ein festes Zeitintervall, zur Regelung der Spaltweite einzusetzen, da sich mit ihnen eindeutig unterschiedliche Prozeßzustände unterscheiden lassen.

Bild 6.3 zeigt, wie über den Leerlauf- und Kurzschlußanteil sowohl der im Sinne der Regelung gewünschte abtragsintensive Bereich als auch die unerwünschten Prozeßzustände Leerlauf und Kurzschluß eindeutig zugeordnet werden können.

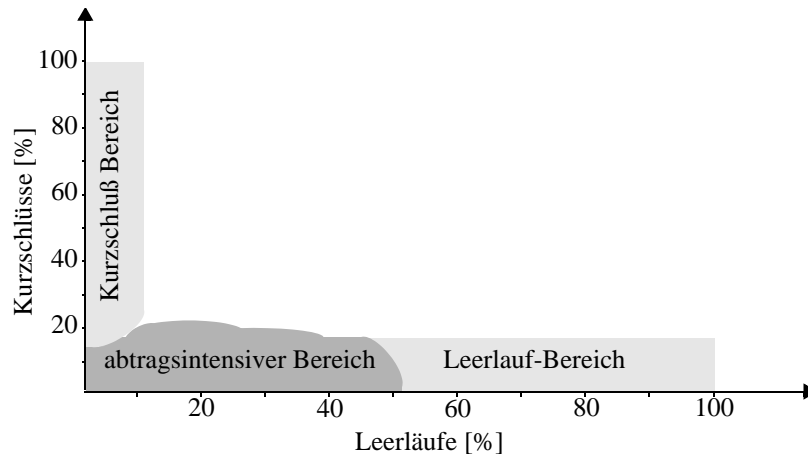


Bild 6.3: Charakterisierung unterschiedlicher Prozeßzustände mittels der relativen Leerlauf- und Kurzschlußhäufigkeit

6.3 Vergleich unterschiedlicher Methoden der Spaltweitenregelung

Die entwickelte Versuchsanlage erlaubt die Implementierung unterschiedlichster Regel- und Optimierstrategien auf dem VMEbus-Prozeßrechner, um diese dann unter gleichen Versuchsbedingungen zu testen. Zum Vergleich wurde ein t_d -basierter Spaltweitenregler sowie ein Regler, der die relativen Leerlauf- und Kurzschluß-Häufigkeiten als Eingangsgrößen verwendet (LL/KS-basiert), im Hinblick auf Abtrags- und Verschleißverhalten bei unterschiedlichen Bearbeitungsaufgaben untersucht.

Der t_d -basierte Spaltweitenregler weist eine geknickte Reglerkennlinie auf (Bild 6.4). Zusätzlich sind die Vorwärts- und Rückwärtsverstärkungen getrennt einstellbar (K_{vor} , K_{zur}). Als Eingangsgröße dient die Zündverzögerungszeit t_d . Eine Glättung dieser Eingangsgröße wurde eingefügt, um zufällige Schwankungen wenigstens teilweise zu kompensieren. Diese Glättung basiert auf der Berechnung des arithmetischen Mittelwertes ($\overline{t_{dm}}$) der Zündverzögerungszeiten von 30 Impulsen. Auf diese Weise ist sichergestellt, daß die Spaltweitenregelung auf Grundlage der jeweils letzten Impulse durchgeführt wird.

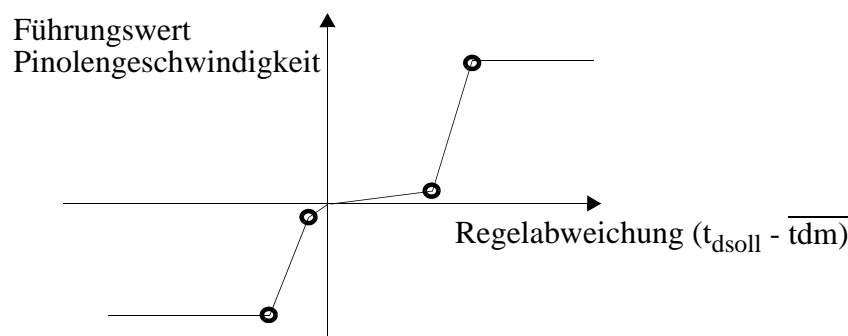


Bild 6.4: Schematische Darstellung der Kennlinie des t_d -basierten Spaltweitenreglers

Der alternativ implementierte Spaltweitenregler auf Basis der relativen Leerlauf- und Kurzschlußhäufigkeiten soll den Prozeß in einem Bereich mit nur wenigen Kurzschlüssen und Leerläufen halten. Zur Gewinnung der Eingangsgrößen wird in einem festen Betrachtungsintervall (1 ms) die Anzahl der aufgetretenen Kurzschlüsse und Leerläufe ermittelt. Diese Werte werden dann in Relation zur Gesamtzahl der im Intervall beobachteten Impulse gesetzt. Als Regler-Parameter lassen sich Grenzwerte für relative Leerlauf- und Kurzschlußhäufigkeiten einstellen (Lim_{LL} , Lim_{KS}). Sind die im Betrachtungsintervall ermittelten relativen Leerlauf- und Kurzschlußhäufigkeiten unterhalb der eingestellten Grenzwerte, so erfolgt keine Veränderung der Pinolenposition. Erst beim Überschreiten dieser Werte wird proportional zum Betrag der Grenzwertüberschreitung die Pinolenposition verändert. Neben den Kurzschluß- und Leerlauf-Grenzwerten lassen sich bei diesem Regler auch die Vorwärtsverstärkung (P_{LL}) sowie die Rückwärtsverstärkung (P_{KS}) als Regler-Parameter einstellen.

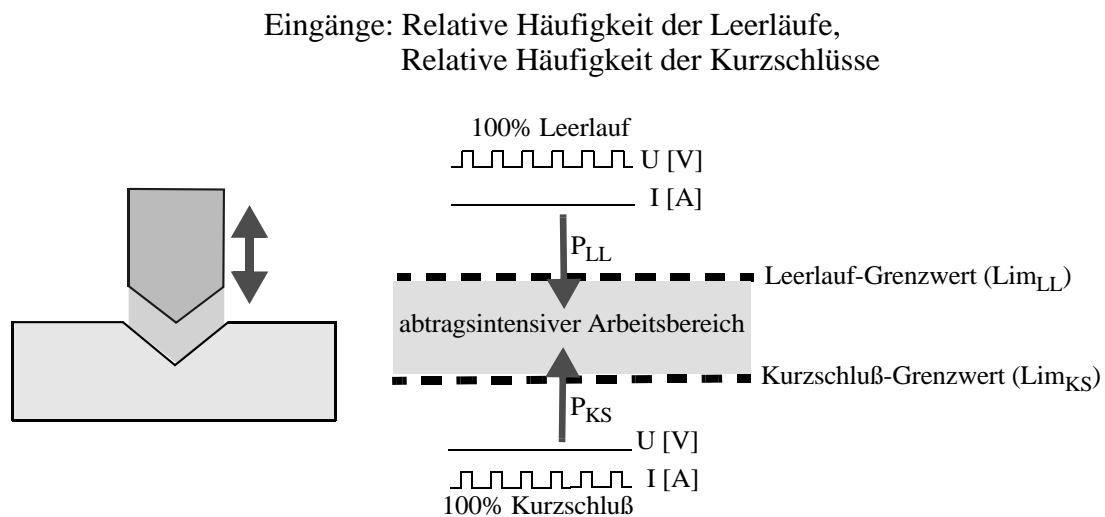


Bild 6.5: Prinzip der Spaltweitenregelung mit Leerlauf- und Kurzschlußhäufigkeit

Der Reglervergleich erfolgte anhand einer definierten Erosionsaufgabe. Dabei wurden in Einzelversuchen die Einstellparameter der Spaltweitenregler systematisch variiert. Eine Lichtbogenerkennung auf Basis der Brennspannung, wie sie in Abschnitt 5.3 beschrieben ist, war in jedem Einzelversuch aktiv, um Prozeßentartungen zu verhindern.

Diese Lichtbogenerkennung arbeitete unabhängig von der Spaltweitenregelung. Unmittelbar nach erkannter Fehlentladung wurde der jeweilige Impuls abgeschaltet. Beschädigungen auf der Werkstückoberfläche konnten auf diese Weise selbst bei ungünstig eingestellter Spaltweitenregelung in keinem der durchgeführten Versuche festgestellt werden.

Die Bearbeitung erfolgte immer ohne externe Spülung, um einen möglichst praxisrelevanten Vergleich zu gewährleisten. Die Reinigung des Spaltes geschah mittels einer Bewegungsspülung. Die Spülbewegung selbst wird durch eine Art Kettenzähler, der nach jeder Fehlentladung erhöht wird, ausgelöst.

Das Ziel einer Bewegungsspülung ist es, möglichst viele Abtragspartikel aus dem Arbeitsspalt zu befördern und gleichzeitig für eine gute Durchmischung des Dielektrikums zu sorgen, damit Partikelkonzentrationen aufgehoben werden. Die Spülung wurde deshalb als Kombination einer oszillierenden und einer abhebenden Bewegung implementiert.

Die Werkzeugelektrode vollführt dazu zunächst eine Pendelbewegung im Bereich weniger Mikrometer zwischen einer oberen und einer unteren Schranke, um eine Verwirbelung der Partikel im Spalt zu erreichen. Anschließend erfolgt ein schnelles Abheben der Werkzeugelektrode bis auf 1mm über das Werkstück, um das mit Partikeln verunreinigte Dielektrikum aus dem Spalt zu entfernen. Die Oszillation sowie die Abhebung wurden mit hoher Geschwindigkeit durchgeführt, um die Prozeßunterbrechung während des Spülvorgangs kurz zu halten. Ein protokollierter Spülvorgang ist ausschnittsweise in Bild 6.6 zu sehen.

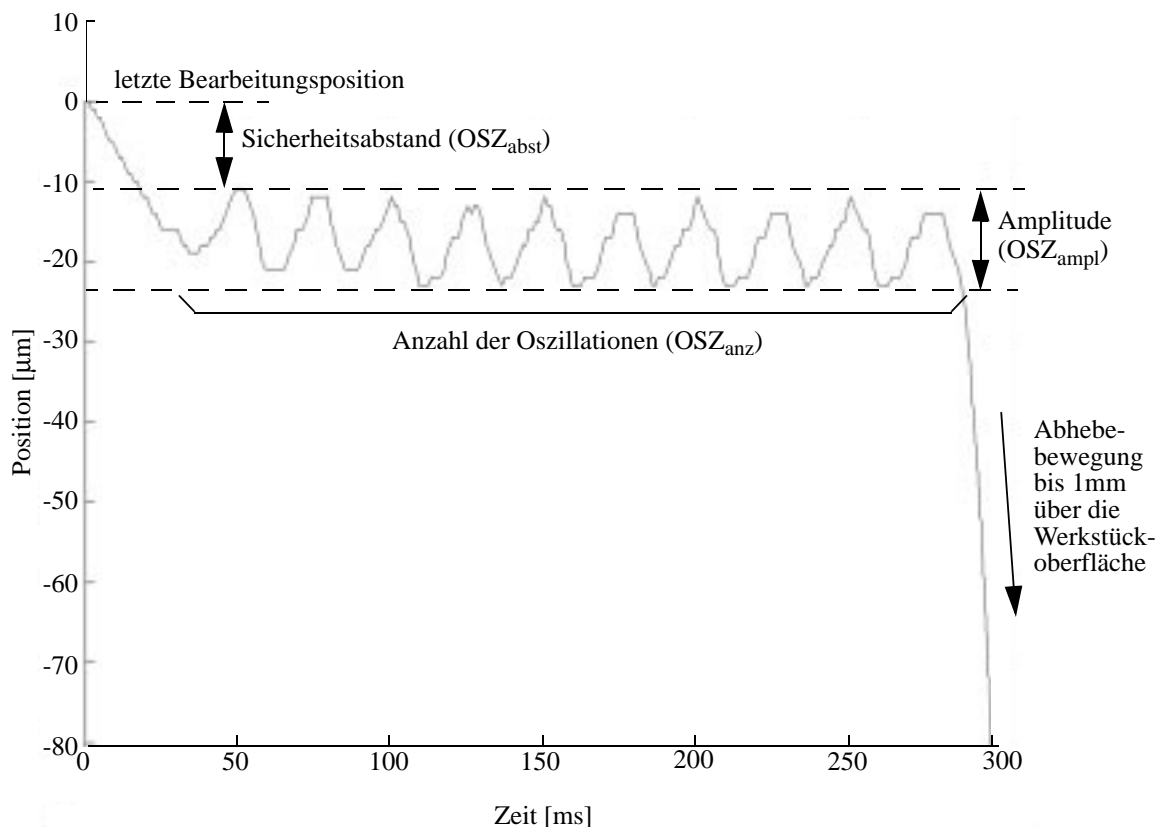


Bild 6.6: Ablauf und Parameter der Bewegungsspülung

Bei dem Reglervergleich wurde eine einfache Elektrodengeometrie (Bild 6.7) zugrunde gelegt. Betrachtet wurde der reine Einsenkvorgang (nur Z-Achse), da in diesem Fall schlechtere Spülbedingungen vorherrschen als bei der planetären Bearbeitung.

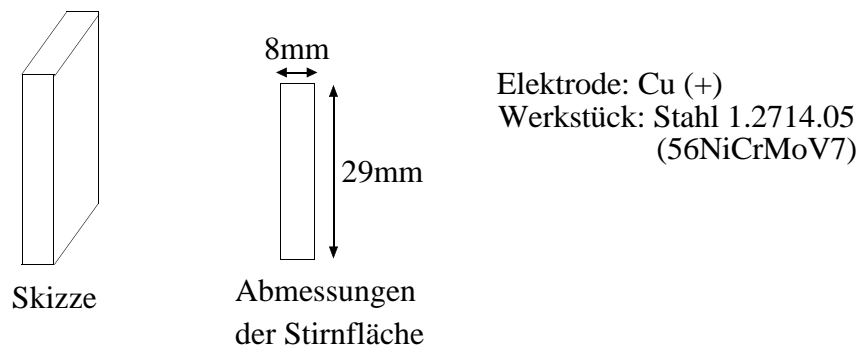


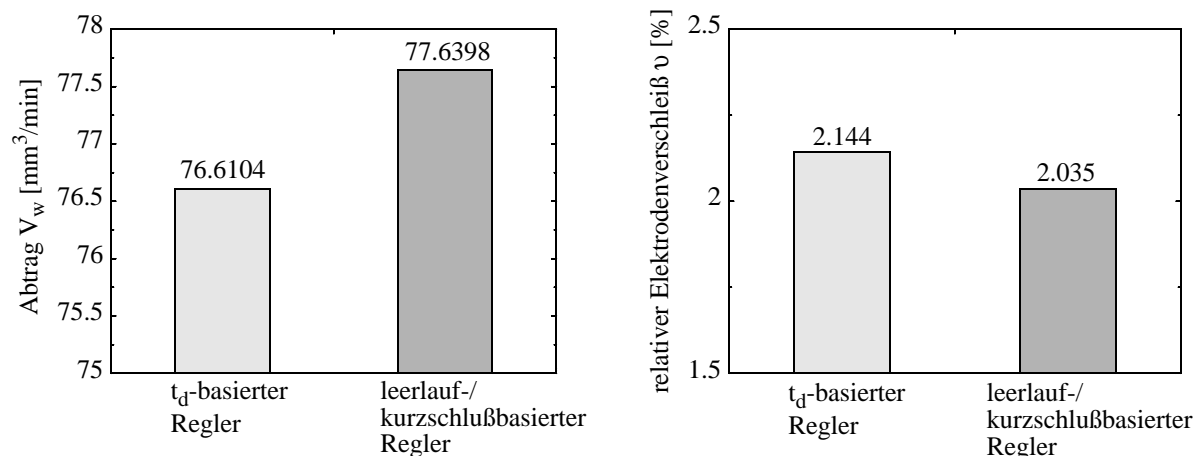
Bild 6.7: Elektrodengeometrie für den Reglervergleich

Für den Vergleich der verschiedenen Spaltweitenregler wurde sowohl eine Schrupp-, als auch eine Schlicht-Einstellung gewählt, um unterschiedlichen Bearbeitungsfällen mit jeweils verschiedenen Anforderungen an die Spaltweitenregelung gerecht werden zu können. Tabelle 6.1 zeigt die Maschineneinstellungen:

Einstellparameter	Schlicht-Einstellung	Schrupp-Einstellung
i_e [A]	6	40
U_0 [V]	200	160
t_e [μ s]	10	200
t_0 [μ s]	30	20
N_{VPL}	5	50
$N_{sp\ddot{u}l}$	10	100
Eindringtiefe	variabel	10 mm
Versuchsdauer	60 Min.	variabel

Tabelle 6.1: Maschineneinstellungen für den Reglervergleich

Die jeweils besten Ergebnisse der verschiedenen Spaltweitenregler für die Schruppbearbeitung sind in Bild 6.8 dargestellt. Die Einstellparameter des Reglers, die zu diesem Ergebnis geführt haben, sind ebenfalls angegeben.



Einstellparameter für das jeweils beste Resultat:

t_d -basierter Regler: $K_{\text{vor}} 40$ $K_{\text{zur}} 40$ $t_{\text{dsoll}} 10$

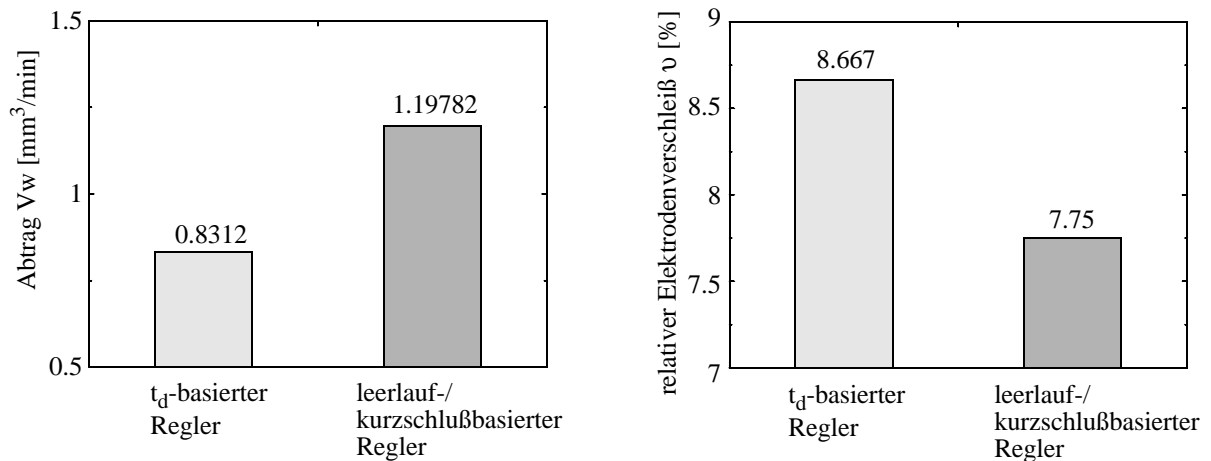
leerlauf-/ kurzschlußbasierter Regler: $\text{Lim}_{\text{LL}} 50$ $\text{Lim}_{\text{KS}} 5$ $P_{\text{LL}} 40$ $P_{\text{KS}} 10$

Bild 6.8: Ergebnisse des Reglervergleiches im Schruppversuch

Aus den Versuchsergebnissen für den Schruppbetrieb (Bild 6.8) geht hervor, daß der leerlauf-/kurzschlußbasierte Regler nur leichte Verbesserungen in der Abtragsleistung gegenüber einem konventionellen, t_d -basierten Regler aufweist. Dies entspricht den Erwartungen, da im Schruppbetrieb aufgrund der größeren Spaltweite geringfügige Schwankungen in der Pinolenbewegung tolerierbar sind.

Im Sinne einer Durchmischung des Dielektrikums kann eine oszillierende Bewegung der Pinole während der Bearbeitung sogar vorteilhaft sein, weil damit eine bessere Verteilung der Abtragspartikel erzielt wird. Dieses läßt sich beim t_d -basierten Regler durch eine erhöhte Vorwärts- und Rückwärtsverstärkung erreichen (K_{vor} , K_{zur}). So wurde das in Bild 6.8 mit t_d -basierter Regelung erzielte Ergebnis mit derartig eingestelltem Regler erreicht. Der Effekt der oszillierenden Bewegung kann demzufolge mit einer zusätzlichen Spülbewegung verglichen werden.

Die Ergebnisse für den Schlichtversuch, wie sie in Bild 6.9 dokumentiert sind, lassen die Unterschiede beider Reglertypen klar hervortreten:



Einstellparameter für das jeweils beste Resultat:

t_d -basierter Regler: $K_{\text{vor}} 5$ $K_{\text{zur}} 5$ $t_{\text{dsoll}} 1$

leerlauf-/ kurzschlußbasierter Regler: $\text{Lim}_{\text{LL}} 50$ $\text{Lim}_{\text{KS}} 5$ $P_{\text{LL}} 10$ $P_{\text{KS}} 10$

Bild 6.9: Ergebnisse des Reglervergleiches im Schlichtversuch

Anhand Bild 6.9 wird deutlich, daß im Schlichtversuch der leerlauf-/kurzschlußbasierte Regler eine Steigerung des Abtrags um über 40% gegenüber einem t_d -basierten Regler erreicht. Diese Steigerung wird bei einer gleichzeitigen Reduktion des Verschleißes an der Werkzelektrode erzielt.

Verantwortlich für diese Verbesserung ist die Pinolenbewegung. Insgesamt ist die Regelbewegung des leerlauf-/kurzschlußbasierten Reglers durch ein langsames Zustellen der Pinole gekennzeichnet. Oszillierende Regelbewegungen, verursacht durch die zufälligen Schwankungen der Reglereingangsgröße, treten nicht auf. Die Einsenkbewegung des LL/KS-basierten Reglers ist in Bild 6.10 dargestellt.

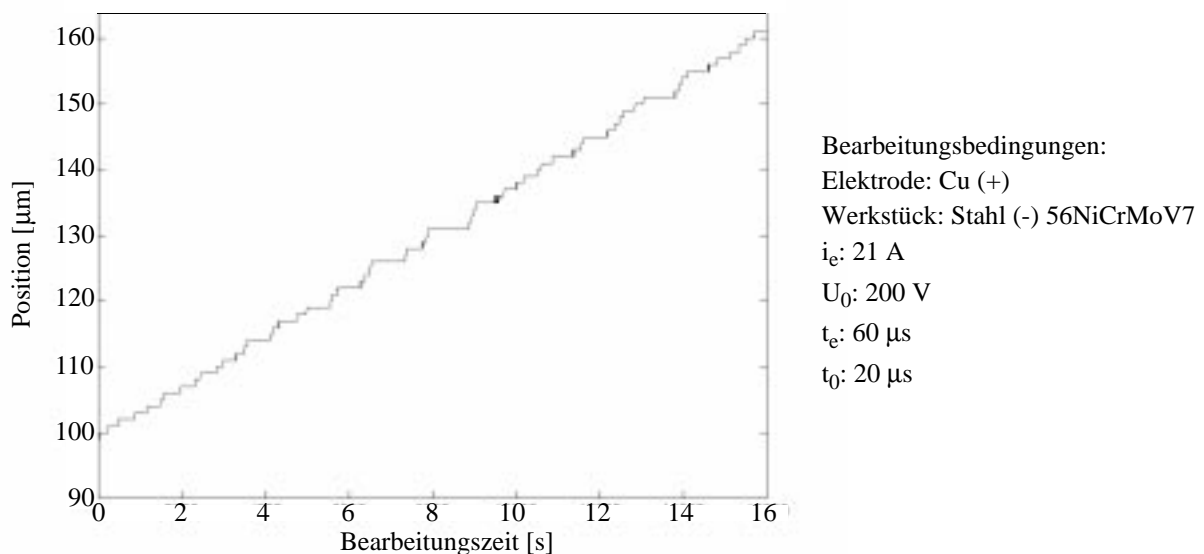


Bild 6.10: Einsenkbewegung bei einem LL/KS-basierten Regler

Die besten Abtragsergebnisse werden mit dem LL/KS-basierten Spaltweitenregelung sowohl bei der Schrupp- als auch bei der Schlichtbearbeitung erzielt, wenn ein relativ hoher Leerlaufanteil toleriert wird, bevor eine Zustellung der Pinole erfolgt. Dieses kann durch Einstellung des Leerlaufgrenzwertes (Lim_{LL}) erreicht werden (siehe Bild 6.5). Bild 6.11 zeigt die Verteilung von t_d -Werten während der Bearbeitung mit einem derartig eingestellten Spaltweitenregler und den hohen Leerlaufanteil (t_d ist bei Leerlaufimpulsen $30 \mu\text{s}$ festgelegt).

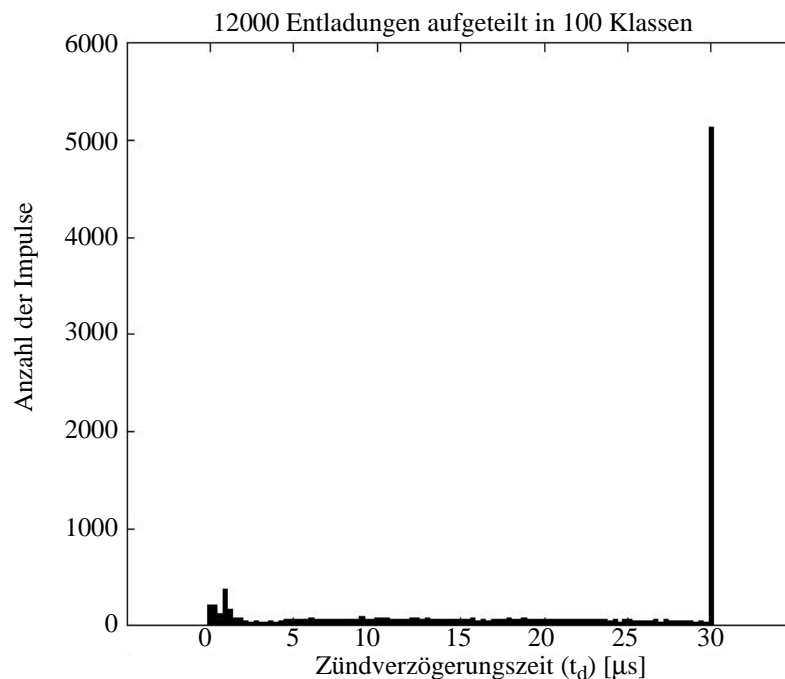


Bild 6.11: Histogramm der Zündverzögerungszeiten von einer während der Bearbeitung mit dem LL/KS-basierten Spaltweitenregler aufgezeichneten Entladungsfolge

Dieser erhöhte Leerlaufanteil ist verantwortlich für einen deutlich stabileren Prozeßverlauf. Die reduzierte Entartungstendenz macht sich während der Bearbeitung durch eine verminderte Tätigkeit der Bewegungsspülung bemerkbar.

Verursacht werden Prozeßentartungen durch Abtragspartikel, die das Dielektrikum verunreinigen. Betreibt man den Erosionsprozeß bei konstant geringer geometrischer Spaltweite ohne den Einfluß einer Spülung, so kommt es zwangsläufig zu einer Entartung der Entladefolge in Richtung Kurzschluß und damit zu vergrößerter Lichtbogenhäufigkeit, da die sich kontinuierlich vermehrenden Abtragspartikel die Isolationseigenschaft des Dielektrikums immer weiter herabsetzen.

Ein verbessertes Prozeßverhalten wird dagegen erreicht, wenn die Spaltweite eine Größe einnimmt, die einen erhöhten Leerlaufanteil verursacht. Hält man in diesem Fall die Spaltweite konstant, so wird Material nur soweit abgetragen, bis die sich durch den Abtrag vergrößernde Spaltweite nicht mehr ausreicht, um weitere Funkenentladungen herbeizuführen. Der Prozeß wäre beendet, sofern keine weitere Pinolenzustellung erfolgt. Das Risiko einer Entartung ist bei einer solchen Spaltweitereinstellung deutlich vermindert.

Die höhere Abtragsleistung, die trotz des vermeintlich ineffizienten hohen Leerlaufanteils erzielt wird, läßt sich auf den verminderten Anteil lichtbogenartiger Fehlentladungen zurückführen. Diese wirken sich in zweierlei Hinsicht negativ auf das Abtragsergebnis aus. Einerseits leisten diese als Fehlentladung erkannten und abgeschalteten Impulse nur einen geringen Beitrag zum Abtrag. Andererseits ziehen gehäuft auftretende Folgen von Fehlentladungen eine Bewegungsspülung nach sich, die den Prozeß für Sekunden unterbricht.

Da Leerläufe keinen Beitrag zum Abtrag leisten, entsteht durch jeden Leerlaufimpuls ein Zeitverlust während der Bearbeitung. Dieser Nachteil wird bei der verwendeten Versuchsanlage durch eine verbesserte Generatorsteuerung vermindert. Da Zündimpulse bei der eingesetzten Generatortechnologie zumeist kurze Zündverzögerungszeiten aufweisen, konnte für Leerlaufimpulse eine unabhängig von der Entladedauer geltende zeitliche Begrenzung eingeführt werden. Ein Impuls, der $30\ \mu\text{s}$ nach dem Anlegen der Leerlaufspannung noch nicht gezündet hat, wird als Leerlauf klassifiziert und abgebrochen. Bedingt durch die Generatortechnik ist der Anteil spätzündender Impulse mit einer Zündverzögerungszeit größer als $30\ \mu\text{s}$ sehr gering. Eine weitere Verbesserung läßt sich erzielen, wenn die Pausendauer nach jedem Leerlaufimpuls begrenzt wird. Da ein Leerlauf die Isolationseigenschaft des Dielektrikums nur wenig beeinflusst, kann die Pausendauer auf die zur Aufladung der Energiespeicher innerhalb des Generators notwendige Zeit von $5\ \mu\text{s}$ beschränkt werden. Durch diese Maßnahmen beträgt die gesamte Prozeßunterbrechungszeit bei einem Leerlaufimpuls lediglich $35\ \mu\text{s}$.

Die in Bild 6.12 aufgezeichnete Impulsfolge läßt das Prinzip der „leerlaufangepaßten“ Generatorsteuerung erkennen.

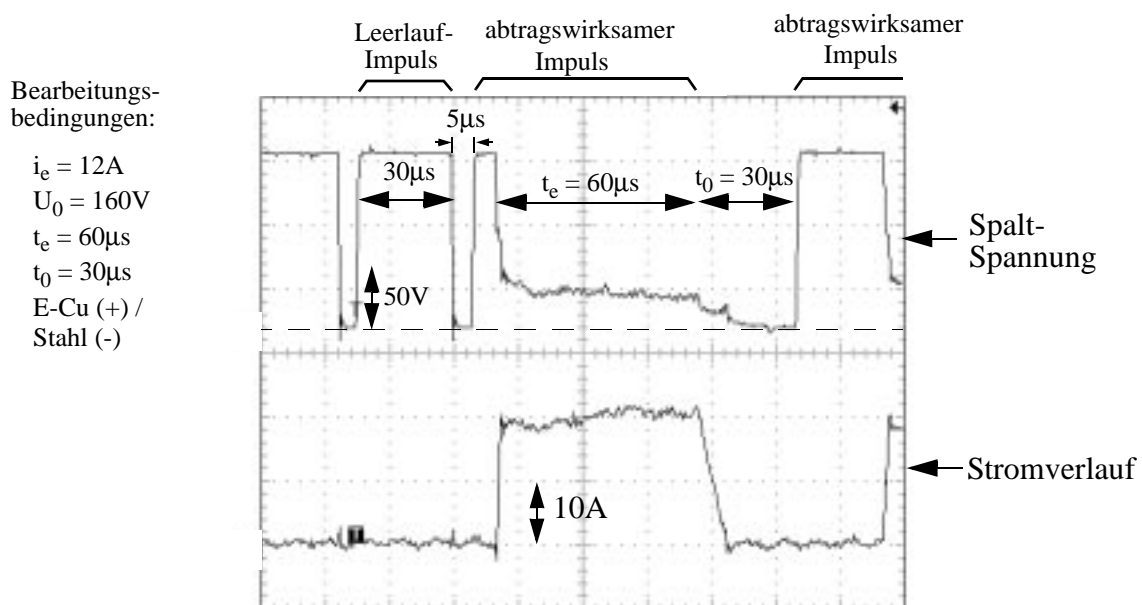


Bild 6.12: Impulsfolge mit gekürzter Pausendauer nach einem Leerlauf

6.4 Einsatz von Fuzzy-Logik zur Regelung

Fuzzy-Technologien werden in wachsender Zahl vorzugsweise zur Regelung von Prozessen eingesetzt, deren Übertragungsfunktionen sich nicht oder nur schwierig beschreiben lassen. Auch innerhalb der Funkenerosion findet eine wachsende Verbreitung von Fuzzy-Reglern statt. Dies ist nach [Cox94] auf folgende Eigenschaften der Fuzzy-Logik zurückzuführen:

- Fuzzy-Regler zeichnen sich durch hohe Transparenz und Verständlichkeit aus, da die verwendete Symbolik der menschlichen Denkweise angenähert ist.
- Intuitives („*unscharfes*“) Prozeßwissen kann in die Regelung einbezogen werden.
- Zur Erstellung eines Fuzzy-Reglers ist es ausreichend, Teilzusammenhänge, die auch widersprüchlich oder redundant sein können, zu formulieren, um zu einem globalen Regler-Kennfeld zu gelangen.
- Ein auf Fuzzy-Logik basierender Regler zeichnet sich aufgrund der inhärenten Unschärfe zumeist durch Fehlertoleranz aus.

Fuzzy-Logik stellt eine Erweiterung der klassischen Mengenlehre dar [Zad65]. Basierend auf der zweiwertigen Logik ist in der klassischen Mengenlehre ein Element x entweder in einer Menge enthalten oder nicht. Zur Verdeutlichung sei beispielhaft eine Menge M wie folgt definiert:

$$M = \{x; x \in \mathbb{R}, 1 \leq x \leq 10\} \quad (\text{Gl 6.1})$$

Durch die charakteristische Funktion $\mu(x)$ kann die Zugehörigkeit eines Elementes x zu der Menge M wie folgt angegeben werden:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & \text{falls } x \in M \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{Gl 6.2})$$

Bei der klassischen Mengenlehre ist die Zugehörigkeit des Elementes damit eindeutig festgelegt. Dabei wird $\mu(x)$ als Zugehörigkeitsfunktion bezeichnet. In der Fuzzy Logik werden kontinuierliche Zugehörigkeitsfunktionen verwendet. Der Mengenbegriff wird damit „*unscharf*“.

Die Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktion gibt den Grad der Zugehörigkeit des Elementes x zu der unscharfen Menge M an. Unscharfe Mengen werden im Fuzzy-Sprachgebrauch auch als linguistische Terme bezeichnet. Sie bezeichnen nicht eindeutig abgrenzbare Bereiche von physikalischen Werten. In dieser Arbeit werden trapezförmige und dreieckige Zugehörigkeitsfunktionen verwendet. Beispielhaft zeigt Bild 6.13 die linguistischen Terme „hoch“, „normal“ und „niedrig“ zur Bewertung des relativen Leerlaufanteils einer Impulsfolge.

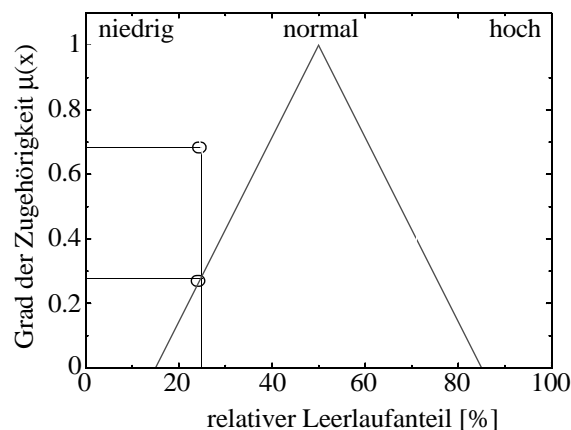


Bild 6.13: Zugehörigkeitsfunktionen des relativen Leerlaufanteils

Ein Leerlaufanteil von 25% hat dabei einen Zugehörigkeitsgrad von 0.68 zu dem linguistischen Term „niedrig“ und gehört mit 0.28 gleichzeitig dem linguistischen Term „normal“ an (Bild 6.13).

Für Mengen M , deren Elemente x alle einer Grundmenge X entstammen, sind in der klassischen Mengenlehre die Grundoperationen *Vereinigung*, *Schnitt* und *Komplement* definiert. Diese Grundoperationen sind auf unscharfe Mengen übertragbar:

$$\text{Vereinigung (ODER):} \quad \mu_{A \vee B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{Gl 6.3})$$

$$\text{Schnitt (UND):} \quad \mu_{A \wedge B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{Gl 6.4})$$

$$\text{Komplement (NICHT):} \quad \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{Gl 6.5})$$

Durch die Verwendung der linguistischen Terme kann sprachlich formulierbares Wissen operationalisiert werden. Dies geschieht mit Hilfe von *Wenn-Dann-Regeln* in der Wissensbasis. Angewandt auf die Problematik einer Regelung werden diese Regeln verwendet, um Aussagen über die Stellgröße zu treffen. Bei der sogenannten *Inferenz* werden die Aussagen aller anwendbaren Regeln miteinander verknüpft. In dieser Arbeit wurde zum Zweck der Inferenz die *MAX-MIN-Methode* angewendet [MaKi77]. Bei dieser Methode entsteht die Zugehörigkeitsfunktion einer Regel dadurch, daß der Erfüllungsgrad des Wenn-Teils die Zugehörigkeitsfunktion des Dann-Teils begrenzt. Werden mehrere Eingangsterme im Wenn-Teil einer Regel UND-Verknüpft, so bestimmt der minimale Grad der Zugehörigkeit eines Terms den Erfüllungsgrad der Regel (Grundoperation „Schnitt“).

Das Ergebnis der Inferenz ist eine Zugehörigkeitsfunktion, also eine „unscharfe“ Information. Zur Verwendung dieses Wertes als Stellgröße innerhalb einer Regelung ist es notwendig, diese Zugehörigkeitsfunktion in einen Zahlenwert umzusetzen. Dies geschieht mittels *Defuzzifizierung*.

Der innerhalb dieser Arbeit implementierte Fuzzy-Regler verwendet die Schwerpunkt-Methode zur Defuzzifizierung. Als Ausgangswert wird dabei der Abszissenwert des Schwerpunktes X_S der unter der Ausgangs-Zugehörigkeitsfunktion gelegenen Fläche ermittelt. Die allgemeine Berechnungsvorschrift für den Flächenschwerpunkt einer Teilfläche lautet:

$$X_S = \frac{\int_a^c x \mu(x) dx}{\int_a^c \mu(x) dx} \quad (\text{Gl 6.6})$$

Die Defuzzifizierung mittels Schwerpunkt-Methode ist exemplarisch im nachfolgenden Bild skizziert:

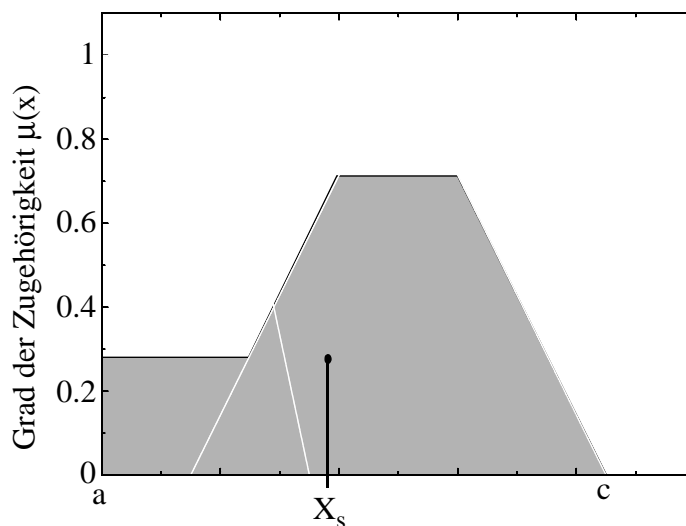


Bild 6.14: Schwerpunkt-Methode zur Defuzzifizierung

6.5 Fuzzy-Logik-basierte Spaltweitenregelung

Der auf den relativen Leerlauf- und Kurzschlußhäufigkeiten basierende Spaltweitenregler läßt sich mit den Möglichkeiten der Fuzzy-Logik formulieren. Die Strategie kann mit den folgenden Regeln dargestellt werden:

- I WENN wenige Kurzschlüsse UND wenige Leerläufe vorliegen, DANN bewege die Pinole nicht.*
- II WENN vermehrte Kurzschlüsse vorliegen, DANN ziehe die Pinole zurück.*
- III WENN viele Leerläufe vorliegen, DANN stelle die Pinole zu.*

Die unscharfen Begriffe „wenige“, „vermehrte“ und „viele“ wurden in der bisher vorgestellten Implementation des leerlauf-/kurzschlußbasierten Reglers durch Grenzwerte für relative Kurzschluß- und Leerlaufhäufigkeiten realisiert. Mit den Möglichkeiten der Fuzzy-Logik läßt sich ein sehr viel feiner abgestuftes Regelverhalten erzielen.

Die Architektur des Spaltweitenreglers ist in Bild 6.15 dargestellt.

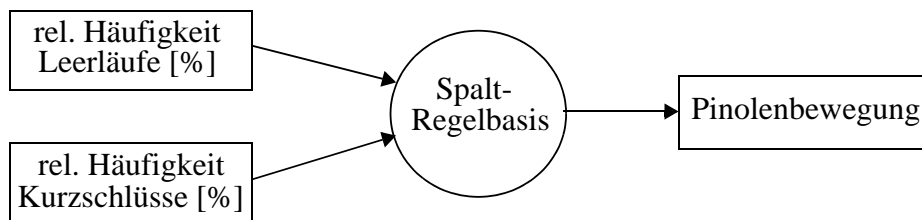


Bild 6.15: Fuzzy-Architektur des LL/KS-basierten Spaltweitenreglers

Der Spaltweitenregler erhält als Eingangsdaten die relativen Leerlauf- und Kurzschlußhäufigkeiten. Zur Weiterverarbeitung müssen diese Zahlenwerte zunächst fuzzifiziert werden. Dies geschieht mit Hilfe der Zugehörigkeitsfunktionen, die in Bild 6.16 und Bild 6.17 dargestellt sind. Zu erkennen ist, daß jeweils fünf linguistische Terme verwendet wurden (VL, LOW, MED, HIGH, VH). Durch diese Anzahl linguistischer Terme und die gewählte Überlappung der Zugehörigkeitsfunktionen ist eine ausreichend genaue Approximation der Reglerfunktion gewährleistet. Das Reglerverhalten läßt sich dadurch in feiner Abstufung einstellen.

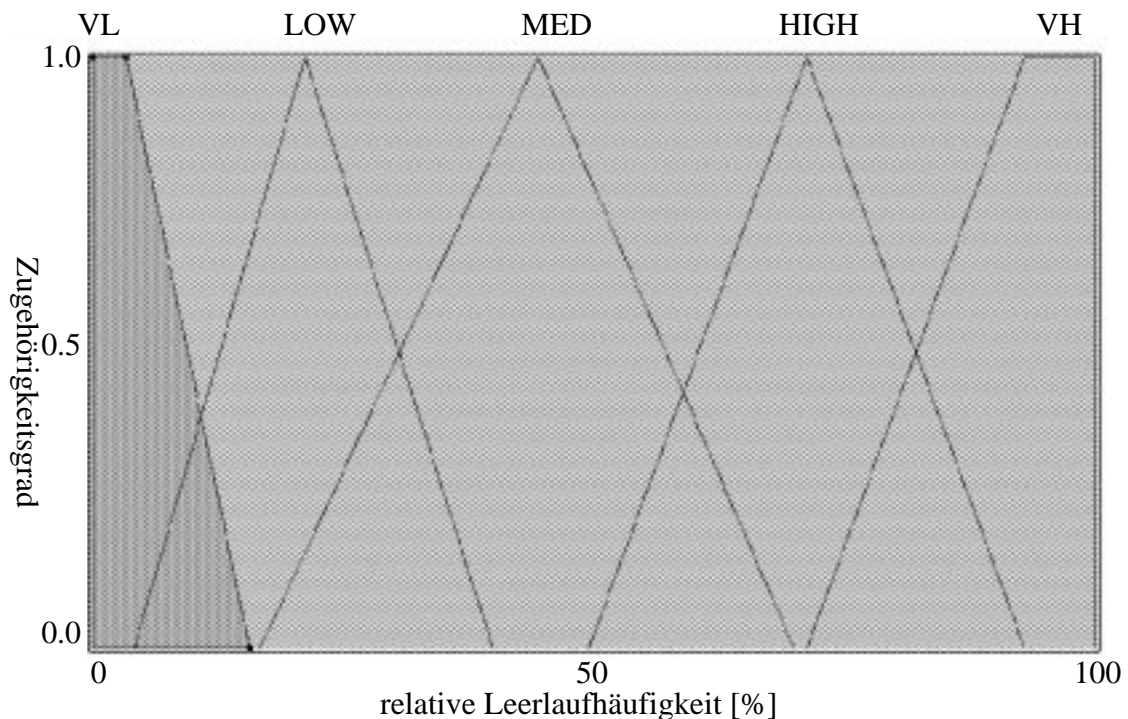


Bild 6.16: Zugehörigkeitsfunktionen für die Eingangsgröße Leerlaufhäufigkeit

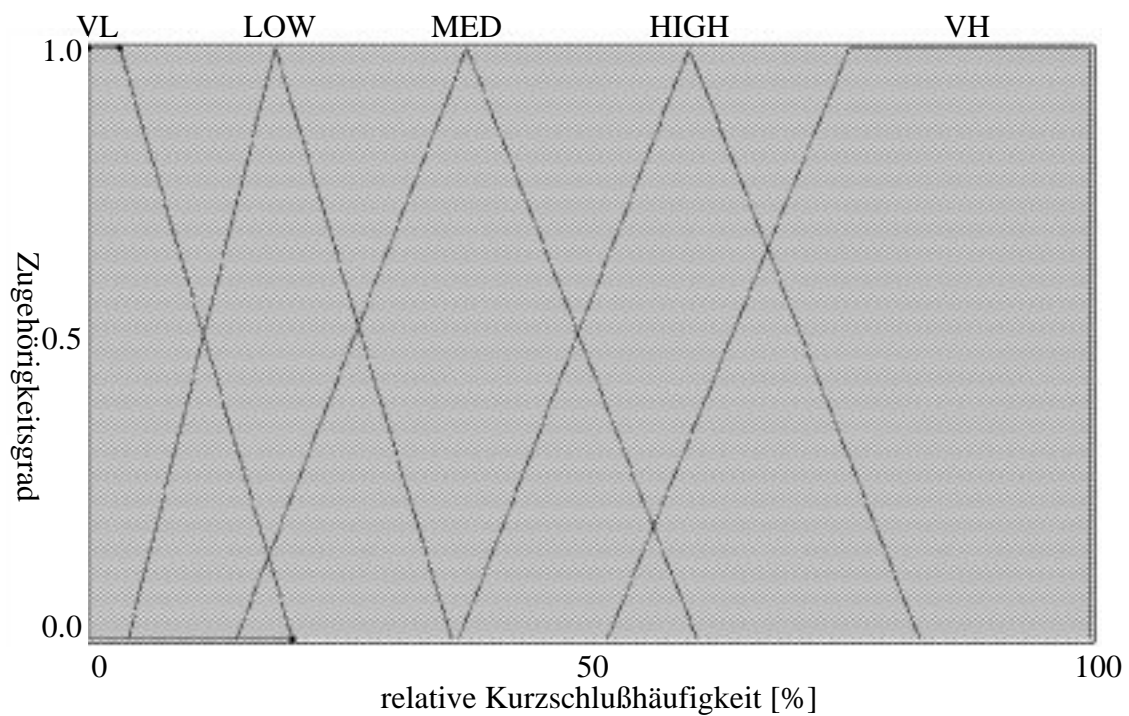


Bild 6.17: Zugehörigkeitsfunktionen für die Eingangsgröße Kurzschlußhäufigkeit

Die Stellgröße des Reglers ist der Verfahrenbefehl für den Antrieb zur Änderung der Pinolenposition. Die ursprünglich formulierten Regeln beinhalten Aussagen wie: „*Bewege die Pinole nicht*“, „*ziehe die Pinole zurück*“ und „*stelle die Pinole zu*“. Innerhalb des Fuzzy-Reglers wurde dies in fünf linguistische Terme umgesetzt, deren Zugehörigkeitsfunktionen in Bild 6.18 zu sehen sind.

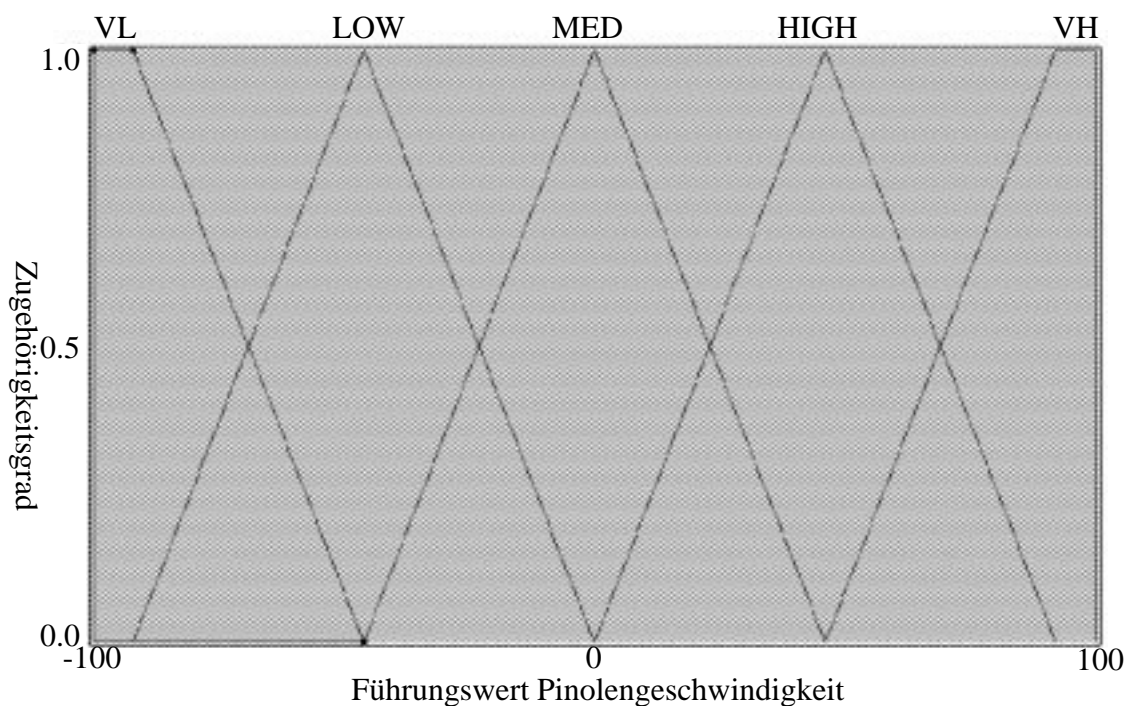


Bild 6.18: Zugehörigkeitsfunktionen für die Ausgangsgröße Pinolengeschwindigkeit

Die Wissensbasis des Fuzzy-Reglers besteht aus Regeln, die Bedingungen über die Eingangsgrößen in Zusammenhang bringen mit Aussagen über die Stellgröße. Im Falle der Fuzzy-Spaltweitenregelung existieren zwei Eingangsgrößen (Leerlauf- und Kurzschlußhäufigkeit), die in einer Regel jeweils miteinander UND-verknüpft werden, um die Pinolenbewegung festzulegen. Anstelle die einzelnen Regeln aufzulisten ist es üblich, in Form einer Tabelle die Verknüpfungen und das jeweilige Ergebnis darzustellen. Die Spalt-Wissensbasis ist in Tabelle 6.2 wiedergegeben.

UND verknüpft		relative Leerlaufhäufigkeit				
		VL	LOW	MED	HIGH	VH
relative Kurzschlußhäufigkeit	VL	MED	MED	MED	HIGH	VH
	LOW	MED	MED	MED	MED	HIGH
	MED	LOW	LOW	MED	MED	MED
	HIGH	LOW	LOW	LOW	MED	MED
	VH	VL	VL	VL	VL	VL

Tabelle 6.2: Spalt-Regelbasis

Die Strategie, bei wenigen Leerläufen und Kurzschlüssen, also im Moment hohen Abtrags, keine Pinolenbewegung durchzuführen, findet sich im Bereich I der Spalt-Regelbasis wieder. Bereich II läßt die Pinole bei vermehrten Kurzschlüssen zurückziehen, während Bereich III für eine Zustellung im Falle eines erhöhten Leerlaufanteils sorgt. Die übrigen Regeln wurden in Abtragsversuchen ermittelt und optimiert.

Aus den Zugehörigkeitsfunktionen und der Wissensbasis läßt sich das Kennlinienfeld des Fuzzy-Reglers berechnen. Dieses 3D-Kennlinienfeld ist in Bild 6.19 dargestellt. Zu erkennen ist ein ausgedehntes Plateau beim Ausgabewert 0. Dies ergibt sich aus der Spalt-Regelbasis in Tabelle 6.2, die vielfach der Stellgröße den linguistischen Term *MED* zuordnet, um damit einen Stillstand der Pinole zu bewirken. Weite Teile des Kennlinienfeldes reichen in den negativen Wertebereich der Stellgröße und bewirken damit einen Rückzug der Pinole. Dahinter verbirgt sich die Regelstrategie, grundsätzlich bei erhöhtem Kurzschlußanteil den Spaltabstand zu vergrößern. Eine Zustellung der Pinole (positiver Wertebereich im Kennlinienfeld) erfolgt erst ab einem Leerlaufanteil von über 50%, wenn gleichzeitig nur wenige Kurzschlüsse vorliegen (<15%). Bedingt durch die Defuzzifizierung mittels Schwerpunkt-Methode (siehe Bild 6.14) nimmt die Stellgröße nicht den gesamten möglichen Wertebereich ein. Stattdessen beschränkt sich das Kennlinienfeld auf den Wertebereich von -81.7 bis 81.7. Für den praktischen Einsatz ist diese Einschränkung unerheblich.

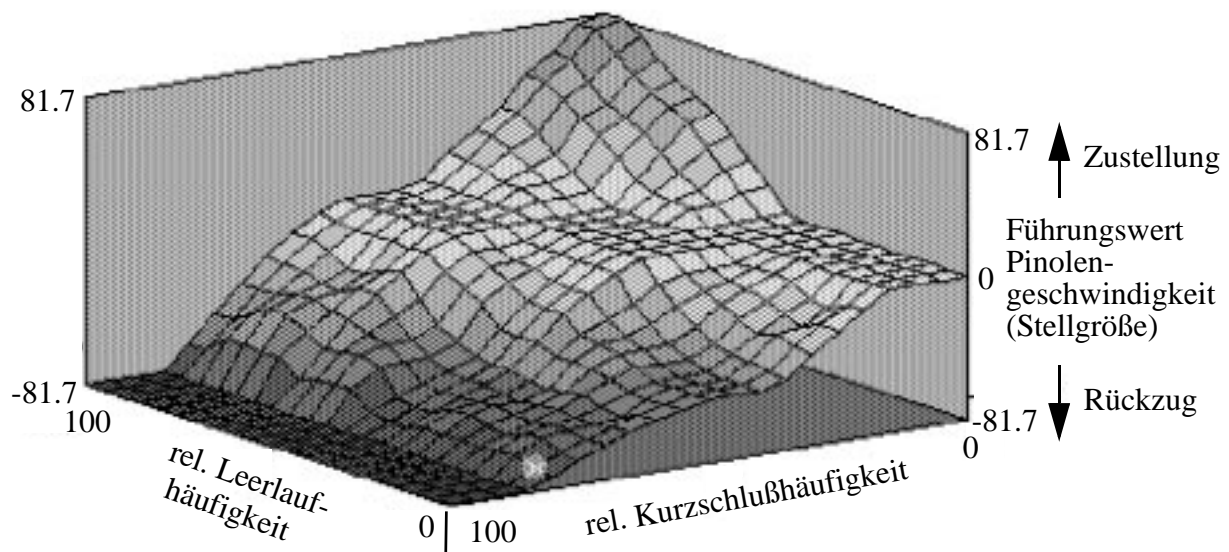


Bild 6.19: 3-D Darstellung der Spalt-Regelbasis

Ausgangsgröße des Fuzzy-Reglers ist ein Führungswert, aus dem sich die Pinolengeschwindigkeit ergibt. Um daraus einen Stellbefehl für einen Antrieb abzuleiten, wird diese Ausgangsgröße mit Skalierungsfaktoren multipliziert. Dabei ist es möglich, für die Zustell- und Rückzugsbewegung unterschiedliche Skalierungsfaktoren zu definieren (S_V , S_R). Beide Faktoren können durch eine adaptive Optimierung angepaßt werden, wie es in Kapitel 8 (Optimierung des Spaltweitenreglers mit Neuronalen Netzen) beschrieben wird. Bild 6.20 zeigt den Fuzzy-Regler mit nachgeschaltetem Skalierungsfaktor.

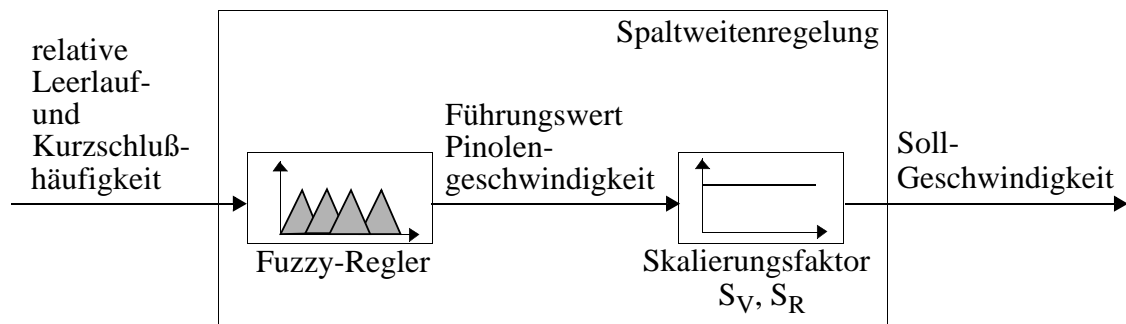
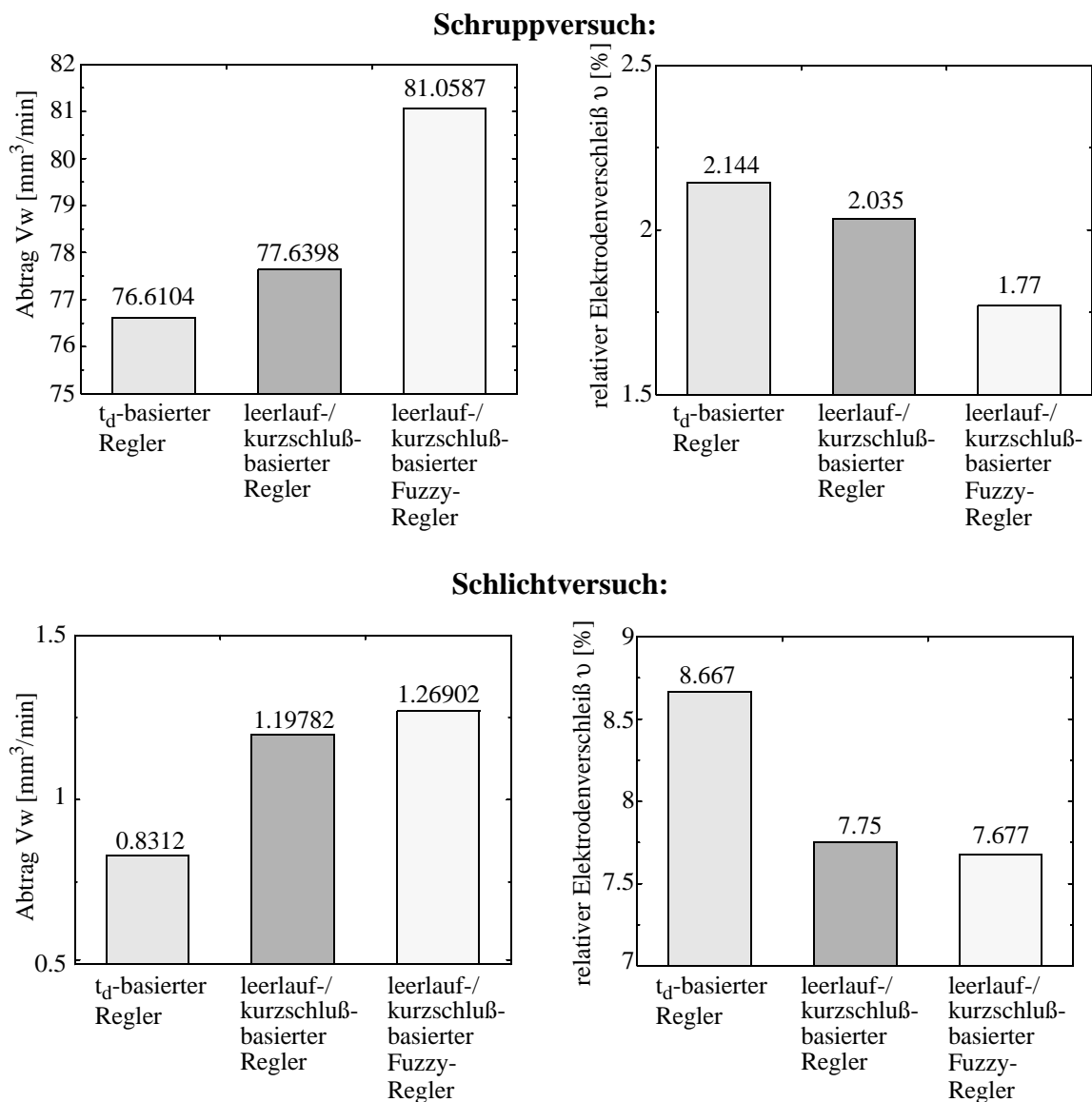


Bild 6.20: Skalierung der Ausgangsgröße des Fuzzy-Reglers

Der beschriebene Fuzzy-Regler wurde anhand der in Bild 6.7 dargestellten Erosionsaufgabe sowohl im Schruppbetrieb als auch im Schlichtbetrieb untersucht (Maschineneinstellung gemäß Tabelle 6.1). Im Vergleich zu den bereits getesteten Spaltweitenreglern konnten sowohl bei der Schrupp- als auch bei der Schlichtbearbeitung weitere Steigerungen in der Abtragsleistung bei gleichzeitiger Verschleißreduktion beobachtet werden.



Einstellparameter: leerlauf-/ kurzschlußbasierter Fuzzy-Regler: S_V 60 S_R 80

Bild 6.21: Reglervergleich unter Einbeziehung des LL/KS-basierten Fuzzy-Reglers

6.6 Einordnung in die Entwicklungstendenzen im Bereich der Spaltweitenregelung

Die Ergebnisse der vergleichenden Untersuchungen an Spaltweitenreglern zeigen, daß sich mit den Eingangsgrößen relative Leerlauf- und Kurzschlußhäufigkeit Verbesserungen gegenüber t_d -basierten Reglern erzielen lassen. Insbesondere in der Schlichtbearbeitung werden diese Vorzüge deutlich, da der LL-/KS-basierte Regler den Prozeß sehr präzise in einem Bereich mit erhöhtem Leerlaufanteil und fast keinen Kurzschlüssen oder Lichtbögen hält. Die Pinolenbewegung ist in diesem Fall durch eine langsame Zustellbewegung gekennzeichnet.

Bei Betrachtung der zurückliegenden Entwicklungen im Bereich der Spaltweitenregelung stellt man jedoch fest, daß diese Eingangsgrößen bereits in den Anfängen der Erosionstechnologie verwendet wurden. Derartige Regeleinrichtungen wurden aufgrund der noch unzureichenden Computertechnik mittels einfacher Logik- und Zähl-Schaltkreise implementiert. Dabei wurde der Stellbefehl durch Abzählen und Vergleichen der Kurzschlüsse, Leerläufe und Normalentladungen erzeugt. Die mittlere Spaltspannung \bar{u} verdrängte bald die ausgezählten Leerläufe und Kurzschlüsse als Regelgröße [Lüd75]. Durch die Verwendung von \bar{u} ergaben sich Vorteile vor allem bei der Weiterverarbeitung dieser Größe innerhalb der mittels analoger Technik aufgebauten Regelung. Mit der Einführung der Zündverzögerungszeit t_d als alternative Regelgröße wurde die mittlere Spaltspannung \bar{u} weitgehend abgelöst. Die Zündverzögerungszeit ermöglichte eine bessere Prozeßbeurteilung und hat insbesondere bei computerbasierten Regelsystemen den Vorzug der einfachen Meßbarkeit [Peu81].

Unter Beachtung dieser Entwicklungshistorie ist es überraschend, daß eines der ältesten Verfahren zur Spaltweitenregelung Vorteile gegenüber der relativ modernen Regelung auf Basis der Zündverzögerungszeit aufweist. Die in diesem Reglervergleich implementierte Spaltweitenregelung auf Basis der relativen Leerlauf- und Kurzschlußhäufigkeiten hat mit den ursprünglichen LL/KS-basierten Reglern zwar die Eingangsgrößen gemein, jedoch sind wesentliche Unterschiede in den Randbedingungen vorhanden:

Ein Unterschied ist die Lichtbogenerkennung und Behandlung, die während der Versuche ständig aktiv war und unabhängig von der Spaltweitenregelung arbeitete. Die Regelung ist somit nicht mehr für die Behandlung von Prozeßentartungen zuständig, sondern nur noch für die Einstellung einer abtragsoptimalen Spaltweite. Die LL/KS-basierte Regelung kann aufgrund ihrer Eingangsgrößen keine Fehlentladungstendenzen feststellen. Dafür ist die erforderliche präzise Einstellung der Spaltweite mit diesen Eingangsgrößen besser realisierbar als mit der Zündverzögerungszeit.

Eine weitere Differenz in den Randbedingungen besteht bei der Generatortechnologie und Generatorsteuerung. Für den Reglervergleich wurde ein Generator mit hohem Spannungsanstieg bei der Zündspannung eingesetzt. Demzufolge traten überwiegend kurze Zündverzögerungszeiten auf und die negative Wirkung der zufälligen Schwankungen auf den t_d -basierten Regler verstärkte sich.

Auf der anderen Seite erlaubten die kurzen Zündverzögerungszeiten eine zeitliche Begrenzung der Leerlaufimpulse. Durch eine zusätzliche Verbesserung im Bereich der Generatorsteuerung konnte der zeitliche Verlust pro Leerlaufimpuls auf $35\mu\text{s}$ reduziert werden. Durch diese Maßnahme wird der Nachteil bei der Erosion mit erhöhtem Leerlaufanteil verringert. Da der LL/KS-basierte Regler optimale Abtragswerte bei erhöhtem Leerlaufanteil aufweist, profitiert er somit von der eingesetzten Generortechnologie.

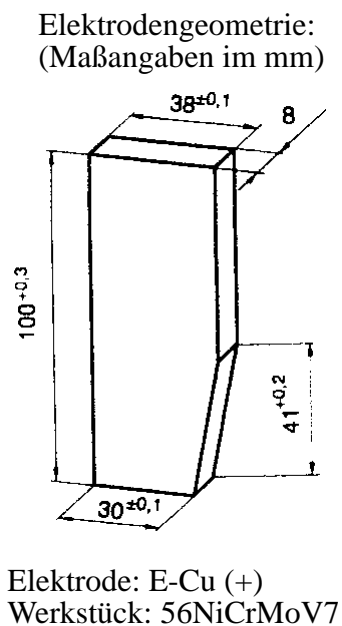
Durch die Entwicklungen im Bereich der Generortechnik und der Lichtbogenerkennung ergeben sich demnach veränderte Randbedingungen für die Spaltweitenregelung, die eine neue Einordnung der Entwicklungen in diesem Bereich notwendig machen.

6.7 Abtragsversuch mit einer komplexen Erosionsaufgabe

Aufgrund der Vielzahl der durchzuführenden Versuche wurde für den Reglervergleich eine einfache Elektrodengeometrie und eine geringe Einsenktiefe (10mm im Schruppversuch) gewählt. In der Anwendungspraxis überwiegen jedoch komplexere Erosionsaufgaben mit tiefen Einsenkungen. Aus diesem Grund wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, bei denen mit einer keilförmigen Elektrode eine 30 mm tiefe Einsenkung herzustellen war. Durch den verwendeten Entladestrom von 27 A ist der Versuch der Schruppbearbeitung zuzuordnen, wodurch sich folgende Vorteile für eine t_d -basierte Regelung ergeben:

- Aufgrund des erhöhten Entladestromes wird sich eine im Vergleich zur Schlichtbearbeitung größere geometrische Spaltweite einstellen. Ein stabiler Erosionsprozeß ist damit in einem größeren Spaltweiten-Bereich möglich.
- Kleinere Schwankungen der Pinole müssen den Prozeßverlauf nicht unbedingt negativ beeinflussen, sofern sie sich innerhalb des vergrößerten Spaltweiten-Bereiches bewegen, der einen stabilen Prozeßverlauf gewährleistet.
- Mit zunehmender Einsenktiefe verschlechtern sich die Spülbedingungen zum Abtransport der Abtragspartikel. Eine oszillierende Regelbewegung, wie sie durch die zufälligen Schwankungen der Zündverzögerungszeit verursacht wird, kann eine zusätzliche Spülwirkung erzielen.

Für den Abtragsversuch ist die verwendete Maschineneinstellung sowie die Elektrodengeometrie in Bild 6.22 dargestellt.



Parameter	Einstellung
i_e [A]	27
U_0 [V]	180
t_e [μ s]	250
t_0 [μ s]	20
N_{VPL}	100
$N_{sp\ddot{u}l}$	200
Einsenkttiefe [mm]	30

Tabelle 6.3: Maschineneinstellungen

Bild 6.22: Einsenkung einer Keilelektrode aus Kupfer

Die Bearbeitungsdauer mit der t_d -basierten Regelung beträgt 106 Minuten, während der leerlauf-kurzschlußbasierte Fuzzy-Regler 116 Minuten für die gleiche Aufgabenstellung benötigt. Damit ergibt sich eine geringfügig höhere Abtragsrate bei der t_d -Regelung. Deutliche Unterschiede sind jedoch beim Verschleiß der Werkzeugelektrode V_E zu erkennen. Die Versuchsergebnisse sind in Bild 6.23 dargestellt.

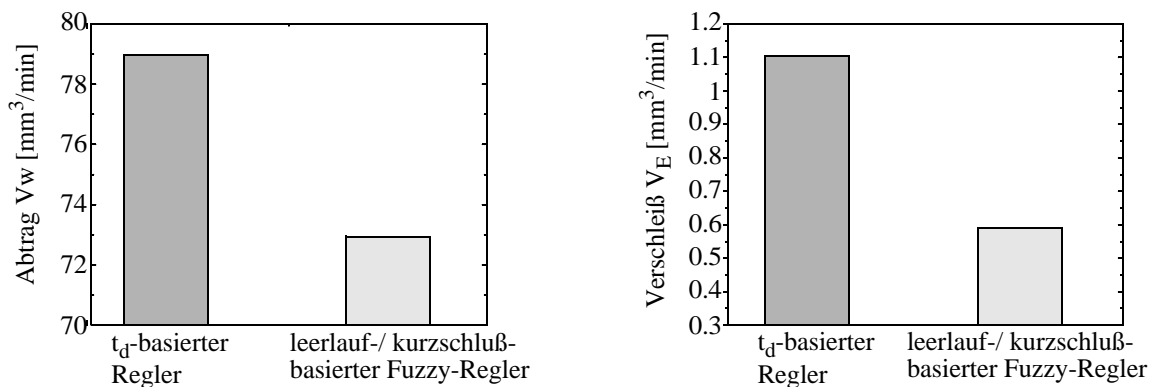


Bild 6.23: Versuchsergebnisse bei der Einsenkung der Keilelektrode

Aus den Ergebnissen (Bild 6.23) geht hervor, daß bei der Bearbeitung mit dem t_d -basierten Regler ein um über 50% größerer Elektrodenverschleiß gegenüber dem LL/KS-basierten Fuzzy-Regler entsteht. Diese deutlichen Unterschiede im Verschleiß sind auf der Werkzeugelektrode sichtbar und werden auch im Werkstück abgebildet, wodurch die Abbildungsgenauigkeit beeinträchtigt wird. Der Verschleiß bei der Bearbeitung mit t_d -basiertem Regler äußert sich in verstärkten Abrundungen an Ecken und Kanten. Bild 6.24 zeigt beide Elektroden nach der Bearbeitung im Vergleich.



Bild 6.24: Werkzeugelektroden im Vergleich

Der erhöhte Verschleiß bei der t_d -basierten Regelung ist auf gehäufte Impuls-Abschaltungen aufgrund von Lichtbögen zurückzuführen. Wie bereits in Abschnitt 6.2 ausgeführt, neigt der t_d -basierte Regler aufgrund seiner schwankenden Regelgröße zum Überschwingen in den Kurzschlußbereich. Dadurch entstehen vermehrt lichtbogenartige Fehlentladungen, die von der Lichtbogenerkennung abgeschaltet werden. Trotz dieser Abschaltungen tragen diese Impulse zum Verschleiß bei (vgl. Kapitel 5 - Erkennung lichtbogenartiger Fehlentladungen).

Der leerlauf-/ kurzschlußbasierte Fuzzy-Regler wird während der Bearbeitung wesentlich weniger von Lichtbogen-Abschaltungen betroffen, da die Werkzeugelektrode konstant in einem Bereich mit erhöhtem Leerlaufanteil gehalten wird. Damit ergibt sich auch ein deutlich verringerter Verschleiß, wie er auch während der übrigen Versuche beobachtet werden konnte.

Insgesamt bestätigt dieser erneute Abtragsversuch die Einschätzung, daß durch eine Verringerung der Pinolenschwankungen ein stabilerer Prozeßverlauf erreicht werden kann. Die geringfügig schlechtere Abtragsrate des leerlauf- / kurzschlußbasierten Fuzzy-Reglers ist auf den erhöhten Leerlaufanteil zurückzuführen, der trotz Optimierungen im Bereich der Generatorsteuerung zu einem Zeitverlust führt. Hier bietet sich Potential zur Steigerung, das durch eine übergeordnete Optimierung ausgeschöpft werden kann.