VIII. DIE ENTWICKELTEN VERFAHREN IN DER ANWENDUNG

8.1. Definition der Spezialbearbeitungsaufgabe

Ziel der Erodierversuche ist die Analyse der im Rahmen vorliegender Arbeit entwickelten Prozeßführung auf ihre Leistungsfähigkeit. Hierbei stehen im ersten Teil (Kapitel 8.2) die Variationsmöglichkeiten der Steuerparameter und deren Wirkung auf den Abtragsprozeß für eine Spezialbearbeitungsaufgabe im Vordergrund. Darauf aufbauend wird im zweiten Teil (Kapitel 8.3) die automatische Prozeßoptimierung anhand von Abtragsversuchen für einen Standardbearbeitungsfall dargestellt. Die Durchführung von Abtragsversuchen nach VDI-Richtlinie VDI 3402 Blatt 2, Abschnitt 8.2 setzt den Erodierbetrieb mit Spüllochbohrung voraus. Das hat zur Folge, daß sich der Abtragsprozeß mit wenig Aufwand stabilisieren läßt. Dieser genormte Abtragsversuch liefert jedoch für schwierige Bearbeitungsaufgaben nur unzureichende Erkenntnisse. Aus diesem Grund wurde im Rahmen vorliegender Arbeit bewußt eine Referenzerodieraufgabe definiert, die besondere Anforderungen an die Prozeßführung stellt.

Die Versuche orientieren sich dabei an Anforderungen, die aus der Erodierpraxis kommen. Aus Anwendersicht spielt heute der zwangsgespülte Betrieb eine eher untergeordnete Rolle. Überwiegend wird, insbesondere bei hochgenauen Erodieraufgaben mit erosionskritischen Geometrien, wie z.B. tiefe Schlitze, mit Bewegungsspülung gearbeitet. Neben der Schlitzerosion zählt dazu auch die Erosion mit zylindrischen Elektroden mit Durchmessern im Bereich von 0,25mm bis 2mm.

Um die Leistungsfähigkeit entwickelter Strategien und Technologien untersuchen zu können, wird im Folgenden zunächst eine Spezialbearbeitungsaufgabe als Referenzversuch vorgestellt. Es handelt sich dabei um eine Schlitzerodieraufgabe. Hersteller von Erodieranlagen verwenden eine ähnliche Bearbeitungsaufgabe, die auf Kundenwunsch der Demonstration der Leistungsfähigkeit ihrer kommerziellen Senkanlagen dient. Bild 8-1 zeigt die Form und die Maße der entsprechenden Referenzelektrode. Der Abtragsversuch sieht vor, diese Elektrode 10mm tief in ein Werkstück aus hochlegiertem Stahl (56 NiCrMoV7) nach VDI 3402 einzusenken. Dabei wird ausschließlich mit der MO-Bewegungsspülung gearbeitet. Neben dem Werkstückabtrag und relativen Verschleiß ist die parameterabhängige Einsenkgeschwindigkeit von Interesse. Ferner ist die Gesamtbearbeitungszeit bis zum Erreichen der Solltiefe von 10mm ein Kriterium für die Effizienz der Senkstrategie bzw. der realisierten Prozeßstabilisierung. Ziel der Bearbeitung ist die lichtbogenfreie und möglichst schnelle Einsenkung. Dabei sollte der Verschleiß an den Elektrodenspitzen, der sich durch Abrundungen zeigt, klein sein.

Im ersten Versuchsteil wird zunächst eine Anzahl von Referenzversuchen beschrieben, die Abtrag, Verschleiß und Einsenkgeschwindigkeit in Abhängigkeit verschiedener Einstellvarianten wiedergibt. Ziel dieses ersten Teils ist, die prinzipielle Wirkungsweise der Anlagentechnik für den Spezialfall aufzuzeigen. Dabei wurde Wert auf die Nachvollziehbarkeit der einzelnen Versuche gelegt.

Die Materialpaarungen sind aufgrund der Verfügbarkeit reduziert auf:

Werkstück: Stahl 1.2714.05 (56 NiCrMoV7) vergütet
Elektrode: Elektrolytkupfer

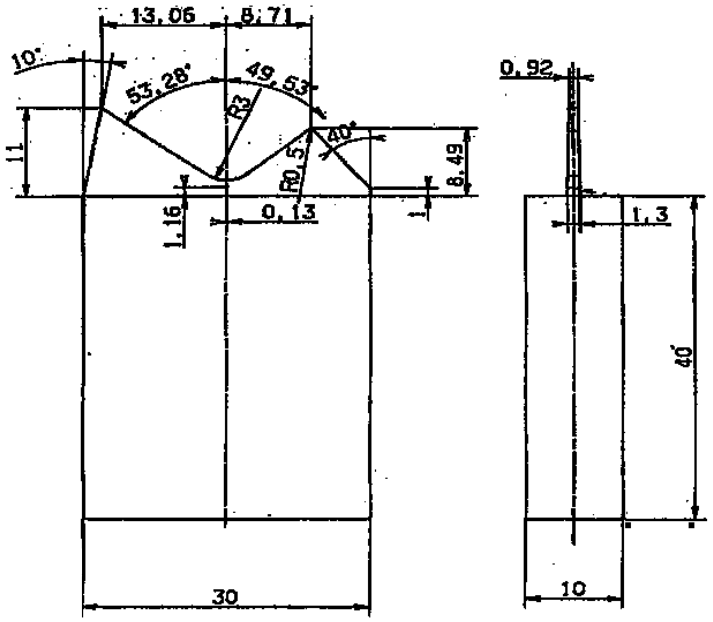


Bild 8-1:
Schlitzelektrode aus Kupfer

Die Elektrode ist ein konisch zulaufender Kamm (Konizitätswinkel 1°)mit den Abmaßen nach Bild 8-1. Das Werkstück besteht aus geschliffenen planparallelen Plättchen, die zur Bestimmung der erzielten Oberflächengüte R_a nach dem Einsenkvorgang getrennt werden können. Die Protokollierung umfaßt neben Abtrag, Verschleiß, Rauhigkeit und die variierten Parameter auch die Einsenkgeschwindigkeit der Elektrode über der Zeit. Dazu wird im 2-Minuten Takt die Position gemessen.

Darüber hinaus wurden Erodierversuche mit den Werkstoffpaarungen Kupfer/Hartmetall und Graphit/Stahl durchgeführt, die jedoch hier nicht dargestellt werden. Diese Versuche sollten lediglich aufzeigen, daß sich die entwickelten Technologien ohne Einschränkungen für beliebige Erodieraufgaben verwenden lassen. Im Anschluß an die Referenzversuche ist die Wirkungsweise der entwickelten, automatischen, adaptiven Prozeßoptimierung anhand eines exemplarischen Erodierversuchs dargestellt.

8.2. Spezialerodieraufgabe mit Variation der grundlegenden Einstellparameter

Die Schlitzerosionsaufgabe gemäß Kapitel 8.1 beinhaltet folgende Schwierigkeiten:

- Aufgrund der ausgeprägten Spitzen, wird zu Beginn der Bearbeitung die Stromdichte dort sehr hoch. Dies führt zu einem erheblichen Verschleiß zu Beginn der Bearbeitung, der sich als Spitzenabrundung bemerkbar macht.
- Mit fortschreitendem Einsenken der Elektrode verschärft sich die Spülproblematik. Die Spitzengeometrie führt zu einer Konzentration der Abtragspartikel im tiefsten Punkt des auszuerodierenden Werkstücks.

Sowohl die Lichtbogenerkennung und -behandlung mit überlagerter Bewegungsspülung als auch die Spaltweitenregelung sind zur befriedigenden Lösung dieser insgesamt recht anspruchsvollen Erodieraufgabe stark gefordert.

Sämtliche Versuche dieses Kapitels 8.2 wurden ohne automatische Prozeßoptimierung durchgeführt. Die Prozeßstabilisierung mit ihren Elementen Lichtbogendetektion, MO-Spülung und Spaltweitenregelung arbeitete dabei bei allen Versuchen, außer im letzten Versuch, mit fest eingestellten Parametern. Die Versuchsreihen eins bis drei sollen zunächst aufzeigen, wie sich die Veränderung der Arbeitsparameter auf den Abtrag und den Verschleiß bei der gewählten Erodieraufgabe mit isoenergetischer Taktung auswirkt. Die variierten Arbeitsparameter sind:

- Arbeitsstrom I_a
- Brenndauer T_{on} und Pausendauer T_{off}
- Zündspannung U_z

Folgende exemplarische Versuchsreihen wurden dazu durchgeführt:

1. Versuchsreihe (Bild 8-2): *Variation des Arbeitsstromes Ia*
Ziel dieser Versuchsreihe war die Darstellung der direkten Verknüpfung des Energieeintrages mit dem erzielbaren Abtrag. Außer dem Arbeitsstrom wurden alle weiteren Steuerparameter konstant gehalten.

2. Versuchsreihe (Bild 8-3): *Variation der zeitlichen Impulsparameter Ton, Toff*
Hierbei sollte die Wirkung der Brenn- und Pausendauer auf den Energieeintrag verdeutlicht werden. Daraus resultieren die Oberflächenrauhigkeit und der erreichbare Abtrag.

3. Versuchsreihe (Bild 8-4): *Variation der Zündspannung Uz*
Zur vollständigen Charakterisierung des Energieeintrages wurde die Zündspannung variiert, um Aufschluß über die meßbaren Abhängigkeiten des Verschleißes und des Abtrages zu untersuchen.

4. Versuchsreihe (Bild 8-5): *Variation der Reaktionsempfindlichkeit der Stabilisierung*
Diese Reihe dient der Verdeutlichung der wichtigen Rolle der Prozeßstabilisierung auf die Bearbeitungskenngrößen Abtrag und Verschleiß. Während dieses Versuchs wurden die Parameter der einzelnen Elemente der Prozeßstabilisierung manuell während des Versuchs verändert. Diese Veränderung wirkt sich, wie dargestellt, sehr positiv auf den erzielten Abtrag aus.

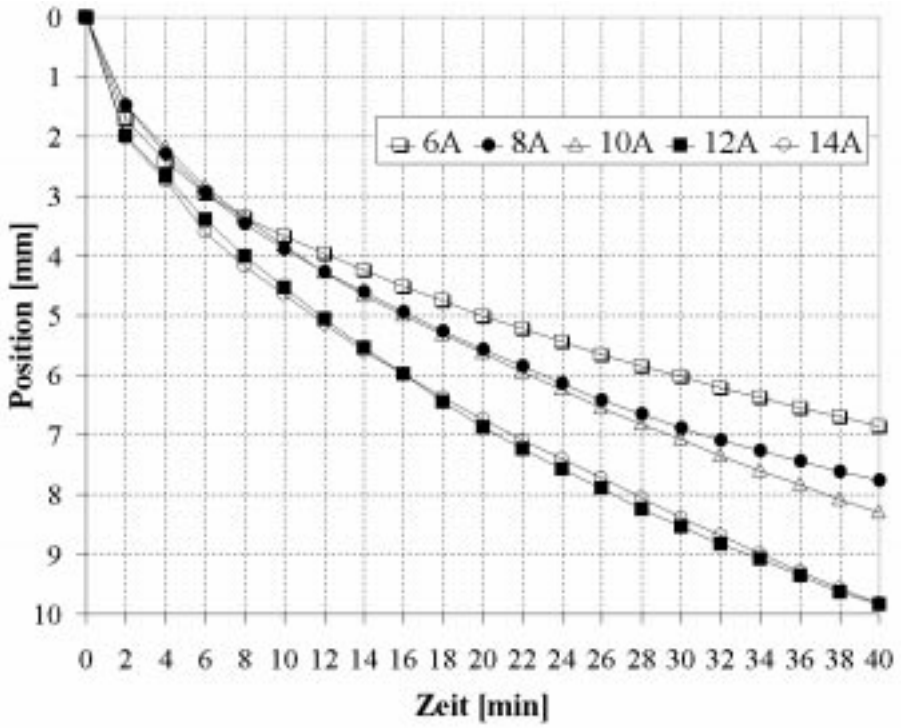
Die Ergebnisse der Versuche sind in Form eines einheitlichen Versuchsprotokolls in den Bildern 8-2 bis 8-5 dargestellt. Grundlage der Versuche ist eine Versuchsdauer von 40 Minuten. Während der Versuche wurde die Position im zweiminütigen Takt protokolliert. Ferner sind die jeweiligen erzielten Abtrags- ($\mathbf{V_w}$), relativen Verschleiß- (ϑ) und Rauhigkeitswerte ($\mathbf{R_a}$) angegeben. Die Anlagenparametrierung ist unterteilt in die erwähnten Arbeitsparameter, die unmittelbar das Arbeitsergebnis bestimmen und die Einstellparameter der Prozeßstabilisierung. Die Parameter des Spaltweitenreglers k_v, k_r und

T_{off} sind Bestandteil der Spaltweitenregelung. Die variable Pausenverlängerung *vpl* gehört ebenso wie die Parameter der MOS zu den möglichen Variationsgrößen. Die Spülung erlaubt die Angabe der Anzahl von Oszillationsspülungen ANZ, den Oszillationshub WEG und die Empfindlichkeit OszWait. Die Empfindlichkeit gibt an, nach welcher Anzahl von erkannten Lichtbögen in Folge ein MOS-Zyklus ausgelöst wird.

In Bild 8-2 (Stromvariation) sind 5 Versuche mit unterschiedlich gewähltem Arbeitsstrom dargestellt. Erwartungsgemäß nimmt der Abtrag mit der Erhöhung des Arbeitsstroms zu. Der relative Verschleiß zeigt bei 8A ein Minimum, nimmt dann jedoch mit dem Strom zu. Die Rauhigkeit steigt mit dem Arbeitsstrom an. Insgesamt wird hier die geforderte Oberflächengüte den Arbeitsstrom vorschreiben. Daraus folgt unmittelbar die Bearbeitungszeit, die bei kleineren Strömen erheblich zunimmt. Besonders zu betrachten ist der allererste Abschnitt von 0 bis 1,5 mm. Dort verhalten sich alle Einstellungen nahezu gleich.

.

Referenzversuch: 1. Stromvariation



I_a	6A	8A	10A	12A	14A		
V_w (mm^3/min)	1,359	2,384	2,427	3,830	3,967		
ϑ (%)	1,437	1,334	1,816	1,989	2,504		
Ra (µm)	3,17	3,34	3,74	3,93	4,52		

Parameter	Wert
St^- Cu^+	10
I_a	**var**
U_z	160V
T_{on}	100µs
T_{off}	20µs
k_v	50
k_r	70
t_{dsoll}	4
vpl	700µs
anz	3
weg	10µm
oszWait	200

Variation von

Arbeitsstrom

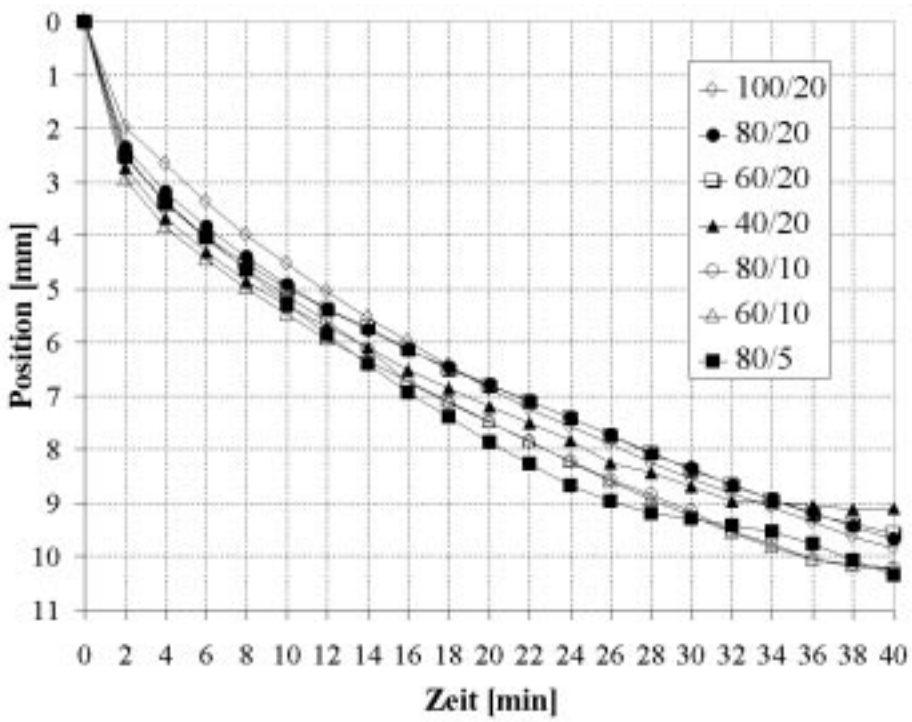
Bild 8-2: Referenzversuch mit Variation des Arbeitsstromes

Spezielle Vorversuche zeigten, daß der Hauptanteil des Verschleißes, der sich als Abrundung der Spitzen der Elektrode bemerkbar macht, genau in dieser allerersten Erodier-

phase auftritt. Interessanterweise ist die Abrundung für die verschiedenen Stromhöhen nahezu gleich. Dieser Effekt deutet darauf hin, daß die Stromamplitude, die zu einer Überlastung der Elektrode führt, nicht unbedingt ein Mittel zur Verschleißreduzierung ist. Vielmehr scheint die Stromformung, d.h. die Flankensteilheit des einsetzenden Arbeitsstromes im wesentlichen verantwortlich für den Verschleiß bei vorliegender Erodieraufgabe zu sein. Diese Vermutung wurde durch Vergleichsversuche mit einem Hersteller von Erodieranlagen, dessen Erodiergenerator über eine Einrichtung zur Veränderung der Flankensteilheit der Stromimpulse verfügt, bestätigt.

Im Rahmen der Versuchsreihe 2 (Variation der Brenn- und Pausendauer) ergaben sich die in Bild 8-3 dargestellten Resultate. Dabei zeigte sich die Bedeutung der sogenannten Technologieerstellung zur Ermittlung abtrags- und verschleißoptimaler Einstellparameter.

Referenzversuch 2: Variation von Brenn- u. Pausendauer



T_{on}/T_{off}	100/20	80/20	60/20	40/20	80/10	60/10	80/5
V_w (mm³/min)	3,830	3,868	3,497	2,944	3,965	4,607	4,608
ϑ (%)	1,989	2,524	4,277	8,349	2,449	3,700	2,234
Ra (m)	3,93	4,44	3,22	2,64	3,10	3,48	3,85

Parameter	Wert
St^- Cu^+	10
I_a	12A
U_z	160V
T_{on}	**var**
T_{off}	**var**
k_v	50
k_r	70
t_{dsoll}	4
vpl	700µs
anz	3
weg	10µm
oszWait	200

Variation von

Zeitparameter

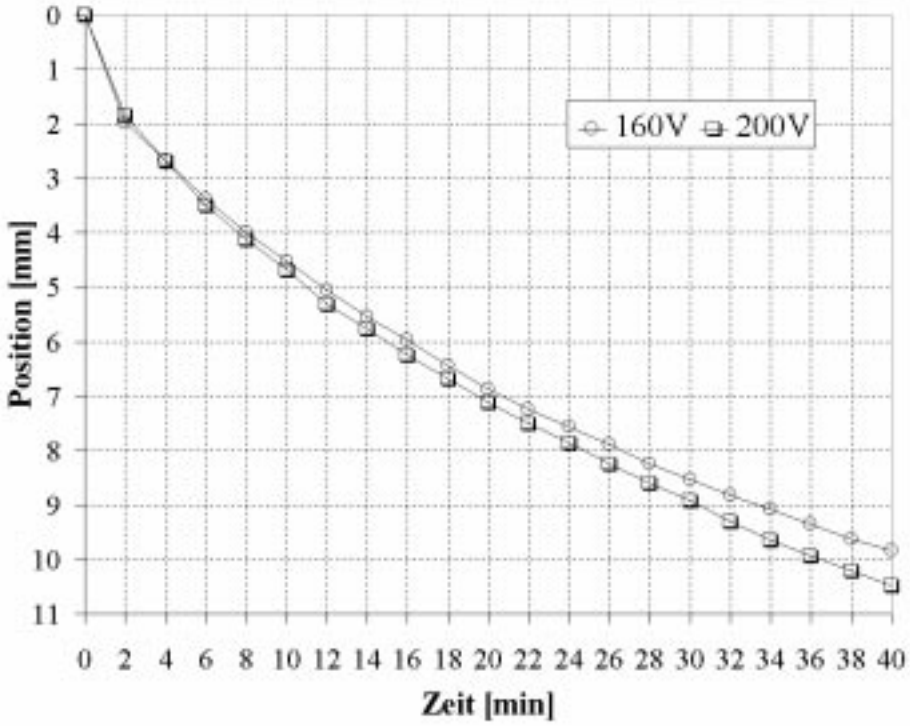
Bild 8-3: Referenzversuch mit Variation der zeitlichen Impulsparameter

Die Versuche ergaben, daß die Kombination der Brenndauer 80µs und der Pausendauer 5µs die bestmöglichste Einstellung für den gewählten Arbeitsstrom darstellt. Dort ist der Abtrag bei einem akzeptablen Verschleiß am höchsten. Das Tastverhältnis von 0,941 belegt die Qualität der Prozeßstabilisierung. Nur eine hochwirksame Prozeßvisualisierung

ermöglicht eine Schlitzerosion mit einem derartig hohen Tastverhältnis. Wie bereits im vorherigen Versuch beobachtet, ist der Verschleiß zu Beginn der Bearbeitung sehr groß.

Die dritte Versuchsreihe zeigt den Einfluß der Zündspannung U_z. Dabei wirkt sich eine erhöhte Zündspannung für die vorliegende Bearbeitungsaufgabe positiv auf Abtrag und Verschleiß aus. Der Grund liegt zum Teil darin, daß der Lateralspalt bei höherer Zündspannung größer wird und sich somit die Spülverhältnisse verbessern. Hinzu kommt , daß der im Mittel größere Arbeitsspalt zu einem gleichmäßigeren Verschleiß führt.

Referenzversuch 3: Zündspannungsvariation



Uz	160V	200V					
V_w (mm³/min)	3,830	4,521					
ϑ (%)	1,989	1,784					
Ra (m)	3,93	3,77					

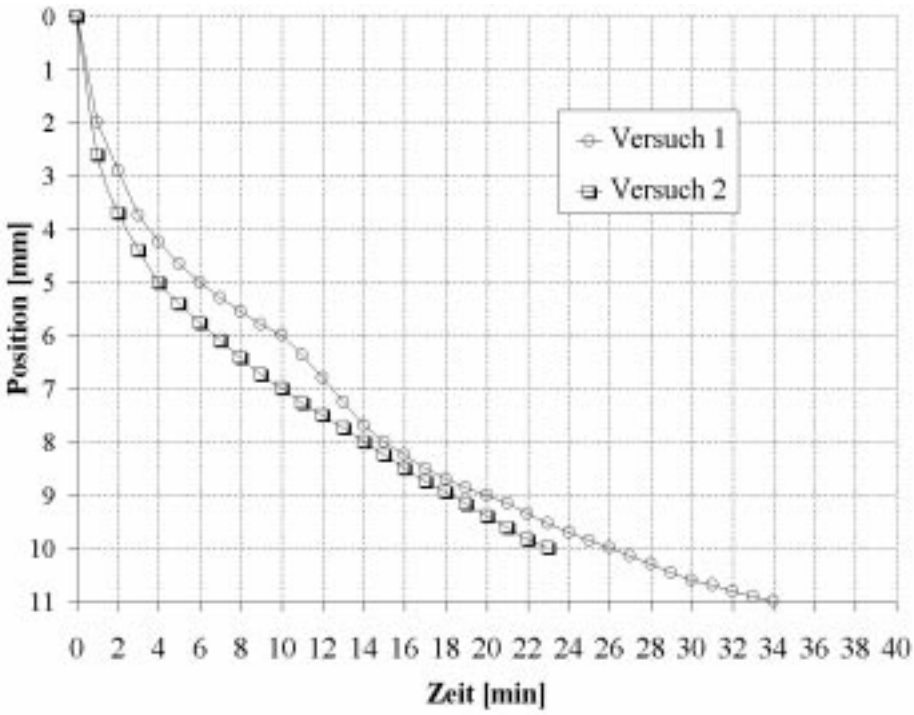
Parameter	Wert
St^- Cu^+	10
I_a	12A
U_z	**var**
T_{on}	100µs
T_{off}	20µs
k_v	50
k_r	70
t_{dsoll}	4
vpl	700µs
anz	3
weg	10µm
oszWait	200

Variation von

Zündspannung

Bild 8-4: Referenzversuch mit Variation der Zündspannung

Der vierte Referenzversuch, der in Bild 8-5 dargestellt ist, unterscheidet sich von den vorangegangenen grundlegend darin, daß bei diesem Versuch die Einstellparameter während des Versuchs verändert wurden. Dabei wurde versucht, in jeder Phase des Versuchs maximale Laufruhe zu erzielen. Im Ergebnis zeigte sich, daß diese „manuelle Optimierung“ zu einem überragenden Zeitvorsprung führte, der sich in der relativ kurzen Bearbeitungszeit von ca. 23 Minuten widerspiegelt. Der zu beobachtende Verschleiß unterschied sich dabei kaum von den Verschleißwerten der vorangegangenen Versuche.



Referenzversuch 4: Empfindlichkeitsvariation		Parameter	Wert
		St^- Cu^+	10
		I_a	12A
		U_z	160V
		T_{on}	80µs
		T_{off}	10µs
		k_v	50
		k_r	70
		t_{dsoll}	4
		vpl	400µs
		anz	3
		WEG	10µm
		oszWait	**var**
	Variationen	Variation von	
Versuch 1	vpl = 500µs	Empfindlichkeit	
	oszWait = 15		
Versuch 2	vpl = 400µs		
	oszWait = 20 -> 40 -> 80 -> 100 -> 75		

Bild 8-5: Referenzversuch mit manueller Empfindlichkeitsvariation

Im ersten Versuch wurden die beiden Parameter vpl (Variable Pause) und oszWait (Spülungsempfindlichkeit) variiert. Beide wurden ausgehend vom Startwert der rechten Diagrammspalte während des Versuchs einmal verändert. Im zweiten Versuch wurde lediglich die Empfindlichkeit der Spülung verändert. Diese wurde sukzessive vom Startwert 20 in 4 Schritten auf einen „optimalen“ Wert von 75 verändert. Der Parameter *oszWait* gibt dabei an, nach welcher Anzahl von Folgelichtbogensignalen *folgeArc* die Micro-Oszillationsspülung ausgelöst wird. Offensichtlich war dieser Parameter in den vorigen Referenzversuchen deutlich zu hoch eingestellt. Das im Rahmen dieser einfachen manuellen Optimierung erreichte Abtragsergebnis kann als sehr gut bezeichnet werden. Vergleichsversuche bei mehreren Herstellern ergaben Abtragszeiten für 10mm Einsenken mit der Kammelektrode zwischen 21 und 50 Minuten

8.3. Standarderodieraufgabe mit automatischer Prozeßoptimierung

Die Aufgabe der ausführlich beschriebenen Prozeßoptimierung ist es, die Einstellparameter der Prozeßstabilisierung adaptiv an die Erfordernisse des Abtragsprozesses an-

zupassen. Die Prozeßstabilisierung arbeitet dabei autark. Die Optimierung stützt sich zunächst auf Startwerte für die Einstellparameter ab. Diese Werte werden im Verlauf des Abtragsprozesses, wie ausführlich beschrieben, entsprechend den Ergebnissen einer Prozeßbewertung nach einem in der Wirkung angepaßten und gedächtnisbasierten Verfahren kontinuierlich verändert. Welche Steuerparameter auf welche Art und Weise verändert werden, bleibt dabei der Optimierung überlassen. Zur Demonstration der Wirkungsweise wurde eine Standarderodieraufgabe (Sackloch, Durchmesser 30mm) gewählt.

Grundlage der Optimierung ist zunächst die Entscheidung, ob der Arbeitsfortschritt ausreichend groß ist. In Bild 8-6 sind exemplarisch drei Stichproben dargestellt, die unterschiedliche Arbeitsfortschritte wiedergeben und die als Basis für die Entscheidungsfindung dienen.

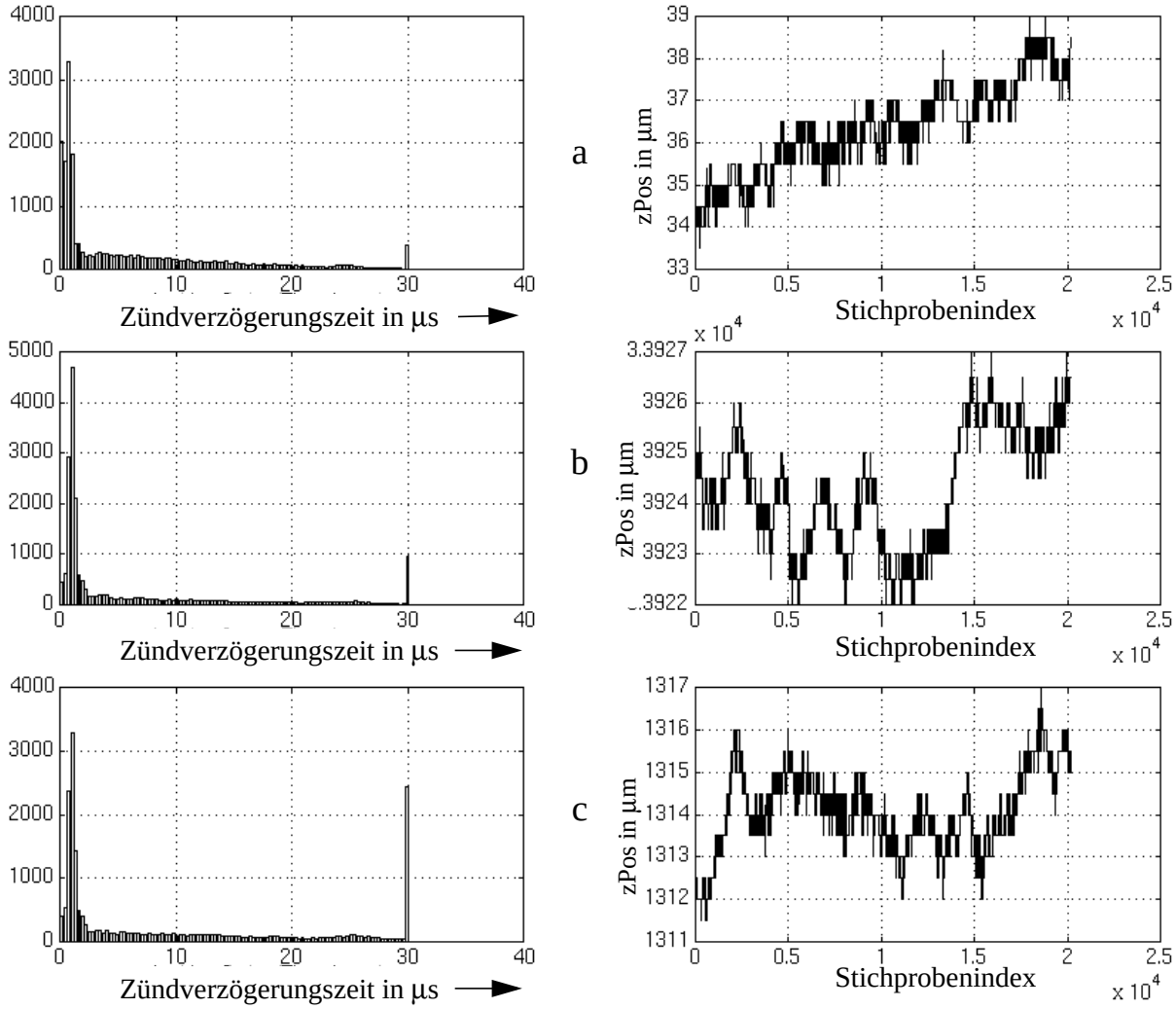


Bild 8-6: ***Stichproben mit einem Umfang von 20165 der Pinolenposition zPos zur Optimierungsentscheidung mit der jeweiligen t_d-Verteilung der aufgenommen Werte (Index); a: Guter Prozeß; b: Mittelmäßiger Prozeß; c: Ungünstiger Prozeß***

Für die Optimierung wird anhand von Stichproben mit einem Umfang von ca. 20000 Impulsen in Folge der Prozeßfortschritt anhand der Pinolenposition erfaßt und bewertet.

Kern der Entscheidungsfindung bildet die tatsächlich eingesenkte Tiefe, die als Positionsänderung in der Z-Achse gemessen wird und direkt den Arbeitsfortschritt wiedergibt. Dazu wird aus den Positionen und den Zeitabschnitten zwischen den Positionsmeßpunkten eine Regressionsgerade berechnet. Die Geradensteigung dieser Regressionsgeraden dient dann als Maß für den Arbeitsfortschritt und liefert im Vergleich mit den vorangegangenen Steigerungen das Entscheidungskriterium für eine Optimierung.

In Bild 8-6 ist zusätzlich für die jeweiligen Pinolenpositionen die Häufigkeitsverteilung der Zündverzögerungszeiten dargestellt. Diese Darstellung dient der Untermauerung der aufgrund der Analyse der Pinolenposition getroffenen Entscheidung, die wie folgt lauten würde:

Bild 8-6 a: Die Pinolenposition zeigt einen beinahe linearen Anstieg. Dieser Arbeitsfortschritt läßt auf einen „guten“ Prozeß schließen. Eine Optimierung würde nicht notwendig sein. Die für die Arbeitsfortschrittsbewertung unerhebliche t_d-Häufigkeitsverteilung erlaubt eine ähnliche Aussage. Man erkennt sehr wenig Leerläufe und ein breit verteiltes Spektrum mit regulären Entladungen mit akzeptablen Verzögerungszeiten im Bereich von 3µs bis zu ca. 10µs.

Bild 8-6 b: In dieser Stichprobe schwankt die Pinolenposition. Sie zeigt allerdings im Mittel einen deutlichen Zuwachs. Hier würde wahrscheinlich auch keine Optimierung eingeleitet, wenngleich der Abtragsprozeß verglichen mit der Stichprobe aus Teil a deutlich unruhiger verläuft. Entsprechendes gibt die t_d-Verteilung wieder. Hier zeigt sich ein ausgeprägtes Maximum im Bereich 3 µs, was auf einen erhöhten Lichtbogenanteil schließen läßt. Dazu passend ist die Leerlaufzahl auf mehr als das Doppelte angestiegen.

Bild 8-6 c: Hier ist eine Stichprobe dargestellt, die im Mittel kaum einen Arbeitsfortschritt besitzt. Der entsprechende Abtragsprozeß ist mit großer Wahrscheinlichkeit als wenig abtragsintensiv zu bezeichnen. Hier würde deswegen eine Optimierung eingeleitet werden. Die für die Anschauung dargestellte t_d-Verteilung spiegelt den Prozeßtrend in gleichem Maße wider. Auffallend ist vor allem der enorm hohe Leerlaufanteil, der auf zahlreiche Mikro-Oszillationsspülungen hindeutet.

Zur Analyse der Wirkungsweise der Prozeßoptimierung im Hinblick auf die kontinuierliche Parameteranpassung werden alle die Optimierung betreffenden Ein- und Ausgangsdaten protokolliert. Damit kann im nachhinein der gesamte Optimierungsvorgang graphisch dargestellt und sozusagen „offline“ ausgewertet werden. In den folgenden Bildern 8-7a bis d ist ein Ausschnitt eines optimierten Bearbeitungsvorganges dargestellt. Die Optimierung nutzt Stichproben mit einem Umfang von 20165 Werten. Die Prozeßparameter, die die Eingangsdaten für die Optimierung bilden, sind der Mittelwert *tdmit*, der Medianwert *tdmed* der Zündverzögerungszeiten, die relative Häufigkeit der Lichtbögen in der Stichprobe *relArc*, die Anzahl der in Folge aufgetretenen Lichtbögen *folgeArc* sowie die Pinolenposition *zPos*.

Demonstrationsversuch mit automatischer Prozeßoptimierung für einen Standarderodierversuch:

Sackloch 10mm tief einsenken

Cu^+, Zylinderelektrode
Durchmesser 20mm
St^-

I_a=16A; U_z=180V
T_{on}=100µs; T_{off}=20µs

MOS aktiv
Fuzzy-Optimierung aktiv

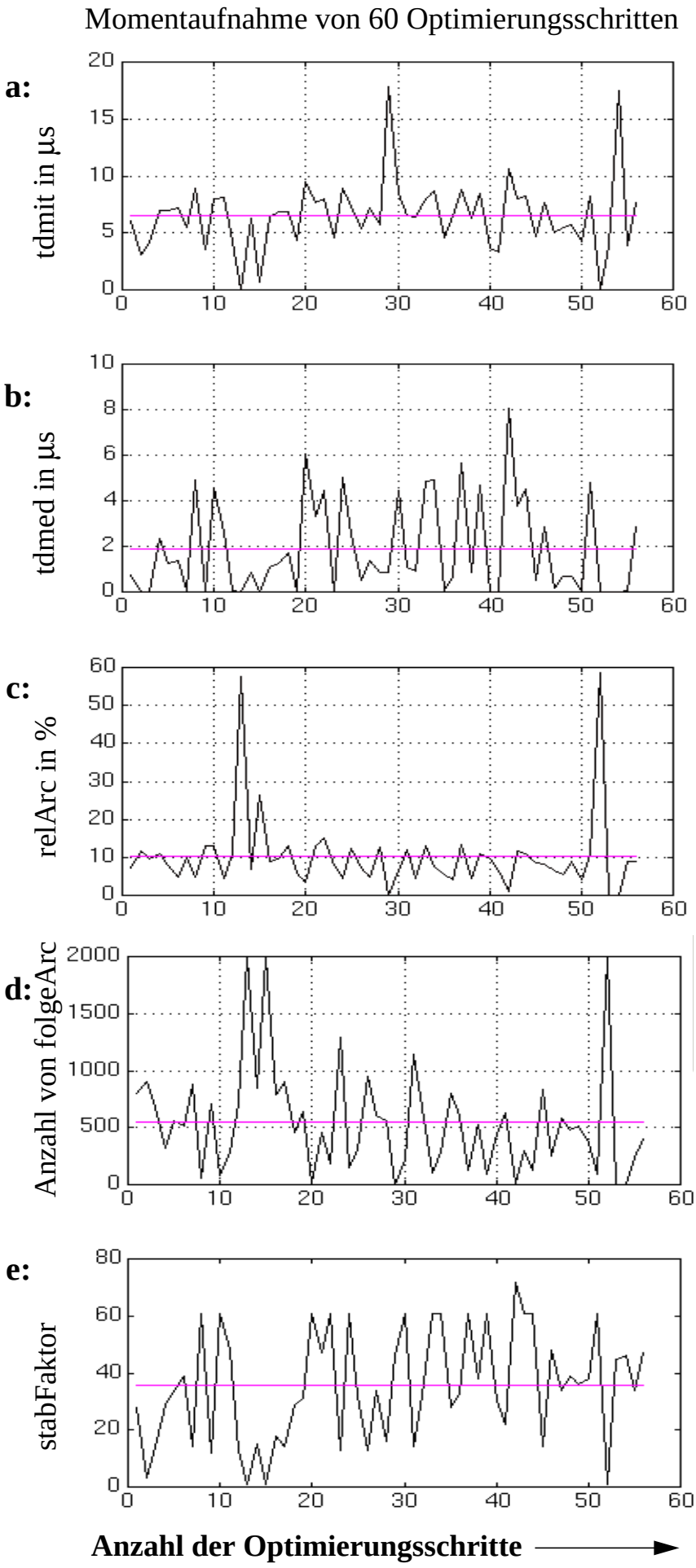


Bild 8-7:

Fuzzy-Prozeßbewertung für einen Ausschnitt von 60 Optimierungsschritten

Die vier erstgenannten Prozeßparameter sind in den Bildern 8-7a-d dargestellt und bilden die Eingangsdaten der Fuzzy-Prozeßbewertung. Das Ergebnis der Bewertung, den Stabilitätsfaktor *stabFaktor*, zeigt Bild 8-7e.

Die Momentaufnahme von 60 Optimierungsschritten vermittelt einen Eindruck vom Verlauf der Prozeßparameter. Die beiden Werte *tdmit* und *tdmed* geben den Verlauf der Zündverzögerungszeiten wieder. Der Maßstab reicht dabei von 0 bis 10µs bzw. 20µs. Der Medianwert beschreibt hierbei sehr anschaulich die durchweg sehr kleinen Zündverzögerungszeiten. Man erkennt anhand der eingezeichneten Hilfslinien, daß der Mittelwert *tdmit* mit durchschnittlich 6,55µs deutlich höher liegt als der Medianwert *tdmed* mit durchschnittlich 1,88µs. Ferner ist ist die Schwankungsbandbreite von *tdmit* ca. doppelt so groß wie diejenige von *tdmed*.

Die beiden Eingangsparameter *relArc* und *folgeArc* beschreiben die Anzahl und Folgehäufigkeit von Lichtbögen bzw. Kurzschlüssen. Man erkennt in den Bildern 8-7c und 8-7d, daß der Anteil an Lichtbögen in den jeweiligen Stichproben im Mittel ca. 10% betrug. Aufgetretene Ausreißer, wie z.B. zwischen den Optimierungsschritten 12 bis 15, weisen auf eine Unregelmäßigkeit hin, die sich in allen Prozeßparametern niederschlägt. Insbesondere die Anzahl der *folgeArc-Signale* wächst sehr stark an. Für die Bewertung von *folgeArc* sei angemerkt, daß der mittlere Wert von 500 nicht etwa 500 Lichtbögen in Folge für jede Stichprobe eines jeden Optimierungsschrittes wiedergibt. Die Aussage bedeutet, daß aufgrund des Vorwärts-Rückwärtszählers, wie er in Kapitel 7.1.1 dargestellt ist, tendenziell viele Lichtbögen nacheinander auftreten. Dabei führt jeder weitere Lichtbogen nach vier in Folge aufgetretenen wiederum zu einem *folgeArc-Signal*. Somit kann von der absoluten Zahl *folgeArc* nicht auf die absolut in Folge aufgetretenen Lichtbögen geschlossen werden. Man kann aber feststellen, daß ein hoher Wert für *folgeArc* einen Prozeßzustand wiedergibt, der durch viele Folgelichtbögen gekennzeichnet ist.

Insgesamt sind die beiden t_d-Kurven und die arc-Kurven in ihren prinzipiellen Verläufen relativ gut korreliert. Die erwähnte höhere Aussagekraft des Medianwertes wird bei dem Vergleich des Medians, des Mittelwertes und dem relArc-Verlauf deutlich. Dabei ist zu erkennen, daß der Mittelwert *tdmit* nur auf massives Auftreten von Lichtbögen, wie z.B. bei Optimierungsschritt 12 reagiert. Entsprechend zeigt *tdmit* die Leerlaufphase kurz vor Schritt 30 relativ deutlich an. Der Medianwert besitzt hingegen ein exakteres Verhalten für lichtbogenartige Prozeßzustände. Er erholt sich weniger schnell und signalisiert z.B. um Schritt 12 bis 15 die auftretenden Lichtbögen deutlicher. Dies zeigt sich auch nach Optimierungsschritt 40. In diesem Abschnitt würde man einen positiven Arbeitsverlauf mit einem mäßigen, gut verteilten Lichtbogenanteil vermuten. Der Medianwert liegt dabei relativ hoch und signalisiert, daß eine Vielzahl von Impulsen eine relativ hohe Zündverzögerungszeit aufweist. Der Mittelwert hingegen unterscheidet sich kaum von anderen Abschnitten, wie z.B. um den Optimierungsschritt 35, die deutlich mehr Leerläufe, aber auch mehr Lichtbögen aufweisen.

Gemäß der in Kapitel 7.2.2.4 beschriebenen Fuzzy Parameter Klassifizierung wird aus den Prozeßparametern der Bilder 8-7a bis 8-7d der Stabilitätsfaktor *StabFak*, wie in Bild

8-7e dargestellt, ermittelt. Entsprechend den 60 Optimierungsschritten ergeben sich 60 Stabilitätsfaktoren. Der Wertebereich reicht von 0, d.h. äußerst lichtbogen- bzw. kurzschlußartig, bis 100, d.h. vollkommen leerlaufartig. Ein Wert um 50 bedeutet, daß die Klassifikation eine ausreichende Prozeßgüte festgestellt hat, so daß keine Parameteranpassung notwendig ist. Im dargestellten Ausschnitt wird dieser Wert selten erreicht, so daß in den allermeisten Fällen eine Anpassung der Steuerparameter vorgenommen wird. Der eingezeichnete Mittelwert des Stabilitätsfaktors liegt bei 35,5. Dieser relativ niedrige Mittelwert besagt, daß der Abtragsprozeß im Beobachtungszeitraum eine deutliche Lichtbogen- bzw. Kurzschlußtendenz besitzt. Ein Vergleich der Verläufe der Prozeßparameter und des Stabilitätsfaktors zeigt die sehr gute Beschreibung des Prozeßzustandes. Der Stabilitätsfaktor „folgt“ dem Abtragsprozeß sehr präzise.

Basierend auf dem ermittelten Stabilitätsfaktor folgt gemäß Kapitel 7.2.2.5 die Einstellung der Steuerparameter bzw. die Anpassung der Zielgrößen der Optimierung. Dazu sind die drei Zielgrößen der Spaltweitenregelung k_v, k_r, t_{dsoll} zusammen mit dem Stabilitätsfaktor in Bild 8-8 dargestellt. Da in dem dargestellten Optimierungsausschnitt die maximale Bandbreite der Parameter des Spaltweitenreglers noch nicht erreicht wurde, sind die zeitlichen Zielgrößen und die MOS-Parameter nicht verändert und werden deswegen auch nicht dargestellt. Die einzige zusätzlich durchgeführte Maßnahme betrifft die sogenannte „Notspülung“, die direkt von der Optimierung ausgelöst wird, wenn der Stabilitätsfaktor einen Wert nahe null annimmt. Dies ist im betrachteten Ausschnitt dreimal vorgekommen.

Aufgrund des ermittelten tendenziell lichtbogenartigen Verlaufs des Abtragsprozesses erwartet man eine Reaktion, die diesem Prozeßtrend entgegenwirkt. Die Einstellstrategie antwortet dabei auf Stabilitätsfaktoren, die einen kleineren Wert als 50 annehmen, immer mit Maßnahmen, die den Prozeß aus dem lichtbogenartigen Bereich heraus bewegen.

Die Bilder 8-8b bis 8-8d geben den erwarteten Verlauf der Steuerparameter wieder. Gemäß dem Stabilitätsfaktor muß k_v aufgrund des anhaltenden Lichtbogentrends verringert werden. Bild 8-8b zeigt den Abwärtstrend, der dazu führt, daß k_v im betrachteten Zeitraum vom Startwert 40 bis auf 25 abnimmt. Die auftretenden Schwankungen im Beobachtungszeitraum stimmen sehr gut mit dem Prozeßtrend, ausgedrückt durch den Stabilitätsfaktor, überein. Die Rückwärtsverstärkung k_r nimmt erwartungsgemäß zu. Ausgehend vom Startwert von 60 liegt k_r am Ende des Beobachtungszeitraumes bei 85. Auch hier wirken sich die Stabilitätsschwankungen unmittelbar auf den Einstellwert aus. Der dritte, in Bild 8-8d dargestellte Einstellparameter ist der Sollwert für die Zündverzögerungszeit t_{dsoll}. Der Startwert für t_{dsoll} beträgt 5,5µs. Während des Optimierungsausschnittes wird der Sollwert für die Zündverzögerungszeit sukzessive auf den Wert 7µs erhöht.

Insgesamt werden im dargestellten Optimierungsausschnitt die drei Parameter der Spaltweitenregelung tendenziell so eingestellt, daß sie dem lichtbogenartigen Prozeßtrend entgegenwirken.

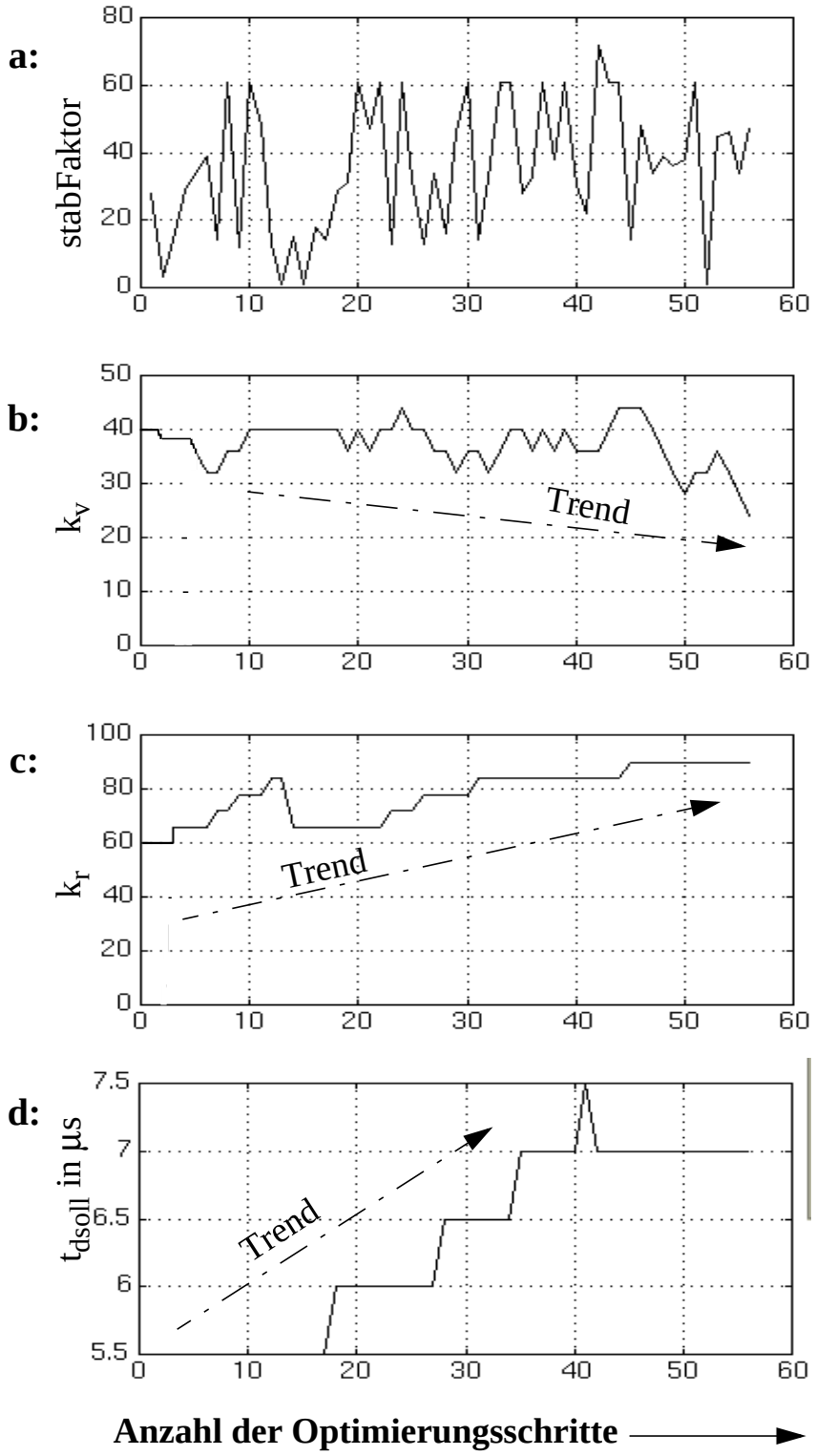


Bild 8-8
Der ermittelte Stabilitätsfaktor:
stabFaktor
Ausgangsparameter der Fuzzy-Optimierung:
k_v
k_r
t_{dsoll}
Ausschnitt für 60 Optimierungsschritte

Die durchgeführten Standarderodierversuche zur Erzeugung eines einfachen Sackloches mit aktiver Fuzzy-Optimierung zeigten, daß die Prozeßsicherheit erhöht werden konnte. Dieser Gewinn an Prozeßsicherheit äußerte sich in weniger Folgelichtbögen, aber leider auch in mehr Nichtzündern, was insgesamt nur zu minimalem Abtragsgewinn führte. Der Grund dafür ist eine „zu vorsichtige“ Prozeßbeurteilung. Das bedeutet, daß ein an sich akzeptabler Prozeß als lichtbogenartig klassifiziert wird. Die dafür verantwortlichen Regelbasen, insbesondere diejenigen für den Stabilitätsfaktor, wurden zunächst bewußt

sehr vorsichtig konzipiert, da die Prozeßoptimierung in der entwickelten Form als multivariable Optimierung vollkommen neuartig ist und dafür keine Erfahrungen vorlagen. Im nächsten Schritt kann nun durch gezielte Veränderungen der Regelbasen die Fuzzy-Prozeßparameter-Klassifikation (FPK) gezielt auf mehr Abtragsleistung optimiert werden.

Die Wirkung der Optimierung wurde bewußt nicht an der Spezialerodieraufgabe des vorigen Kapitels aufgezeigt, da die prozeßbedingten Schwierigkeiten von der implementierten Fuzzy-Prozeßparameter Klassifikation nicht befriedigend beherrscht werden. Einige Vorversuche wiesen deutlich darauf hin, daß die FPK idealerweise über eine weitere Stabilitäts-Regelbasis für Spezialerodieraufgaben verfügen müßte, um z.B. Schlitze oder Feinsterosionen mit echtem Abtragsgewinn realisieren zu können.

Für Standarderodieraufgaben ist es im Rahmen dieser Arbeit gelungen, den Abtragsprozeß entsprechend seiner Abtragsgüte zuverlässig zu bewerten und mittels einer prozeßangepaßten Einstellstrategie auf die Steuerparameter der Prozeßführung korrekt rückzuwirken. Die Zielsetzung, eine vollautomatische „adaptive“ Prozeßoptimierung zur Stabilisierung des Abtragsprozesses unter Einbeziehung von Fuzzy-Technologien zu realisieren, ist damit für einen großen Teil von Erodieraufgaben erreicht.

Das im Rahmen dieser Arbeit konzipierte und realisierte Prozeßführungssystem ist somit in der Lage, alle wichtigen Prozeßparameter zu erfassen und zu verarbeiten. Die resultierende Prozeßbeeinflussung liefert, wie gezeigt, einen stabilen Abtragsprozeß, der für Standarderodieraufgaben bereits ansprechende Abtragswerte aufweist. Für die weitere Optimierung der Einstellstrategie, insbesondere zur Erhöhung der Abtragsleistung, scheint eine Beschleunigung der Maßnahmensteigerung in der Einstellhierarchie sinnvoll. Für Spezialerodieraufgaben, wie in Kapitel 8.2 vorgeführt, sollte die FPK um eine zusätzliche spezialisierte Regelbasis zur Ermittlung des Stabilitätsfaktors ergänzt werden. Ergänzungen der Einstellstrategie um einen „lernenden Bestandteil“ mittels künstlicher neuronaler Netze bergen aus Sicht der Abtragsoptimierung zusätzliches Potential für weiterführende Untersuchungen und Verbesserungen.