

5 Erkennung lichtbogenartiger Fehlentladungen

Die funkenerosive Bearbeitung nutzt die abtragende Wirkung einzelner Entladungen. Neben den gewünschten abtragswirksamen Entladungen können jedoch auch lichtbogenartige Fehlentladungen auftreten, die eine ernstzunehmende Gefahr für den Prozeßverlauf darstellen. Treten derartige Fehlentladungen in dichten Folgen auf, so kann dies sehr schnell zu einer niederohmigen Brückenbildung zwischen Werkstück und Elektrode und damit zum Kurzschluß führen. Wird der Prozeß nicht abgebrochen, so können sich daraus sogenannte „stehende Lichtbögen“ mit massivem Kohlenstoffauftrag entwickeln. Es entstehen lokale Oberflächenbeschädigungen und der Erodierprozeß kommt zum Erliegen. Bild 5.1 zeigt eine durch Fehlentladungen beschädigte Werkstück-Oberfläche.

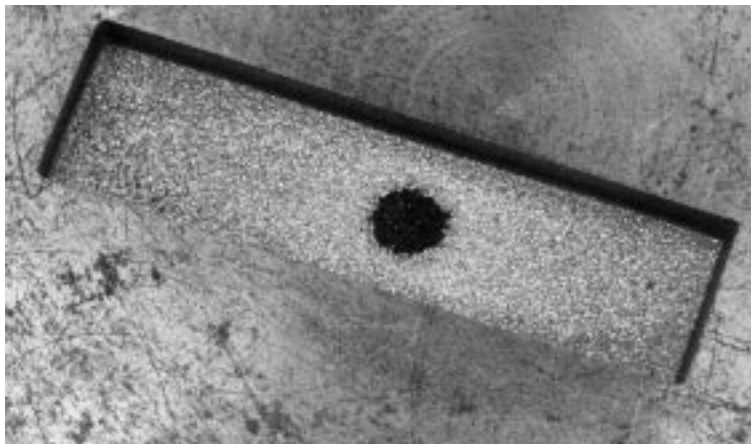


Bild 5.1: Durch Fehlentladungen beschädigte Oberfläche

Die Entwicklung von dem Stadium einzelner Fehlentladungen bis zum Entarten des Prozesses in Form von kontinuierlich auftretenden Folgen von Fehlentladungen geschieht in Etappen. Ziel einer Prozeßführung muß es daher sein, frühzeitig und präzise Prozeßentartungstendenzen zu erkennen und diesen mit geeigneten Maßnahmen entgegenzuwirken.

5.1 Ursache lichtbogenartiger Fehlentladungen

Das Dielektrikum weist bei der Funkenerosion nur eine begrenzte Isolationseigenschaft auf. Dieser Umstand ist Voraussetzung dafür, daß überhaupt ein Funkenüberschlag und damit ein Abtragsprozeß zustande kommt. Ist diese isolierende Eigenschaft des Dielektrikums jedoch lokal zu gering z.B. durch Konzentration von Abtragspartikeln, so können bevorzugte Bereiche für Funkenentladungen entstehen. Dadurch, daß Folgen von Funkenentladungen auf einer geometrisch eng begrenzten Zone konzentriert werden, kommt es an dieser Stelle zu einer lokalen Überhitzung und damit zu einer Beschädigung der Oberfläche.

Zur Vermeidung dieses Effektes ist es notwendig, den Zustand des Dielektrikums so zu steuern, daß dessen Isolationseigenschaft groß genug ist, damit sich keine Zonen mit Entladungskonzentrationen bilden können.

Um nach einer erfolgten Entladung die notwendige Mindestisolation für den nächsten Impuls wiederherzustellen, bedarf es einer Erholzeit, in der kein Energieeintrag in den Funkenspalt erfolgt. Die Länge dieser Erholzeit zur Deionisierung wird stark beeinflusst durch die Kontamination des Dielektrikums mit Abtragspartikeln. Die Größe und Zahl dieser Abtragspartikel, die bei jedem Impuls das Dielektrikum verunreinigen, hängt von der vorangegangenen Entladedauer und der Höhe des Arbeitsstromes ab.

Die Verteilung dieser Abtragspartikel ist aufgrund der vielen Einflußfaktoren nur schwer abzuschätzen [BiKo98]. So beeinflussen Gasblasen, die während des Abtragsvorganges entstehen, sowie die geometrischen Spaltverhältnisse den Abtransport der Abtragspartikel.

Die Bestimmung des Entladungsortes ist über ein Verfahren möglich, das den Stromfluß durch verschiedene Kontaktierungsstellen an der Werkzeugelektrode mißt. Anhand der während der Entladung aufgenommenen Strom-Meßwerte kann auf die Position des Entladungsortes geschlossen werden (Bild 5.2).

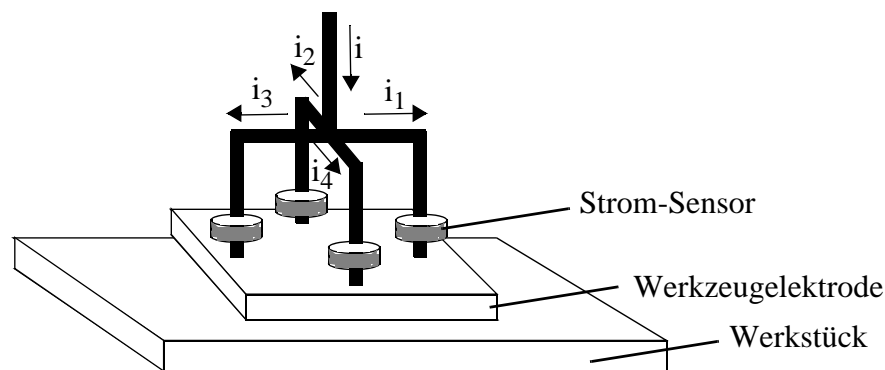


Bild 5.2: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Entladungsortes nach [KKN92] und [Oba92]

Eine Analyse der während der funkenerosiven Bearbeitung aufgenommenen Entladungsorte mit den Methoden der Chaos-Theorie ergab, daß bei einem stabilen Erosionsprozeß die Orte des Funkenüberschlags hochgradig chaotisch auf den Elektrodenoberflächen verteilt sind [HaKu01]. Es bilden sich demnach keine Gebiete bevorzugter Entladungsaktivität aus. Andere Verhältnisse ergeben sich im Falle eines instabilen Prozesses. Die Verteilung der Entladungsorte ist in diesem Fall weniger chaotisch und Entladungen konzentrieren sich auf bestimmte Zonen.

In der praktischen Anwendung ist die Messung des Entladungsortes zur Bewertung der Prozeßstabilität nicht geeignet. Verschiedene Elektrodengeometrien und der äußerst komplexe Meßaufbau erschweren die allgemeine Anwendbarkeit. Weit verbreitet ist es dagegen, über die Anzahl der detektierten lichtbogenartigen Fehlentladungen auf die Prozeßstabilität zu schließen. Es existieren jedoch unterschiedlichste Verfahren zur Erkennung lichtbogenartiger Fehlentladungen.

5.2 Methoden zur Erkennung lichtbogenartiger Fehlentladungen

Das Problem der Erkennung von Lichtbögen ist eng verknüpft mit der Bewertung der Leitfähigkeit des Dielektrikums. Verfahren, in denen Prozeßgrößen gemessen werden, die die Leitfähigkeit des Dielektrikums beschreiben [VOL81], [Peu81], arbeiten mittels Testimpulsen in der Impulspause. Dabei entsteht jedoch das Problem, daß durch den Testimpuls zusätzliche Energie eingespeist wird und die Pausenzeit ausgedehnt werden muß.

Die meisten Methoden zur Erkennung von Fehlentladungen ziehen daher anhand charakteristischer Ausprägungen der Funkenentladungen Rückschlüsse auf die Leitfähigkeit des Dielektrikums. Die Entladungen zeigen bei der funkenerosiven Bearbeitung unterschiedlichste Ausprägungen, die abhängig sind von dem eingesetzten Werkstoff- und Elektrodenmaterial sowie der Höhe des Arbeitsstromes und der Zündspannung. Dieser Umstand erschwert die Erkennung von Lichtbögen erheblich und ist der Grund für die große Zahl unterschiedlicher Verfahren zur Lichtbogendetektion.

Nachfolgend werden die wichtigsten industriell eingesetzten Verfahren dargestellt und im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit bewertet.

5.2.1 Lichtbogenerkennung über die Zündverzögerungszeit

Die elektrische Durchschlagfestigkeit des Dielektrikums beeinflusst die Zündverzögerungszeit t_d . Eine geringe Durchschlagfestigkeit führt zu einer Abnahme der Zündverzögerungszeit. Daraus folgt, daß ein Anstieg der Dielektrikumsverschmutzung im Arbeitsspalt bei konstanter geometrischer Spaltweite zu einer Abnahme der Durchschlagfestigkeit und damit auch zu einer verringerten Zündverzögerungszeit t_d führen wird.

Diese Überlegung bildet die Grundlage der Lichtbogenerkennung über die Zündverzögerungszeit: Folgen mehrere Impulse mit geringer Zündverzögerungszeit aufeinander, so wird dies als lichtbogenartige Fehlentladung interpretiert, die einen erhöhten Verschleiß an der Werkzeugelektrode nach sich zieht (Bild 5.3).

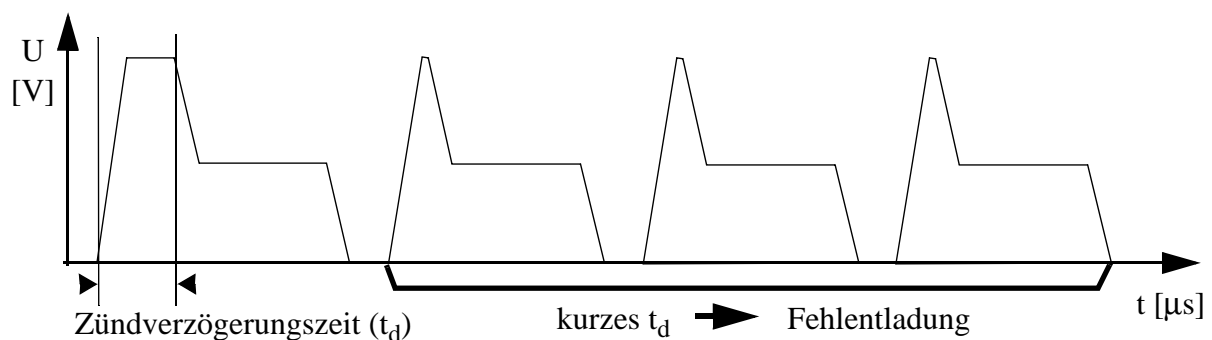


Bild 5.3: Prinzip der Lichtbogenerkennung über die Zündverzögerungszeit

Es existieren zahlreiche Arbeiten, die in der beschriebenen Art und Weise die Zündverzögerungszeit zur Prozeßbeurteilung heranziehen [SnCo75], [Slo89], [Deh92], [Ode95]. Die Wirksamkeit dieser Methode ist allerdings strittig. So konnte bei Ausblendung aller Impulse mit geringer Zündverzögerungszeit weder eine Steigerung des Abtrags noch eine Verringerung des Werkzeugelektrodenverschleißes festgestellt werden [Bru82]. Auch bei einer Untersuchung von Einzelentladungen mit kurzer Zündverzögerungszeit konnte kein erhöhter Elektrodenverschleiß nachgewiesen werden [Enn80]. Außerdem unterliegt die Zündverzögerung auch in einem stabilen Erosionsprozeß starken zufallsbedingten Schwankungen. So ist die geometrische Spaltweite keinesfalls konstant, sondern wird durch die Regelung permanent verändert. Gasblasen im Arbeitsspalt beeinflussen ebenfalls die Durchschlagfestigkeit.

Zusätzliche Einschränkungen bei der Anwendbarkeit dieses Verfahrens ergeben sich durch die Generatortechnik. So ist die Aussagekraft der Zündverzögerungszeit reduziert, wenn der Generator beim Anstieg der Zündspannung sehr steile Flanken erzeugt, da in diesem Fall überwiegend Entladungen mit kurzen Zündverzögerungszeiten auftreten.

5.2.2 Lichtbogenerkennung über die Höhe der Zündspannung

Die Grundüberlegung bei der Erkennung von Fehlentladungen über die Höhe der Zündspannung ist identisch mit der Detektion über die Zündverzögerungszeit. Erneut wird davon ausgegangen, daß ein stark mit Abtragspartikeln verunreinigter Arbeitsspalt eine verringerte Durchschlagfestigkeit aufweist, die zu einem frühen Zünden der Entladestrecke führt. Eine Entladung, die noch vor dem Erreichen des Zündspannungsniveaus stattfindet, wird demzufolge als lichtbogenartige Fehlentladung gewertet (Bild 5.4).

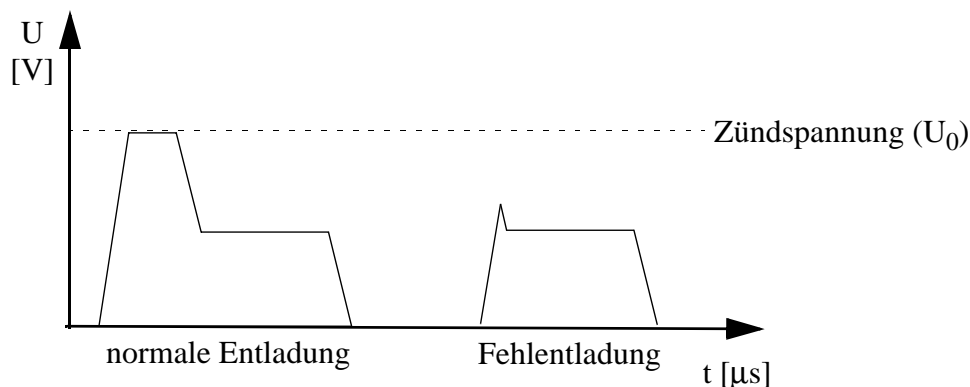


Bild 5.4: Prinzip der Lichtbogenerkennung über die Höhe der Zündspannung

Bei der Bewertung dieses Verfahrens können die gleichen Kritikpunkte angeführt werden, die schon bei einer Lichtbogenerkennung mittels Zündverzögerungszeit erörtert wurden. Auch der Einsatz von Generatoren, die steile Spannungsanstiegsflanken produzieren, beeinträchtigt die Anwendbarkeit dieser Methodik zur Lichtbogenerkennung. Dennoch finden sich Arbeiten, die dieses Verfahren einsetzen [SKO82], [Bru83], [Tim96], [Raa99].

5.2.3 Lichtbogenerkennung über die fallende Spannungsflanke der Zündspannung

Neben der Beschädigung der Werkstück-Oberfläche bewirken lichtbogenartige Fehlentladungen auch einen erhöhten Verschleiß auf der Werkzeug-Elektrode. Während einer Funkenentladung ist der Verschleiß der Werkzeug-Elektrode nicht konstant. Innerhalb der ersten 100 Nanosekunden nach dem Durchzünden der Entladestrecke wird bei positiv gepoltem Werkzeug am meisten Material von der Werkzeug-Elektrode abgetragen, da in dieser Zeit die Energiedichte auf der Anode am größten ist. Im weiteren Verlauf der Entladung dehnt sich der Plasmakanal aus, die Energiedichte auf der Anode nimmt ab und der Werkzeug-Elektroden-Verschleiß verringert sich.

Entladungen, die unmittelbar nach dem Durchzünden eine hohe Stromdichte aufweisen, verursachen infolgedessen einen stärkeren Verschleiß. Der Stromanstieg beim Aufbau des Plasmakanals kann über die abfallende Spannungsflanke der Zündspannung charakterisiert werden. Demzufolge verursachen Entladungen, die einen steilen Spannungsabfall der Zündspannung aufweisen, einen erhöhten Verschleiß, da der Stromanstieg bei diesen Impulsen groß ist. Diese Zusammenhänge werden bei der Lichtbogenerkennung über die fallende Spannungsflanke der Zündspannung ausgenutzt (Bild 5.5).

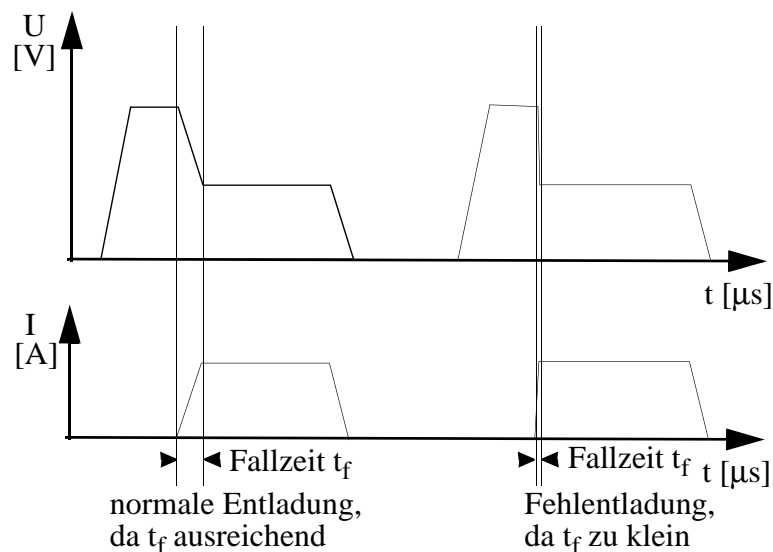


Bild 5.5: Prinzip der Lichtbogenerkennung über die fallende Spannungsflanke der Zündspannung

Auch dieses Verfahren zur Lichtbogenerkennung ist aufgrund der einfachen Messung über die Fallzeit t_f in der praktischen Anwendung verbreitet [Dau85], [Mar85]. Im Zusammenhang mit Generatoren, die nach dem Prinzip einer aktiven Stromquelle arbeiten, kann dieses Verfahren jedoch nicht angewendet werden. Der Anstieg der Stromflanke, der über die abfallende Spannungsflanke erfasst und ausgewertet wird, läßt bei dieser Art Generatoren keine Aussage über den Zustand des Funkenspaltes zu. Vielmehr ergibt sich die steigende Stromflanke überwiegend aus der internen Strom-Regelung.

5.2.4 Lichtbogenerkennung über die Welligkeit der Brennspannung

Die Grundlage bei der Lichtbogenerkennung über die Welligkeit der Brennspannung bildet die Beobachtung, daß der Spaltspannung während der Brennphase hoch-frequente Anteile unterschiedlicher Amplituden überlagert sind. Die Ursache für diese hochfrequenten Anteile, die auf der Brennspannung als „Wellen“ sichtbar sind, liegt in der Schwankung des Leitwertes des Plasmakanals während der Entladedauer. Im Verlauf einer lichtbogenartigen Fehlentladung sind geringere Amplituden in den höheren Frequenzanteilen der Brennspannung festzustellen [WLG98]. Diese Eigenschaft kann zur Detektion von Fehlentladungen angewendet werden [BAZ81], [Mar83], [Ito84], [RaWa92] (Bild 5.6).

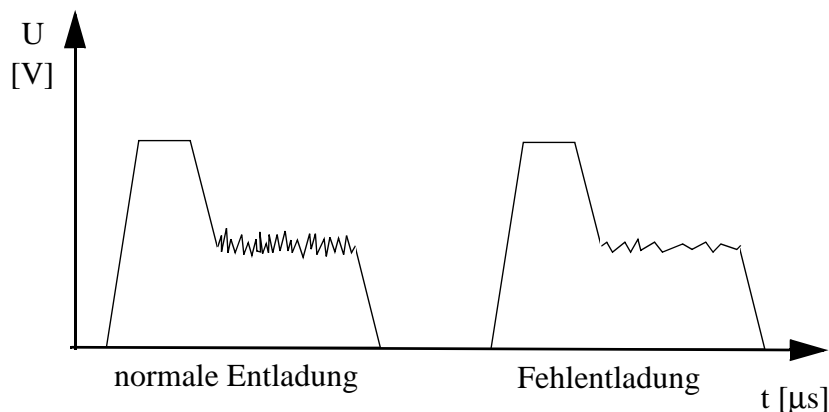


Bild 5.6: Prinzip der Lichtbogenerkennung über die Welligkeit der Brennspannung

Die Konzentration von Entladungen auf eine geometrisch eng begrenzte Zone als Ursache für Oberflächenschädigungen auf den Elektroden untersuchte *Obara* im Zusammenhang mit den hochfrequenten Anteilen der Brennspannung [OMO01]. Im Falle einer Konzentration der Entladungsorte konnte eine Abnahme der hochfrequenten Anteile bei den Entladungen festgestellt werden. Dieses Ergebnis untermauert die Wirksamkeit dieser Methodik zur Erkennung von Prozeßentartungen.

Die praktische Anwendbarkeit dieses Verfahrens wird jedoch durch den Umstand erschwert, daß die „Welligkeit“ der Brennspannung von zahlreichen Faktoren abhängt. So beeinflussen die eingesetzte Generatortechnologie sowie die eingestellten Werte für Strom und Zündspannung die Amplitude der hochfrequenten Anteile der Brennspannung und damit die Wirksamkeit des Verfahrens. Auch die Materialien, aus denen Werkzeug- und Werkstückelektrode bestehen, haben Einfluß auf das während der Brennphase meßbare Frequenzspektrum der Spaltspannung.

Bei einigen Materialien weist die Brennspannung auch bei normalen Entladungen einen „glatten“ Verlauf mit deutlich verringerten hochfrequenten Anteilen auf (z. B. Hartmetall). In diesen Fällen ist das Verfahren nicht anwendbar. Bild 5.7 zeigt an den Verlauf der Spaltspannung bei der Bearbeitung von Hartmetall und Stahl im Vergleich, wie er bei der benutzten Erosionsanlage beobachtet werden konnte.

Parameter: U_0 200 V i_e 12 A t_0 30 μ s t_e 40 μ s

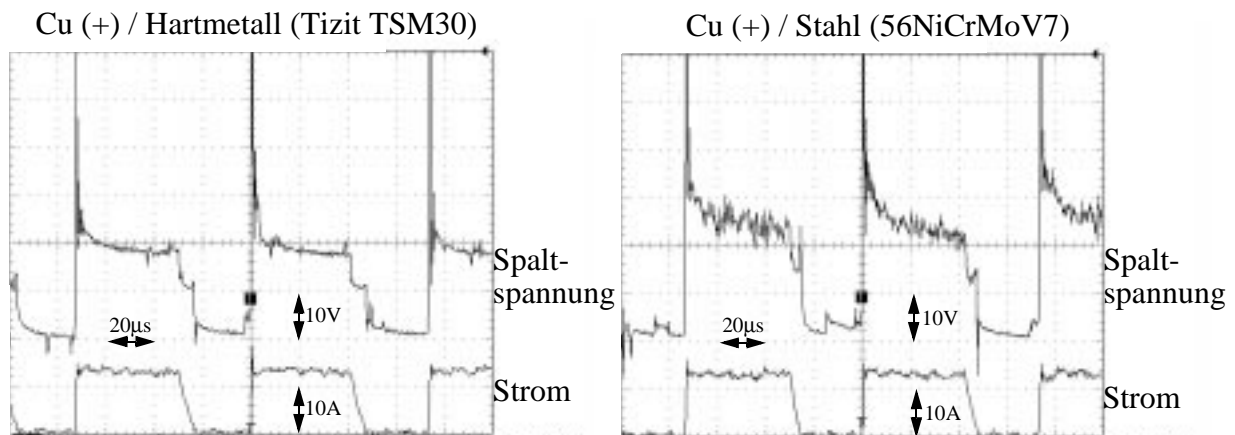


Bild 5.7: Verlauf der Spaltspannung bei der Bearbeitung von Hartmetall und Stahl

5.2.5 Bewertung der Methoden zur Lichtbogenerkennung

Die Verschiedenartigkeit der aufgeführten Verfahren zur Erkennung von lichtbogenartigen Fehlentladungen zeigt, daß diese Problematik auf höchst unterschiedliche Art und Weise behandelt wird. Jedes Verfahren weist andere Vor- und Nachteile auf, die die Anwendbarkeit einschränken. Die Wirksamkeit der jeweiligen Verfahren ist zumeist nur mit empirischen Methoden nachgewiesen. Nur im Falle der „Welligkeit“ der Brennspannung untersuchte *Obara* den direkten Zusammenhang zwischen dem im Detektionsverfahren ausgewerteten Phänomen und der räumlichen Konzentration von Entladungen [OMO01]. Aussagen hinsichtlich der Korrelation verschiedener Lichtbogenerkennungs-Strategien werden in der Literatur nicht gemacht. Auch der zur Auswertung der Lichtbogen-Kriterien notwendige meßtechnische Aufwand ist höchst unterschiedlich. So können die Messung und der Vergleich einer zeitlichen Größe sehr einfach realisiert werden, während die Erfassung von hochfrequenten Anteilen auf der Brennspannung einen erheblichen Aufwand bedeutet.

Durch die aufgeführten Nachteile der beschriebenen Verfahren wird die Notwendigkeit für eine Neuentwicklung deutlich. Insbesondere im Zusammenhang mit modernen Generatoren, die nach dem Prinzip einer aktiven Stromquelle arbeiten, sind viele bekannte Methoden zur Lichtbogenerkennung nicht mehr anwendbar. Das zu entwickelnde Verfahren muß daher auch bei dieser Generator-Technologie einsetzbar sein. Gleichzeitig sollen möglichst viele unterschiedliche Elektroden-Materialien im Zusammenhang mit dem neuen Verfahren verwendbar sein.

Damit Tendenzen zur Prozeßentartung möglichst frühzeitig durch die Prozeßführung begegnet werden kann, muß das Verfahren Änderungen im Prozeßzustand rechtzeitig anzeigen und eine hohe Empfindlichkeit aufweisen.

5.3 Entwicklung einer neuartigen Methode zur Lichtbogenerkennung

Die Grundlage bei der Entwicklung eines Verfahrens zur Lichtbogenerkennung bildet ein Modell, das die Schaltvorgänge zu Impulsbeginn und -ende im funkerosiven Abtragssystem mit dem sprungförmigen Anregen einer Zweidrahtleitung mit variablem kapazitiv/ohmschem Abschluß gleichsetzt (Bild 5.8)

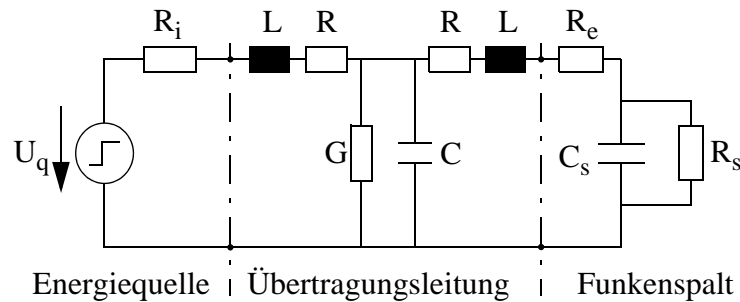


Bild 5.8: Ersatzschaltbild des funkerosiven Abtragssystems für den Übergang von der Pause zur Brennphase nach[Wit97]

Der Spalt wird in diesem Modell als „unvollkommener“ Kondensator modelliert, dessen kapazitiver Anteil C_s bestimmt ist durch die Elektrodenflächen und die geometrische Spaltweite. Für die Impulsauswertung von Interesse ist der ohmsche Anteil R_s , mit dem die stark schwankende Verschmutzung des Dielektrikums nachgebildet wird. Der Widerstand R_e beschreibt die Verluste in den Elektroden. Bei Anregung dieses Schwingkreises mit einem Spannungsimpuls stellt sich entsprechend der Impedanzverhältnisse am Funkenspalt (C_s , R_s) aufgrund von Reflexionen ein schwingungsartiger Verlauf der Spannung über dem Arbeitsspalt ein (Bild 5.9).

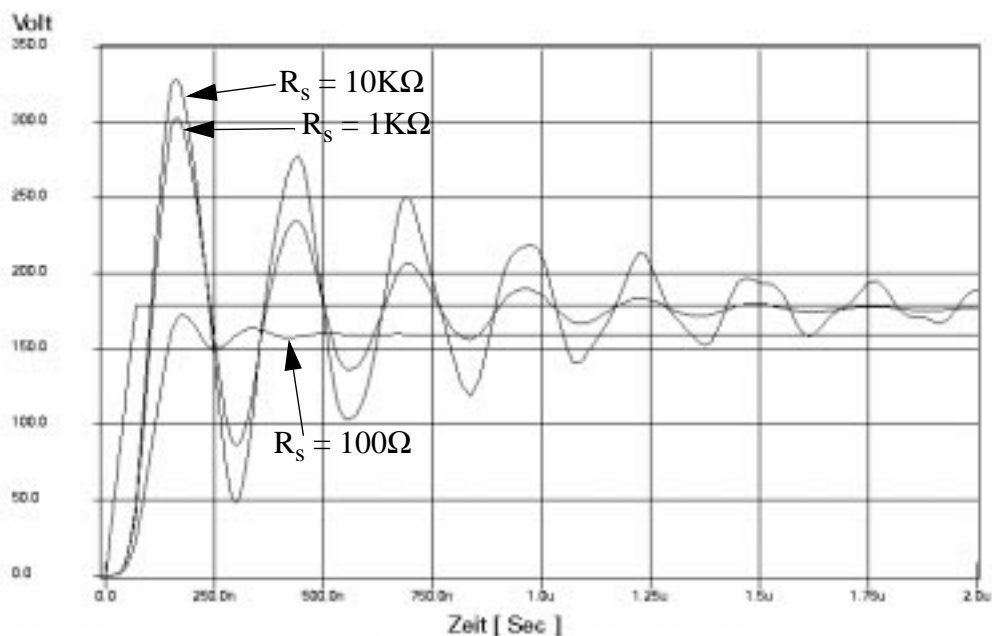


Bild 5.9: Schwingungsverhalten der Spannung bei Variation des Spaltwiderstandes R_s nach [Wit97]

Witzak nutzte dieses Schwingungsverhalten zur Detektion von Lichtbögen [Wit97]. Dabei werden die Dämpfung und die auftretenden Frequenzen dieser Schwingung zur Klassifizierung der Entladungsart eingesetzt (Tabelle 5.1).

| Schwingungsverhalten | R_s | Klassifizierung |
|-----------------------------------|------------|--|
| ausgeprägtes Schwingungsverhalten | sehr groß | guter Impuls |
| wenig Schwingungsverhalten | mittel | verschmutzter Funkenspalt, Lichtbogenimpuls |
| Zusammenbruch der Spaltspannung | sehr klein | Kurzschluß |

Tabelle 5.1: Klassifizierung der Entladungsart über das Schwingungsverhalten

Das Verfahren kann zu Beginn der Zündphase eingesetzt werden, wenn die Spaltspannung von 0 V auf Zündspannungsniveau angestiegen ist. Es ist aber auch möglich, dieses Verfahren am Ende der Brennphase anzuwenden, wenn die Spaltspannung vom Brennspannungsniveau auf 0 V abfällt (Bild 5.10).

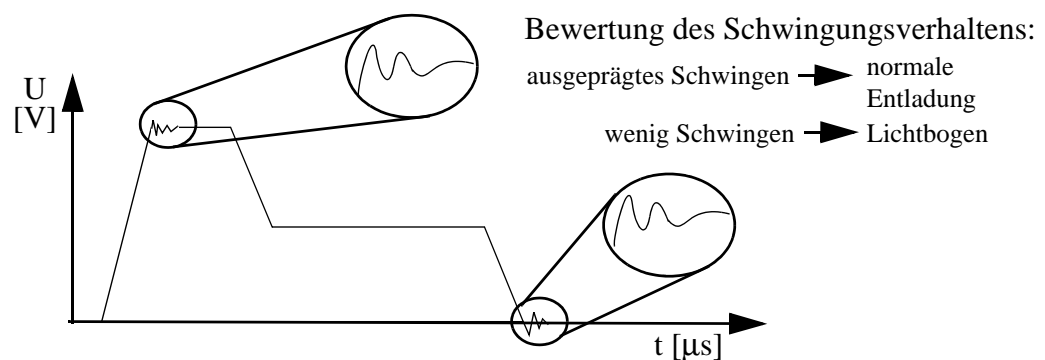


Bild 5.10: Prinzip der Lichtbogenerkennung über das Schwingungsverhalten der Spaltspannung

In der praktischen Anwendung konnte sich dieses Verfahren nicht durchsetzen, da der Einschwingvorgang neben der Spaltverschmutzung noch von zahlreichen anderen Faktoren beeinflusst wird. So wirken sich die gewählten Zündspannungs- und Stromwerte ebenso auf das Schwingungsverhalten aus, wie unterschiedliche Materialien für Werkzeug- und Werkstückelektrode. Auch die Leitungswege zwischen Generator und Funkenspalt sowie die Elektrodengeometrien verändern das Schwingungsverhalten.

Ein neuer Ansatz zur Lichtbogenerkennung entsteht, wenn man das Modell des funkenerosiven Abtragssystems von dem Beginn der Zündphase aus Bild 5.8 in die Brennphase überträgt. Die Spannungsimpulsquelle wird nun zu einer Stromquelle, die den konstanten Entladestrom i_e in den Funkenspalt einspeist. Wurde der Funkenspalt in der Zündphase noch als „unvollkommener“ Kondensator modelliert (C_s , R_s), so kann der kapazitive Anteil C_s in der Brennphase vernachlässigt werden.

Dies ergibt sich aus dem Umstand, daß der Plasmakanal bereits entstanden ist und damit im Sinne des Modells der Kondensator C_s überbrückt wurde. Die Widerstände R_e und R_s bleiben erhalten, um den Kontaktwiderstand der Elektroden (R_e) und die Spaltverschmutzung (R_s) zu modellieren. Damit ergibt sich für die Brennphase das in Bild 5.11 dargestellte Modell.

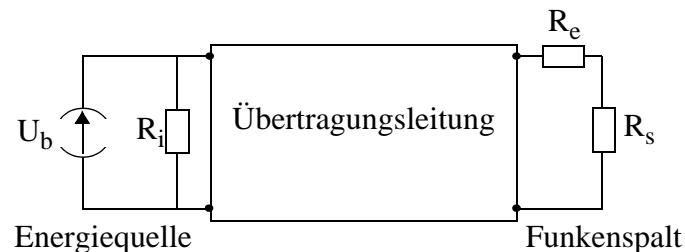


Bild 5.11: Ersatzschaltbild des funkenerosiven Abtragssystems für die Brennphase

Zur Erkennung von Fehlentladungen ist der Spaltwiderstand R_s von großer Bedeutung, da über ihn die Leitfähigkeit und damit der Zustand des Dielektrikums modelliert wird (Tabelle 5.2).

| R_s | Zustand des Dielektrikums | Auswertung |
|-----------------|---|--|
| mittleres R_s | nur gering verschmutztes Dielektrikum, gute Bearbeitungsbedingungen | der aktuelle Impuls ist <u>kein</u> Lichtbogen |
| geringes R_s | stark verschmutztes Dielektrikum, schlechte Bearbeitungsbedingungen | bei dem aktuellen Impuls handelt es sich um eine Fehlentladung |

Tabelle 5.2: Klassifizierung der Entladungsart über den Spaltwiderstand

Der Spaltwiderstand R_s variiert während der Brennphase. Eine Messung ist über die Höhe der Brennspannung möglich. Ein Absinken von R_s , das als eine Entartung des Impulses interpretiert wird, ist über eine Komparatorschaltung leicht zu detektieren. Im Gegensatz zu den zündphasenorientierten Lichtbogenerkennungs-Verfahren erlaubt diese Methode auch die Erkennung von Impulsen, die als normale Entladungen beginnen, jedoch im Verlauf der Brennphase zu einer Fehlentladung mutieren. Dies ermöglicht eine höhere Wirksamkeit.

Die in Bild 5.12 dargestellte Funkenentladung wird nach diesem Verfahren als Lichtbogen klassifiziert, da die Brennspannung den Spannungsschwellwert unmittelbar nach der Zündphase unterschreitet. Dieser als Lichtbogen klassifizierte Impuls weist eine deutliche Zündverzögerungszeit t_d auf und wäre deshalb über ein t_d -orientiertes Erkennungsverfahren nicht als Lichtbogen klassifiziert worden.

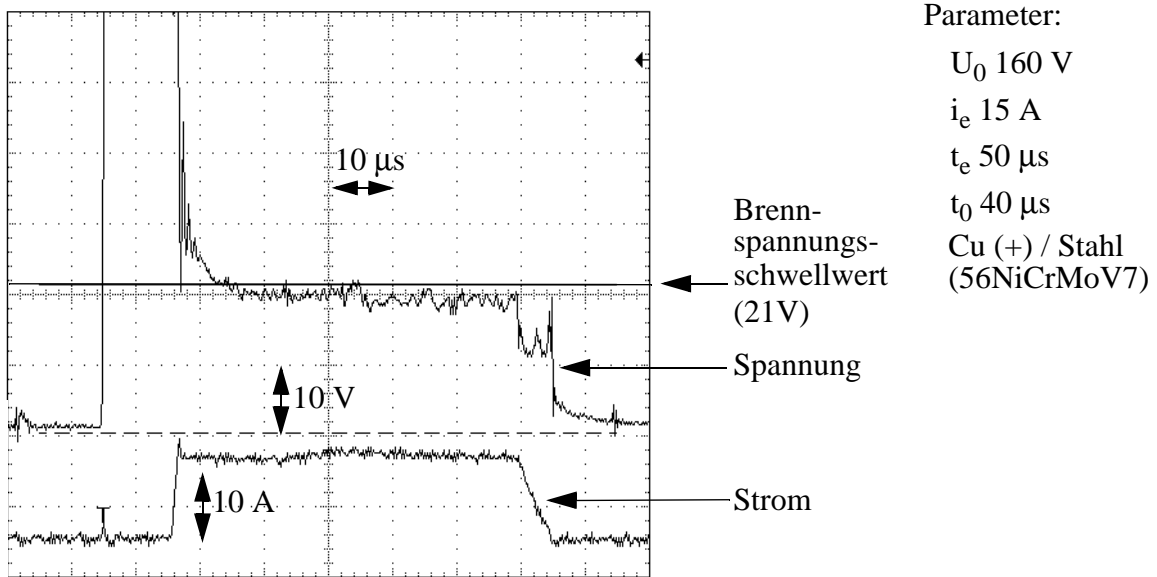


Bild 5.12: Verlauf der Brennspannung bei einer Fehlentladung

Bild 5.13 liefert ein Beispiel für eine normal abtragswirksame Entladung. Die Brennspannung dieses Impulses bleibt während der gesamten Brennphase oberhalb der Brennspannungsschwelle.

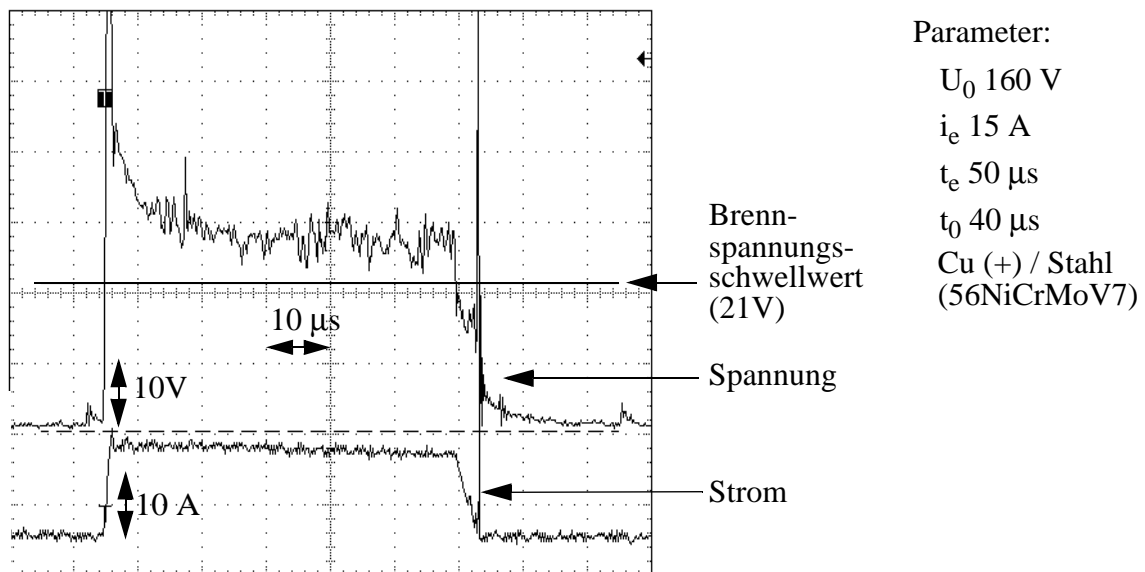


Bild 5.13: Verlauf der Brennspannung bei einem abtragswirksamen Impuls

Die in Bild 5.14 gezeigte Entladung unterschreitet gegen Ende der Brennphase den Brennspannungsschwellwert. Ein zündphasenorientiertes Detektionsverfahren hätte diesen Impuls nicht als Lichtbogen erkannt. Bei der Erkennungsmethode über die Brennspannungsschwelle wird die gesamte Entladedauer ausgewertet. Daher wird auch dieser Impuls als Fehlentladung klassifiziert.

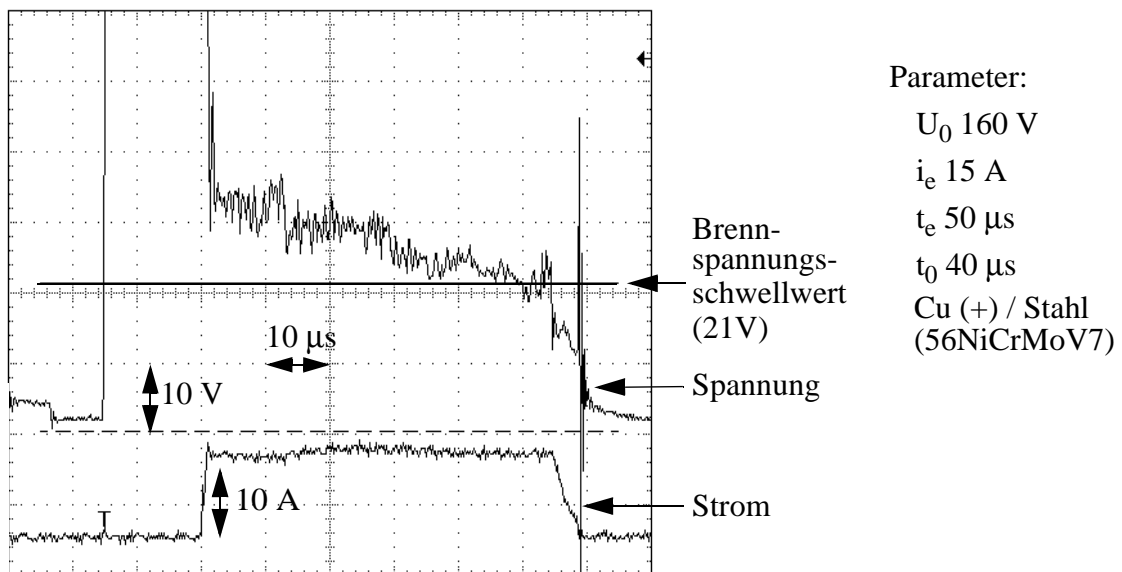


Bild 5.14: Mutation einer Fehlentladung während des Verlaufs der Brennphase

Auf eine erkannte Fehlentladung wird unmittelbar mit dem Abschalten des Impulses reagiert. Diese Reaktion erfolgt innerhalb weniger Nanosekunden (Bild 5.15).

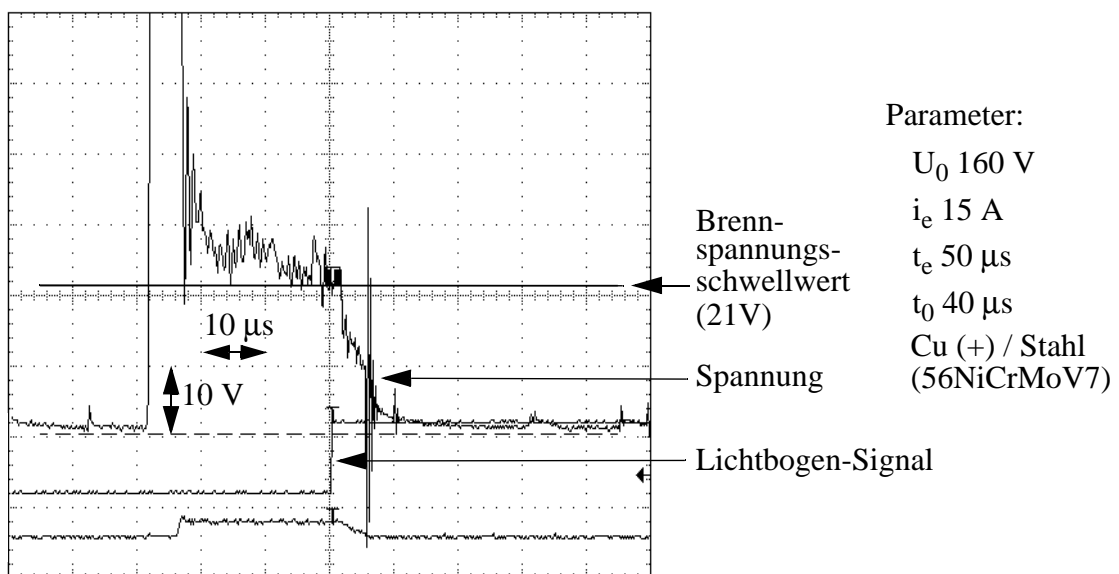


Bild 5.15: Reaktion auf einen detektierten Lichtbogen

Die nächste Impulszündung erfolgt erst, nachdem die noch verbleibende Entladedauer sowie die Impulspause verstrichen sind. Dadurch ergibt sich nach jeder detektierten Fehlentladung automatisch eine verlängerte Pausenzeit. Bis zum Beginn des nächsten Impulses wird ein Signal ausgegeben, das der Prozeßsteuerung den detektierten Lichtbogen anzeigt. Die Information über die Häufigkeit von Fehlentladungen kann somit genutzt werden, um größere Impulspausen einzufügen oder eine Bewegungsspülung auszulösen.

Die relative Häufigkeit der Fehlentladungen ist außerdem ein wichtiger Indikator zur Bewertung der Prozeßstabilität im Rahmen einer adaptiven Prozeßführungsstrategie.

Das beschriebene Verfahren zur Detektion von lichtbogenartigen Fehlentladungen mittels Brennschwelle ist bei einer Vielzahl verschiedener Elektrodenwerkstoffe einsetzbar. Zu beachten ist dabei die Anpassung des Spannungsschwellwertes an die jeweilige Materialpaarung. Bild 5.16 zeigt die Erkennung einer Fehlentladung bei der Bearbeitung von Hartmetall. Der Spannungsschwellwert wurde hier mit 19,6 V niedriger eingestellt als bei der Bearbeitung von Stahl (21V).

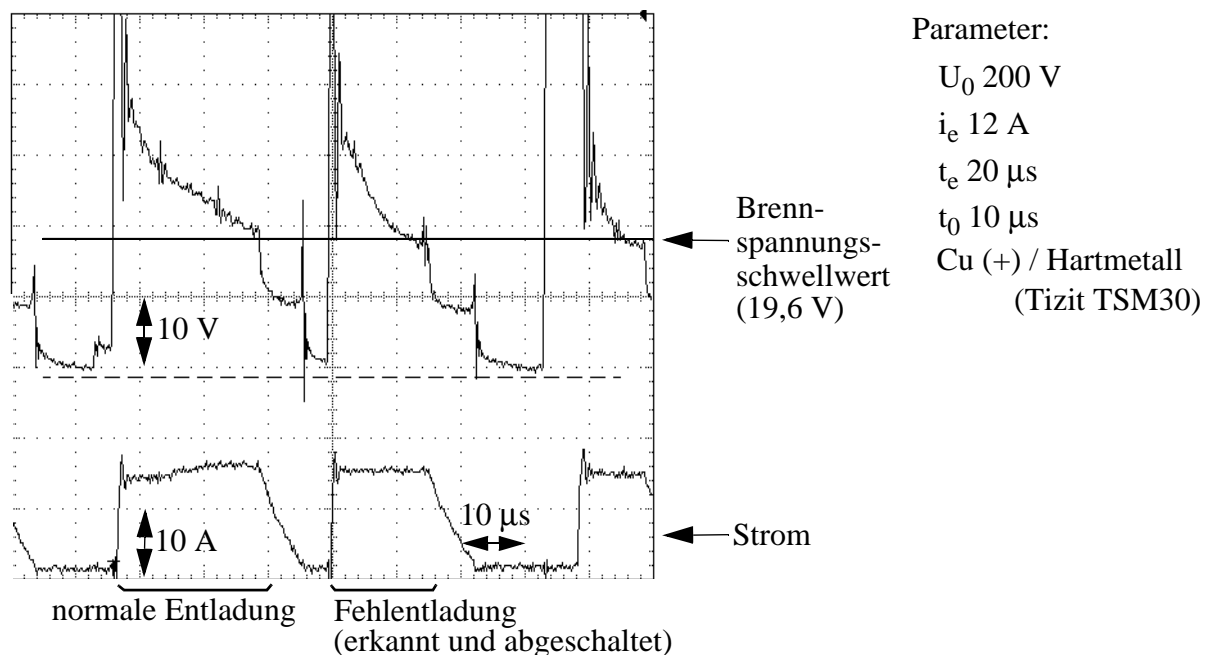


Bild 5.16: Erkennung von Fehlentladungen bei der Hartmetall-Bearbeitung

5.4 Wirksamkeit der entwickelten Lichtbogensensorik

In zahlreichen Erodierversuchen wurde die Wirkungsweise der entwickelten Lichtbogensensorik untersucht. Als technologisch wichtigster Parameter erwies sich dabei die Höhe der Brennschwelle (B_S), die zur Klassifizierung eines Lichtbogens verwendet wird. Die Referenzwerte für diesen Schwellwert sind abhängig vom Arbeitsstrom und der Materialpaarung. Gleichzeitig wird mit dieser Schwelle auch die Empfindlichkeit der Lichtbogensensorik bestimmt. Wird der Schwellwert zu niedrig angesetzt, werden lichtbogenartige Fehlentladungen erst zu spät oder gar nicht erkannt. Am Werkstück treten dann Verkohlungen sog. „Schatten“ auf. Eine zu hoch eingestellte Brennschwelle führt zum Absinken des Abtrages, da bei zu hoch eingestelltem Schwellwert auch abtragswirksame, normale Entladungen abgeschaltet werden. Bild 5.17 zeigt das Abtragsverhalten bei Variation der Brennschwelle für eine Schrubbearbeitung.

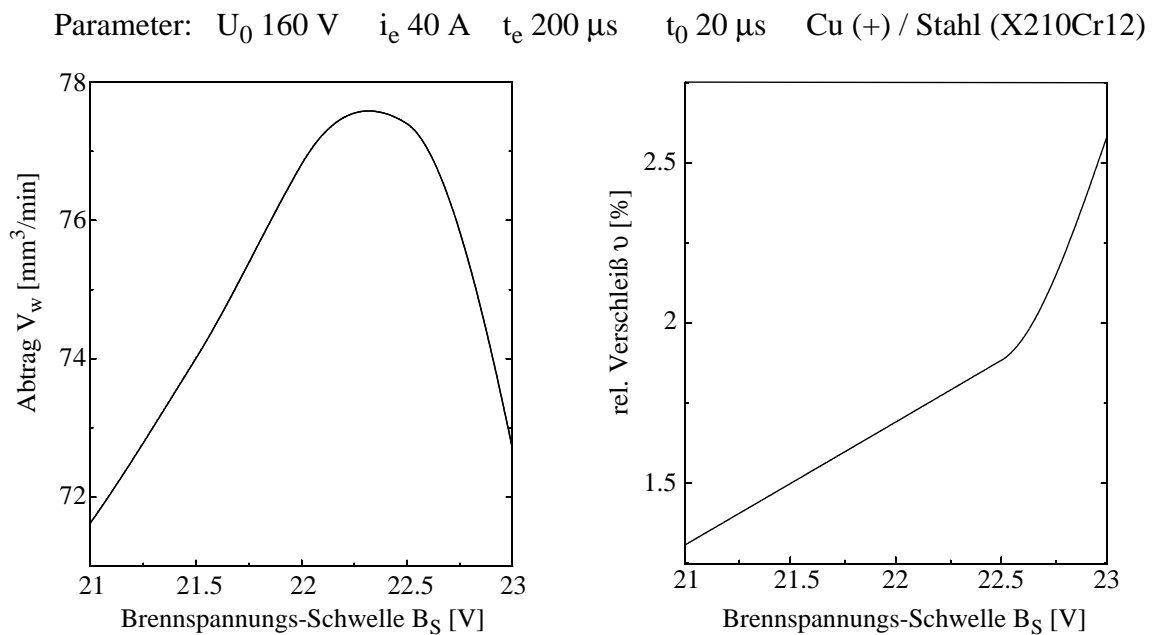


Bild 5.17: Abtragsverhalten bei Variation der Brennspannungsschwelle B_S

Anhand von Bild 5.17 (linke Seite) ist zu erkennen, daß bei Erhöhung des Schwellwertes B_S bis zu einem Wert von ca. 22.5 V der Abtrag ansteigt. Mit steigendem Schwellwert B_S werden jedoch vermehrt Entladungen als Lichtbogen gewertet und abgeschaltet. Da die abgeschalteten Impulse nicht zum Abtrag beitragen, müßte demnach der Abtrag abfallen anstatt anzusteigen. Der Anstieg des Abtrags trotz vermehrter Impulsabschaltungen ist ein Indiz für die Wirksamkeit der entwickelten Lichtbogenerkennung, da offensichtlich mit ansteigendem Schwellwert B_S die Wirkung von Fehlentladungen verringert wird und sich dadurch der Abtrag erhöht. Wird der Schwellwert B_S über den Wert von 22.5 V hinaus erhöht, so werden nicht nur Fehlentladungen sondern auch normale Entladungen abgeschaltet und der Abtrag fällt ab.

Betrachtet man den relativen Verschleiß bei Variation des Brennspannungs-Schwellwertes B_S in Bild 5.17 (rechte Seite) so fällt ein kontinuierlicher Anstieg auf, der sich ab $B_S = 22.5$ V noch erhöht. Der Anstieg des relativen Verschleißes ist auf die Wirkung der Impulsabschaltungen durch die Lichtbogenerkennung zurückzuführen. Bei positiv gepolter Werkzeugelektrode entsteht der Verschleiß unmittelbar nach Zündung der Entladestrecke. Die Detektion und Abschaltung von Fehlentladungen wird jedoch erst im Verlauf der Brennphase vorgenommen. Deshalb hat jeder als Lichtbogen abgeschaltete Impuls bereits zum Verschleiß beigetragen. Wird die Brennspannungsschwelle erhöht, dann steigt damit auch die Anzahl abgeschalteter Impulse und somit der Verschleiß. Der stärkere Verschleiß-Anstieg ab $B_S = 22.5$ V ist durch das Abtrags-Maximum bei diesem Wert zu erklären, da in Bild 5.17 der Verschleiß in Relation zum Abtrag dargestellt wird.

Aus den Bild 5.17 zugrundeliegenden Abtragsversuchen geht hervor, daß bei der Materialpaarung Kupfer / Stahl und einem Arbeitsstrom $i_e = 40$ A der Brennsprungsschwellwert bei 22.5 V liegen muß, um größtmögliche Wirksamkeit bei der Erkennung von Fehlentladungen zu erzielen. Für andere Materialkombinationen und Ströme wurden derartige Versuche ebenfalls durchgeführt. Sie sind in den nachfolgenden Bildern wiedergegeben.

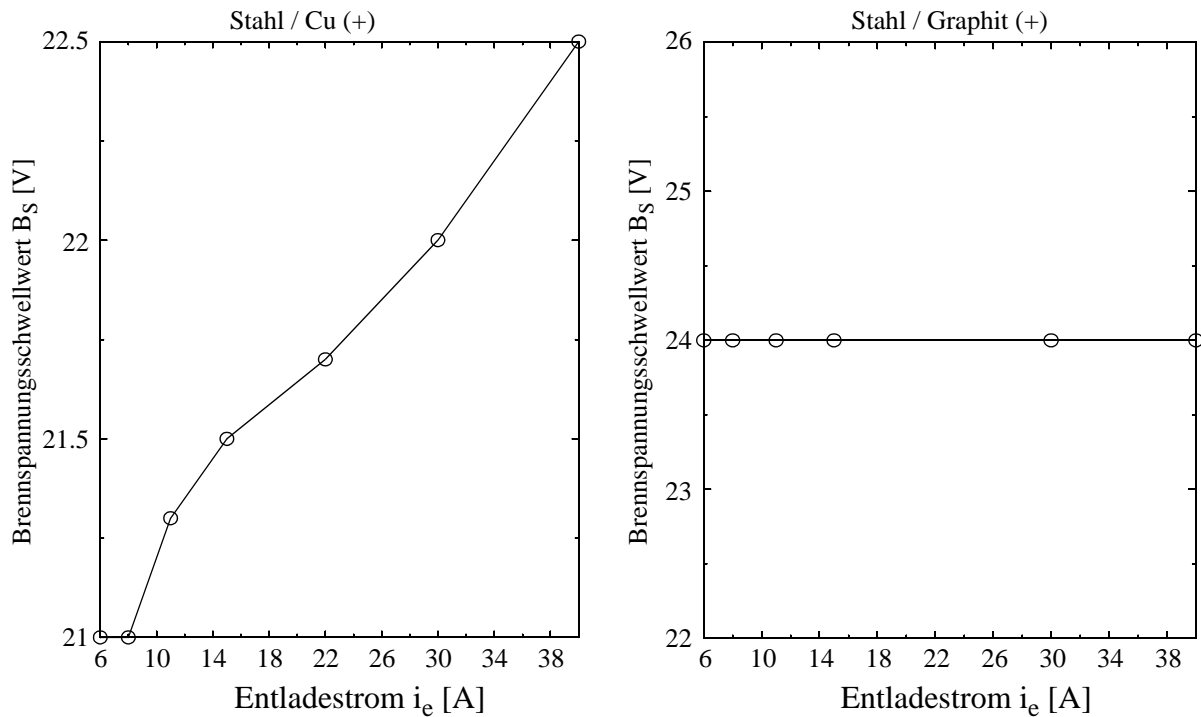


Bild 5.18: Brennsprungsschwellwerte für die Bearbeitung von Stahl

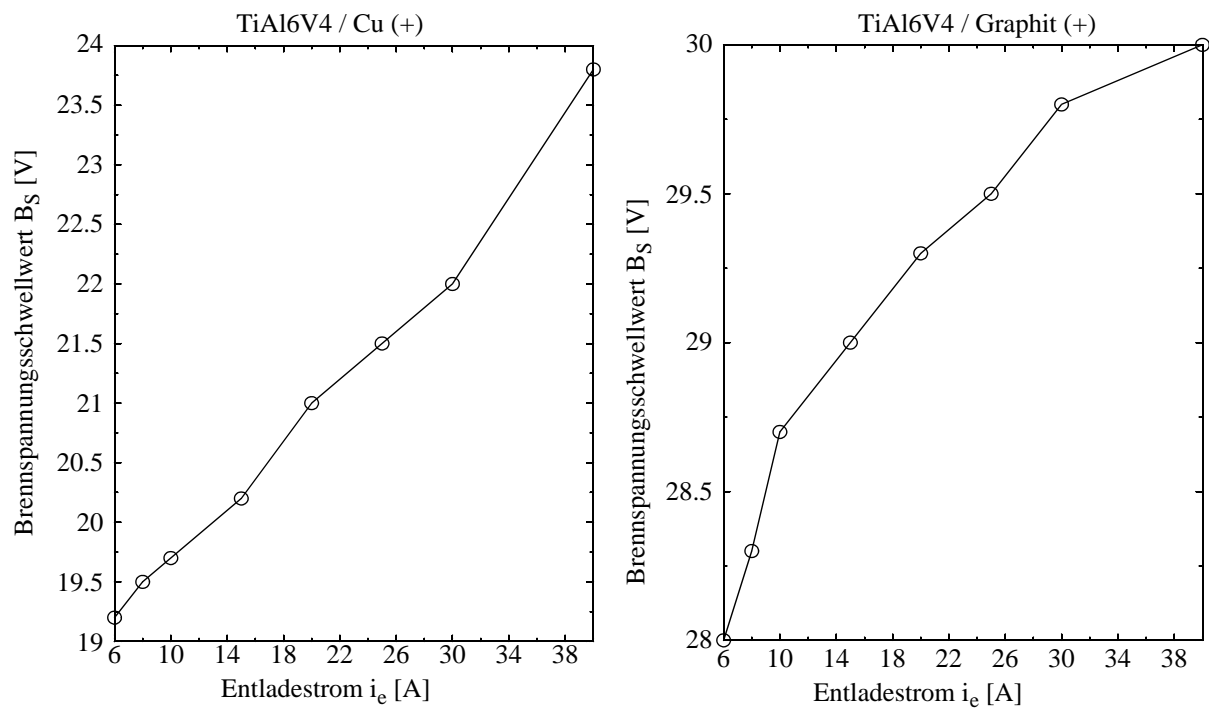


Bild 5.19: Brennsprungsschwellwerte für die Bearbeitung von TiAl6V4

Die Versuche mit der Materialkombination Stahl / Graphit (Bild 5.18) lassen erkennen, daß im untersuchten Entladestrombereich die Brennsprungsschwelle konstant auf 24 V eingestellt bleiben kann, um eine wirksame Lichtbogenbehandlung zu erreichen. Auch bei der Beobachtung von Funkenentladungen bei dieser Materialkombination mit dem Oszilloskop konnte für zunehmende Entladeströme nur ein geringer Anstieg der Brennsprungsschwelle festgestellt werden. Zur Erklärung kann die in [Kar01] beschriebene Einschnürung des Entladekanals bei der Erosion mit Graphit herangeführt werden. So scheint dieser Effekt dafür zu sorgen, daß sich mit zunehmendem Entladestrom die Leitfähigkeit des Plasmakanals verbessert und dadurch die Brennsprungsschwelle nahezu konstant bleibt.

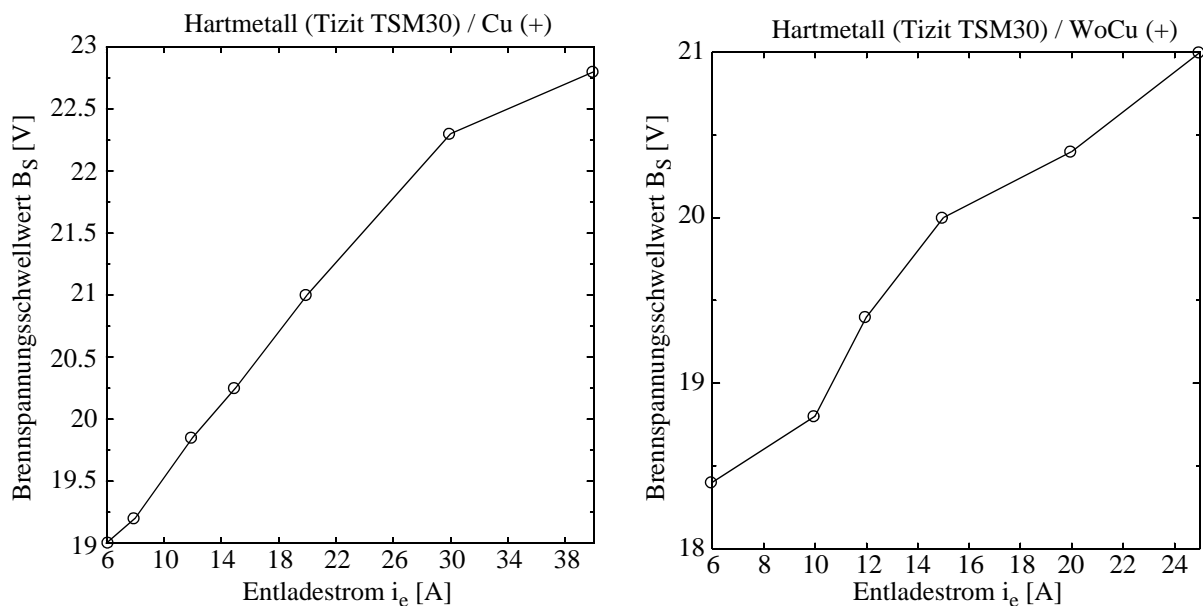


Bild 5.20: Brennsprungsschwellewerte für die Bearbeitung von Hartmetall

5.5 Die Mutation normaler Entladungen in Lichtbögen

Im Unterschied zu anderen Lichtbogenerkennungsmethoden, die in der Zünd- oder Pausenphase arbeiten, erkennt die entwickelte Methodik Fehlentladungen während der Brennphase. Zündphasen- oder pausenorientierte Verfahren gehen davon aus, daß bereits vor oder unmittelbar zu Entladungsbeginn fest steht, ob es sich bei einer Entladung um eine Fehlentladung handelt. Im Gegensatz dazu liegt der Brennsprungsschwelle basierten Erkennungsmethodik die Überlegung zugrunde, daß eine Entladung zunächst normal beginnt und erst im Verlauf der Brennphase in eine lichtbogenartige Fehlentladung übergehen. Dies führt zu folgender Fragestellung:

*Warum mutiert eine normal abtragswirksame Entladung
in eine lichtbogenartige Fehlentladung?*

Eine Antwort, die die physikalischen Phänomene nicht berücksichtigt, ergibt sich durch Betrachtung des exakten Zeitpunktes innerhalb der Brennphase (t_{arc}), zu dem die Entladung sich in eine Fehlentladung verwandelt (Bild 5.21).

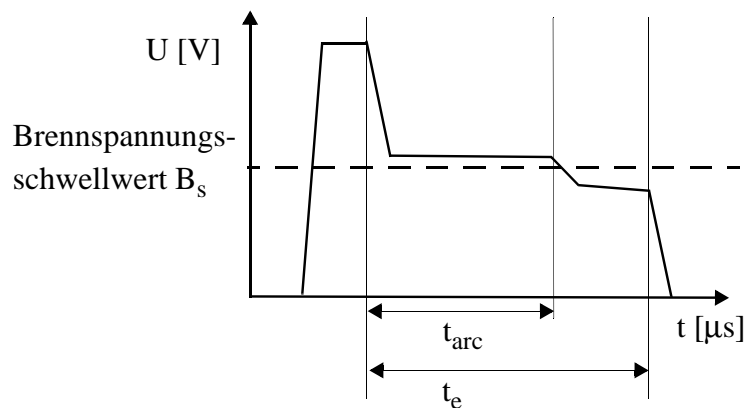


Bild 5.21: Zeitpunkt, an dem sich die Entladung in eine Fehlentladung verwandelt

Die Messung der t_{arc} -Zeitpunkte für eine Vielzahl lichtbogenartiger Fehlentladungen, die jeweils bei unterschiedlichen Entladedauern t_e aufgenommen wurden, zeigt den Zusammenhang zwischen der Entladedauer und der Lichtbogen-Häufigkeit auf. Es wird erkennbar, daß nahezu jede Entladung in eine lichtbogenartige Fehlentladung übergehen kann, wenn die Entladedauer übermäßig ausgedehnt wird.

Diese Aussage läßt sich durch eine Analogie aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung untermauern. Betrachtet man die Wandlung von normalen Entladungen in Lichtbögen als zufälligen Prozeß, ohne sich mit den Ursachen für dieses Phänomen auseinanderzusetzen, so kann eine Mutationswahrscheinlichkeit $A(t)$ in Abhängigkeit von der bereits vergangenen Entladedauer angenommen werden. Diese Mutationswahrscheinlichkeit ist vergleichbar mit einer Ausfallrate bei technischen Produkten. Wenn die Mutationswahrscheinlichkeit während der Entladedauer nicht abnimmt, dann folgt daraus, daß jede normale Entladung nur eine begrenzte Entladedauer zur Verfügung hat, bis die Mutation zur Fehlentladung erfolgt (vergleichbar mit einer Lebensdauer). Durch Ausdehnung der Entladedauer kann also die Mutation jeder Entladung in eine Fehlentladung beobachtet werden.

Um diese Annahme zu untersuchen, wurden während einer Schlicht-Bearbeitung 32000 Impulse in Folge aufgezeichnet. Da Kurzschlüsse sowie Leerlaufimpulse nicht in lichtbogenartige Fehlentladungen mutieren können, wurden diese Impulsformen bei der weiteren Betrachtung ausgenommen. Von den verbleibenden 15190 Zündimpulsen mutierten 2886 Entladungen im Verlauf der Brennphase in Fehlentladungen. Dies wurde mittels Brennspannungsschwellwert detektiert. Durch diesen geringen Anteil an Fehlentladungen kann das Prozeßverhalten während des betrachteten Zeitintervalls als stabil bezeichnet werden. Der geringe Fehlentladungsanteil ist, wie später noch nachgewiesen wird, hauptsächlich auf die Entladedauer zurückzuführen, die mit $10 \mu s$ bei diesem Versuch nur einen geringen Wert aufweist. Für die erkannten 2886 Lichtbögen wurden jeweils die Zeitpunkte (t_{arc}) gemessen zu denen die Mutation in eine Fehlentladung erfolgte. Bild 5.22 zeigt das Histogramm für diese t_{arc} Werte.

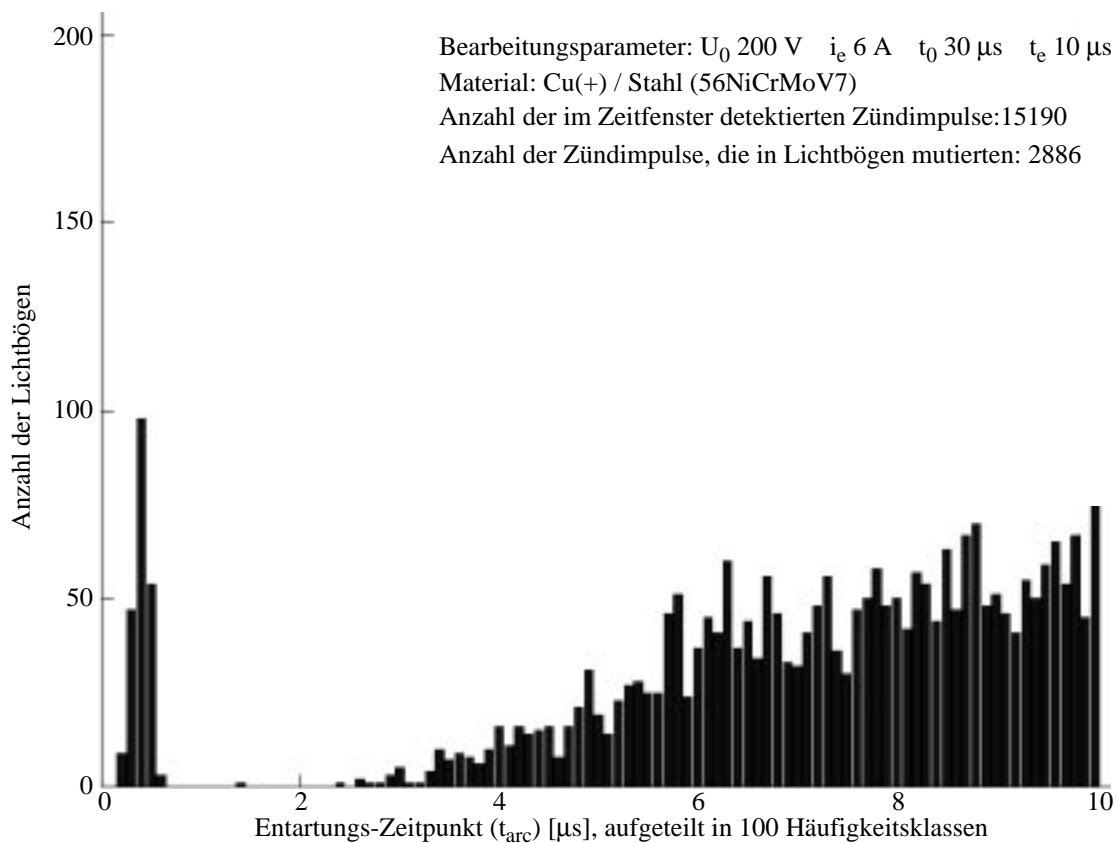


Bild 5.22: Histogramm der t_{arc} -Werte, aufgezeichnet während eines stabilen Prozesses

Um die ursprüngliche Annahme zu untersuchen, nach der nahezu jede Entladung sich bei übermäßig ausgedehnter Entladedauer in eine Fehlentladung verwandeln kann, wurde die Entladedauer t_e ausgedehnt und geprüft, ob ein Anstieg der Fehlentladungen zu beobachten ist. Für diesen Versuch bildete der in Bild 5.22 dargestellte stabile Erosionsprozeß den Ausgangspunkt. Die Entladedauer wurde abrupt von 10 μ s auf 50 μ s ausgedehnt und sofort mit der Aufzeichnung der nun folgenden Impulse begonnen. Nach der Erfassung von 32000 Impulsen wurde die Entladedauer wieder auf den vorherigen Wert von 10 μ s zurückgesetzt. Dadurch konnte eine Beschädigung der Elektrodenoberflächen aufgrund von lichtbogenartigen Fehlentladungen vermieden werden.

Die Auswertung der Impulse, die bei einer Entladedauer-Einstellung von $t_e = 50 \mu$ s aufgezeichnet wurden, ergab einen erheblichen Anstieg der Fehlentladungen. Während dieses Betrachtungsintervalls konnten 15310 Zündimpulse festgestellt werden. Von diesen Zündimpulsen mutierten 13890 Entladungen zu lichtbogenartigen Fehlentladungen, die jeweils über die Brennschwelle B_s erkannt wurden. Die Zeitpunkte zu denen innerhalb der Entladedauer die Mutation erfolgte (t_{arc}) sind in Bild 5.23 als Histogramm dargestellt.

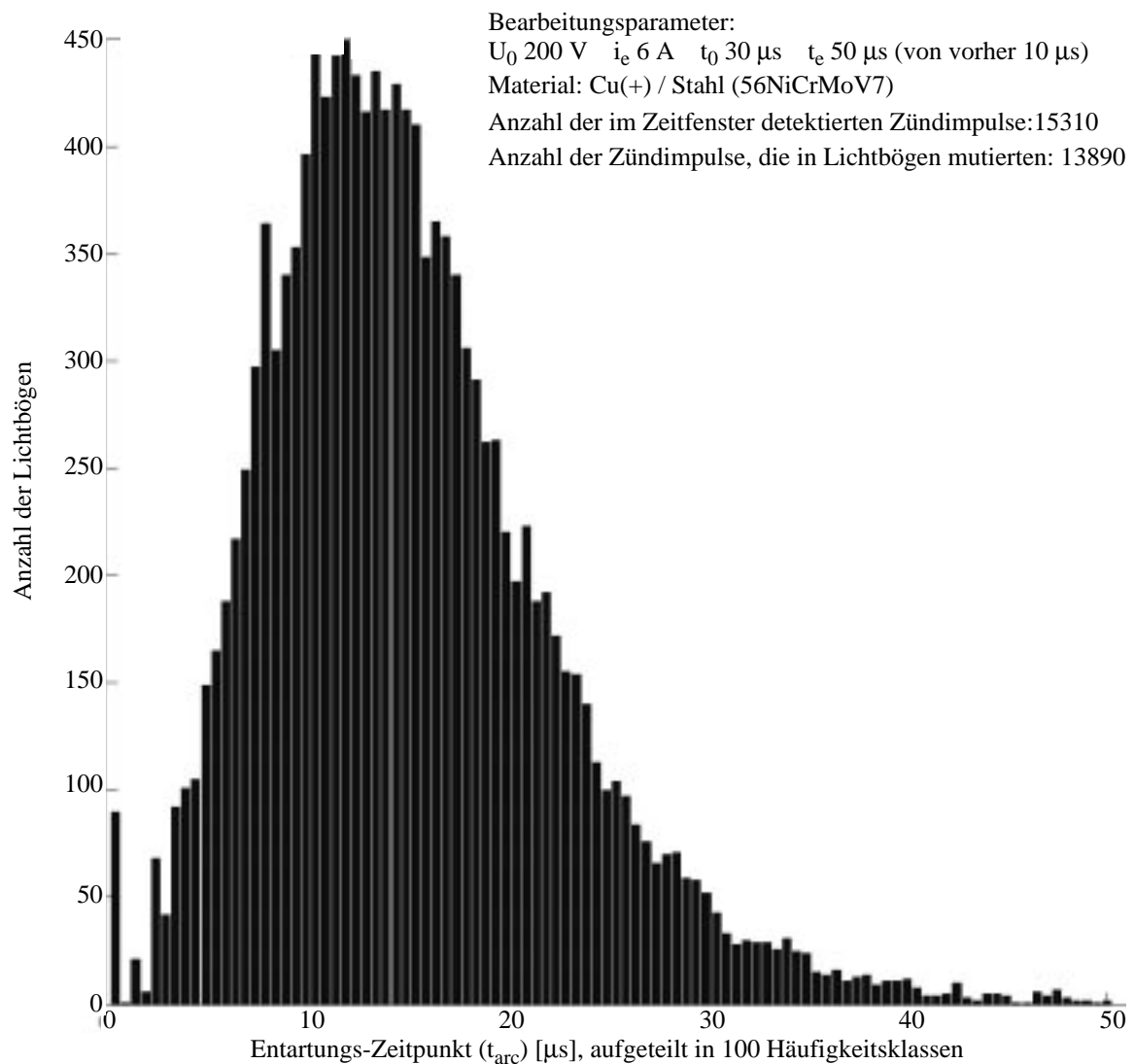


Bild 5.23: Histogramm der t_{arc} -Werte, aufgezeichnet für Impulse mit verlängertem t_e

Durch Vergleich der insgesamt detektierten Lichtbögen in Bild 5.22 und Bild 5.23 wird deutlich, daß sich die Zahl der Fehlentladungen um ein vielfaches erhöht hat. In Bild 5.23 sind fast alle Entladungen während des Verlaufs der Brennphase in Lichtbögen mutiert (der Anteil der Fehlentladungen an den Zündimpulsen beträgt über 90%). Das Histogramm der t_{arc} -Werte weist dabei einen glockenkurven-ähnlichen Verlauf auf, mit einem Maximum bei ca. 14 μ s (Mittelwert: 14.165 μ s; Standardabweichung: 6.078). Die Annahme, nach der nahezu jede Entladung in einen Lichtbogen mutieren kann, wenn die Entladedauer t_e lang genug ausgedehnt wird, ist damit bestätigt.

Durch eine Analyse mit den Methoden der Statistik können die t_{arc} -Werte aus Bild 5.23 einer Modellverteilung zugeordnet werden. Als Verteilungsfunktion ließ sich für die meisten der erhaltenen Versuchsdaten die *Weibull*-Verteilung ermitteln.

Die *Weibull*-Verteilung mit zwei Parametern (α und β) ist nach [FKO81] wie folgt definiert:

$$f(t) = \alpha \beta t^{\beta-1} e^{-\alpha t^\beta} \quad \text{für } \alpha > 0, \beta > 0 \quad (\text{Gl 5.1})$$

$$F(t) = 1 - e^{(-\alpha t^\beta)} \quad \text{für } \alpha > 0, \beta > 0 \quad (\text{Gl 5.2})$$

Die Dichte wird dabei durch $f(t)$ (Gl 5.1) definiert, während $F(t)$ (Gl 5.2) die Verteilungsfunktion beschreibt. Eine Möglichkeit, qualitativ zu beurteilen, ob eine Verteilung als eine Stichprobe aus einer *Weibull*-verteilten Grundgesamtheit zu betrachten ist, bietet auf grafischem Wege das *Weibull-Papier* [Sto95]. Dabei werden auf der Abszisse die Meßwerte (t_{arc}) und auf der Ordinate die empirische Verteilungsfunktion dargestellt. Liegen die eingezeichneten Punkte nahezu auf einer Geraden, so schließt man daraus, daß die zugrunde liegende Gesamtheit in guter Näherung eine *Weibull*-Verteilung besitzt. Für die 13890 t_{arc} -Werte aus Bild 5.23 ist diese Darstellung in Bild 5.24 zu finden.

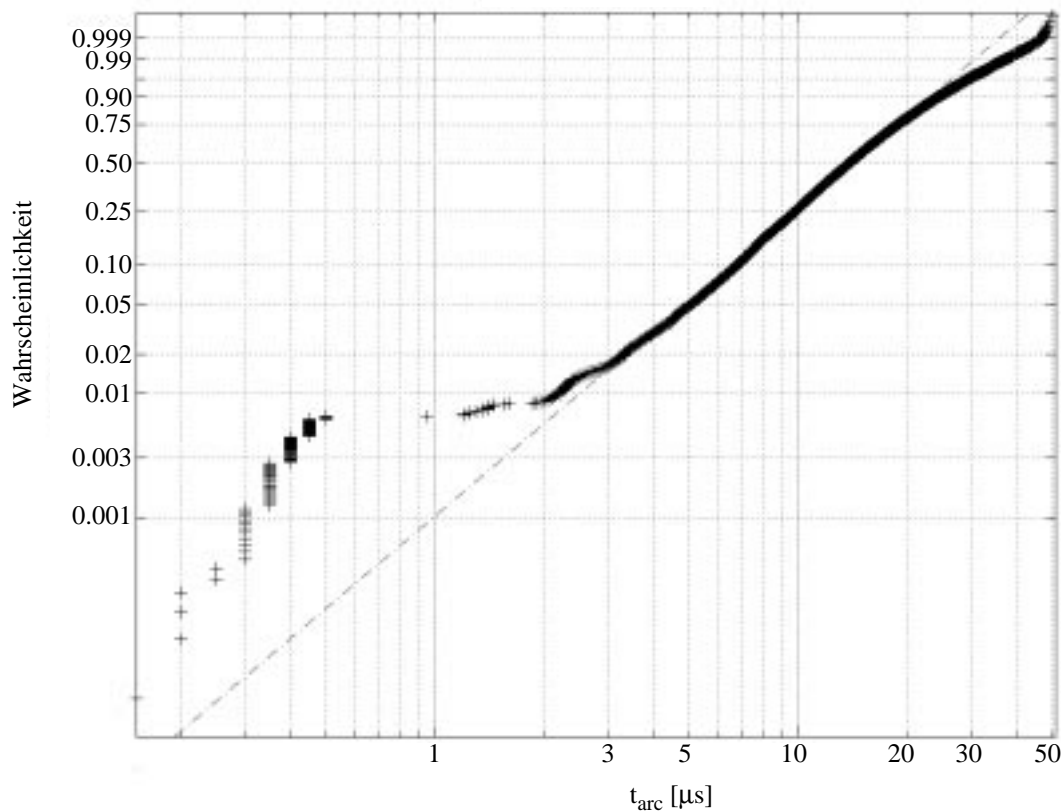


Bild 5.24: *Weibull*-Papier für Versuchsdaten aus Bild 5.23

Aus dem *Weibull*-Papier in Bild 5.24 geht hervor, daß im t_{arc} -Wertebereich zwischen 3 μs und 30 μs eine gute Annäherung an eine Gerade zu beobachten ist. In dem Wertebereich von 30 μs bis 50 μs sind Abweichungen von der Geraden zu erkennen. Dieser von der Verteilungsfunktion nicht abgedeckte Bereich betrifft jedoch nur einen geringen Anteil der Versuchsdaten und ist deshalb nicht relevant.

Um die beiden Parameter α und β der vermuteten *Weibull*-Verteilung abzuschätzen, wurde die *Maximum-Likelihood*-Methode nach [FoFu99] eingesetzt. Dadurch werden aus den möglichen Schätzungen für die unbekannt Parameter diejenigen ausgewählt, die für die konkrete Stichprobe die größten Wahrscheinlichkeiten besitzen. Angewandt auf den t_{arc} -Wertebereich $0 \mu\text{s}$ – $30 \mu\text{s}$ der Versuchsdaten aus Bild 5.23 ergeben sich folgende *Weibull*-Parameterwerte:

statistische Sicherheit : 95%
 α : 0.00108593126262 (Konfidenzintervall: 0.00098 - 0.00119)
 β : 2.46584810774382 (Konfidenzintervall: 2.43360 - 2.49810)

Eine rechnerische Methode zur Beurteilung, ob eine Stichprobe aus einer Grundgesamtheit mit einer bestimmten Verteilung stammt, ist der *Kolmogoroff-Smirnov*-Test [Kre82]. Dieser bestätigte bei einem Signifikanzniveau von 0.01 die Annahme der *Weibull*-Verteilung mit den ermittelten Parametern (α , β).

Ein Anwendungsfeld der *Weibull*-Verteilung besteht allgemein in der statistischen Untersuchung der Ausfallwahrscheinlichkeit von Systemen. Dabei wird die *Weibull*-Verteilung insbesondere dann eingesetzt, wenn es darum geht, die Überlebenswahrscheinlichkeit von Geräten zu betrachten, die Abnutzungserscheinungen unterliegen und deren Ausfallrate daher mit steigender Betriebsdauer zunimmt.

Überträgt man die statistischen Auswertungsmöglichkeiten aus der Lebensdauerbetrachtung technischer Geräte auf das Phänomen der Entladungsmutation, dann können folgende Zuordnungen gemacht werden:

| | | |
|-------------------------------------|-------------------|--|
| Der Ausfall des technischen Systems | <i>entspricht</i> | der Mutation einer Entladung in eine Fehlentladung |
| Die Betriebsdauer | <i>entspricht</i> | der Entladedauer t_e eines Zündimpulses |

Eine bei der Untersuchung von Lebensdauern wichtige Größe ist die Ausfallrate $A(t)$ (oder Ausfallwahrscheinlichkeit). Sie gibt die Intensität des Ausfalls in Abhängigkeit von der Betriebsdauer t an und ist nach [Pfa88] wie folgt definiert:

$$A(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad \text{mit } t > 0, \quad (\text{Gl 5.3})$$

wobei $f(t)$ die Dichtefunktion und $F(t)$ die Verteilungsfunktion darstellen.

Auch die Ausfallrate kann auf die Problematik der Mutation von Entladungen in Lichtbögen übertragen werden. Die Ausfallrate entspricht dann einer Mutationsrate (oder Mutationswahrscheinlichkeit).

Für die anhand der t_{arc} -Werte aus Bild 5.23 identifizierte *Weibull*-Verteilung mit ihren Parametern α und β ergibt sich in Abhängigkeit von der Entladedauer t_e die in Bild 5.25 dargestellte Mutationsrate.

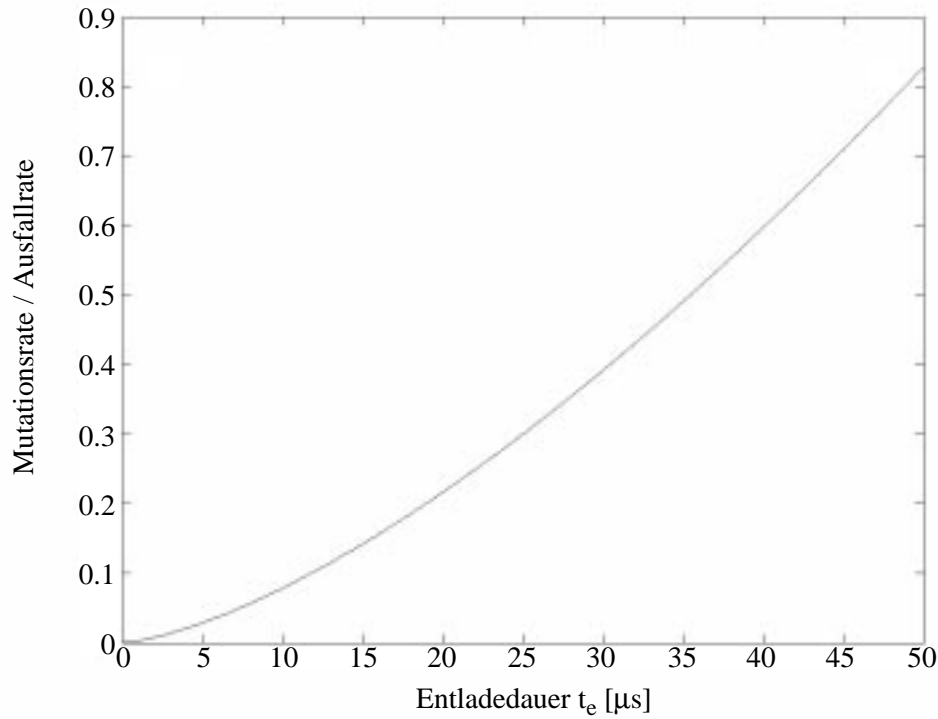


Bild 5.25: Mutationsrate in Abhängigkeit von der Entladedauer

Aus Bild 5.25 wird die mit zunehmender Entladedauer nahezu linear ansteigende Mutationsrate ersichtlich. Eine zu lang eingestellte Entladedauer t_e wird demnach einen erhöhten Anteil an Fehlentladungen verursachen. Zwar werden diese Fehlentladungen durch die Lichtbogenerkennung abgeschaltet, jedoch sind Verzögerungszeiten in der Erkennung (Sensor) und Behandlung (Generator) vorhanden, die bei hohem Fehlentladungsanteil zu einer Oberflächenschädigung führen können.

Daraus ergibt sich die Fragestellung, wie groß die Entladedauer t_e maximal bemessen sein darf, um einen stabilen Abtragsprozeß zu gewährleisten und dabei gleichzeitig hohe Abtragsraten und niedrige Verschleißwerte sicherzustellen. Um eine Entladedauer festzulegen, die nur einen geringen Anteil an Fehlentladungen auftreten läßt, ist es notwendig, den Anteil der Fehlentladungen zu betrachten, die zu einem bestimmten Zeitpunkt innerhalb der Entladedauer bereits aufgetreten sind. Diese Information läßt sich der empirischen Verteilungsfunktion für die t_{arc} -Werte entnehmen. Die empirische Verteilungsfunktion gibt für jeden Mutationszeitpunkt (t_{arc}) an, wie hoch der Anteil der Lichtbögen ist, die zu diesem Zeitpunkt bereits mutiert sind (deren t_{arc} -Wert also kleiner oder gleich ist). Durch Betrachtung der empirischen Verteilungsfunktion für die t_{arc} -Werte aus Bild 5.23 läßt sich die optimale Entladedauer t_e für den eingestellten Entladestrom abschätzen. Diese empirische Verteilungsfunktion ist in Bild 5.26 dargestellt.

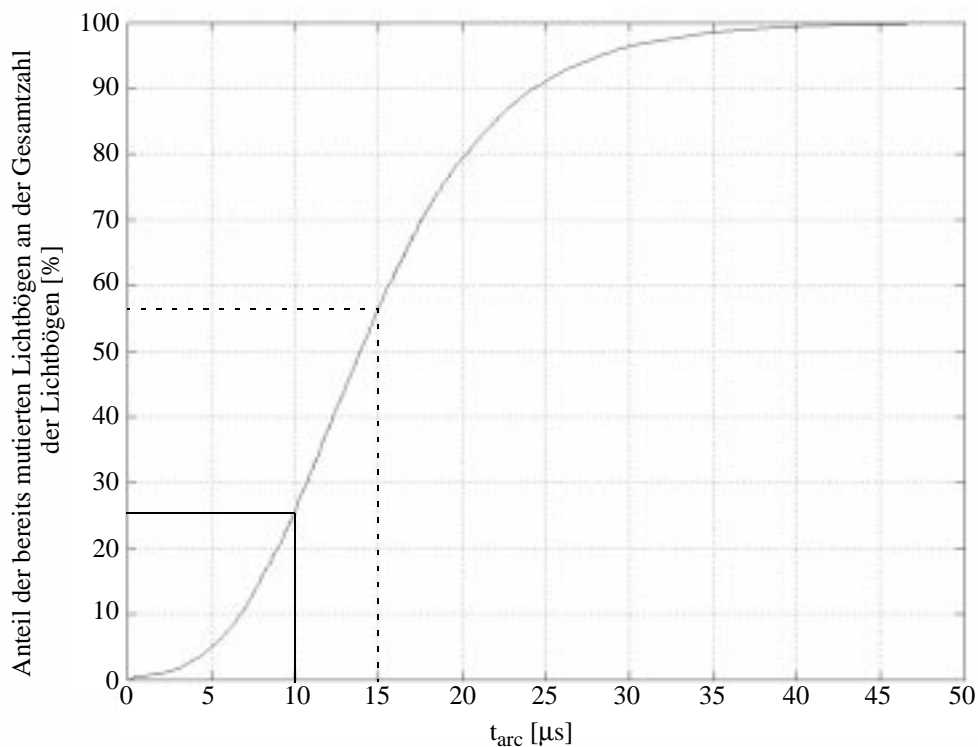


Bild 5.26: Empirische Verteilungsfunktion der t_{arc} -Werte aus Bild 5.23

Aus Bild 5.26 geht hervor, daß nach einer Entladedauer t_e von 15 μs bereits 57% der Entladungen zu Lichtbögen mutiert sind, während bei einem t_e von 10 μs lediglich 26% der Entladungen entarten. Bei einer Entladedauer, die kleiner oder gleich 10 μs ist, könnten demnach Lichtbögen weitgehend vermieden werden, so daß ein stabiler Erosionsprozeß gewährleistet ist.

Die jeweils optimale Entladedauer t_e ist für jede Materialkombination abhängig vom Entladestrom i_e . Bei größeren Strömen ist ein stabilerer Erosionsprozeß zu beobachten. Demzufolge kann auch die Entladedauer t_e bei größerem Entladestrom verlängert werden. Die Methodik zur Ermittlung der optimalen Entladedauer durch Betrachtung der t_{arc} -Werte bei abrupt ausgedehntem t_e kann auch bei größerem Entladestrom in gleicher Weise angewendet werden. Eigene Versuche belegen, daß auch die beschriebenen statistischen Zusammenhänge bei anderen Entladeströmen ihre Gültigkeit behalten. Lediglich die Parameter α und β der *Weibull*-Verteilung ändern sich mit wechselndem Entladestrom i_e . Zum Nachweis sind im Anschluß weitere Experimente mit unterschiedlichen Entladeströmen angeführt.

Der nachfolgend aufgeführte Versuch wurde bei einem Entladestrom von $i_e = 12$ A aufgenommen. Durch eine Entladedauer von 30 μs wurde zunächst ein stabiler Prozeßzustand mit geringem Lichtbogenanteil eingestellt. Dann wurde die Entladedauer t_e abrupt und nur für die Dauer von 32000 Impulsen auf 100 μs ausgedehnt. Die Impulsfolge bei ausgedehnter Entladedauer-Einstellung wurde aufgezeichnet. Danach erfolgte die Rückstellung der Entladedauer auf den ursprünglichen Zustand.

Durch die ausgedehnte Entladedauer konnte erneut eine starke Zunahme des Lichtbogenanteils festgestellt werden. So konnten im Betrachtungszeitraum 14825 Zündimpulse verzeichnet werden wovon 11954 im Verlauf der Brennphase zu lichtbogenartigen Fehlentladungen mutierten. Das Histogramm der t_{arc} -Werte für diese Fehlentladungen ist in Bild 5.27 dargestellt.

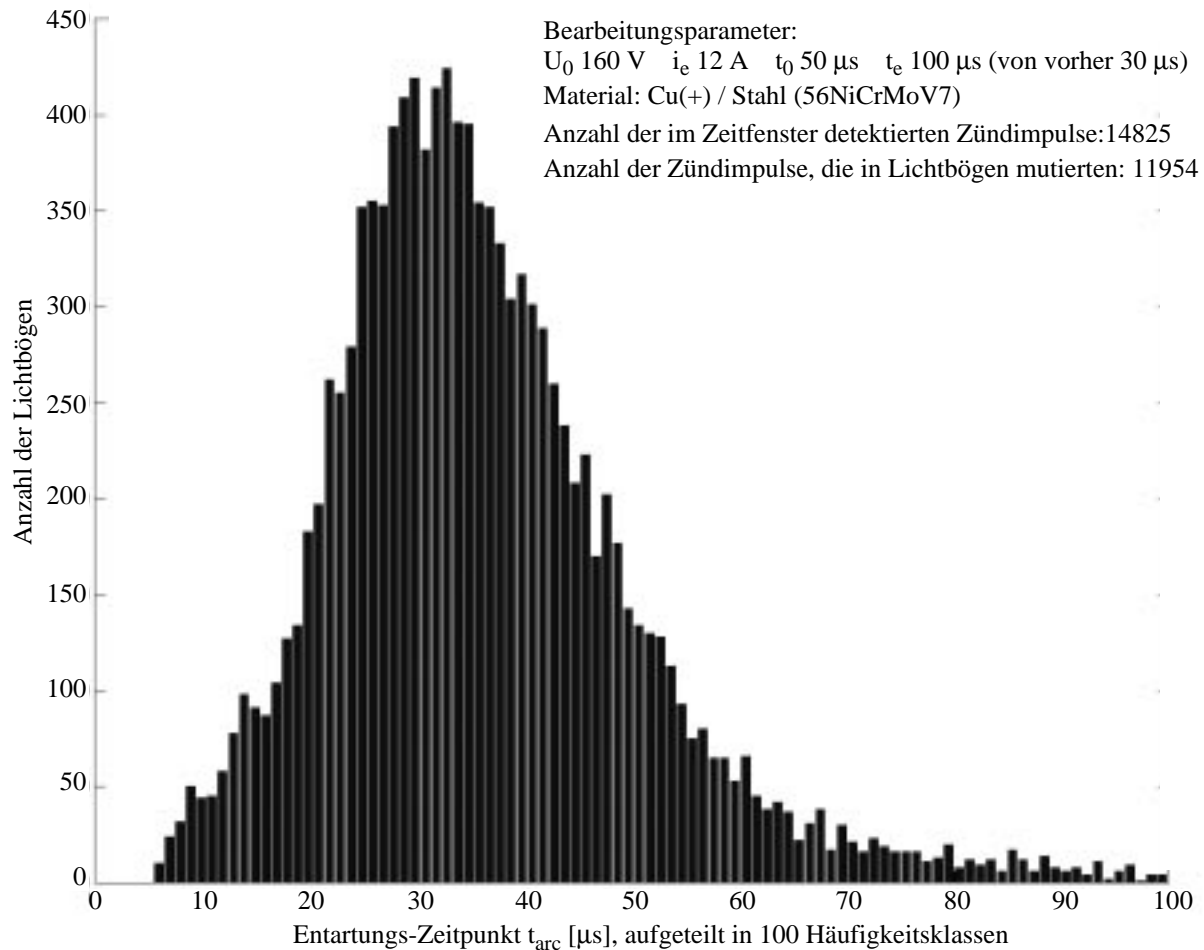


Bild 5.27: Histogramm der t_{arc} -Werte für $i_e = 12$ A

Abermals ist bei dem in Bild 5.27 dargestellten Histogramm ein glockenkurven-ähnlicher Verlauf festzustellen. Die rechnerische Prüfung bestätigt ebenfalls für einen Teil des Wertebereiches, daß die Stichprobe einer Grundgesamtheit mit *Weibull*-Verteilung entstammt.

Durch Betrachtung der empirischen Verteilungsfunktion der t_{arc} -Werte aus Bild 5.27 läßt sich erneut die optimale Entladedauer t_e abschätzen. Diese Funktion ist in Bild 5.28 dargestellt.

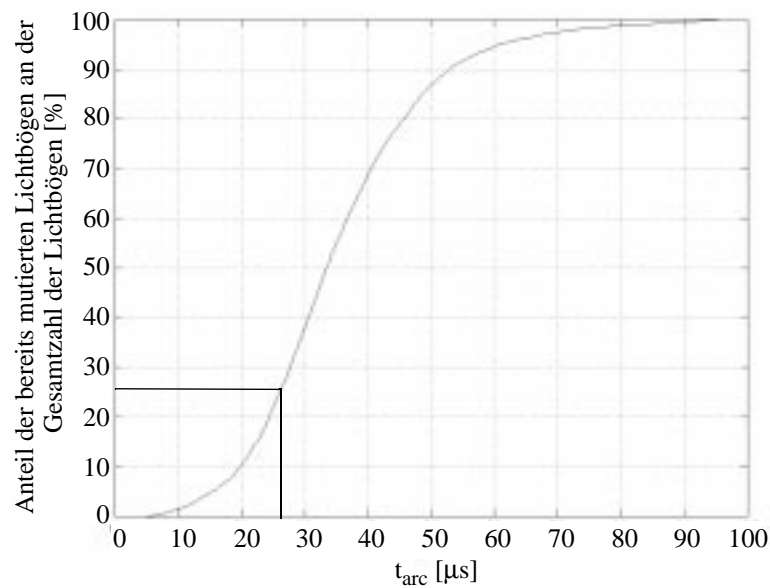


Bild 5.28: Empirische Verteilungsfunktion der t_{arc} -Werte aus Bild 5.27

Aus Bild 5.28 geht hervor, daß ein stabiler Erosionsprozeß bei $t_e = 27$ μs noch gewährleistet ist, da bei dieser Entladedauer lediglich 25% Lichtbögen zu verzeichnen sind. Für einen Entladestrom von $i_e = 12$ A und bei der Materialkombination Kupfer / Stahl sollte demnach die Entladedauer kleiner oder gleich 27 μs gewählt werden.

Das nächste Experiment wurde bei einem Entladestrom $i_e = 20$ A durchgeführt. Zur Aufzeichnung der Impulsfolge wurde die Entladedauer t_e abrupt von 50 μs auf 150 μs verlängert. Das Histogramm der dabei aufgenommenen t_{arc} -Werte ist in Bild 5.29 zu sehen.

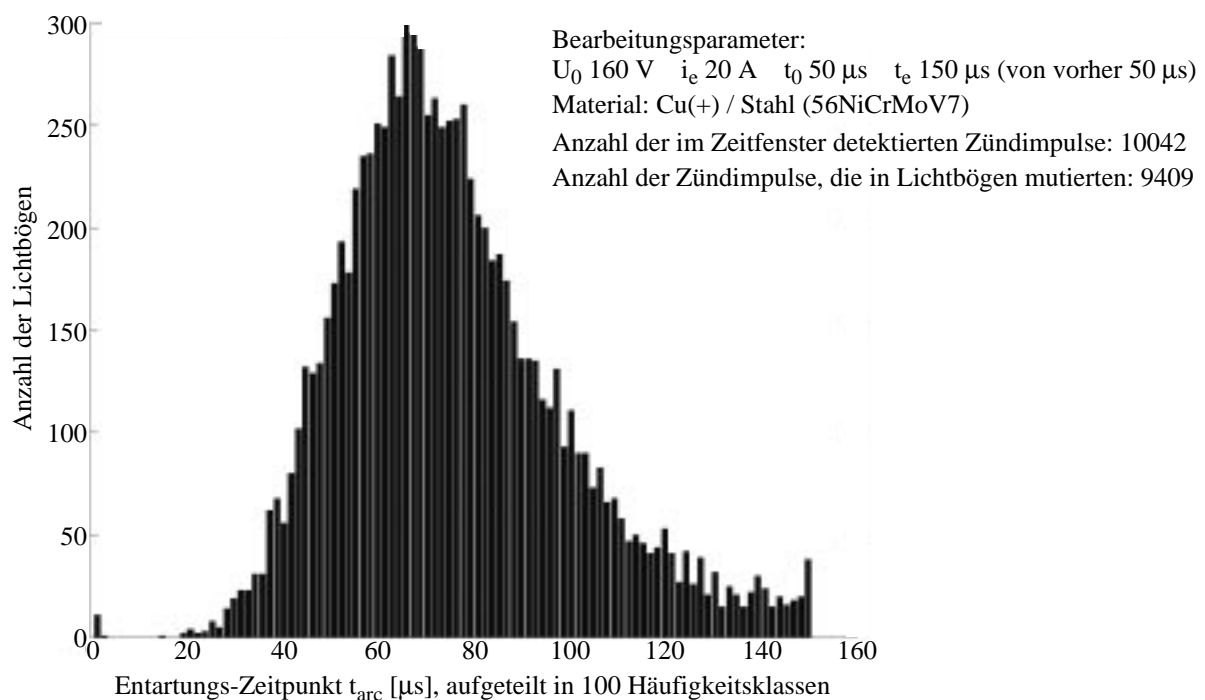


Bild 5.29: Histogramm der t_{arc} -Werte für $i_e = 20$ A

Durch die empirische Verteilungsfunktion der t_{arc} -Werte aus Bild 5.29 kann die optimale Entladedauer t_e abgeschätzt werden:

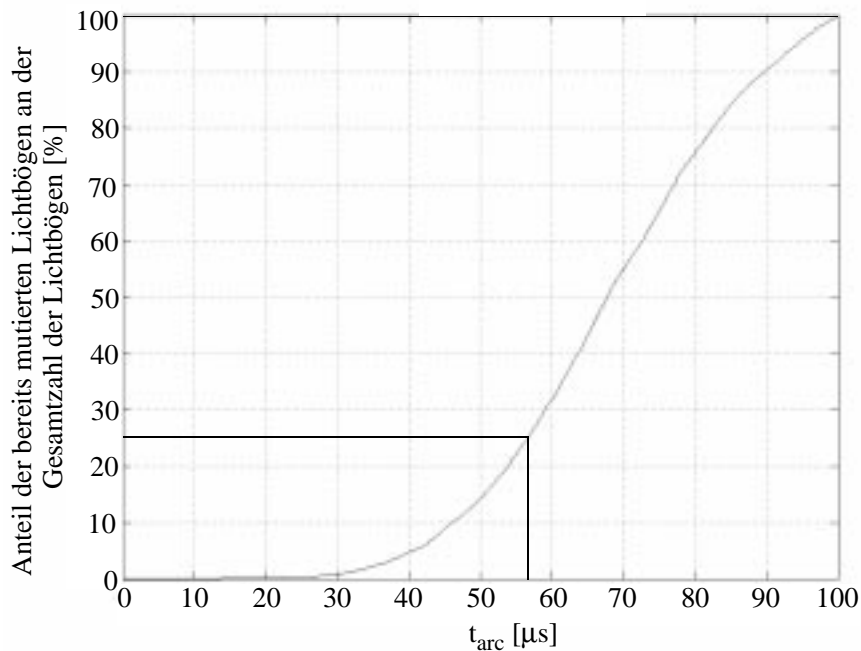


Bild 5.30: Empirische Verteilungsfunktion der t_{arc} -Werte aus Bild 5.29

Unter der Annahme einer akzeptablen Lichtbogenhäufigkeit von 25% ergibt sich die Entladedauer $t_e = 57 \mu\text{s}$. Bei der Materialkombination Kupfer / Stahl und dem eingestellten Entladestrom von 20 A kann demnach ein stabiles Prozeßverhalten erzielt werden, wenn die Entladedauer kleiner oder gleich $57 \mu\text{s}$ gewählt wird.

Die aufgezeigten Zusammenhänge zwischen dem Lichtbogenanteil und der Entladedauer konnten durch Versuche auch bei anderen Entladeströmen und Materialkombinationen nachgewiesen werden. Dabei wurde die Entladedauer abrupt zur Aufzeichnung von Impulsfolgen entsprechend der bereits vorgestellten Vorgehensweise verlängert. Mit Hilfe dieser Versuche kann die Verteilung der t_{arc} -Werte ermittelt werden. Mittels dieser Verteilung ist es möglich, eine optimale Einstellung für die Entladedauer abzuschätzen.

Im Experiment muß zu Beginn eine kurze Entladedauer eingestellt werden, damit ein stabiler Abtragsprozeß gewährleistet ist. Eine zu kurz eingestellte Entladedauer beeinflusst das spätere Ergebnis nur unwesentlich. Für das aufzuzeichnende Zeitfenster muß die verlängerte Entladedauer groß genug gewählt werden, so daß nahezu jeder Zündimpuls während dieser Periode in einen Lichtbogen mutiert. Eine an dieser Stelle zu groß gewählte Entladedauer übt ebenfalls keinen wesentlichen Einfluß auf das Ergebnis aus.

Während der kurzen Aufzeichnungsphase mit verlängerter Entladedauer wird nur verhältnismäßig wenig Energie in den Abtragsprozeß eingetragen. Dadurch stellen sich Schädigungen an den Elektrodenoberflächen aufgrund von Lichtbogeneinwirkung nicht ein. Das Experiment kann deshalb nach einer ausreichend langen Prozeßstabilisierungsphase mit kurzer Entladedauer erneut durchgeführt werden.

5.6 Ein neuartiges Verfahren zur Technologieentwicklung

Ein Hindernis bei der praktischen Anwendung der Erosionstechnologie bildet die Ermittlung von Bearbeitungsparametern, die auf die jeweilige Aufgabenstellung angepaßt sind. Die Schwierigkeit besteht in der Fülle der Parameter, die eingestellt werden müssen und die sich in ihrer Wirkung teilweise gegenseitig beeinflussen. So müssen die Impulsparameter, Parameter der Spaltweitenregelung sowie die Parameter der Spülung und der Lichtbogenerkennung auf den Bearbeitungsfall abgestimmt werden. Adaptive Regelstrategien schränken die Zahl der einzustellenden Parameter ein, indem etwa die Spaltweitenregelung automatisch während der Bearbeitung an die sich ändernden Prozeßbedingungen angepaßt wird. Innerhalb dieser Arbeit wurde ein solches System entwickelt, das den Spaltweitenregler während der Bearbeitung mit Hilfe Neuronaler Netze optimiert (Kapitel 8).

Die Impulsparameter können nur begrenzt durch eine automatische Adaption während der Bearbeitung eingestellt werden. So legen Leerlaufspannung U_0 , Entladestrom i_e und Entladedauer t_e die gewünschte Oberflächengüte und Maßhaltigkeit fest. Diese Parameter müssen deshalb vom Bediener abgestimmt auf den jeweiligen Anwendungsfall vor Bearbeitungsbeginn festgelegt werden.

In der Praxis werden Technologiedaten zur Voreinstellung der Impulsparameter entsprechend der Bearbeitungsaufgabe verwendet. Dieses Datenmaterial wird in der Regel vom Maschinenhersteller in umfangreichen Abtragsversuchen ermittelt und steht dem Maschinenbediener meist in Form einer Datenbank zur Verfügung. Dort aufgeführte Impulsparameter bieten für die jeweilige Materialkombination Einstellwerte, die einen sicheren Erosionsbetrieb gewährleisten, jedoch nicht unbedingt abtragsoptimal sind. Beabsichtigt der Anwender Materialien elektroerosiv zu bearbeiten, für die herstellerseitig keine technologischen Daten vorliegen, so müssen eigene Abtragsversuche durchgeführt werden.

Die allgemein übliche Vorgehensweise bei der Einstellung der Impulsparameter besteht darin, zunächst die Entladestromstärke i_e und die Entladedauer t_e festzulegen. Aufbauend auf dieser Auswahl werden dann die übrigen Impulsparameter ermittelt [ScWe88], [Kön90]. Diese Rangfolge ergibt sich, weil Entladestromstärke i_e und Entladedauer t_e den größten Einfluß auf die Entladeenergie W_e und damit auf die Abtrags- und Verschleißkennwerte sowie die Oberfläche des Werkstücks ausüben. Die Entladeenergie W_e ist wie folgt definiert:

$$W_e = \int_{t_e} u_e(t) \cdot i_e(t) dt \approx \bar{u}_e \cdot i_e \cdot t_e \quad (\text{Gl 5.4})$$

Damit ergibt sich die in Bild 5.31 dargestellte Rangfolge der Impulsparameter:

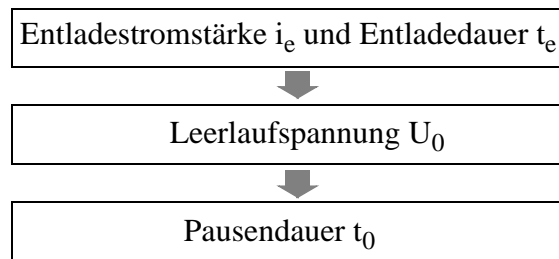


Bild 5.31: Hierarchie der Impulsparameter

Der im jeweiligen Bearbeitungsfall maximal mögliche Entladestrom i_e hängt von der Größe der Bearbeitungsfläche ab. Um für einen Entladestrom die in bezug auf die Abtragsrate optimale Entladedauer zu ermitteln, müssen umfangreiche Versuche durchgeführt werden. Für jede Entladestromstärke werden dabei unterschiedliche Entladedauern eingestellt und die resultierende Abtragsrate ermittelt.

Diese Vorgehensweise wurde bei der Technologieentwicklung für eine Titanlegierung angewendet. Der bearbeitete Werkstoff (TiAl6V4) wird überwiegend in der Luft- und Raumfahrttechnik, aber auch in der Marine- und Medizintechnik eingesetzt. Bei der elektroerosiven Bearbeitung von TiAl6V4 können Prozeßentartungen und Instabilitäten leicht auftreten, so daß die Technologieentwicklung für diesen Werkstoff besonders schwierig ist.

Eine Versuchsreihe, die für den Entladestrom $i_e = 25$ A mit konventionellen Methoden die optimale Entladedauer zu ermitteln sucht, ist in Bild 5.32 dargestellt. Dazu wurden bei gleichbleibender Einstellung für Leerlaufspannung, Entladestrom und Pausendauer mehrere Abtragsversuche mit jeweils unterschiedlicher Entladedauer unternommen.

Für jeden Versuch mußte eine Probe zunächst verwogen werden. Danach wurde ein Abtragsversuch mit fester Entladedauer durchgeführt. Die Versuchsdauer betrug jeweils 75 Minuten, damit anschließend durch erneutes Verwiegen die Abtragsrate mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden konnte.

Für die Gesamtzahl der durchgeführten Versuche betrug die Bearbeitungszeit 225 Minuten. Für eine genauere Abschätzung der optimalen Entladedauer wären weitere Abtragsversuche notwendig. Anhand der ermittelten Abtragsraten ergibt sich eine optimale Entladedauer für $i_e = 25$ A im Bereich $11 \mu\text{s} - 15 \mu\text{s}$ (Bild 5.32). Für andere Entladeströme müßten weitere derartige Versuchsreihen durchgeführt werden.

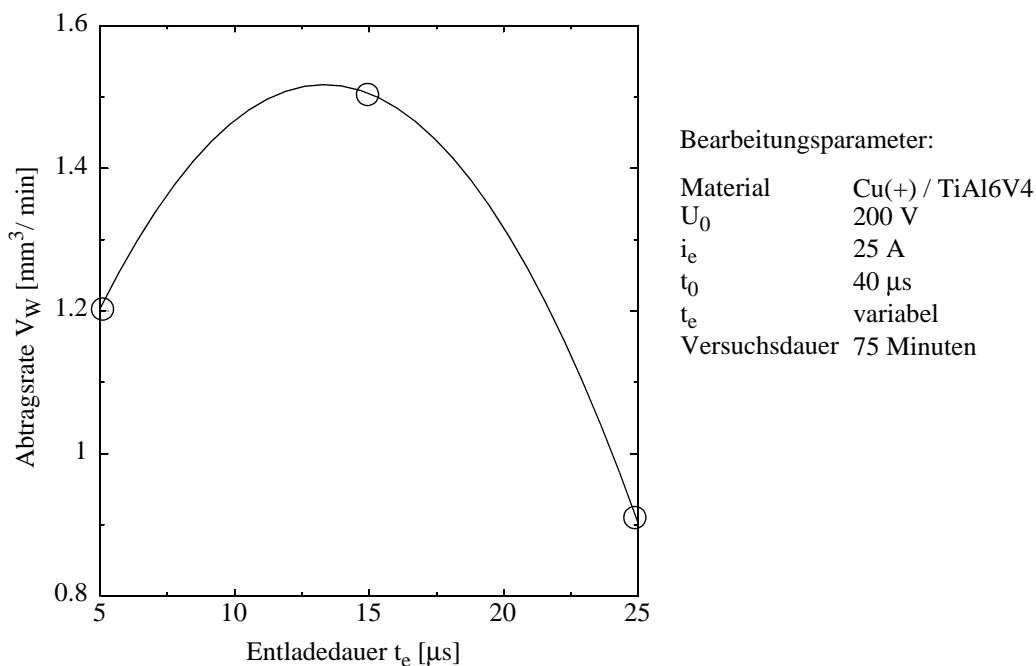


Bild 5.32: Abtragsraten bei der Bearbeitung von TiAl6V4 bei 25 A mit unterschiedlichem t_e

Diese aufwendigen Technologieversuche können entfallen, wenn die im vorigen Abschnitt beschriebene Vorgehensweise zur Ermittlung der optimalen Entladedauer mittels Entartungszeit t_{arc} eingesetzt wird. Die Vorgehensweise ergibt sich dabei wie folgt:

1. Start des Erosionsvorgangs mit einer kurzen Entladedauer t_e , um einen stabilen Prozeßzustand und eine geringe Anzahl Lichtbögen zu gewährleisten. Die Impulspause t_0 sollte dabei so groß bemessen werden, daß keine gehäufte Lichtbogenbildung aufgrund unzureichender Deionisierung auftritt. Eine während der Experimente zu groß gewählte Impulspause t_0 hat keinen Einfluß auf die später ermittelte optimale Entladedauer.
2. Während des stabil ablaufenden Erosionsprozesses wird die Entladedauer abrupt auf einen sehr viel größeren Wert erweitert. Damit wird eine gehäufte Lichtbogenbildung erreicht. Die ausgedehnte Entladedauer sollte nur für einige Impulse (etwa 32000) beibehalten werden. Auf diese Weise können Zerstörungen auf den Elektrodenoberflächen durch Lichtbögen vermieden werden.
3. Für die im Zeitraum der erweiterten Entladedauer auftretenden Lichtbögen werden die Entartungszeitpunkte t_{arc} für die statistische Auswertung aufgezeichnet.
4. Aus dem Histogramm der t_{arc} -Werte und der empirischen Verteilungsfunktion lassen sich die optimalen Einstellwerte für die Entladedauer t_e ablesen. Für einen stabilen Prozeßzustand sollte dabei der Lichtbogenanteil 25% nicht wesentlich überschreiten.

Exemplarisch wurde diese Vorgehensweise nachfolgend für den Entladestrom von $i_e = 25 \text{ A}$ wiedergegeben. Der Abtragsvorgang wurde zunächst mit einer Entladedauer von $t_e = 10 \mu\text{s}$ gestartet, damit stabile Prozeßbedingungen vorherrschen. Zur Aufnahme einer Impulsfolge mit ausgedehnter Entladedauer wurde t_e auf $80 \mu\text{s}$ ausgedehnt. Das Histogramm der auf diese Weise aufgezeichneten t_{arc} -Werte ist in Bild 5.33 darstellt.

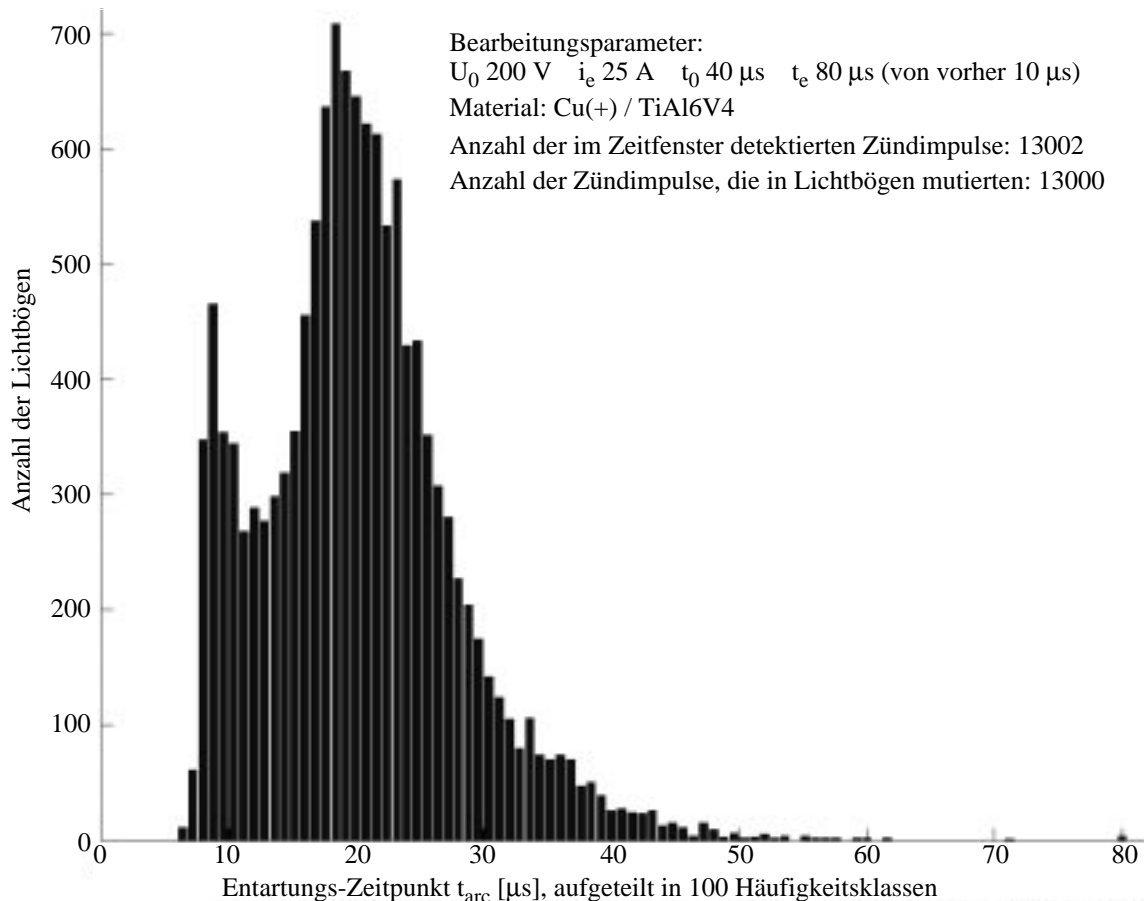


Bild 5.33: Histogramm der t_{arc} -Werte bei der Bearbeitung von TiAl6V4 mit 25 A

Der glockenkurven-ähnliche Verlauf des Histogramms ist bei diesem Versuch nur teilweise erkennbar (Bild 5.33). Dennoch läßt sich das Verfahren zur Gewinnung einer optimalen Entladedauer uneingeschränkt anwenden. Bild 5.34 zeigt die empirische Verteilungsfunktion der aufgezeichneten t_{arc} -Werte.

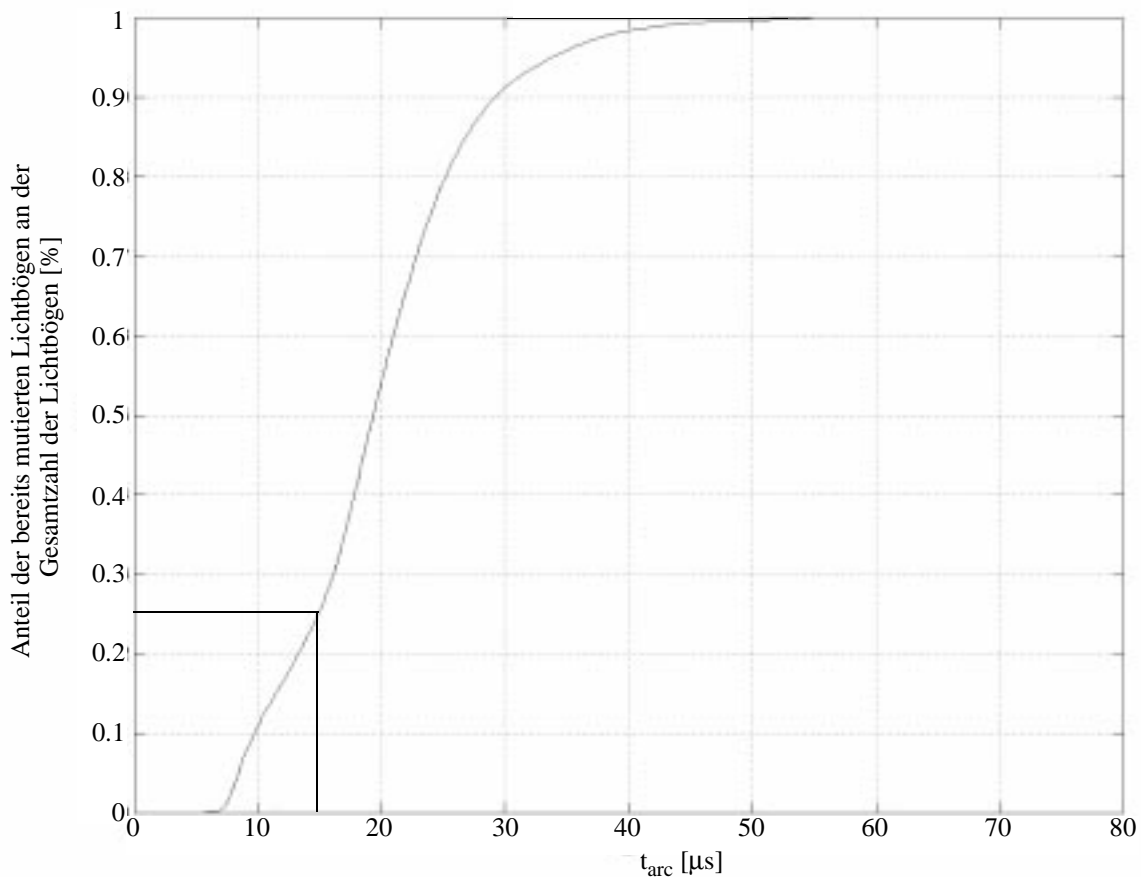


Bild 5.34: Empirische Verteilungsfunktion der t_{arc} -Werte aus Bild 5.33

Wird erneut eine akzeptable Lichtbogenhäufigkeit mit 25 % angenommen, dann kann mit der in Bild 5.34 dargestellten Verteilungsfunktion die optimale Entladedauer t_e auf 14 μs festgelegt werden.

Diese Vorgehensweise zur Technologieentwicklung liefert innerhalb von Sekunden die optimale Entladedauer für den eingestellten Entladestrom. Da die Elektroden während der 32000 Impulse mit ausgedehnter Entladedauer nicht beschädigt werden, können jeweils nach einer kurzen Phase zur Prozeßstabilisierung weitere Versuche durchgeführt werden. Auf diese Weise ist es möglich, innerhalb weniger Minuten für verschiedene Ströme jeweils die optimale Entladedauer zu ermitteln. Angewandt auf das Problem der Technologieentwicklung für den Werkstoff TiAl6V4 ergibt diese Vorgehensweise in kurzer Zeit für unterschiedliche Entladeströme jeweils die optimalen Entladedauern. Diese Daten sind in Bild 5.35 dargestellt.

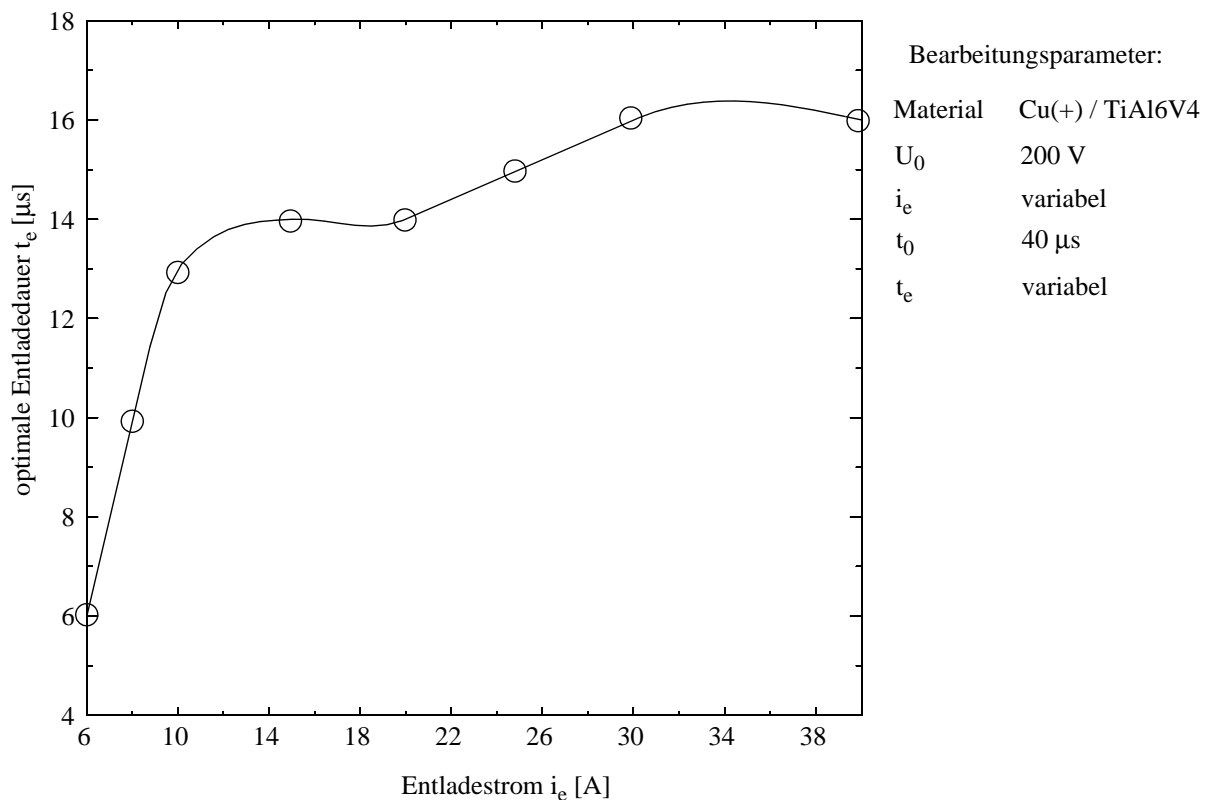


Bild 5.35: Optimale Entladedauer bei unterschiedlichem Entladestrom für TiAl6V4

In der praktischen Anwendung der Erosionstechnologie ist es notwendig, bei der Wahl einer passende Kombination aus Entladestrom und Entladedauer auch die erzielbare Oberflächenqualität einzubeziehen. Die Oberflächenausbildung eines elektroerosiv bearbeiteten Werkstückes ist geprägt durch die während des Abtragsvorgangs entstehenden Krater. Tiefe und Durchmesser dieser Krater werden wesentlich durch die Entladeenergie festgelegt. In Bild 5.36 ist für verschiedene Entladeströme bei jeweils optimaler Entladedauer die erzielbare Oberflächenqualität dargestellt (durchgezogene Linie).

Durch Verringerung der Entladeenergie läßt sich eine verbesserte Oberfläche erzielen. Dies kann durch einen kleinen Entladestrom i_e und eine kurze Entladedauer t_e erreicht werden (Gl 5.4). Um bei gleichem Entladestrom i_e eine verbesserte Oberfläche zu erzielen, muß die Entladedauer t_e verkürzt werden. Eine verkürzte Entladedauer verringert zwar die Abtragsrate, führt aber gleichzeitig aufgrund der geringeren Lichtbogenbildung zu einem stabileren Prozeßverhalten. So kann es aus Gründen der Oberflächenqualität sinnvoll sein, die Entladedauer geringer zu wählen, als die optimale Entladedauer. Um die sich damit ergebende Oberflächenverbesserung abzuschätzen, sind in Bild 5.36 (gestrichelte Linie) ebenfalls Versuche mit einer verkürzten Entladedauer ($t_e = 6 \mu$ s) angegeben.

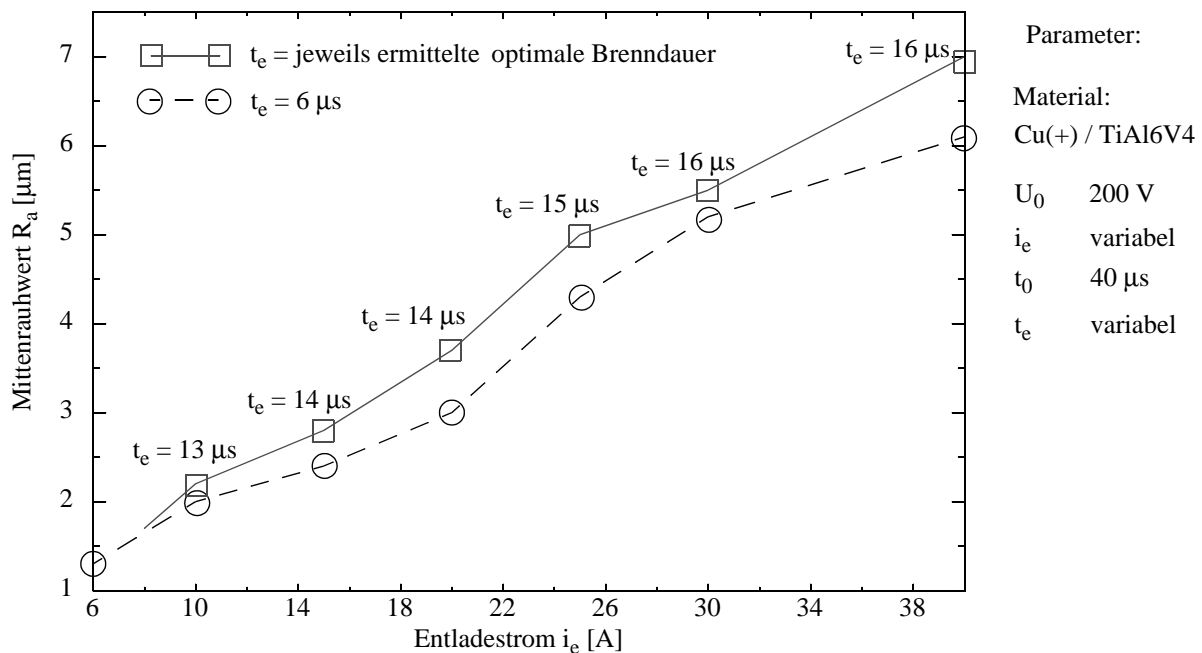


Bild 5.36: Oberflächenqualität abhängig von Entladestrom/ -dauer für TiAl6V4

Nachdem passend zur gewünschten Oberfläche der Entladestrom und die Entladedauer festgelegt wurden, gilt es im nächsten Schritt, die Leerlaufspannung U_0 einzustellen. Diese muß vor Bearbeitungsbeginn eingestellt werden, da sie sich auf die Spaltweite und damit auf die Abbildungsgenauigkeit auswirkt. Von der Höhe der Leerlaufspannung U_0 hängt wesentlich die Größe des Funkenspaltes ab. Je höher die Leerlaufspannung U_0 ist, desto eher erfolgt die Funkenentladung schon bei relativ großem Spaltabstand. Ein großer Funkenspalt bietet verbesserte Abflußbedingungen für Abtragspartikel und führt deshalb zu einem stabileren Erosionsprozeß. Andererseits bedeutet ein großer Funkenspalt auch gleichzeitig eine verminderte Abbildungsgenauigkeit. Um kleine Geometrien präzise abzubilden, sollte die Leerlaufspannung U_0 deshalb möglichst klein gewählt werden.

Als letzter Impulsparameter muß die Pausendauer t_0 eingestellt werden. Da während der Impulspause kein Energieeintrag in den Funkenspalt erfolgt, sollte im Sinne eines abtragsintensiven Prozesses die Impulspause möglichst kurz sein. Eine zu kurze Pausendauer wird zur Lichtbogenbildung infolge unzureichender Deionisierung führen und muß vermieden werden. Um auf eine kurzfristige Prozeßinstabilität zu reagieren, wird in der entwickelten Versuchsanlage durch Impulsausblendung die Pause bei Bedarf verlängert. Dies geschieht zum einen, indem nach jeder abgeschalteten Fehlentladung bis zum Start des nächsten Impulses die verbleibende Restzeit der Entladedauer sowie die Pausendauer abgewartet wird. Zum anderen wird automatisch in die Impulstaktung eine längere Impulspause eingeblendet, sobald die Anzahl der in Folge erkannten Fehlentladungen einen einstellbaren Schwellwert überschreitet. Der Prozeß wird auf diese Weise stabilisiert.

5.7 Vergleich mit anderen Methoden der Lichtbogenerkennung

Die in der industriellen Anwendung verbreiteten Verfahren zur Erkennung lichtbogenartiger Fehlentladungen wurden bereits unter Abschnitt 5.2 vorgestellt. Dabei wurden auch die Unterschiede dieser Verfahren zu der entwickelten Erkennungsmethodik herausgearbeitet. Um die im Rahmen dieser Arbeit propagierte Methodik zur Lichtbogendetektion unter den Gesichtspunkten Empfindlichkeit und Äquivalenz mit anderen Verfahren zu vergleichen, müssen für jeden Impuls mehrere Lichtbogen-Kriterien gleichzeitig erfaßt werden. Dies ist mit der innerhalb der Versuchsanlage implementierten Spaltsensorik möglich, da für den Spaltspannungsverlauf jedes Impulses das Über- bzw. Unterschreiten verschiedener Schwellwerte detektiert und die zugehörigen Ereigniszeitpunkte aufgezeichnet werden (siehe Bild 4.5). Damit können die in Bild 5.37 dargestellten Detektionsverfahren verglichen werden.

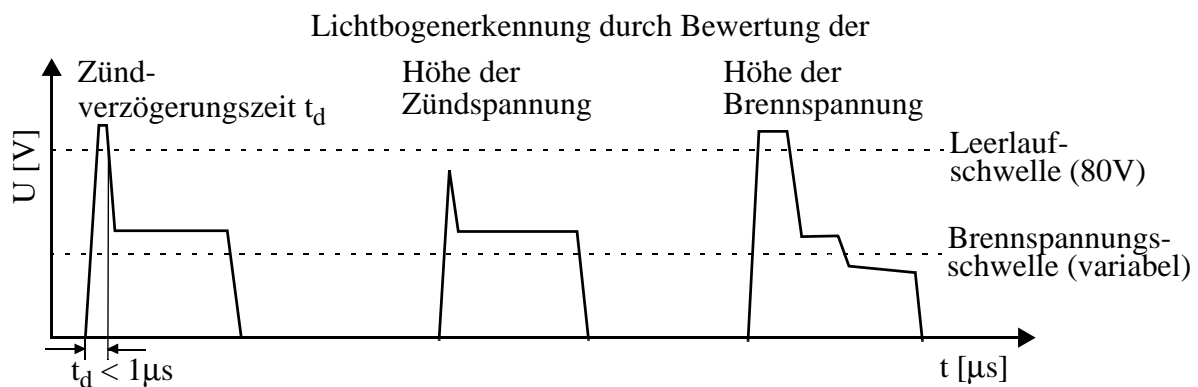


Bild 5.37: In den Vergleich einbezogene Lichtbogenerkennungsverfahren

Die Implementation einer Lichtbogenerkennung über die fallende Spannungsflanke der Zündspannung (siehe Abschnitt 5.2.3) ist mit der vorhandenen Spaltsensorik ebenfalls möglich. Aufgrund der eingesetzten Generatortechnologie ist dieses Verfahren jedoch nicht einsetzbar und wurde deshalb in den Vergleich nicht einbezogen.

Betrachtet man den Erosionsprozeß in unterschiedlichen Zuständen (stabil, an der Stabilitätsgrenze, entartet) und untersucht dabei die Anzahl der mit der jeweiligen Methodik erkannten Lichtbögen, so läßt sich die Empfindlichkeit der einzelnen Detektionsverfahren bewerten. Entsprechend den Ergebnissen aus dem letzten Abschnitt lassen sich verschiedene Prozeßzustände gezielt mit Hilfe der Entladedauer t_e erreichen:

- Ein stabiler Erosionsprozeß wird sich einstellen, wenn die Entladedauer kleiner oder gleich der für den jeweiligen Entladestrom optimalen Entladedauer ist.
- Eine lang ausgedehnte Entladedauer wird die Anzahl der Fehlentladungen erhöhen und den Prozeß damit destabilisieren.

- Wird die lang ausgedehnte Entladedauer im Prozeß über mehrere Sekunden beibehalten, so kommt es zur Bildung eines „stehenden Lichtbogens“. Die Entladungen konzentrieren sich auf eine bestimmte Region. Die Elektrodenoberfläche wird geschädigt, der Prozeß ist entartet.

Die Anzahl der durch jedes Erkennungsverfahren detektierten Lichtbögen bei unterschiedlichen Prozeßzuständen ist in Tabelle 5.3 dargestellt.

| i_e | t_e | Prozeß-Zustand | Lichtbögen jeweils erkannt über ... | | |
|-------|-------------|--------------------------------|---|---|--|
| | | | Brennspannungsschwelle (B_s) Anzahl der Lichtbögen | $t_d < 1\mu s$ Anzahl der Lichtbögen | Höhe der Zündspannung Anzahl der Lichtbögen |
| 6A | 10 μs | stabil | 2476-3991 | 2-40 | 3-16 |
| 12A | 30 μs | | 1749-3721 | 320-1779 | 61-191 |
| 20A | 40 μs | | 748-4697 | 3-979 | 14-247 |
| 6A | 50 μs | an der Grenze zur Instabilität | 10424-13890 | 0-3 | 2-34 |
| 12A | 100 μs | | 8350-11954 | 160-595 | 790-1004 |
| 20A | 100 μs | | 9409-10032 | 176-473 | 832-1470 |
| 20A | 100 μs | entartet | 12040-13382 | 0-376 | 8006-12733 |

Tabelle 5.3: Über verschiedene Verfahren erkannte Lichtbögen aus 32000 Impulsen

Aus Tabelle 5.3 geht hervor, daß die in dieser Arbeit entwickelte Erkennungsmethodik für Lichtbögen mittels Brennspannungshöhe B_s sehr gut geeignet ist, um eine Änderung des Prozeßzustandes zu erkennen. Durch die Anzahl der detektierten Lichtbögen kann auch bei verschiedenen Entladeströmen klar zwischen einem stabilen Prozeß und einem Prozeß, der sich an der Grenze zur Instabilität befindet, unterschieden werden.

Eine Unterscheidung von Prozeßzuständen über die Anzahl der mittels Zündverzögerungszeit t_d erkannten Lichtbögen ist dagegen nicht möglich. Die Anzahl der Impulse, die eine sehr kurze Zündverzögerungszeit aufweisen, schwankt in weiten Grenzen auch bei stabilem Prozeßzustand.

Die Anzahl der Impulse, die das Zündspannungsniveau nicht erreichen, steigt mit sich verschlechterndem Prozeßzustand an. Eine Klassifikation des Prozeßzustandes über diese Methode zur Lichtbogenerkennung ist jedoch im Bereich niedriger Entladeströme ($i_e = 6 \text{ A}$) nicht eindeutig möglich. Bei einem entarteten Prozeß ist ein sprunghafter Anstieg der über dieses Verfahren detektierten Fehlentladungen zu verzeichnen. Die Lichtbogenerkennung über das Zündspannungsniveau bietet für diesen Fall eine starke Indikation. Bei diesem Prozeßzustand ist jedoch eine Schädigung der Elektrodenoberflächen bereits erfolgt, so daß es zu spät ist, um seitens der Prozeßsteuerung Maßnahmen einzuleiten.

Bild 5.38 zeigt das Histogramm der Entartungs-Zeitpunkte t_{arc} für den Fall eines entarteten Prozesses. Es wird deutlich, daß in diesem Prozeßzustand die über die Brennspannung erkannten Lichtbögen unmittelbar nach dem Ende der Zündphase mutieren ($t_{\text{arc}} = 0 \mu\text{s}$).

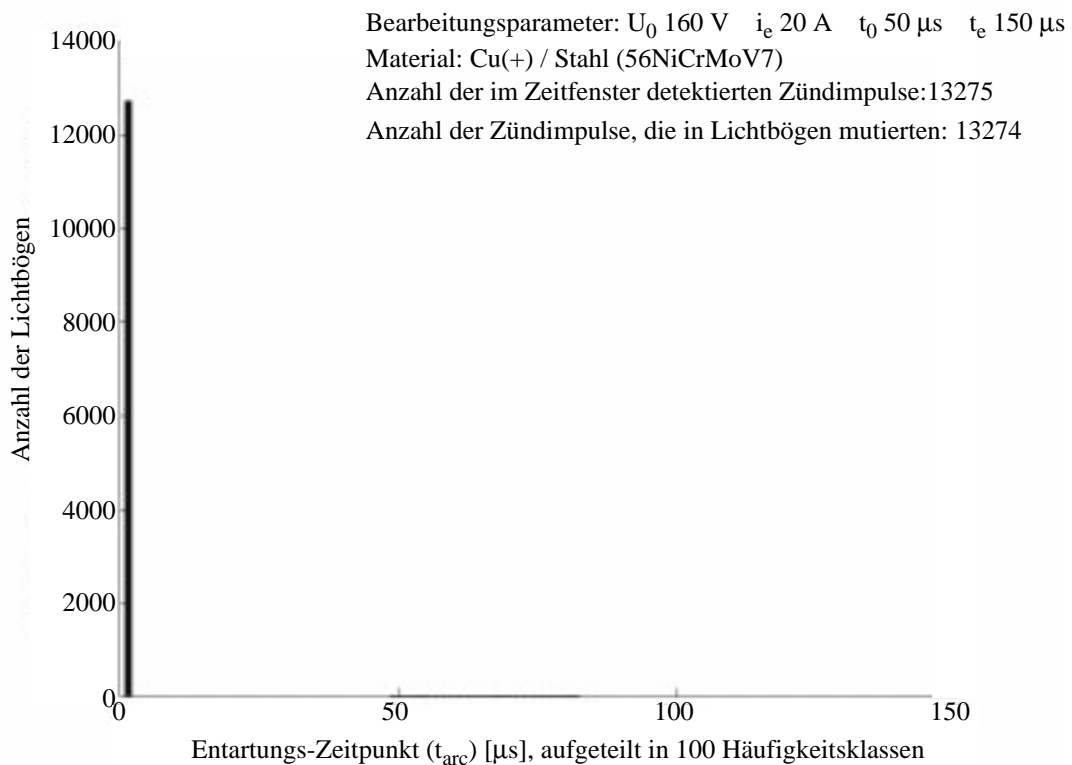


Bild 5.38: Histogramm der t_{arc} -Werte für einen entarteten Prozeß

Die große Anzahl an Lichtbögen, die im Fall eines entarteten Prozesses sowohl über die Brennspannungshöhe als auch über das Zündspannungsniveau detektiert wurden, deutet für diesen Prozeßzustand auf eine hohe Übereinstimmung beider Verfahren hin und gibt den Anlaß, die Äquivalenz der Erkennungsverfahren zu untersuchen.

Um die Übereinstimmung der entwickelten Erkennungsmethodik mit anderen Detektionsverfahren beurteilen zu können, werden die Impulsmengen betrachtet, die sowohl über die Brennspannungshöhe als auch über andere Indikatoren als Fehlentladungen erkannt wurden. Tabelle 5.4 zeigt die Gesamtzahl der über die Brennspannungshöhe erkannten Lichtbögen im Vergleich zu den Fehlentladungen, die über dieses Verfahren und gleichzeitig über eine andere Erkennungsmethodik derartig beurteilt wurden.

| i_e | t_e | Prozeß- zustand | Lichtbögen jeweils erkannt über ... | | |
|-------|-------------|-----------------------------------|---|---|---|
| | | | Ein Erkennungs- verfahren Brennspannungs- schwelle (B_s) Anzahl der Lichtbögen | Zwei Erkennungsverfahren Brennspannungs- schwelle (B_s) und $t_d < 1\mu s$ Anzahl der Lichtbögen | Brennspannungs- schwelle (B_s) und Höhe der Zündspannung Anzahl der Lichtbögen |
| 6A | 10 μs | stabil | 2476-3991 | 0-2 | 3-16 |
| 12A | 30 μs | | 1749-3721 | 0-47 | 61-191 |
| 20A | 40 μs | | 748-4697 | 0-4 | 14-247 |
| 6A | 50 μs | an der Grenze zur Instabilität | 10424-13890 | 0-3 | 2-34 |
| 12A | 100 μs | | 8350-11954 | 91-369 | 790-1004 |
| 20A | 100 μs | | 9409-10032 | 126-323 | 832-1470 |
| 20A | 100 μs | entartet | 12040-13382 | 0-290 | 8006-12733 |

Tabelle 5.4: Über verschiedene Verfahren erkannte Lichtbögen aus 32000 Impulsen

Beim Vergleich von Tabelle 5.3 und Tabelle 5.4, fällt die Übereinstimmung in der letzten Spalte auf. Daraus geht hervor, daß alle Lichtbögen, die über das Zündspannungsniveau detektiert werden, auch über die Brennspannungsschwelle B_s erkennbar sind. Die Lichtbogenerkennung über das Zündspannungsniveau vermag demnach eine Untermenge der Fehlentladungen zu erkennen, die das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Erkennungsverfahren über die Brennspannung B_s detektiert.

Die Erkennung von Fehlentladungen über die Zündverzögerungszeit t_d erscheint nicht wirkungsvoll. Es ist mit diesem Verfahren weder möglich, der Anzahl detektierter Lichtbögen einen Prozeßzustand zuzuordnen, noch können die erkannten Lichtbögen über ein anderes Verfahren bestätigt werden.

Bei der Lichtbogendetektion über die Höhe der Brennspannung ist die im Vergleich zu anderen Verfahren hohe Anzahl detektierter Fehlentladungen auffällig. Diese hohen Lichtbogenraten ergeben sich durch die Detektion während der gesamten Entladedauer. Bei den anderen Erkennungsmethoden handelt es sich um zündphasenorientierte Verfahren, diese betrachten nur den Moment der Kanalbildung. Wird die gesamte Entladedauer betrachtet, wie im Fall des entwickelten Erkennungsverfahrens, dann können auch die Fehlentladungen detektiert werden, die in der Zündphase keine Auffälligkeiten zeigen und erst im Verlauf der Brennphase mutieren. Dies erhöht die Empfindlichkeit maßgeblich.

5.8 Die physikalischen Vorgänge bei der Entladungsmutation

Das entwickelte Verfahren zur Erkennung von Lichtbögen überwacht die gesamte Brennphase. Es werden auch Lichtbögen erkannt, die während der Zündphase keine Anzeichen einer Fehlentladung aufweisen und erst im Verlauf der Brennphase mutieren. Dadurch rücken die physikalischen Vorgänge, die bei der Mutation einer Entladung auftreten, in den Blickpunkt des Interesses.

Entsprechend dem entwickelten Detektionsverfahren kommt es im Moment der Entladungsmutation zu einem Abfall der Brennspannung. Da der eingesetzte Generator nach dem Prinzip einer aktiven Stromquelle arbeitet, muß der Entladestrom näherungsweise als konstant angesehen werden. Ein Spannungsabfall kann also nur dann auftreten, wenn sich der Widerstandswert des Entladekanals verringert. Dies ist der Fall, wenn sich der Durchmesser des Plasmakanals erweitert.

Vergrößert sich bei einer Fehlentladung im Moment der Mutation der Entladekanal, dann nimmt die Energiedichte auf der Elektrodenoberfläche ab. Damit stellt sich die Frage, wie trotz abnehmender Energiedichte die Oberfläche der Elektroden geschädigt werden kann. Eine Erklärung liefert die Bewegung des Plasmakanalfußpunktes während der Entladung.

Die Wanderbewegung des Anoden- und Kathodenfußpunktes wurde von *Kunieda* während einer Entladung gemessen und untersucht [KXN92]. Dabei wurde eine permanente Bewegung festgestellt, deren räumliche Ausdehnung mit zunehmender Entladedauer ansteigt. Verursacht wird diese Bewegung durch das ständige Bestreben des Plasmakanals, den Punkt mit der größten Feldstärke aufzusuchen. An jedem Ort, an dem sich der Entladekanal befindet, wird Material von der Elektrodenoberfläche verdampft und aufgeschmolzen. Dadurch vergrößert sich an dieser Stelle der Elektrodenabstand und die elektrische Feldstärke nimmt ab. Eine Wanderbewegung zu einem Ort größerer Feldstärke ist die Folge. Als Resultat zeigen Einzelentladungen einen verteilten, unregelmäßigen Kratergrund auf der Elektrodenoberfläche.

Wird die Werkzeugelektrode als Kreiskegel ausgeführt, dann ist die Wanderbewegung des Plasmakanals eingeschränkt. An der Spitze des Kreiskegels ergibt sich eine erhöhte Feldstärke und der Plasmakanal kann von diesem Ort nicht abwandern.

Der Entladekanal ist während der Entladung fixiert und die Wärmeenergie wird konzentriert eingeleitet. Als Konsequenz entsteht ein einzelner tiefer Krater [KJK98].

Überträgt man die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zur Bewegung des Plasmakanals auf den Fall der mutierten Fehlentladung, so liegt die Vermutung nahe, daß auch im Moment der Entladungsmutation der Entladekanal seine Wanderung beendet. Die konzentrierte Wärmezufuhr aufgrund des stillstehenden Entladekanals ist eine Erklärung für die zu beobachtende Schädigung der Elektrodenoberfläche im Fall eines Lichtbogens. Der stillstehende Plasmakanal zieht dann durch elektrische Feldkräfte Abtragspartikel aus der Umgebung an und verschmilzt diese mit der Elektrodenoberfläche. Später sind diese Partikel als Verkohlungen sichtbar.

Experimentelle Untersuchungen über die physikalischen Vorgänge im Moment der Entladungsmutation müßten in nachfolgenden Arbeiten durchgeführt werden, um die gemachten Annahmen zu bestätigen.