V. GRUNDLAGEN DER ENERGIEÜBERTRAGUNG UND FOLGERUNGEN

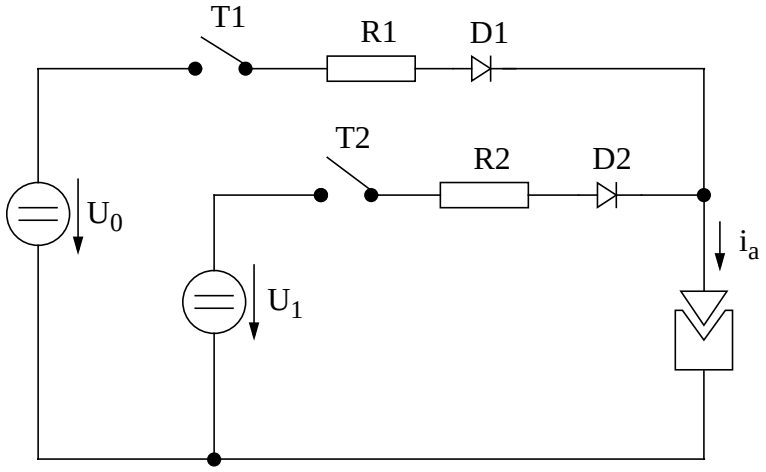
Die Erzeugung, Übertragung und Wirkung der energietragenden elektrischen Größen Strom und Spannung bestimmen den Funkenerosionsprozeß. Die Analyse der elektrischen Größen zeigt die spezifischen Eigenschaften und Wirkungen elektrischer Impulse auf und mündet abschließend in die Betrachtung von Prozeßentartungen, die als Folge fehlerhafter Energieübertragungen auftreten.

5.1. Energiequellen für die Senkerosion

Zur Bereitstellung von impulsförmigen elektrischen Größen kann prinzipiell ein als Spannungs- oder Stromquelle arbeitender Generator eingesetzt werden. Folgende Anforderungen sind dabei zu erfüllen:

- Einstellbare Amplitude des Impulsstromes von ca. 0,5A bis 100A
- Einstellbare Höhe der sogenannten Zündspannung von ca. 100V bis 300V
- Freie Vorgabe der Impulsperioden und des Tastverhältnisses
- Leerlauf- und Kurzschlußfestigkeit

Je nach Aufgabe variieren die Pulsfrequenzen von ca. 100KHz (Schlichtbearbeitung) bis zu wenigen Kilohertz (Schruppbearbeitung). Die Stromhöhe nimmt dabei Werte zwischen einem halben und ca. 10 A (Feinbearbeitung) und bis zu 200A (Grobbearbeitung) an. Spannungsquellen werden im Bereich der Funkenerosion als sogenannte „statische Impulsgeneratoren“ bezeichnet. Sie sind noch in einigen Erodieranlagen vorzufinden. Sie basieren im wesentlichen auf einer gesteuerten Kondensatorentladung über dem Arbeitsspalt. Zur Stromeinstellung und Begrenzung von Kurzschlußströmen, die im Falle eines Kurzschlusses zwischen Werkzeug- und Werkstückelektrode auftreten, müssen diese Art Generatoren über Hochlastwiderstände verfügen, die in der Lage sind, die überschüssige Wirkleistung zu vernichten. Diese während des Erodierprozesses zwangsweise auftretenden kurzschlußartigen Betriebszustände verschlechtern die beim funkenerosiven Senken ohnehin ungünstige Leistungsbilanz zusätzlich. Darüber hinaus erfordern diese Hochlastwiderstände sehr viel Platz, sind sehr teuer und müssen über eigene Kühleinrichtungen verfügen. Im Gegensatz zu Spannungsquellen bieten Stromquellen den Vorteil, daß sie nahezu verlustfrei arbeiten [BüB86]. Im Anschluß sind die Ersatzschaltbilder für typische exemplarische Energiequellen angegeben. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Stromquelle eingesetzt, die in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner für die Funkenerosion adaptiert und durch eigene Weiterentwicklung schließlich für den Einsatz als Prozeßstromquelle in Senkgeneratoren befähigt wurde [Red94] [BWB95c]. Bild 5-1 zeigt einen statischen Impulsgenerator mit Zünd- und Leistungsteil, Bild 5-2 stellt das Prinzip der geregelten Stromquelle dar und in Bild 5-3 ist die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Stromquelle abgebildet. Die baulichen Ausführungen und die Wirkungsweisen werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.



U1: Arbeitsspannung typ. ca. 80V;
Uo: Leerlaufspannung 100V, 150V, 300V
T1, T2 : Transistoren als Schalter
R1, R2 : Lastwiderstände zur Strombegrenzung
D1, D2 : Entkopplungsdioden

Bild 5-1:
Prinzipdarstellungen statischer Impulsgenerator nach VDI 3404

U_o: Gleichspannungsquelle; i_aArbeitsstrom
L :Energiespeicher zur Bereitstellung des Arbeitsstromes
T1:Regeltransistor zur Einstellung des Arbeitsstromes
T2:Kurzschlußtransistor zur Arbeitsstrom-Impulsgenerierung
D1, D2, D3, D4: Entkopplungs- und Freilaufdioden

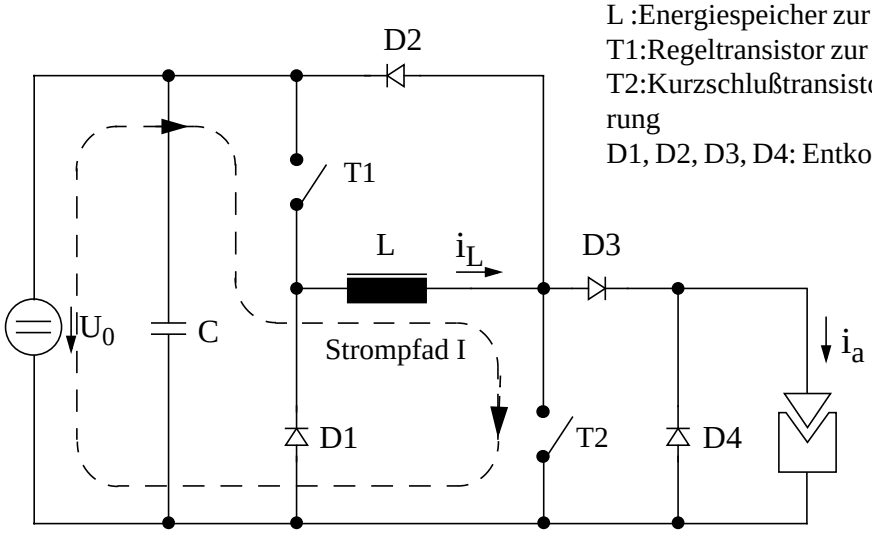
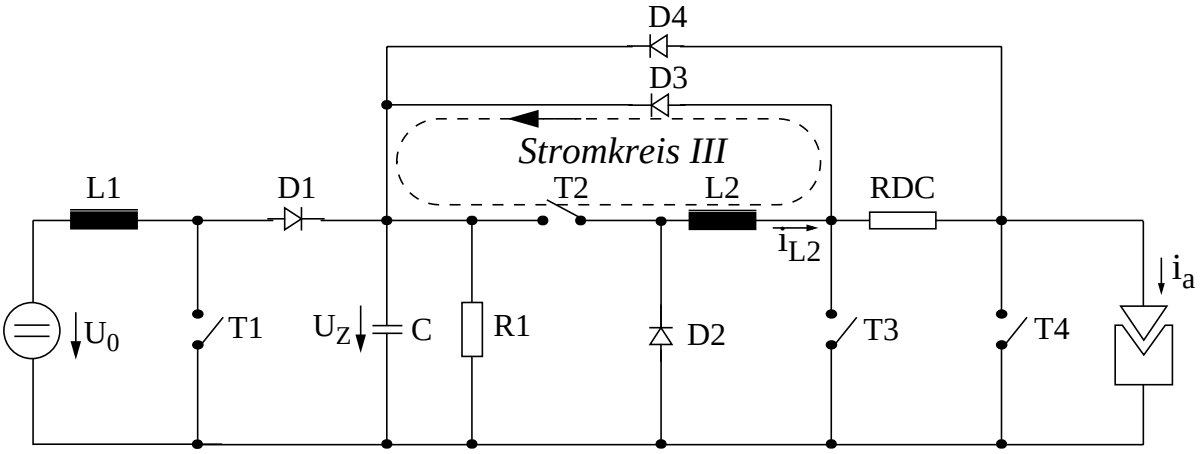


Bild 5-2:
Prinzipdarstellungen einer geregelten Stromquelle mit fester Zündspannung und Kurzschlußschalter [WeS87]



U_z: Zündspannung; T1, L1, C, D1:Schalter, Energiespeicher (Spule und Kapazität) und Entkopplungsdiode zur Regelung der Zündspannung; T2, L2, D2:Schalter, Spule und Abbaudiode zur Regelung des Spulenstromes i_{L2}; T3, D3:Kurzschlußschalter zur Erzeugung der Pulspause und Pulsbrennzeit mit Freilaufdiode;
T4, RDC,D4:Deionisierungsschalter für niederohmige Spaltkurzschlüsse für die Kommutierung des Spaltstromes i_a

Bild 5-3:
Prinzipdarstellungen einer Prozeßstromquelle für die Senkerosion [Knö88] [BWB95c]

a) Statischer Impulsgenerator mit Zündspannungsquelle

Die Funktionsweise der Spannungsquelle sieht vor, zunächst die hochohmige Zündquelle über den Schalter T1 an den Funkenspalt zu legen. Dabei fließt zunächst ein niedriger Strom von z.B. 1,5A bei einer Zündspannung von bis zu 300V und mehr, die von der Quelle vorgegeben wird. Wenn die "Zündung des Funkens" detektiert wird, schaltet ein Steuerelement den Leistungsteil mit einer Leerlaufspannung von z.B. 80V über Schalter T2 an den Funkenspalt. Die Leistungsquelle vermag die Arbeitsströme von bis zu mehreren hundert Ampere durch Parallelschalten mehrerer Leistungsquellen zu erbringen. Dieses System funktioniert für Entladungen, die nach einer Zündverzögerungszeit mit der physikalisch definierten Brennspannung von ca. 20-30V ablaufen. Tritt allerdings der Kurzschlußfall ein, so fällt der Widerstand auf nahe null Ohm ab, was ein zusätzliches Anwachsen des Stromes und letztendlich eine Beschädigung oder Zerstörung der Leistungsquelle zur Folge hätte. Zur Vermeidung dieses Problems ist die Leistungsquelle mit sogenannten Kurschlußwiderständen geschützt, die zur Strombegrenzung verwendet werden und in der Lage sind, sehr hohe elektrische Leistung aufzunehmen. In diesen Vorwiderständen ist einer der Hauptnachteile statischer Impulsgeneratoren zu sehen.

b) Geregelte Stromquelle mit fester Zündspannung

Die Funktionsweise der geregelten Stromquelle nach Bild 5-2 basiert auf dem ständigen Fließen des eingestellten Arbeitsstromes i_L. Während der Pause ergibt sich der Strompfad aus dem geschlossenen Transistor T1 der Spule L und dem geschlossenen Transistor T2 (Strompfad I). Da die Spule L mit den Halbleiterschaltern T1 und T2 keinen nennenswerten ohmschen Widerstand aufweist, würde der Strom sehr schnell auf Werte ansteigen, die zu einer Zerstörung der Leistungshalbleiter führen würden. Hier setzt die Regelung ein, die den durch die Induktivität L fließenden Strom ständig erfaßt. Im einfachsten Fall kann es sich bei dem Regler um einen Zweipunktregler handeln, der bei Überschreiten des vorgegebenen Sollwertes den Regler-Schalter T1 öffnet. Da der Strom durch die Spule stetig fließt, ergibt sich ein Strompfad, der von L, D2, der Spannungsquelle und D1 gebildet wird. Die treibende Spannung, die nach der Lentzschen Regel einen stetigen Spulenstrom verlangt, wird über die Gegenspannung Uo sehr schnell abgebaut. Erkennt das Meßglied eine Unterschreitung des Sollstromes, so wird der Schalter T1 wieder geschlossen, was wieder zu einem Anwachsen des Stromes durch die Spule L führt. Als Ergebnis erhält man einen gezackten Stromverlauf, dessen Amplitude prozentual zur Gesamtstromamplitude als „Ripple“ bezeichnet wird. Die eigentliche abtragswirksame Entladung beginnt mit dem Öffnen des Schalters T2.

Da der Strom stetig fließen muß und der Funkenspalt während der Zündverzögerungszeit t_d noch isolierend wirkt, erfolgt die Rückspeisung über die Diode D2 in die Quelle. Wird der Funkenspalt leitend, so fließt der Strom aus der Quelle über T1 durch L und D3 in den Spalt. Bei längeren Impulsen tritt die Regelung des Arbeitsstromes wieder in Kraft, die den Reglerschalter T1 entsprechend einem vorgegebenen Stromsollwert öffnet und schließt und damit im Mittel den vorgegebenen Arbeitsstrom einstellt. Der Einfachheit halber wird auf die Darstellung des Reglers und der Meßglieder verzichtet. Schaltungsbedingt stellt sich die von der Quelle vorgegebene Spannung U_o als Zündspannung ein.

Dieses resultiert aus der Tatsache, daß die Spule während t_d versucht, einen Strom in den noch nicht leitenden Spalt einzuprägen. Es hat zur Folge, daß die Spannung ansteigt, bis sie den Wert der Quellenspannung U_0 erreicht hat. Überschreitet die induktive Spannung die Quellspannung, so kommt es zum Ausgleichsstromfluß über die Freilaufdiode D2. Damit werden Beschädigungen ausgeschlossen und das Gerät wird leerlauffest.

c) Prozeßstromquelle für die Senkerosion

In Bild 5-3 ist die Prozeßstromquelle dargestellt, wie sie im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde. Die Besonderheit gegenüber b) besteht darin, daß die gewählte Schaltung über einen sogenannten Hochsetzsteller [Boe88] zur Bereitstellung der Zündspannung verfügt. Somit bekommt man die Möglichkeit, eine ausschließlich von den eingesetzten Leistungshalbleitern beschränkte Zündspannung zu erzeugen [Knö81]. Für die Senkerosion ist die Variation der Zündspannung je nach Erosionsaufgabe zwischen 80V bis 400V möglich. Da der Hochsetzstellerteil als geregelte Spannungsquelle arbeitet, ist die bereitgestellte Spannung sehr stabil und kann abhängig von den Zeitkonstanten der eingesetzten Energiespeicher sehr schnell auf die gewünschte Zündspannung eingeregelt werden. An diese Spannungsquelle ist ein sogenannter Tiefsetzsteller [Boe88] angeschlossen, der einen frei vorgebbaren geregelten Arbeitsstrom zur Verfügung stellt. Wie in Teil b) bereits dargestellt, ist die Forderung nach minimalem Ripple, also kleinster Welligkeit des Stromes, und nach maximaler Flankensteilheit nicht gleichzeitig zu erfüllen. Dies liegt daran, daß der Ripple von der Größe der eingesetzten Induktivität abhängt und i. d. R. mit zunehmender Induktivität abnimmt. Da aber die Flankensteilheit des Stromes umgekehrt proportional zur Induktivität L ist, wirkt die Vergrößerung von L direkt als Verkleinerung der Flankensteilheit des Stromes. Die eigentliche Impulserzeugung erfolgt durch Öffnen (Brennzeit) und Schließen (Pausenzeit) des Schalters T3. Daraus ergeben sich Stromflanken, die nur von der Leitungsinduktivität und der Schaltgeschwindigkeit des Halbleiterschalters abhängen.

In der eingesetzten Prozeßstromquelle ist die Stromregelung auf einen Ripple von 5-10% des Scheitelwertes des Arbeitsstromes ausgelegt. Die Flankensteilheiten des Spaltstromes liegen im Bereich von ca. 60A/µs. Eine weitere Besonderheit des realisierten Generatorprinzips ist die direkte Parallelbeschaltung des Kurzschlußschalters T3 mit T4, der während der Pause den Arbeitsstrom übernimmt. Der Arbeitsspalt wird damit während der Impulspause praktisch kurzgeschlossen, was zu einer maximalen Deionisierung in der Pause führt. Aufgrund der hohen zu schaltenden Ströme in Verbindung mit kleinsten Schaltzeiten werden sogenannte IGBTs (Isolated Gated Biploar Transistors) eingesetzt. Würde der Generator gemäß Bild 5-3 ohne die Zusatzschaltung [BWB95c] betrieben, so könnten auftretende Kurzschlüsse nicht behandelt werden. Dies liegt daran, daß ein niederohmiger Spaltkurzschluß einen kleineren ohmschen Widerstand darstellt als der geschlossene Halbleiterschalter T3 mit seinem Durchlaßwiderstand. Die Auswirkung von Kurzschlüssen im Arbeitsspalt wäre ein Gleichstrom durch den Spalt, der von Schalter T3 nicht „abschaltbar“ ist. Die vorgeschlagene Ergänzung um das Netzwerk (RDC) in Verbindung mit dem Deionisierungsschalter T4 behebt die geschilderten Nachteile, so daß der Arbeitsstrom damit auch im "harten Kurzschlußfall" während der Im-

pulspause sicher in den Kreis des Schalters T3 kommutiert.

Der Schalter T4, der unter einer sehr kleinen Last synchron mit T3 schaltet, sorgt für die vorteilhafte Deionisierung des Arbeitsspaltes in den Impulspausen. Der Schaltungszusatz erlaubt auch die Parallelschaltung einer Anzahl von Tiefsetzstellern zur Erhöhung des Arbeitsstromes unter Beibehaltung aller günstigen Eigenschaften der Prozeßstromquelle. Die eingesetzte Prozeßstromquelle ist spezifiziert auf 0 bis 60A Arbeitsstrom, der in 0.25A Schritten variiert werden kann. Im Rahmen der Entwicklung und der ausgedehnten Erprobungsphasen stellte sich ein weiteres Problem während der Zündverzögerungszeit t_d heraus, das durch zwei Maßnahmen nahezu eliminiert werden konnte. Wie bereits beschrieben, öffnen die Schalter T3 und T4 zu Beginn des Impulses. Die Stetigkeit des Stromes verlangt, daß der Strom entweder über den durchgezündeten Funkenspalt oder über die Diode D3 fließt. Im ersten Fall läge ein Sofortzünder vor. Im zweiten Fall tritt die normale Zündverzögerung auf. Die Folge ist, daß die Spannung sehr schnell auf die sogenannte Zwischenkreisspannung ansteigt, die der Hochsetzsteller gemäß der aktuellen Einstellung als Zündspannung U_z abgibt und die am Kondensator C anliegt. Das bedeutet, der Strom fließt quasi ohne wirksame Quelle im *Stromkreis III (*Bild 5-3). Die erste Maßnahme sieht vor, während dieser Zeit den Schalter T2 permanent auf leitend geschaltet zu belassen, d.h. die Stromregelung zu unterbrechen. Damit wird vermieden, daß die Spule durch die Zwischenkreisspannung U_z entladen wird. Die Folge davon, daß der Strom im Strom*kreis III* nur aufgrund der Spulenenergie fließt, ist ein trotzdem kontinuierlicher Abbau des Stromes, d.h. der in der Spule L2 gespeicherten Energie. Bei genügend großer eingestellter Impulslänge ist somit bei entsprechend langer Zündverzögerungszeit t_d ein nahezu vollständiges „Leerlaufen“ der Spule möglich. Bei einer Spätzündung mit sehr großer Zündverzögerungszeit stünde daher kein oder nur sehr geringer Strom zur Verfügung, was negative Auswirkungen auf die Abtragsleistung zur Folge hätte. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieses Problem durch die Elimination von langen Zündverzögerungszeiten gelöst. Dabei erkennt die Impulstaktung, wenn ein Impuls nicht zündet und bricht den Impuls nach einer beliebig einstellbaren Wartezeit ab. Nach der Pausendauer erfolgt eine Neuzündung. Zündet ein Impuls innerhalb der vorgegebenen Wartezeit, die auf 30µs eingestellt ist, so verläuft der Impuls regulär.

Der bereits mehrfach postulierte Vorteil von gestuften Stromimpulsen [Enn81], oder im Idealfall beliebig vorgebbaren Stromimpulsflanken, wurde beim vorliegenden Generatorkonzept der „spaltangepaßten Prozeßstromquelle“ für die Senkerosion nicht realisiert. Es bleibt allerdings festzustellen, daß ein Stromverlauf nach Bild 5-4 auf jeden Fall positive Auswirkungen auf den Elektrodenverschleiß hat. Dazu existieren jedoch bereits Ansätze, die unmittelbar auf dem Konzept der beschriebenen Prozeßstromquelle aufbauen, im Rahmen vorliegender Arbeit allerdings noch nicht realisiert werden konnten. Im Gegensatz zu Lösungen, die mittels variablen Induktivitäten die Stromflanke beeinflussen, soll mit einer Weiterentwicklung die Stromformung durch gesteuerte Schalter erreicht werden. Bekannte Konzepte für Prozeßstromquellen [Göl90] [Let93] gehen bereits in diese Richtung, sind aber von einer industriell verwertbaren Lösung im Hinblick

auf die Unwägbarkeiten der funkenerosiven Anwendung noch weit entfernt.

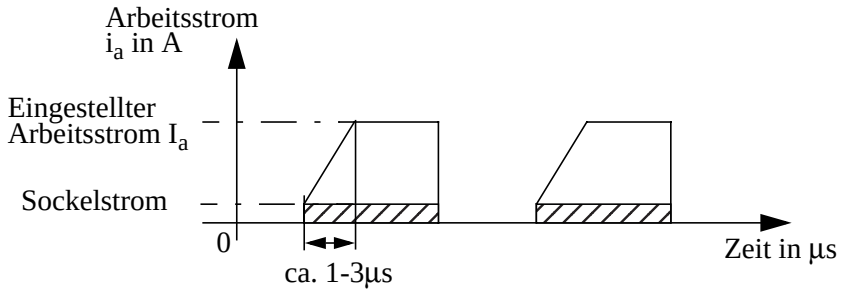


***Bild 5-4*: Günstige Stromformung zur Verschleißminderung**

Die in Bild 5-4 dargestellte Stromform muß einen Sockelstrom aufweisen, der mindestens so groß sein muß, daß der Funkenspalt durchzünden kann. Aus der physikalischen Betrachtung ergibt sich eine ideale Sockelstromamplitude von ca. 1A. Der Strom steigt im Anschluß an den Sockelstrom linear bis zur Arbeitsamplitude an. Daraus ergeben sich für die Entladung sehr günstige Randbedingungen, die erstens die anfängliche Energieeinleitung in die Werkzeugelektrode verringert, so daß weniger Elektrodenmaterial verdampft. Durch den „sanften“ Stromanstieg kann sich der elektrodenseitige Fußpunkt ausdehnen, bis die Energieverhältnisse einen übermäßigen Elektrodenabtrag, wie er zu Anfang der Entladephase auftritt, kaum mehr zulassen. Die Flankensteilheit müßte variabel gestaltet sein und dabei eine Mindestanstiegsdauer von ca. 1 bis 3 µs besitzen.

5.2. Wirkungsanalyse der pulsförmigen Energiegrößen im Entladekreis

Neben den bekannten Parametern Amplitude, Brenn- und Pausendauer gehören zur vollständigen Beschreibung des Energieeintrages in den Funkenspalt ebenso Größen, wie Flankensteilheit und Oberwellengehalt. Dazu soll im Folgenden eine Wirkungsanalyse durchgeführt werden, die zunächst in Teil 1 die Energiegrößen und deren Wirkung auf die Zündwilligkeit des Funkenspalts beschreibt. In Teil 2 folgt eine Betrachtung der Energieübertragung vom Generator als Quelle zum Funkenspalt als Senke. Hierbei wird die Bedeutung der Spaltzuführungsleitung deutlich. Abschließend wird das gewonnene Modell in Teil 3 in ein Schwingkreismodell überführt, das im Anschluß als Grundlage für eine neuartige Methode zur Erkennung von Prozeßentartungen verwandt wird.

5.2.1. Wirkung der impulsförmigen Energiegrößen im Funkenspalt

Neben Impulsdauern und Amplituden sind die Flankensteilheiten und die Impulsfrequenzen für die Einbringung von Energie in den Funkenspalt verantwortlich [Sto91]. Für die Funkenerosion existieren kaum Untersuchungen, in welcher Weise sich die Formung der Spannungsimpulse auf die Zündwilligkeit des Funkenspalts auswirkt. Gemeinhin wird hier von der Höhe der Zündspannung und der Spaltweite als bestimmende Größen ausgegangen. Eine Analyse der Zündverzögerungszeiten von Impulsen mit gleichen Dauern und Amplituden aus unterschiedlichen Erodiergeneratoren ergab, daß mit zunehmender Flankensteilheit der Zündspannung und des einsetzenden Arbeitsstromes die Zündverzögerungszeit stark zurückgeht. So lag die Mehrzahl der Zündverzögerungszeiten bei Verwendung eines statischen Impulsgenerators bei Impulsen von 100µs

Brenndauer um 10µs, wohingegen die neu entwickelte Prozeßstromquelle bei gleicher Brenndauer mit dem Gros ihrer Zündverzögerungszeiten unter 5µs liegt. Die Ursache ist mit großer Sicherheit in der Wirkung höherfrequenter Spektralanteile in der sprungförmigen Zündspannung begründet. So weist ein Impuls mit weniger steilen Flanken deutlich weniger Spektrallinien bei höheren Frequenzen auf als ein Rechteckimpuls gleicher Grundfrequenz. Daraus resultiert die Frage, inwiefern sich Wechselfelder unterschiedlicher Frequenz auf das Dielektrikum und die Zündverzögerungszeit auswirken.

Das Dielektrikum, das eigentlich ein Isolieröl ist [Zer69], wird während der Erosion mit Partikeln verschiedener Maße, Materialien und Volumen verunreinigt. Starke elektrische Felder, wie sie als Folge der FE-Zündspannung im Funkenspalt vorliegen, üben Kräfte auf diese Partikel aus. Die resultierende Bewegung kann zu einer Verteilung, Anhäufung oder zu einer Kettenbildung mit direkter Auswirkung auf die Durchbruchsfestigkeit führen. Dabei gilt, daß leitende Partikel die Durchbruchsfestigkeit stärker herabsetzen als nichtleitende Partikel. Insgesamt kann man sagen, daß Verunreinigungen in Form von Partikeln die Durchschlagsfestigkeit sowohl für Gleich- als auch für Wechselspannungen stark herabsetzen [MaA78]. Entsprechend zeigt ein stark verschmutzter Funkenspalt kleine Zündverzögerungszeiten. Ein Ergebnis der Partikelbetrachtung in Wechselfeldern ist, daß Partikel, deren *Dielektrizitätskonstante* ε größer ist als die des umgebenden Dielektrikums ε_o, dazu neigen, sich an einer Stelle maximaler Feldstärke anzusammeln und dort eine Brücke zu bilden. Hierbei sind vor allem größere Teilchen ($r > 10$ Å) hoher Dielektrizitätskonstante beteiligt. Allgemein gilt [Kok63]:

- Bei Gleichfeldern wandern die Teilchen zwischen den Elektroden.
- In schwachen Wechselfeldern schwingen die Partikel senkrecht zu den Elektroden um eine Ruhelage.
- In starken Wechselfeldern bilden sich Partikelbrücken an Orten stark erhöhter Feldstärke. Handelt es sich um homogene Felder, wie z.B. in Plattenkondensatoren, so bilden sich viele parallele Brücken.

Daraus kann gefolgert werden, daß mit der Zunahme der Wechselenergie der äußeren elektrischen Felder die Partikel verstärkt zur Brückenbildung neigen. Diese Folgerung deckt sich, ohne hier den Beweis anzutreten, mit den Beobachtungen beim Feinschlichten mit kleinsten Strömen und kürzesten Impulsdauern. Dieser Effekt beruht auf Partikeln, die sich infolge des äußeren elektrischen Feldes im Funkenspalt bewegen. Dabei handelt es sich um Ionen, polarisierte Partikel oder permanente Dipole. Im Ergebnis sammeln sich Ladungsträger an Stellen maximaler Feldstärke und setzen dort die Durchschlagsfestigkeit merklich herab. Ein zweiter Aspekt sind die im Funkenspalt vorhandenen Gasblasen. In [Kok63] wird die Theorie bestätigt, daß es sich bei der Auslösung der Funkenentladung in einem flüssigen Dielektrikum durchaus um einen versteckten Gasdurchschlag handelt, der seinen Ursprung in Entladungen innerhalb einzelner Gasblasen mit Durchmessern von ca. 10^{-3} bis 10^{-2}mm im Funkenspalt hat. Auch hierbei spielt die Frequenz der anregenden elektrischen Größen eine zentrale Rolle. So treten derartige Entladungen bevorzugt unter Einwirkung eines hochfrequenten äußeren Feldes auf [Kok63].

Die exakte Wirkung von Wechselfeldern auf Dielektrika beschreibt die sogenannte Polarisation. Wird ein Dielektrikum unter Einwirkung eines elektrischen Feldes polarisiert, so entstehen gerichtete Dipole oder es werden vorhandene Dipole ausgerichtet [Mün85]. Man unterscheidet elektronische Polarisation (Deformation der Elektronenhülle der Atome), ionische Polarisation (Elastische Verschiebung von Ionen) und Orientierungspolarisation (Ausrichtung permanenter Dipole). In Bild 5-5 ist die Frequenzabhängigkeit der Polarisation, d.h. der Dielektrizitätszahl ε_r, für die verschiedenen Polarisationsmechanismen dargestellt. Das Einbringen eines Dielektrikums in einen Kondensator, wie z.B. des Erodieröls in den Funkenspalt, führt dabei zu einer Erhöhung der Kapazität um den Faktor ε_r, wie in Gleichung 4.32.1 angegeben. Die Betrachtung des Funkenspalts als Kondensator mit Dielektrikum führt auf die Spaltkapazität C_s:

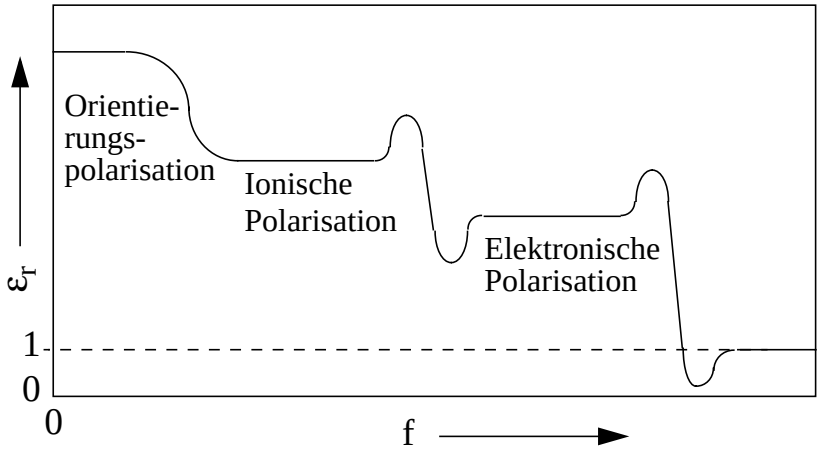


Bild 5 -5: Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante ε_r nach [Mün85]

$$C_s = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d} \qquad \text{Glg. 4.32.1}$$

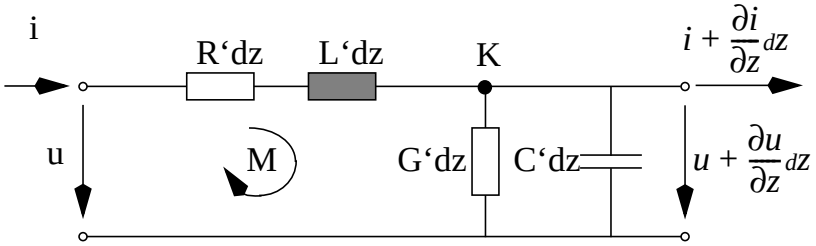
ε_0: Dielektrizitätskonstante, ε_r: Dielektrizitätszahl, A: Kondensatorfläche, d: Spaltabstand

Die Polarisation, die durch das dielektrische Medium hervorgerufen wird, ist proportional zur äußeren elektrischen Feldstärke E [Mie78]. Aus Bild 5-5 ist zu entnehmen, daß die Dielektrizitätszahl abhängig von der Frequenz des äußeren elektrischen Feldes sich immer aus der Summe der drei Polarisationsmechanismen ergibt [ZiS82]. Zusammen mit Gleichung 4.32.1 folgt, daß die resultierende wirksame Spaltkapazität ebenfalls frequenzabhängig ist. Entsprechend wird die Durchschlagfestigkeit des Funkenspalts mit zunehmender Frequenz kleiner. Liefert ein Generator Energiegrößen mit deutlich höherfrequenten Wechselanteilen aufgrund steilerer Flanken, so ist damit zu rechnen, daß die Zündwilligkeit des Funkenspalts zunimmt. Entsprechend werden die Zündverzögerungszeiten im Mittel abnehmen. Für das Verhalten des Dielektrikums im Funkenspalt muß der Vollständigkeit halber angemerkt werden, daß die Elektronen- und die Ionenpolarisation aufgrund ihrer hohen Frequenzen, die jenseits des Infrarotbereiches liegen, vernachlässigt werden dürfen. Somit ist die Orientierungspolarisation die einzige verbleibende Quelle der Dielektrizitätsänderung in Abhängigkeit der Frequenz. Für das im Rahmen vorliegender Arbeit benutzte Modellbild kann in guter Näherung das Ersatzschaltbild eines idealen verlustfreien Kondensators in Parallelschaltung mit einem Leitwert verwandt werden. Dabei ist die Gleichstromleitfähigkeit für die Beschreibung der prinzipiellen Effekte ausreichend.

Zusammenfassend ergibt die Modellierung des Funkenspalts als unvollkommener Kondensator eine hinreichend exakte Beschreibung der realen Spaltverhältnisse. Für die Beaufschlagung des Funkenspalts mit Spannungsimpulsen sehr kurzer Periodendauern oder hohen Flankensteilheiten kann das Auftreten sehr kurzer Zündverzögerungszeiten mit dem Kondensatormodell und der Frequenzabhängigkeit seiner Kapazität erklärt werden. In Übereinstimmung mit den Beobachtungen folgt mit zunehmender Frequenz der anregenden Energiegrößen Spaltspannung und -strom eine deutliche Tendenz zur erhöhten Zündwilligkeit des Funkenspalts mit der bekannten Lichtbogentendenz.

5.2.2. Leitungsgebundene Energieübertragung

Grundlage der Modellbildung ist die Annahme, daß der Funkenspalt ein variabler Abschlußwiderstand der Spaltzuführungsleitung ist. Der Erodiergenerator bildet die anregende Spannungsquelle. Die Betrachtung wird für harmonische Anregungen durchgeführt. Der allgemeingültige Charakter ist begründet, da sich die Spannungsimpulse aus einer gewissen Anzahl von harmonischen Signalen zusammensetzen lassen. Es wird, wie in Bild 5-6 dargestellt, ein elektrisches Ersatzschaltbild zugrunde gelegt, das sich auf eine infinitesimal kleine Leitungslänge *dz* bezieht. Die sogenannten Leitungsbeläge R', L', G' und C' bestimmen dabei die charakteristischen Eigenschaften der Leitung und ergeben aufsummiert über die gesamte Leitungslänge die meßbaren Größen Widerstand, Leitwert, Induktivität und Kapazität der Leitung.



u, i: Spannung und Strom am Leitungseingang
dz: differentielle Länge des betrachteten Leitungsstücks
R', G', L', C': ohmscher, induktiver und kapazitiver Belag
M: Masche zur Berechnung der Spannungsverhältnisse
K: Knoten zur Bestimmung der Stromverhältnisse

Bild 5-6: Ersatzschaltbild eines Leitungselements mit Verlusten

Es handelt sich dabei um ein Modell einer verlustbehafteten Leitung. Ganz allgemein sind Strom und Spannung Funktion des Ortes z und der Zeit t. Nach der Kirchhoffschen Maschenregel gilt im Kreis M:

$$u = i \cdot R' \cdot dz + L' \cdot dz \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + u + \frac{\partial u}{\partial z} \cdot dz \qquad 5.21/1$$

Nach der Kirchhoffschen Knotenregel gilt am Knoten K:

$$i = u \cdot G' \cdot dz + C' \cdot dz \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + i + \frac{\partial i}{\partial z} \cdot dz \qquad 5.21/2$$

Aus den beiden Gleichungen folgen die Differentialgleichungen der elektrischen Leitungen, die ein System partieller Differentialgleichungen erster Ordnung darstellen:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\left(i \cdot R' + L' \cdot \frac{\partial i}{\partial t}\right) \qquad 5.21/3$$

$$\frac{\partial i}{\partial z} = -\left(u \cdot G' + C' \cdot \frac{\partial u}{\partial t}\right) \qquad 5.21/4$$

Mit der Beschränkung auf rein sinusförmige Anregung kann das obige Differentialgleichungssystem für den eingeschwungenen Zustand, wie z.B. in [ZiB86] dargestellt, gelöst werden. Mit der expotentiellen Schreibweise für die komplexen Zeigergrößen U, U_1 und U_2 ergibt sich folgende Gesamtlösung:

$$U \cdot e^{i\omega t} = U_1 \cdot e^{i\omega t} \cdot e^{-\gamma z} + U_2 \cdot e^{i\omega t} \cdot e^{\gamma z} \qquad 5.21/5$$

An den vom Ort z abhängigen Anteilen erkennt man, daß der zu U_1 gehörige Anteil der Gesamtspannung U mit zunehmender Ausbreitung abnimmt. Man nennt diesen Summanden die „fortschreitende Welle“. Sie ist gekennzeichnet durch maximale Amplitude am Leitungseingang und maximale Dämpfung am Leitungsende. Den zweiten Summanden mit abnehmender Dämpfung zum Leitungsende nennt man „reflektierte Welle“. Die Überlagerung beider Wellen ergibt zu jedem Ort der Leitung den momentanen Spannungswert. Basierend auf den angegebenen allgemeinen Lösungen kann mittels der Randbedingungen eine spezielle Lösung der Differentialgleichung, die für den Strom und die Spannung an einem beliebigen Ort der Leitung gilt, gefunden werden.

$$\underline{U}(z) = \frac{1}{2} \cdot (\underline{U}_a + Z_L \cdot \underline{I}_a) \cdot e^{-\gamma z} + \frac{1}{2} \cdot (\underline{U}_a - Z_L \cdot \underline{I}_a) \cdot e^{\gamma z} \qquad 5.21/6$$

$$\underline{I}(z) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\underline{U}_a}{Z_L} + \underline{I}_a\right) e^{-\gamma z} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\underline{U}_a}{Z_L} - \underline{I}_a\right) \cdot e^{\gamma z} \qquad 5.21/7$$

Mit Hilfe der speziellen Lösung der Leitungsdifferentialgleichung unter Berücksichtigung der Anfangsspannung *Ua* und des Anfangsstroms *Ia*, die von der Quellenseite eingespeist werden, kann der Abschluß einer Leitung und die entstehende Reflexion bestimmt werden. Am Leitungsende stellt sich entsprechend dem gewählten Abschlußwiderstand *Ze* eine Spannung *Ue* und ein Strom *Ie* ein. Dort wird das Verhältnis der hinlaufenden und reflektierten Welle durch den Abschlußwiderstand *Ze* bestimmt. Rechnerisch folgt das Ergebnis aus der speziellen Lösung der Wellendifferentialgleichung 521/6,7 für das Leitungsende (z=l ; l normierte Länge):

$$\underline{U}(l) = \underline{U}_e = \underline{U}_1 \cdot e^{-\gamma l} + \underline{U}_2 \cdot e^{\gamma l} \qquad 5.21/8$$

$$\underline{I}(l) = \underline{I}_e = \frac{1}{Z_L}\left(\underline{U}_1 \cdot e^{-\gamma l} + \underline{U}_2 \cdot e^{\gamma l}\right) \qquad 5.21/9$$

Aufgelöst nach den Integrationskonstanten U_1 und U_2 und eingesetzt in die allgemeine

Lösung folgt für den Spannungsverlauf am Leitungsende (mit $U_e = Z_e\, I_e$) aus Glg. 5.21/8 direkt der Spannungsverlauf als Überlagerung von rückwärts- und vorwärtslaufender Welle.

$$\underline{U}(z) = \frac{1}{2} \cdot (\underline{U}_e + Z_L \cdot \underline{I}_e) \cdot e^{\gamma(l-z)} + \frac{1}{2} \cdot (\underline{U}_e - Z_L \cdot \underline{I}_e) \cdot e^{-\gamma(l-z)} \qquad 5.21/10$$

Das Verhältnis der Teilspannung von rücklaufender Welle zur Teilspannung der vorlaufenden Welle nennt man **Reflexionsfaktor r**. Er ergibt sich zu:

$$r = \frac{Z_e - Z_L}{Z_e + Z_L} \qquad 5.21/11$$

Der Reflexionsfaktor beschreibt für Spannung und Strom das Verhältnis von reflektiertem und einfallendem Anteil in bezug auf die längs einer Leitung sich ausbreitende Welle. Für die Anwendung sind folgende Sonderfälle für die Modellvorstellung der Energieübertragung in der Funkenerosion von tragender Bedeutung:

Fall 1: r = 0 (ideal angepaßte Leitung)
Bei Anpassung ist der Abschlußwiderstand Z_e gleich dem Wellenwiderstand Z_L. Die einlaufende Welle wird vollständig absorbiert und es bilden sich keine Reflexionen aus. Dieser Fall tritt in der Anwendung im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht auf, da der Abschlußwiderstand sich ständig ändert und praktisch zu keinem Zeitpunkt den Wert des Leitungswiderstandes annimmt.

Fall 2: r = 1 (fehlangepaßte, leerlaufend abgeschlossene Leitung)
Bei Fehlanpassung ist der Abschlußwiderstand Z_e nicht gleich dem Wellenwiderstand Z_L und es ergeben sich immer Reflexionen. Im Sonderfall des Leerlaufs ist die Leitung ohne Abschluß. In Glg. 5.21/11 entspricht dies einer Grenzwertbetrachtung für $Z_e \to \infty$. Daraus folgt unmittelbar r = 1. Hier wird die einlaufende Welle zu hundert Prozent reflektiert. Einlaufende und reflektierte Welle sind in Phase. Am Leitungsende heben sich die Ströme gegenseitig auf und die Spannungen addieren sich. Ein ordnungsgemäß deionisierter Funkenspalt wirkt nach der Impulspause wie ein leerlaufartiger Abschluß.

Fall 3: r = -1 (mit einem Kurzschluß abgeschlossene Leitung)
Im Kurzschlußfall ist die Leitung mit einem sehr kleinen Widerstandswert abgeschlossen. Aus $Z_e = 0$ folgt sofort r=-1. Auch hier wird die einlaufende Welle zu hundert Prozent reflektiert, allerdings sind einlaufende und reflektierte Welle gegenphasig. Die Phasenverschiebung beträgt 180°. Die Ströme addieren sich und die Spannungen heben sich gegenseitig auf. Dieser Fall tritt für den Spaltkurzschluß oder bei lichtbogenartigen Entladungen auf. Der Spaltkurzschluß kann ein „harter“ metallischer Kurzschluß oder eine Kurzschlußbrücke sein. Lichtbogenartige Entladungen gehen mit sehr niederohmigen Funkenspaltverhältnissen einher.

Da es sich in den Fällen 1 bis 3 um idealisierte Zustände handelt, wird in der praktischen Anwendung immer eine Mischform entstehen, die tendenziell in Richtung Kurzschlußfall oder Leerlauffall geht. Prinzipiell gilt bei der sprungförmigen Anregung die Zuord-

nung hoher Reflexionsgrade für den hochohmigen Arbeitsspalt und niedere Reflexionen für den kurzschlußartigen Arbeitsspalt. Der vorgestellte leitungstheoretische Ansatz bildet die Grundlage für ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Verfahren, das charakteristische Ausprägungen der Spaltspannung zu Impulsbeginn benutzt, um Aussagen über den Spaltzustand zu treffen.

5.2.3. Schwingkreismodell

Der folgenden Betrachtung zur Modellbildung für sprungförmige Anregungen liegen die gleichen Überlegungen zugrunde, wie im vorangegangenen Abschnitt zur Leitungstheorie. Grundlage des Modells sind Eigenschaften einer Zweidrahtleitung mit kapazitiv/ohmschem Abschluß. Diese Konfiguration, auch als „Lecherkreis“ mit komplexem Abschlußwiderstand bezeichnet, kann in einen Parallelschwingkreis überführt werden [Jan86]. Dabei werden alle Leitungsbeläge des Bildes 5-7 auf diskrete Bauteile, wie in Bild 5-7 gezeigt, abgebildet. Der Schwingkreis setzt sich aus einer „diskretisierten“ Leitung“ mit Widerstand *R*, Induktivität *L*, Leitwert *G* und Kapazität *C* zusammen. Diese leitungsbezogenen Größen werden als konstant angenommen. Der spaltseitige Abschluß ist durch einen „unvollkommenen“ Kondensator (*Cs, Rs*) mit Zusatzwiderstand (*Re*) modelliert. Ausgehend von einer Energiequelle, die eine pulsförmige Spannung *Uq* hervorbringt und einen Innenwiderstand *Ri* besitzt, wird das Resonanzverhalten und die Dämpfung des resultierenden Schwingkreises betrachtet. Der kapazitive Anteil C_s ist bestimmt von den Elektrodenflächen und der geometrischen Spaltweite. Der ohmsche Anteil R_s dient der Modellierung der stark schwankenden Verschmutzung des Dielektrikums. Ein weiterer Widerstand *Re* beschreibt die ohmschen Verluste in den Elektroden und Kontaktierungen.

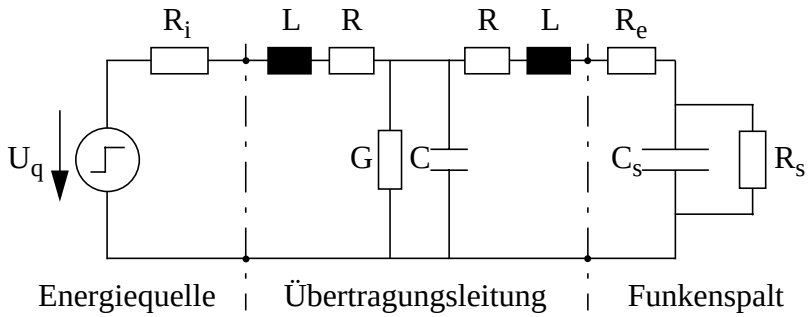


Bild 5 -7: Ersatzschaltbild für das Schwingkreismodell für den Übergang von der Pausenphase in die Brennphase

Dieses Modell soll im Folgenden für die Erkennung von Prozeßentartungen d.h. Lichtbögen und Kurzschlüsse verwandt werden. Dabei wird der Übergangsbereich von Impulspause zur Brennphase ausgewertet. Hier stellt die Leistungsquelle eine quasi sprungförmige elektrische Spannung *Uq* zur Verfügung. Der Spannungssprung wirkt auf den Schwingkreis nach Bild 5-7. Für die Simulation der Sprungantworten werden die Werte nach Tabelle 5-1 für die einzelnen Parameter eingesetzt, die zum Teil direkt durch Messung im Aufbau der FE-Versuchsanlage ermittelt wurden.

Modell-komponente	Parameter	Standardwert	Simulationsbereich
Generator	U_q	180V	konstant 90V|180V|270V
	t_{rise}	70ns	20ns|70ns|120ns
	t_{fall}	70ns	konstant
	T_{on}	120µs	konstant
	T_{off}	30µs	konstant
	R_i	10Ω	5Ω|10Ω|25Ω
Spalt	R_e	2Ω	konstant
	R_s	10kΩ	10Ω|500Ω|1kΩ|10kΩ
	C_s	100pF	100pF|500pF1200pf
Leitung	L	3,4µH	konstant
	C	384pF	konstant
	R	0,9Ω	konstant
	G	vernachlässigbar	konstant

***Tabelle.5-1*: Parameter der Simulation des Schwingkreismodells**

Die Variation der Anstiegszeit t_{rise} beschreibt unterschiedliche Leistungshalbleiter.

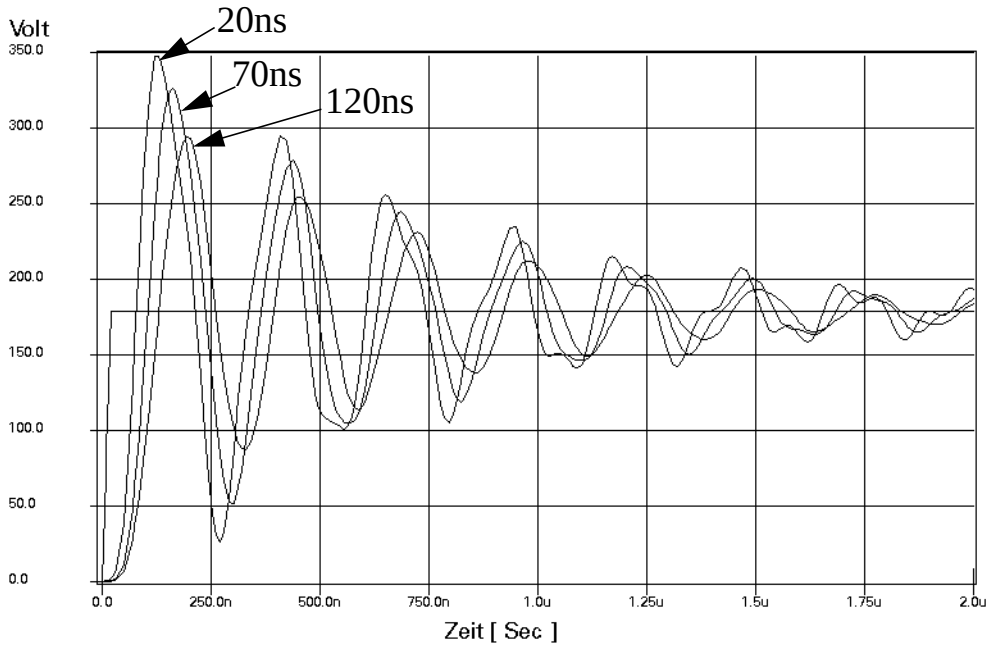


***Bild 5-8*: Variation der Anstiegszeit t_{rise}**

Eine weitere wichtige Kenngröße des Generators ist sein Innenwiderstand. Die Simulation zeigt, daß der Innenwiderstand einen deutlichen Einfluß auf das Schwingverhalten

hat. In Bild 5-9 nimmt die Dämpfung mit steigendem Innenwiderstand zu. Da die entwickelte Prozeßstromquelle systembedingt einen sehr kleinen Innenwiderstand besitzt, sind in der Realität erwartungsgemäß deutliche Schwingungen zu beobachten.

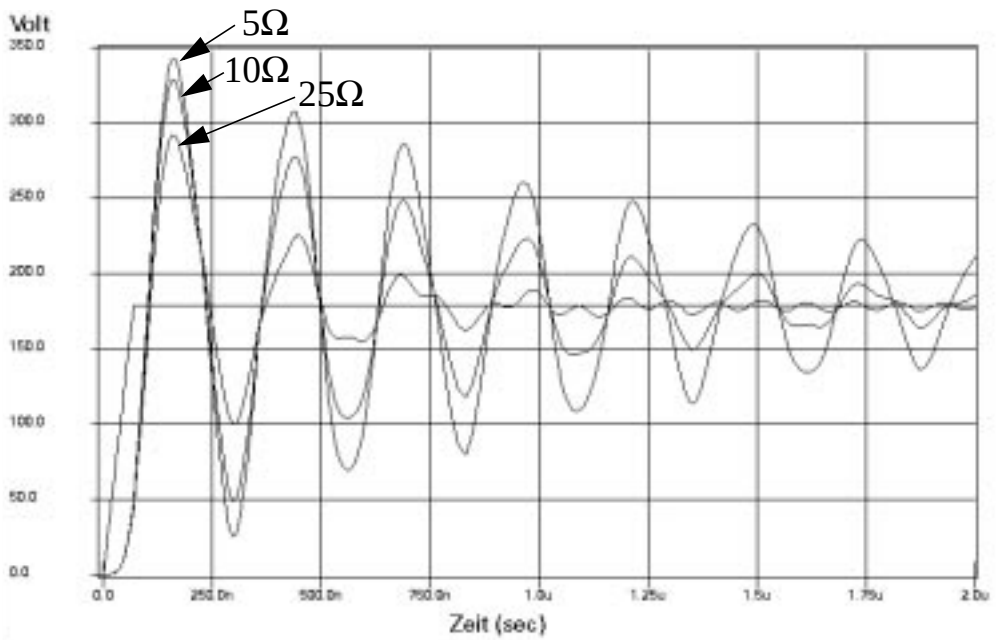


Bild 5-9: Variation des Innenwiderstandes R_i

In Bild 5-10 wurde der Spaltwiderstand R_s variiert. Er spiegelt die dielektrischen Verluste wider. Dieser Widerstand ist ebenso wie R_i verantwortlich für die Dämpfung des Parallelkreises. Im Extremfall z.B. beim Spaltkurzschluß, ist infolge des sehr kleinen Spaltwiderstandes die Dämpfung so groß, daß sich überhaupt keine Schwingung mehr ausbilden kann.

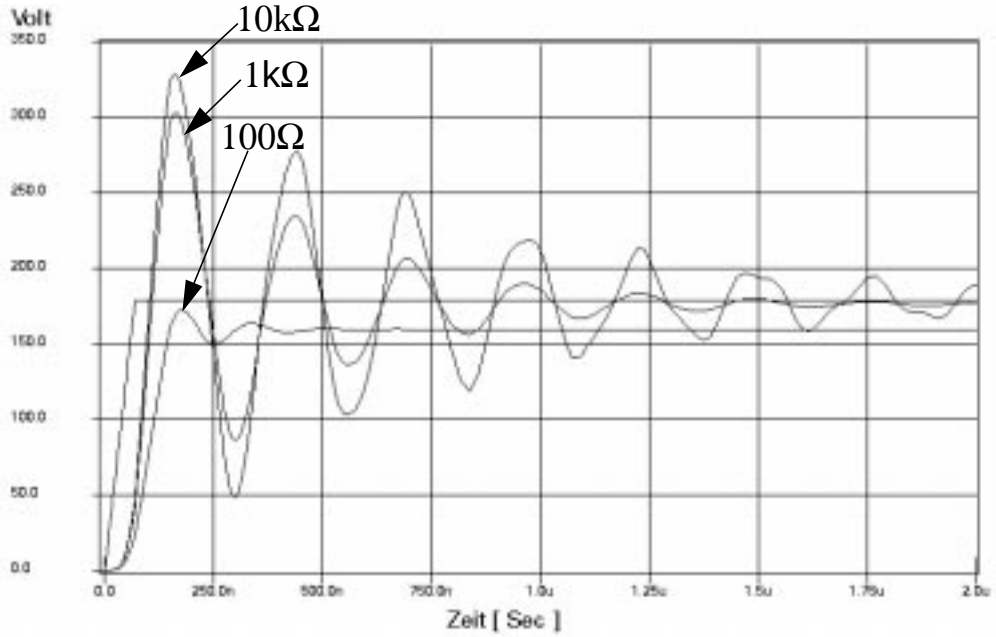


Bild 5-10: Variation des Spaltwiderstandes R_s

Eine weitere unmittelbar von den aktuellen Spalt- bzw. Erodierverhältnissen abhängende

Größe ist die Spaltkapazität. Die Kapazität beeinflußt die Resonanzfrequenz des Schwingkreises. Die Verschiebung der Resonanzfrequenz hat zur Folge, daß das Einschwingverhalten längere Periodendauern aufweist. Zusätzlich nimmt die Amplitude geringfügig ab. Die Erklärung liegt in der Anregung des Schwingkreises. Hierbei gilt, daß ein Schwingkreis für die Anregung in seiner Resonanz die maximale Schwingungsamplitude zeigt. Je entfernter die anregende Frequenz von der Resonanzfrequenz ist, desto weniger ausgeprägt ist das resultierende Schwingverhalten. Das anregende Signal (Spaltspannungssprung) ist unbeeinflußt von der Kapazitätsänderung des Spaltes. Die Resonanzfrequenz hingegen verkleinert sich mit zunehmender Kapazität C_S. Daraus folgt die geringere Amplitude der resultierenden Schwingung und ein Ausschwingvorgang mit niederer Frequenz, wie in Bild 5-11 dargestellt.

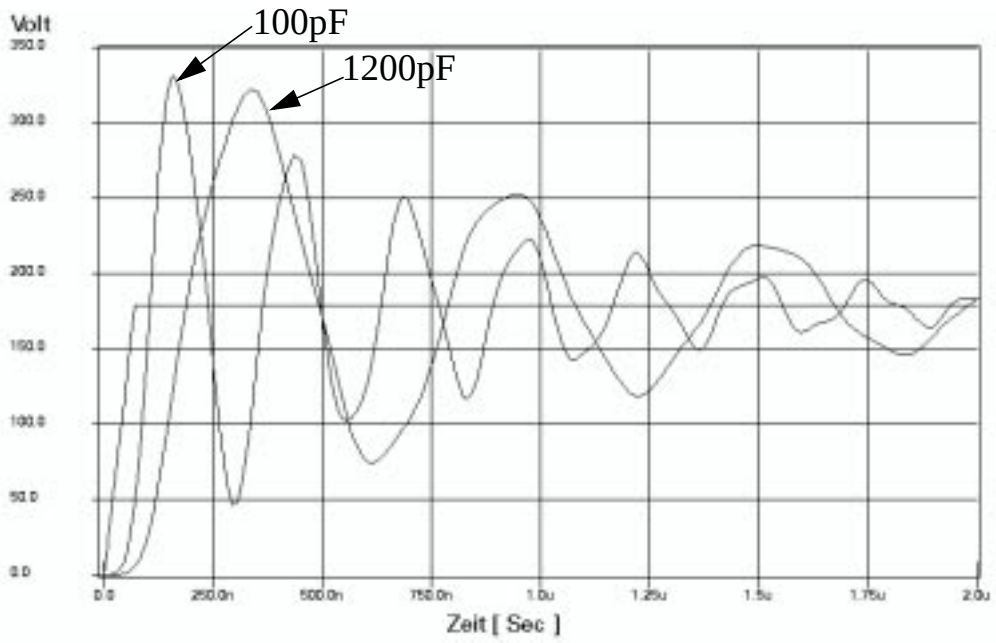


Bild 5-11: Variation der Spaltkapazität C_S

Die aufgezeigte Schwingungsfähigkeit wurde auch an anderer Stelle nachgewiesen. [Fuh85]. Die Betrachtung der Schwingungen im Entladekreis beinhaltet dort sowohl die Schaltkreiselemente des „äußeren“ Stromkreises als auch die aus der Entladestrecke resultierenden Schwingungsquellen. Ziel dieser Untersuchung war die Ermittlung eines „Funkenwiderstandes“, der für die gesamte Entladung Gültigkeit besitzt. Im Gegensatz zu der Erörterung des Problems in [Fuh85] wird die Spaltspannung in vorliegender Arbeit am Beginn der eigentlichen Entladung, präziser vor und während der Zündphase, hinsichtlich des Oberwellengehaltes analysiert. Wie in der Simulation dargestellt, haben die spaltspezifischen Größen R_S und C_S bestimmenden Einfluß auf das Antwortverhalten des Schwingkreises. Unter der aus physikalischer Sicht korrekten Annahme, daß R_S mit der Zündwilligkeit bzw. mit der Prozeßverschlechterung korreliert, kann aus der Sprungantwort auf den Zustand des Funkenspaltes geschlossen werden.

Abschließend sei noch bemerkt, daß zur Simulation eine Spannungsquelle verwandt wurde, die einen Spannungssprung in Höhe der Zündspannung erzeugt. Dies ist mit der

Tatsache zu rechtfertigen, daß die reale Prozeßstromquelle ebenfalls zunächst als Spannungsquelle wirkt, da der eingestellte Arbeitsstrom erst nach der Zündverzögerungszeit fließen kann.

5.3. Prozeßentartungen infolge fehlerhafter Energieübertragung

Die frühzeitige Erkennung von Spaltkurzschlüssen und Lichtbögen ist eine kardinale Voraussetzung für eine sichere Funktionsweise einer FE-Senkanlage. Je zuverlässiger die Lichtbogen- und Kurzschlußerkennung funktioniert, desto abtragsintensiver kann erodiert werden. Technisch stellt die Lichtbogenerkennung ein erhebliches Problem dar, da sich nahezu alle Parameter des Abtragsprozesses abhängig von der Bearbeitungsaufgabe ständig ändern. Aufgrund der zentralen Rolle der Lichtbogenerkennung, sollen im folgenden Kapitel zunächst die Ursache und Wirkung von Prozeßentartungen dargestellt werden, um dann die wichtigsten bekannten und neuartigen Methoden im Überblick vorzustellen.

5.3.1. Ursache und Wirkung von Prozeßentartungen

Aus der physikalischen Betrachtung des Abtragsprozesses in Kapitel 4.1 ist die Definition von Fehlentladungen für die funkenerosive Anwendung nicht direkt möglich. Prinzipiell basiert jede Funkenentladung, auch die lichtbogenartige, auf den beschriebenen Gesetzen der Gasentladungen, ergänzt um die Besonderheiten der Zündmechanismen im flüssigen Dielektrikum. Da es in der FE-Anwendung nicht eine definierte Entladeform gibt, wird eine eindeutige Charakterisierung von Fehlentladungen zusätzlich erschwert. Die Entladungen zeigen abhängig vom eingesetzten Werkstoff und Elektrodenmaterial, von der Höhe der Größen Arbeitsstrom und Zündspannung und der Bearbeitungsgeometrie zum Teil stark unterschiedliche Ausprägungen. So entstehen bei der Graphiterosion im Schruppbereich keine oder äußerst kurze Zündverzögerungszeiten. Bei der gleichen Einstellung mit Kupferelektroden sind jedoch eine erhebliche Zündverzögerungszeiten zu beobachten. Die Paarung Graphit-Stahl zeigt auch erheblich größere Abhängigkeit der Brennspannung vom Arbeitsstrom. Insgesamt folgt für die Funkenerosion, daß es nicht die „charakteristische Entladung“ gibt, sondern eine Vielzahl von Entladungsformen, die sämtlich positiv zum Abtrag beitragen. Die Ausprägungen der Entladungen unterscheiden sich in der Dauer der Zündverzögerungen, der Höhe der Zündspannungen, der Abtragsleistung, des Verschleißes und der Höhe und Welligkeit der Brennspannungen. Einzig die beobachtbare Wirkung von Fehlentladungen ist immer dieselbe. Das Werkstück wird lokal überhitzt, was zur Ausscheidung von Kohlenstoff aus dem umgebenden Dielektrikum führt. Werkzeug und Werkstück werden dabei an den überhitzten Stellen durch Kohlenstoffauftrag stark in Mitleidenschaft gezogen, d.h. es kommt zu lokalen Oberflächenbeschädigungen. In letzter Konsequenz kommt der Erodierprozeß zum Erliegen und es findet kein Abtrag mehr statt. Die Entwicklung von dem Stadium einzelner Fehlentladungen bis zum kontinuierlichen Auftreten von Fehlentladungen in Folge geschieht in Etappen. In zahlreichen Versuchen wurde beobachtet, daß einzelne als Lichtbögen erkannte Entladungen keinen Einfluß auf die globale Prozeßstabilität haben. Erst längere Folgen von Fehlentladungen, ab z.B. 4

Lichtbögen, weisen auf eine ernstzunehmende Gefahr für den Prozeßverlauf hin. Derartige Folgen führen sehr schnell zu niederohmigen Brückenbildungen zwischen den Elektroden und damit zum Kurzschluß. Wird der Prozeß nicht abgebrochen, so können sich daraus sogenannte "stehende Lichtbögen" mit massivem Kohlenstoffauftrag entwickeln [Rau84]. Ziel der Lichtbogenerkennung muß es deshalb sein, frühzeitig und sehr präzise zwischen Einzellichtbögen und Folgen von Lichtbögen unter allen möglichen Erodierbedingungen zu unterscheiden.

Im Gegensatz zur Isolationstechnik ([Kin82] [Hol67]) benötigt die Funkenerosion ein begrenzt isolierendes Dielektrikum, damit der gewünschte Abtragsprozeß überhaupt zustande kommt [Kla82]. Damit stellt sich die Frage, wie sich der Zustand des Dielektrikums stets so steuern läßt, daß dessen Isolationseigenschaft gerade ausreicht, während der Impulspausendauer zu einer Mindestisolation im Funkenspalt zu gelangen, damit für die Folgenentladung keine bevorzugte Entladestelle entsteht. Die Erholzeit zur Deionisierung ist dabei als die Zeit zu sehen, während der kein Energieeintrag in den Funkenspalt erfolgt. Darunter fallen die Impulspausen, Bewegungsspülzyklen mit Prozeßunterbrechung oder Zwangspausen. Die notwendigen Erholzeiten hängen ab von

- der vorangegangenen Brenndauer, die unmittelbar die Summe der Abtragspartikel, Gasblasen und die Erhitzung des Spaltsystems bedingt,
- der Höhe des Arbeitsstromes, der ebenfalls die Verunreinigung bzw. die Anhäufung von Gasblasen und Erhitzung des Arbeitsspaltes festlegt und
- der Größe der Elektrodenfläche und den geometrischen Spülbedingungen,
- der Höhe der Zündspannung, die sich auf die Partikelabflußbedingungen auswirkt. Die Zündspannung beeinflußt den für die Zündung notwendigen Spaltabstand und die Elektrodengeometrie legt den Weg des auszutauschenden leitfähigen Dielektrikums und der Gasblasen aus dem Arbeitsspalt fest.

Interessant ist, daß die für Lichtbögen typischen Verkohlungen auf dem Werkstück, auch als "Schatten" bezeichnet, i.d.R. nahezu kreisförmige Gebilde sind. Zudem bilden sich die meist kreisförmigen Schatten bevorzugt dort aus, wo die Spülverhältnisse am schlechtesten sind. Markant z.B. bei zylindrischen Elektroden ist radiale Symmetrie der Verkohlung. Der Grund für diese radiale Symmetrie kann anhand eines einfachen Modells hergeleitet werden. Angenommen, die Schattenbildung oder Verkohlung resultiert aus Partikeln, die nicht abtransportiert werden können und aufgrund der lokalen Überhitzung in das Werkstück einschmelzen, dann stellt sich die Frage, warum diese Schatten nicht auch bei normalen Entladungen auftreten. Zumindest in geringem Umfang müßte die vorherrschende Temperatur ausreichen, einen, wenn auch kleinen, Teil der Partikel auf das Werkstück aufzuschmelzen.

Eine mögliche Erklärung liefert ein Modell, das auf dem Hall-Effekt basiert (E.H. Hall, 1880) [Küp84]. Dabei wird, wie in Bild 5-13 dargestellt, aufgrund der induzierten elektrischen Feldkräfte eine Kraft auf die Partikel ausgeübt, die dem Auseinanderdiffundieren der Partikel entgegenwirkt und immer zum Mittelpunkt der Entladestelle gerichtet ist.

Im Normalfall der örtlichen Überschlagswechsel auf der Werkstückelektrode ist die Resultierende dieser Feldkräfte nicht relevant. Im Sonderfall der Entladungskonzentration hingegen wirkt die resultierende Kraft immer in dasselbe Zentrum. Ergebnis ist die Anhäufung von Partikeln und damit eine zusätzliche lokale erhöhte Zündwilligkeit, was die Lichtbogentendenz weiter steigert.

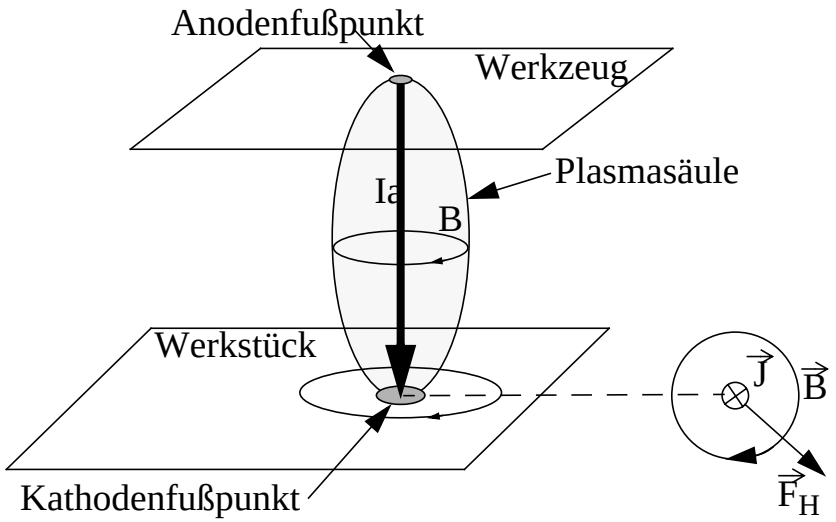


Bild 5-12:
Elektrische Feldkraftwirkung auf Entladungspartikel

Dieses Modell zur Erklärung der Schattenbildung bei der Lichtbogenerosion basiert auf der Wechselwirkung von magnetischen und elektrischen Feldern und deren Wirkung auf geladene Teilchen. Fließt demnach ein elektrischer Strom durch einen ruhenden Leiter, der sich innerhalb eines Magnetfeldes befindet, so resultiert eine elektrische Feldwirkung auf die Ladungsträger. Im kathodenseitigen Fußpunkt der Plasmasäule herrscht aufgrund der Kontraktion eine sehr hohe Stromdichte. Die Ladungsträger, die aufsummiert dem fließenden elektrischen Strom entsprechen, ergeben die Stromdichte J und Halls Feldstärke E_H zu:

$$J = n \cdot e \cdot v \qquad E_H = \frac{1}{n \cdot e} \cdot (\vec{J} \times \vec{B}) \qquad 5.21/12,13$$

Stromdichte J, Anzahl Elektronen n, Elementarladung e, Driftgschw. v und magn. Feldstärke B

Aus den Gleichungen folgt eine Kraft F_H auf Ladungsträger sowohl senkrecht zur Richtung der Stromdichte J als auch senkrecht zum magnetischen Feld B. Die resultierende Kraft wirkt demnach, wie in Bild 5-13 dargestellt, parallel zu den Elektroden. Für sie gilt:

$$F_H = \frac{1}{n} \cdot (\vec{J} \times \vec{B}) \qquad 5.21/14$$

Befindet sich nun ein ionisiertes Teilchen in Nähe des Kathodenfußpunktes, so wird es aufgrund der elektrischen Feldkraft zum Zentrum des Kathodenfußpunktes bewegt. Die radiale Symmetrie folgt zwingend aus der Orientierung von Strom und Magnetfeld (Bild 5-13). Tritt kein Ortswechsel der Entladungen auf, so „wandern“ Abtragspartikel zum Ort des Überschlages, wo aufgrund der ebenfalls durch die Entladungskonzentration entstandenen Temperaturüberhöhung eine Art Aufschmelzvorgang auf die Werkstückoberfläche stattfindet.Im Ergebnis entstehen die bekannten Schatten oder bei anhaltender

Lichtbogenerosion die erhabenen tiefschwarzen Lichtbogengebiete. Eine experimentelle Untersuchung [MaA78] zeigt die erwartungsgemäße Ausbildung von Partikeln auf konzentrischen Kreisen um den Strommittelpunkt. Die Ursache für Lichtbogenbildung als Resultat der beschriebenen Partikelbewegung ist eine Fehleinstellung oder Störung des Zusammenspiels der energietragenden Größen, der zeitlichen Impulsparameter und der im Prozeß verfolgten Spülstrategie. Da die korrekte Einstellung des Ensembles der Prozeßparameter nicht statisch vorgenommen werden kann, da sich die Randbedingungen während des Prozeßfortschritts ständig ändern, wird immer mit Lichtbögen erodiert.

Abtragswirksame oder „gute“ Entladungen sind i.d.R. dadurch gekennzeichnet, daß eine meßbare Zündverzögerungszeit und eine Brennspannung auf einem „mittleren“ Niveau vorhanden sind. Das Vorhandensein einer Zündverzögerung kann jedoch nach eigenen Erodierversuchen sowie nach [Ott95] bestenfalls als notwendiges, keinesfalls aber als hinreichendes Kriterium für die Klassifikation einer Einzelentladung betrachtet werden.

Die Brennspannung als zweiter Indikator zeigt gewisse signifikante Abweichungen von einem werkstoffabhängigen Mittelwert der Brennspannung. Es konnte allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht mit letzter Sicherheit ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Höhe der Brennspannung und der Zündverzögerungszeit bei vermeintlich lichtbogenartigen Entladungen gefunden werden. Dazu zeigt Bild 5-13 zunächst eine Häufigkeitsverteilung einer Stichprobe gemessener Zündverzögerungszeiten.

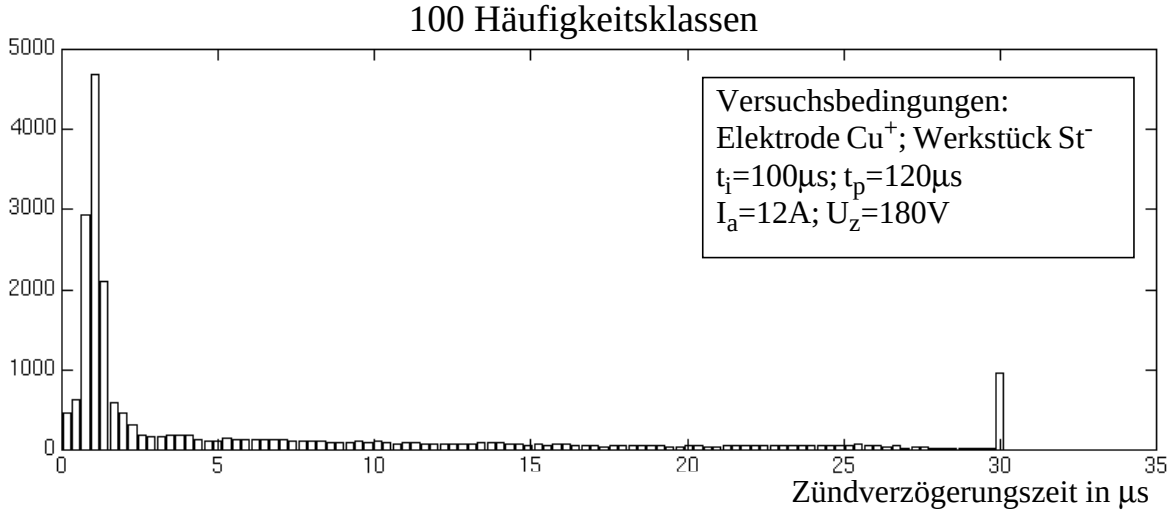


***Bild 5-13*: Histogramm von gemessenen Zündverzögerungszeiten**

Die Ordinate stellt die jeweiligen Häufigkeiten dar. Das Histogramm zeigt, daß die Mehrheit der Entladungen Zündverzögerungszeiten zwischen 2µs und 6µs aufweisen. Bild 5-14 zeigt ein Histogramm aller Brennspannungen für diese Stichprobe. Darin liegen die Brennspannungen der gezündeten Impulse zwischen ca. 17V und 31V. Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Zündverzögerungszeit und Brennspannung sind in Bild 5-15 diejenigen Zündverzögerungen dargestellt, die zu Impulsen mit Brennspan-

nungen zwischen 15V und 20V liegen. Wie bereits erwähnt, können Abweichungen der Brennspannung nach oben oder nach unten von einem materialabhängigen Mittelwert auf einen „schlechten“ Impuls hindeuten. Ferner zeigen schlechte Entladungen i.allg. kurze Zündverzögerungszeiten. So würde man z.B. für weit unter dem Mittelwert liegende Brennspannungen schlechte Impulse vermuten, die ebenso kurze Zündverzögerungen aufweisen müßten. Dieser naheliegende Zusammenhang kann nicht bestätigt werden. Zur Analyse dient Bild 5-15 mit denjenigen Zündverzögerungen, deren Brennspannungen unter 20V liegen. Die Zündverzögerungen sind dort auch in 100 Häufigkeitsklassen unterteilt. Der Vergleich von Bild 5-14 und 5-16 zeigt, daß die Verteilung der Häufigkeiten sehr ähnlich ist.

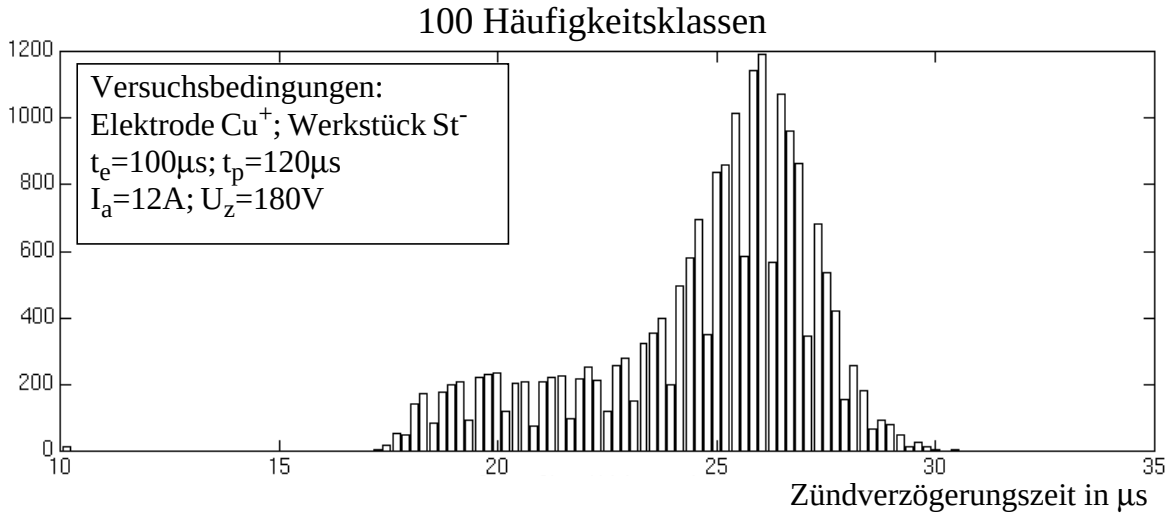


Bild 5 -14*: Histogramm der gemessenen Brennspannungen zu den Entladungen aus *Bild 5-13

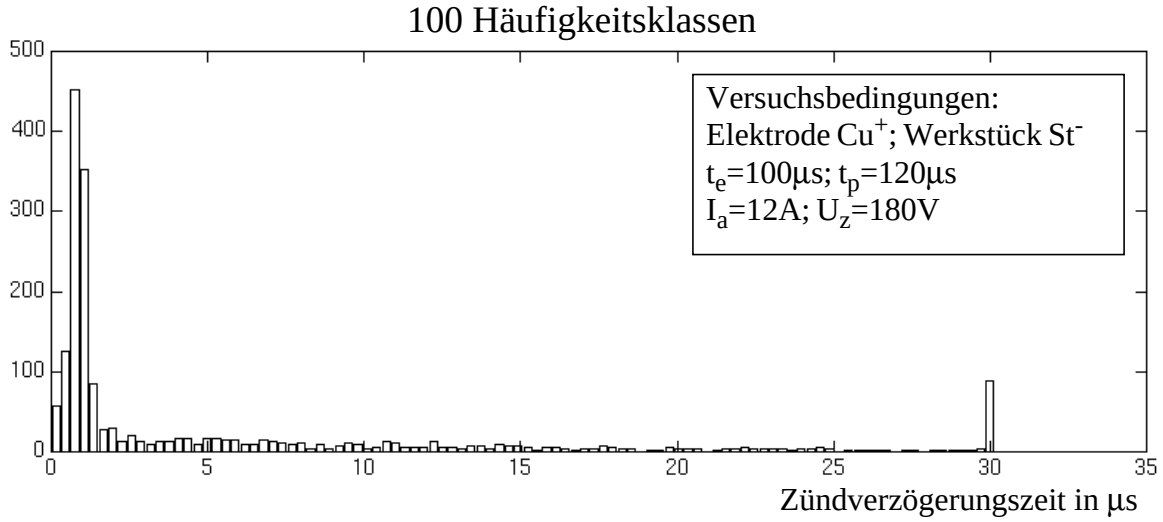


***Bild 5 -15*: Zündspannungen für den Bereich von 15V-20V des Histogramms aus Bild 5-13**

Diese sehr ähnlichen Verteilungen bedeuten, daß die Länge der Zündverzögerungszeiten von Entladungen **nicht** mit den signifikanten Abweichungen der Brennspannungen die-

ser Entladungen von einem Brennspannungsmittelwert korreliert sind. D.h. zwischen der Zündverzögerung und der Brennspannung besteht bezüglich der Lichtbogentendenz einer Entladung kein Zusammenhang.

5.3.2. Methoden zur Erkennung und Vermeidung von Prozeßentartungen

Die Vielzahl der Ausprägungen von Funkentladungen erschweren die Charakterisierung der Einzelentladung. Entsprechend in erheblichem Maße variierenden Entladeparameter existieren eine große Zahl von verschiedenen Verfahren zur Erkennung von Fehlentladungen. In diesem Kapitel sollen die wichtigsten industriell eingesetzten Verfahren im Überblick dargestellt werden.

Die Einteilung der Verfahren zur Detektion von Lichtbögen kann sich an der zeitlichen Entwicklung einer Entladung orientieren. Dabei sind der eigentliche Messzeitpunkt, die Meßzeitspanne und die Reaktionszeit zu unterscheiden. Idealerweise sollte der Meßzeitpunkt mit der Entscheidung, ob eine lichtbogenartige Entladung vorliegt oder wahrscheinlich ist, so gelegt werden, daß gegebenenfalls frühzeitig abgeschaltet werden kann. Die Verfahren zur Lichtbogenerkennung können in drei auf die Entladephasen bezogene Kategorien eingeteilt werden:

I. Pausenorientierte Verfahren
II. Zündphasenorientierte Verfahren
III. Brennphasenorientierte Verfahren

I.<u>Pausenorientierte Verfahren</u>

Die Impulspause, die jeder erneuten Zündung vorangeht, ist sehr gut dazu geeignet, die Isolationsfähigkeit des Dielektrikums festzustellen, um den Impulsbeginn in Abhängigkeit der Isolation variabel festzulegen. Es existiert eine Reihe von Verfahren, die im wesentlichen auf der Messung von Prozeßgrößen basieren, die Leitfähigkeit bzw. die Zündwilligkeit des Dielektrikums beschreiben [DEP81], [Sno77], [Peu81], [WOB92]. Dabei steht das meßtechnische Problem der Bestimmung der korrekten elektrischen Leitfähigkeit, da die elektrische Leitfähigkeit, die „von außen“ zwischen den Elektroden gemessen wird, nicht mit der für den Funkendurchschlag verantwortlichen Leitfähigkeit übereinstimmen muß. Ein einfaches Beispiel ist ein Modell des stark verschmutzten Spaltes, das im elektrischen Ersatzschaltbild eine große Anzahl paralleler Widerstände vorsieht. Dort würde man aufgrund der Parallelschaltung eine sehr hohe Leitfähigkeit konstatieren. Würde man einen Funkenspalt vermessen, der einige wenige hochohmige Kurzschlußbrücken enthält, die eventuell das Ergebnis von zuvor stattgefundenen lichtbogenartigen Entladungen sind, ergäbe sich insgesamt ein niederer Leitwert. Der niedrigere Leitwert würde vorteilhafteren Erodierbedingungen entsprechen. Tatsächlich aber führt der vermeintlich günstigere Funkenspalt mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer nicht mehr beherrschbaren Prozeßinstabilität, wohingegen der vermeintlich schlechte Funkenspalt einen abtragsintensiven Prozeß begünstigt.

Dieses Beispiel macht deutlich, daß die statische Leitwertmessung in der Impulspause nicht geeignet ist, Aussagen auf die zu erwartende Prozeßstabilität zu machen. Eine Verbesserung liegt in der Meßtechnik, die mit Testimpulsen arbeitet [DEP81]. Eine Bewertung der Zündwilligkeit des Dielektrikums anhand der Mikroimpulse liefert im Mittel einen Anhaltspunkt über die tatsächliche Isolationsfähigkeit des Dielektrikums. Die Energieeinspeisung während der Pausendauern beinhaltet natürlich das Problem, daß die Pausen länger gemacht werden müssen, damit der Spalt insgesamt genügend Zeit hat zu deinonisieren. Die zur Arbeitspolung entgegengesetzte Polung der Testimpulsspannung könnte sich dabei vorteilhaft auswirken.

II.Zündphasenorientierte Verfahren

Die während dieser Phase wirksamen Verfahren zur Lichtbogendetektion sind sehr verbreitet. Zur Gewinnung von Beurteilungsgrößen wird die zeitliche Entwicklung der Spaltspannung ausgewertet. Hierbei werden während der Zündphase diverse Flanken der sich rasch ändernden Spaltspannung, zeitliche Bewertungen und neuerdings schwingungstechnische Analysen vorgenommen [DEP82b] [EPA83], [DEP85, [Slo93].

Diese Verfahren messen die Spaltspannung während der Zündphase und leiten aus deren zeitlicher Entwicklung Aussagen über die folgende Entladung und über den Prozeßverlauf ab. Hierbei werden Auswertungen der Zündverzögerungszeit, der Steilheit der Spannungsflanke zu Beginn des Spannungsimpulses und deren Abfall vom Zündspannungsniveau auf Brennspannungsniveau verwandt [Dau85]. Dabei deuten eine kurze Zündverzögerung oder entsprechend steile Flanken der Spaltspannung auf lichtbogenartige Impulse hin. Meist werden diese Verfahren mit Kettenzählern oder Mittelwertbildnern kombiniert, um daraus Aussagen über die globale Prozeßstabilität zu gewinnen. Basierend auf der Auswertung der Zündverzögerungszeit als wesentlicher Stabilitätsindikator entstanden zahlreiche Verfahren zur Prozeßbeurteilung [Kru79], [Dau85], [Slo89], [Deh92], [Ode95]. Diese Verfahren messen die Zündverzögerungszeit und versuchen, über statistische Methoden der Mittelwertbildung, Häufigkeitsverteilung oder Korrelationsanalysen Aussagen über den Prozeßzustand zu gewinnen [WeD92].

Ein weiterer Ansatz zur Auswertung der Spaltspannung in der Zündphase ist die Bewertung der Höhe der Zündspannung. Dabei wird die gemessene Zündspannung mit einem Mindestwert verglichen und bei Nichterreichen des Mindestwertes der Impuls unterdrückt [DEP82a]. Bezogen auf die Flanken der sogenannten Zündspannung sei ein Ansatz exemplarisch erwähnt [Dau85], der die fallende Spannungsflanke der Zündspannung untersucht. Diese Flanke entspricht der steigenden Stromflanke und kann als Maß für die Zündwilligkeit des Funkenspalts betrachtet werden. Eine derartige Lichtbogendetektion lieferte bei älteren statischen Impulsgeneratoren sicherlich Aufschluß über den Zustand des Funkenspalts. Für neuartige Generatoren, die als aktive Stromquellen ausgeführt sind, versagt diese Art der Lichtbogendetektion, da die Stromflanken gesteuert eingeprägt sind.

III.Brennphasenorientierte Verfahren

Die Brennspannung wird über dem Arbeitsspalt als Summe der Spannungsabfälle über Elektroden und Arbeitsspalt gemessen. Sie ist gekennzeichnet durch ihre Amplitude und ihre Welligkeit. Sie wird oftmals als hochfrequente Anteile „HF-Anteil“ bezeichnet. Als Ursache der über dem Spalt meßbaren Wechselanteile in der Brennspannung kommen die bereits erwähnten Effekte des "umherwandernden" Kathodenfußpunktes, der erlischt und in einem Brennradius wieder zündet, in Frage. Für lichtbogenartige Entladungen kann damit abgeleitet werden, daß die natürliche Bewegung der Plasmasäule für Lichtbögen abnimmt und damit auch die höherfrequenten Anteile in der Brennspannung abnehmen. Einige Voruntersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen wurden, konnten diesen Zusammenhang nicht eindeutig belegen. Zwar zeigte das Spektrum bei vermeintlichen Lichtbögen tendenziell weniger hohe Frequenzanteile, aber ein signifikanter Unterschied zu den im Mittel beobachteten Spektren aller Entladungen war nicht ersichtlich. Erschwerend kommt hinzu, daß die Frequenzanteile in starkem Maße von den eingesetzten Materialien abhängen. So zeigt z.B. die Brennspannung bei Cu^+-Hartmetall einen „glatten“ Verlauf wohingegen Cu^+-Stahl deutlich sichtbare höherfrequente Anteile in der Brennspannung aufweist.

Im Ergebnis zeigten die Untersuchungen, daß der „HF-Anteil“ in der Brennspannung Informationsgehalt beinhaltet, daß aber auf der anderen Seite die Meßtechnik und die Materialpaarungen zu viele Änderungen bewirken, so daß eine globale Zuordnung von HF-Anteilen und eindeutigen Lichtbögen nicht möglich scheint. Für die Amplitude der Brennspannung gilt im Prinzip dasselbe. Offensichtlich existiert für bestimmte Materialpaarungen und Arbeitsströme jeweils eine mittlere Brennspannung, die abtragswirksame Entladungen kennzeichnet. In [HaK64] wird die Brennspannung für sogenannte „kurze Bögen“, deren Brenndauer im Bereich von wenigen µs liegt untersucht. Diese Versuchsergebnisse lassen den Schluß zu, daß lediglich der Abstand der Elektroden für die Ausbildung eines sogenannten Anoden- oder Kathodenbogens verantwortlich ist. Der kritische Elektrodenabstand hängt demnach nicht von der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit der Elektrodenmaterialien ab. Ferner unterscheiden sich die Bogenspannungen (=Brennspannungen) in ihrer Höhe um ca. 4-5V. Mit zunehmender Brenndauer wird der kritische Elektrodenabstand überschritten und Anodenbögen gehen in die für die Funkenerosion günstigen Kathodenbögen über. Zusätzlich weist der Anodenbogen eine stärkere sichtbare Lichtemission und gegenüber dem Kathodenbogen auch einen stabileren Bogenansatzpunkt auf [Fin48]. Der Kathodenbogen wandert auf der Kathode umher, was die Bogenspuren auf der Elektrode belegen. Insgesamt bestehen auch nach eigenen Versuchen signifikante Unterschiede hinsichtlich der Brennspannungen bei unterschiedlichen Arbeitsströmen und Materialien, die sowohl die Welligkeit als auch die Amplitude betreffen.

Die im Rahmen vorliegender Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Lichtbogendetektion und Behandlung zeigten, daß die Detektion und rasche Bekämpfung der lichtbogenartigen Einzelentladung mit einer Strategie verbunden werden muß, die in der Lage ist, Folgen von Lichtbögen gesondert zu behandeln. Ein entwickeltes neuartiges Ver-

fahren, das sowohl auf Einzelentladungen als auch Folgen von Lichtbögen behandelt, ist aufgrund seiner Mehrfachwirkung den pausenorientierten und den zündphasenorientierten Verfahren zuzurechnen.