

IV. FUNKENEROSIVER ABTRAGSPROZESS

4.1. Physikalische Einordnung des funkenerosiven (FE)-Abtragens

Die "klassische Lichtbogenphysik" als Grundlage des Prozeßverständnisses beschäftigt sich vorrangig mit der exakten mathematischen Deutung und Beschreibungen der physikalischen Vorgänge und Mechanismen für stationär brennende Entladungen [Flü56].

Für die funkenerosive Anwendung sind darüber hinaus das Verständnis der Vorgeschichte, d.h. die sogenannte Zündphase, und die Nachwirkung der Entladungen, die sogenannte Deionisierungsphase von besonderem Interesse. Zur Beurteilung der Abtragswirkung werden nicht einzelne Entladungen betrachtet, sondern Serien von sehr vielen aufeinanderfolgenden Entladungen, die sich infolge einer pulsformigen Spannung ausbilden. Analysen einer großen Zahl von Folgeentladungen geben Aufschluß darüber, inwieweit der Erodierprozeß im Mittel abtragsoptimal verläuft. Ziel einer entsprechenden Prozeßführung ist es, dabei möglichst viele Impulse mit abtragender Wirkung zu realisieren und solche ohne Abtrag zu vermeiden. Die Langzeitanalysen unter Berücksichtigung von bis zu 50.000 Entladungen in Folge liefern zwar wertvolle Aussagen für die Prozeßoptimierung, sind aber nicht dazu geeignet, Prozeßentartungen, sogenannte "lichtbogenartige Entladungen", zu erkennen und zu vermeiden. Hierzu müssen einzelne oder wenige aufeinanderfolgende Entladungen analysiert werden.

Diese Analyse führt zwangsweise auf die Frage nach den Zündbedingungen und -mechanismen sowie nach dem Energieumsatz während der Entladung.

4.1.1. Elektrische (Einzel-) Entladung in Gasen

Damit ein elektrischer Strom durch ein Gas fließen kann, bedarf es beweglicher Ladungsträger, wie z.B. freie Elektronen, Ionen oder ionisierte Partikel. Werden diese Ladungsträger, die aufgrund eines äußeren elektrischen Feldes zu den Elektroden wandern, z.B. durch Fremdheizung (Thermoionisation) oder Einstrahlung von Fremdlicht (Photoionisation) im Gasraum ersetzt, so handelt es sich um eine "unselbständige Gasentladung". "Selbständige Gasentladungen" liefern durch den Entladungsprozeß selbst freie Ladungsträger für den elektrischen Stromfluß [WRo49]. Für die abtragende FE sind nur selbständige Gasentladungen relevant, da die Entladungen mittels Ionisierung im sogenannten "Funkenspalt" für Nachschub an Ladungsträgern sorgen. Die Einteilung in stationäre und nichtstationäre Entladungen bezieht sich auf die Zeitdauer der Aufrechterhaltung einer Entladung unter Beibehaltung einer bestimmten Entladungsform. Die Entladungsform wird dabei, wie in Bild 4-1 dargestellt, von den äußeren elektrischen Größen Spannung und Strom bestimmt [Rie67].

Bei selbständigen Entladungen sorgt jeder Ladungsträger auf seinem Weg zur Zielelektrode für seinen Ersatz. Erzeugt jeder Ladungsträger genau einen neuen Ladungsträger, so ist die Gasentladung "stationär". Instationäre Entladungen hören entweder sehr schnell auf oder wachsen an, bis eine stationäre Entladung erreicht ist.

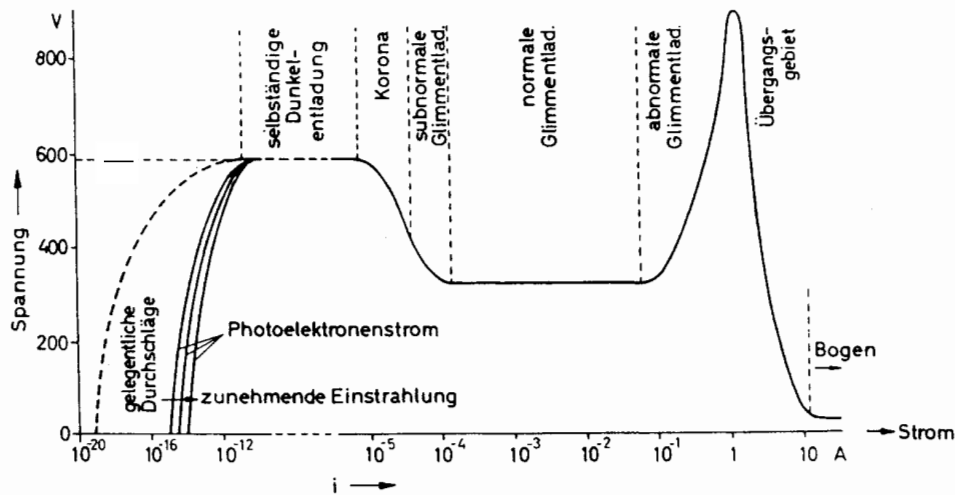


Bild 4-1 Strom- Spannungscharakteristik des gesamten Gasentladungsbereiches nach [Rie67]

4.1.1.1 Bildung von Ladungsträgern im Gasraum

Die Erzeugung von Ladungsträgern in einem Gasraum kann nur durch Ionisierung von neutralen Atomen oder Molekülen erfolgen. Die dafür notwendige Ionisierungsarbeit $W_{io}=eU$ (Elementarladung e , Beschl. Spannung U) ist abhängig von den Bestandteilen des Gases. Sie schwankt von 14,5eV für reinen Stickstoff bis zu 7.7eV für Gas mit Metaldampfanteilen. Die wichtigsten Mechanismen zur Ionisierung von Neutralteilchen in Gasen sind:

- Ionisierung durch Elektronenstoß
- thermische Ionisierung

Für die Stoßionisation ist ein äußeres elektrisches Feld notwendig, das einem im Gasraum vorhandenen Elektron soviel kinetische Energie verleiht, daß es in der Lage ist, ein neutrales Teilchen zu ionisieren. Im Falle der thermischen Ionisation reicht die kinetische Energie nicht aus, die notwendige Ionisierungsarbeit zu leisten. Dort ist allerdings die Temperatur des Gases so hoch, daß die ungeordnete thermische Bewegung der Elektronen einer kinetischen Energie entspricht, die bei Stößen mit neutralen Teilchen zur Ionisierung ausreicht. In zahlreichen Versuchen [Eck61] wurde gezeigt, daß die thermische Ionisation erst bei Elektronentemperaturen oberhalb einiger 1000K nennenswert zur Ladungsträgererzeugung in Gasen beiträgt. Die zur Ionisierung im Gasraum in erster Linie notwendigen Elektronen treten aus der Kathode aus und bewegen sich aufgrund des äußeren elektrischen Feldes in den Gasraum. Die Mechanismen zur Elektronenerzeugung sind die folgenden:

- Thermoemission
- Feldemission
- Thermo-Feld (T-F)- Emission
- Elektronenemission durch Stoß oder durch Lichtquanten (Photoeffekt)

Das Modell der Thermoemission geht von der Vorstellung aus, daß Elektronen in metallischen Festkörpern frei beweglich sind. Diese "freien" Elektronen sind unter normalen Umständen aufgrund eines Potentialwalles nicht in der Lage, den Festkörper zu verlassen. Nach der Modellvorstellung ist es allerdings möglich, ein Elektron über eine Energieschwelle anzuheben, so daß es als freies Elektron den Festkörper verlassen kann. Derjenige energetische Zustand eines Elektrons, der ein Verlassen des Festkörpers ermöglicht, wird als Fermi-Niveau bezeichnet. Innerhalb des Fermi-Niveaus befindliche Elektronen können dann aus dem Metall austreten, wenn eine materialspezifische Austrittsarbeit geleistet wird. Im Fall der Thermoemission verlassen diejenigen Elektronen den Festkörper, deren Wärmeenergie ausreicht, die Austrittsarbeit zu leisten. Wird die Austrittsarbeit mittels eines elektrischen Feldes aufgebracht, das an der Metalloberfläche Feldstärken größer 10^7 V/cm besitzt, so spricht man von Feldemission. In den allermeisten Fällen tritt eine Kombination aus Feld- und Thermoemission auf. Diese T-F-Emission reicht von reiner Thermoemission bei Temperaturen größer 3000K bis zur reinen Feldemission bei 0°K. Die Stoßionisation kann durch positive Ionen, die kurz vor der Kathode stark beschleunigt werden, erfolgen. Die bei dem Stoß umgesetzte Energie trägt allerdings nur zu einem kleinen Teil zur Elektronenemission bei. Der weitaus größte Anteil wird in Wärme umgesetzt. Die Elektronenemission durch Lichtquanten tritt zwar prinzipiell auf, ist aber für die vorliegende Betrachtung im Hinblick auf die Ausbeute an Elektronen zu vernachlässigen.

4.1.1.2 Vorkommende Entladungsformen für Gase

Die für den FE-Abtragsprozeß relevanten Entladungsformen nach Bild 4.1 werden gemeinhin nach ihrer Lichtemission unterschieden. Entsprechend zunehmender Emission können die Entladungsformen in drei Gruppen eingeteilt werden:

- Dunkelentladung
- Glimmentladung
- Bogenentladung (Lichtbogen)

Die Dunkelentladung ist als Vorstufe zu den weitaus energiereicheren anschließenden Entladungsformen zu sehen. Für einen Strom von ca. 10^{-6} A wird ein Elektron in dem vorhandenen elektrischen Feld beschleunigt und erzeugt auf seinem Weg zur Zielelektrode ein oder mehrere Ionenpaare. Die dabei freigesetzten Elektronen erzeugen weitere Ionen und freie Elektronen, so daß sich eine Elektronenlawine in Richtung Anode ausbildet. Die positiven Ionen, die sich langsam zur Kathode bewegen, vermögen dort durch Stoßionisation wiederum freie Elektronen zu erzeugen. Die Elektronenanzahl aufeinanderfolgender Lawinengenerationen wächst so stark an, daß bei fehlender Strombegrenzung ein un stetiger Umschlag, der sogenannte Funkendurchschlag, erfolgt. Die Glimmentladung schließt an die Dunkelentladung an und ist durch einen höheren Stromfluß bei abgesenkter Spannung gekennzeichnet. Typisch für diese Entladungsform ist die Ausbildung von Raumladungen, die zu einer Feldverzerrung und der damit verbundenen Spannungsabsenkung führen. Seinen Namen hat diese Entladungsform vom sichtbaren Glimmen der Schicht vor der Kathode. Die Bogenentladung, auch als Lichtbogen bezeichnet, ist

durch einen signifikanten Spannungsabfall gekennzeichnet. Diese Entladungsform tritt bei einem Strom ab ca. 1 A auf. Dabei sind extrem hohe Stromdichten vor der Kathode zu beobachten. Der Lichtbogen oder einfach Bogen erscheint vor der Kathode stark kontrahiert. In Bild 4-2 ist die der Bogenentladung zugrundeliegende Modellvorstellung der Entladungsstrecke für die Bogenentladung dargestellt [KMV84]. Diese Modellvorstellung unterteilt das Gebiet zwischen den Entladungselektroden in drei räumlich getrennte Entladungsgebiete. Im mittleren Teil, der Bogensäule, ist die Feldstärke gering. In Richtung der Elektroden schließen sich an die Bogensäule die Übergangszonen, der sogenannte Kathoden- und Anodenfall an. In diesen Fallgebieten vor den Elektroden erreichen die Feldstärken höhere Werte, die Temperatur ist geringer und die Stromdichten sind insbesondere im Kathodenfall um Größenordnungen höher. Der Anodenfall spielt bei Bogenentladungen in Gasen i.allg. eine untergeordnete Rolle. Unmittelbar vor der Elektrode fließt ein nahezu reiner Elektronenstrom, der eine negative Raumladung hervorruft, die wiederum einen Spannungsabfall, den sogenannten Anodenfall, bewirkt. Die Anode selbst wird durch die kinetische Energie der Elektronen aufgeheizt. Zusätzliche Aufheizung resultiert aus der Energiezufuhr durch Wärmestrahlung und Wärmeleitung der Bogensäule. Das Anodenfallgebiet realisiert den Übergang von der heißen Bogensäule zur wesentlich kühleren Anode, erzeugt positive Ionen und wandelt die gerichtete kinetische Energie von negativen Ionen in ungeordnete thermische Energie um.

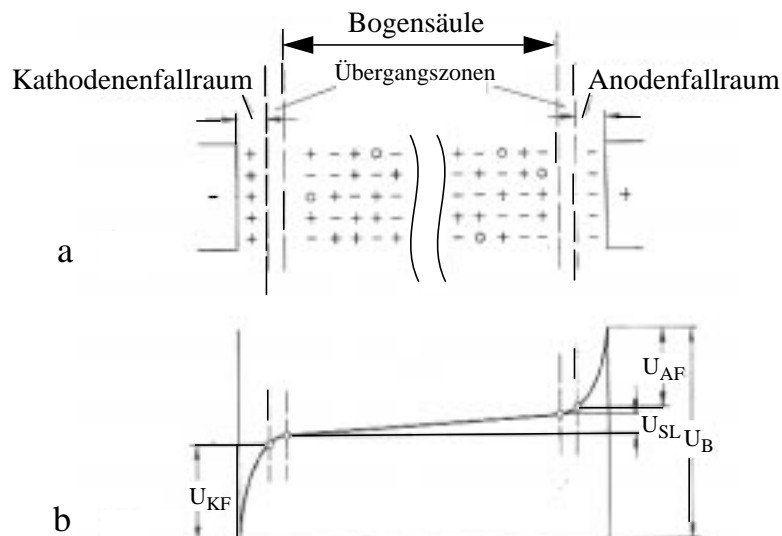


Bild 4-2 Schematischer Aufbau einer Funkenentladung; a. Modellvorstellung der Entladegebiete. b. Potentialverlauf zwischen den Elektroden einer Funkenentladung; U_B Bogenspannung, U_{SL} Säulenspannung, U_{AF} Anodenfall, U_{KF} Kathodenfall

Der Kathodenfall ist durch extrem hohe Stromdichten von 10^4 bis 10^5 A/cm² gekennzeichnet. Diese Stromdichten sind weder durch reine Thermoelektronenemission noch durch Feldemission zu erklären [Eck61]. Dagegen spricht im ersten Fall die niedrige Temperatur der Siedepunkte der eingesetzten Elektrodenwerkstoffe. Im zweiten Fall sind die mittels Feldemission erreichbaren Stromdichten kleiner als die tatsächlich vorhandenen. Nach [Eck61] wird der allergrößte Teil der Elektronen durch thermische Io-

nisation des Plasmas im Kontraktionsgebiet unmittelbar vor der Kathode erzeugt. Aus diesem Gebiet strömen die Elektronen zur Bogensäule und die gleichzeitig neu erzeugten Ionen zusammen mit den Ionen aus der Bogensäule zur Kathode. Vor der Kathode bildet sich ein sogenannter Brennfleck hoher Leuchtdichte aus, der das kathodenseitige Ende der quasi-neutralen Bogensäule markiert. Zwischen Brennfleck und Elektrodenoberfläche liegt ein Raumladungsgebiet, das durch extrem steil abfallende Temperatur und Spannung geprägt ist. Die Bogensäule kann in erster Näherung als im thermischen Gleichgewicht befindliches quasi neutrales Plasma angesehen werden. Als Plasma wird in diesem Zusammenhang ein elektrisch leitfähiges heißes Gas bezeichnet, das aus Molekülen, Atomen, Molekül- und Atomionen in allen Anregungszuständen sowie freien Elektronen besteht.

Die Temperatur der Bogensäule und damit die Dichte der Ladungsträger fällt zu den Rändern, d.h. in axialer Richtung, stark ab. Dies bewirkt eine Verengung der Säule an den elektrodenseitigen Fußpunkten. Da es sich bei der Bogensäule prinzipiell um einen stromdurchflossenen Leiter endlicher Abmessung handelt, kommt es zu einer eigenmagnetischen Kompression, dem sogenannten "Pinch-Effekt". Diese Erscheinung beruht darauf, daß der Strom ein Magnetfeld erzeugt, dessen Kraftlinien die Ladungsträger gegen die Zylinderachse der Bogensäule bewegen. Dadurch wird das Plasma komprimiert, bis der radiale gaskinetische Druckgradient dem magnetischen Druck das Gleichgewicht hält. Die Querschnittsänderung an den elektrodenseitigen Fußpunkten bewirkt dabei auch ein axiales Druckgefälle mit entsprechender axialer Plasmaströmung. Dabei wird das abströmende Plasma durch Gas ersetzt, das aus der Umgebung angesaugt wird. Da das angesaugte Gas erhitzt und ionisiert werden muß, wird dem Kontraktionsgebiet nochmals Energie entzogen, was zu einer noch stärkeren Kontraktion mit entsprechender Temperaturerhöhung führt. Das Phänomen der axialen Plasmaströmung äußert sich in sogenannten Plasmastrahlen, die meist senkrecht auf den Elektroden stehen, von denen sie ausgehen. Liegen die Elektroden in einer Achse, wie im Falle des FE-Senkens, so bilden sich "Plasmateller". Das sind Gebiete, in denen sich die von den beiden Elektroden ausgehenden Plasmastrahlen treffen. Die räumliche Ausdehnung von Plasmastrahlen hängt vom Elektrodenwerkstoff und dem während der Entladung fließenden Strom ab. Sie wirken nicht nur auf die Bogensäule selbst in Form der Kontraktion, sondern beeinflussen auch das Abbrandverhalten und das sogenannte Löschverhalten von Bogenentladungen zur Erreichung der elektrischen Festigkeit vor einem erneuten Zünden. So können Plasmastrahlen bei entsprechender Strahlrichtung, die aus dem Kanal herausweisen muß, zur Deionisierung beitragen.

4.1.2. Besonderheiten der funkenerosiv genutzten Entladungen

Die Besonderheiten elektrischer Entladungen, wie sie für die funkenerosive Metallbearbeitung benutzt werden, resultieren aus der spezifischen Anforderung, durch Entladungen einen definierten Abtrag auf einem Werkstück zu erzielen. Die Entladungen finden in einem Dielektrikum, meist flüssige Kohlenwasserstoffverbindungen, statt. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Gasentladungen, die nach einer Zündphase möglichst

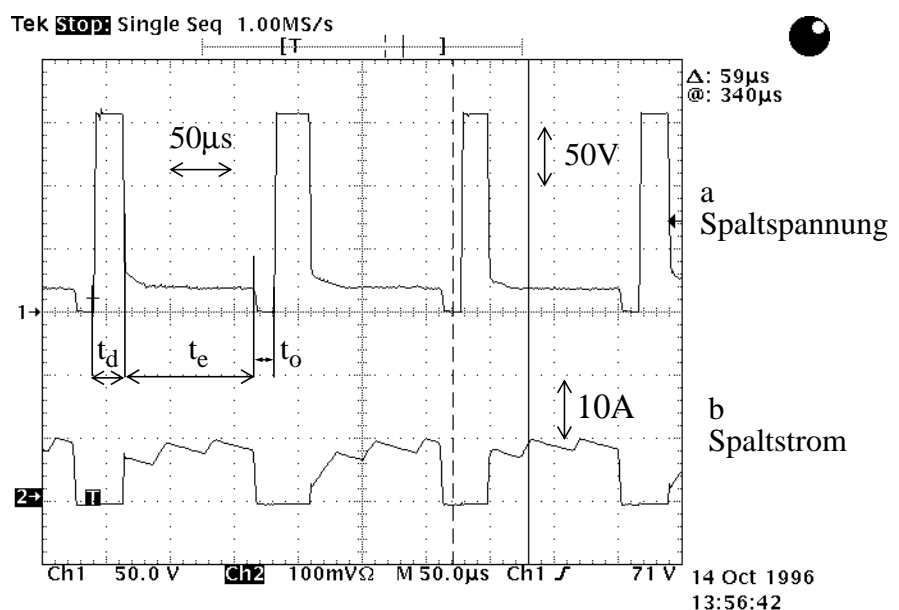
gleichmäßig brennen müssen, wird mittels gesteuerter Spannungs- / Stromimpulse ein energiereicher Funke erzeugt, der kurzzeitig Elektrodenmaterial aufschmilzt. Das entsprechend der eingebrachten Entladungsenergie aufgeschmolzene Werkstückmaterial tritt aufgrund des Druckgefälles im Funkenspalt nach dem Abschalten der Energiezufuhr in den Arbeitsspalt ein und erstarrt. Eine weitere Besonderheit liegt in der Wahl der Elektrodenwerkstoffe und deren Polung begründet. So wird die Werkzeugelektrode im Normalfall positiv gepolt und ist entweder aus Kupfer oder Graphit. Das zu bearbeitende Werkstück ist negativ gepolt und ist je nach Verwendungszweck aus Stahl oder einer Stahllegierung hergestellt. Die FE-Bearbeitung erfolgt immer in einem nichtleitenden flüssigen Isolator, der insbesondere die Konzentration der Entladeenergie überhaupt erst in der notwendigen Art und Weise ermöglicht.

4.1.2.1 Energietragende Größen des FE-Abtragens

Die Erzielung eines definierten Abtrags setzt die Beeinflussung der bestimmenden Energiegrößen voraus. So führen sehr viele Entladungen verteilt über eine Fläche schließlich zu einem Abtragsvolumen auf dem Werkstück (gewünschter Volumenabtrag) und auf dem Werkzeug (unerwünschter Elektrodenverschleiß). Zusätzlich ist die Oberflächenrauigkeit des Werkstückes nach der FE-Bearbeitung eine Bearbeitungszielgröße. Die abtragswirksame Brenndauer t_e im Zusammenspiel mit der Amplitude des Arbeitsstromes legt im wesentlichen die Arbeitsgeschwindigkeit, d.h. die Eindringgeschwindigkeit der Elektrode in das Werkstück fest. Die Spannungs- und Stromimpulse, wie in Bild 4-3 dargestellt, sind durch folgende zeitlichen Parameter charakterisiert:

- t_e : Brenndauer, d.h. die eigentliche Entladedauer
- t_o : Pausendauer, die zwischen den Impulsen vergeht
- t_d : Zündverzögerungszeit zwischen Anlegen der Spannung und Durchzünden

Bild 4-3
Typischer Verlauf der Spaltspannung und des Arbeitsstromes während der FE-Bearbeitung; a) impulsförmige Spaltspannung b) dazugehöriger Spaltstrom mit charakteristischem Regelverlauf des Arbeitsstromes

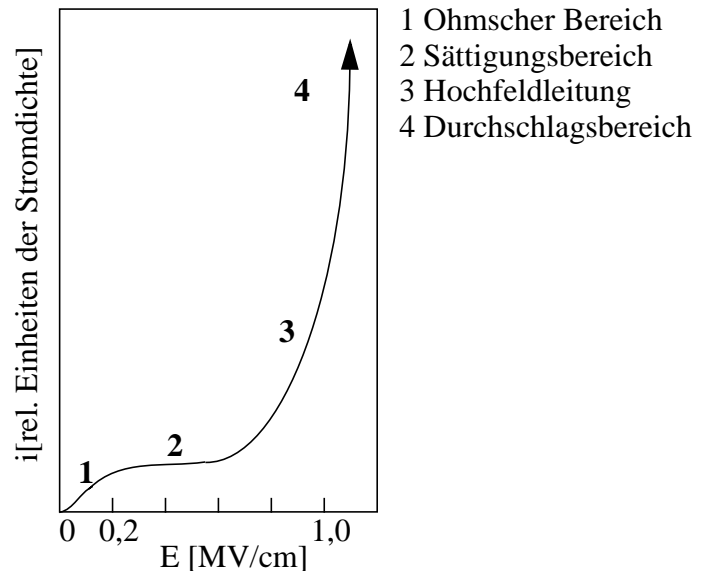


4.1.2.2 Dielektrikum in der Funkenerosion

Während der FE Entladung wird der mit Dielektrikum ausgefüllte Funkenspalt leitfähig, so daß ein Stromfluß zwischen den Elektroden durch den Arbeitsspalt möglich wird. Der eigentlichen Bogenentladung mit den Effekten des Aufschmelzens von Elektrodenmaterial an den Fußpunkten der Bogensäule geht eine Phase voraus während der das Dielektrikum in einen leitfähigen Zustand überführt werden muß. In Bild 4-4 ist dazu ein typischer Verlauf einer Stromdichte-Feldstärkecharakteristik von flüssigen Kohlenwasserstoffen dargestellt.

Bild 4-4

Typischer Verlauf der Stromdichte-Feldstärkecharakteristik von flüssigen Kohlenwasserstoffen nach [Gal75]



Dieser Verlauf, kann aufgrund der großen Änderung des Stromes nur gebietsweise experimentell untersucht werden. Er bildet die Grundlage verschiedener Modelle zur Erklärung der elektrischen Leitfähigkeit und des elektrischen Durchschlages in Isolierflüssigkeiten.

- a) Ohmscher Bereich und Sättigungsbereich
- b) Elektrische Leitfähigkeit bei hoher Feldstärke
- c) Elektrischer Durchschlagsbereich

a) Ohmscher Bereich und Sättigungsbereich (Bereiche 1+2)

Diese Bereiche treten in der FE-Anwendung nicht stationär auf, da an den mit Dielektrikum gefüllten Arbeitsspalt entweder eine hohe Spannung angelegt wird, die meist zum Durchschlag führt, oder während der Impulspausen überhaupt keine Spannung anliegt. Die Impulspausen dienen dabei der Regeneration des Arbeitsspalt zur Wiedererlangung einer lokalen genügend hohen elektrischen Durchschlagsfestigkeit. Da sich die energietragenden Größen stetig ändern, wird bei jeder Impulsperiode im Prinzip der ohmsche Bereich für sehr kurze Zeit durchlaufen. Interessant kann dieser Strom für die Beurteilung der Isolationsfähigkeit des Dielektrikums sein. Damit ist es möglich, mittels in der Stromstärke stark begrenzter Impulse vor dem eigentlichen Abtragsimpuls sogenannte Testimpulse zu erzeugen, die Aufschluß über den aktuellen Widerstandswert des Funkenspalt geben [DEP81]. Eine Erhöhung der Spannung führt in eine Sättigung des Stromtransportes. Dabei werden pro Zeiteinheit genausoviele Ladungsträger neu er-

zeugt, wie an den Elektroden neutralisiert. Im Falle des Dielektrikums in der FE-Anwendung erfolgt der Ladungstransport in erster Linie durch Ionen.

b) Elektrische Leitfähigkeit bei hoher Feldstärke

Eine Erhöhung der Spannung über den Sättigungsbereich hinaus ergibt eine Strom-Spannungscharakteristik ähnlich einer in Durchlaßrichtung betriebenen Diode. Das bedeutet quasi exponentiellen Stromanstieg nach Überschreiten der Durchlaßspannung. Während dieser Phase läuft die Plasmakanalbildung ab. Hier findet auch der maßgebliche Werkzeugverschleiß statt. Zu den Mechanismen, die zu der Bereitstellung der für den steilen Stromanstieg notwendigen Ladungsträger sorgen, existieren verschiedene Theorien, die folgende Tabelle 4-1 wiedergibt.

CHARAKTERISTIKA	BLASENTHEORIE	ELEKTRONEN-LAWINEN-THEORIE	PARTIKELTHEORIE
Elektrische Leitfähigkeit	ionische Ladungsträger	ionische Ladungsträger	ionische Ladungsträger, Partikel
Ladungsträgererzeugung	Feldionisation, Feldemission	Feldionisation, Feldemission	aufgeladene Partikel
Ladungsträgervermehrung	Stoßionisationsprozesse in den Gasblasen	Stoßionisationsprozesse in der Flüssigkeit	Brückenbildung durch den Einfluß des elektrischen Feldes
elektrischer Durchschlag	versteckter Gasdurchschlag	Flüssigkeitsdurchschlag	über die Partikelbrücke

Tabelle 4-1: Theorien für das Durchschlagsverhalten von Isolierflüssigkeiten

Elektronenlawinen-Theorie

Die Vervielfachung der Ladungsträger, die ein exponentielles Anwachsen des Stromes bedingt, basiert auf der Annahme, daß die Elektronen im flüssigen Kohlewasserstoff, dem Dielektrikum, so beschleunigt werden, daß ihre aus dem beschleunigenden Feld resultierende Ionisierungsarbeit ausreicht, ihrerseits Kohlenwasserstoffmoleküle zu ionisieren. Dieser Stoßionisationsprozeß würde eine lawinenartig anwachsende Zahl von Elektronen produzieren. Aus dem Energieerhaltungssatz kann dazu die folgende Gleichung abgeleitet werden:

$$e E \lambda = k_1 h \nu$$

e: Elementarladung; E: Elektr. Feldstärke; λ: mittlere freie Weglänge der Elektroden in der Flüssigkeit; k₁: Konstante; hν: Energiequant, das durch Elektronenstoß an ein Flüssigkeitsmolekül übertragen wird.

Aus obiger Gleichung folgt die Bedingung zur Entwicklung einer Elektronenlawine. Sie besagt, daß die im elektrischen Feld aufgenommene Ionisierungsarbeit so groß sein muß, daß bei der folgenden Stoßionisation mindestens zwei oder mehr neue Elektronen frei werden. Hierzu muß bemerkt werden, daß die Lawinentheorie in flüssigen Kohlenwasserstoffen nur bedingt gültig ist, da die mittlere freie Weglänge der Elektronen im allgemeinen zu kurz ist, um genügend Energie zur Ionisierung der Flüssigkeitsmoleküle aufzunehmen. In Anbetracht der zentralen Bedeutung des Durchschlagmechanismus

sei an dieser Stelle auf den Sachverhalt in Isoliergasen hingewiesen. Dort kann der Durchschlag in Abhängigkeit von Druck, Elektrodenabstand und Homogenitätsgrad des elektrischen Feldes durch den sogenannten Townsend-Mechanismus oder dem Streamer Mechanismus erklärt werden. Basis für den nach Townsend benannten Generationsmechanismus sind freie Elektronen im Isoliergas, die im elektrischen Feld zwischen zwei Elektroden beschleunigt werden und dabei Energie aufnehmen. Ein solches Elektron, dessen mittlere freie Weglänge proportional zu $1/p$ (p : Gasdruck) ist, führt auf seinem Weg Stoßprozesse mit neutralen Gasmolekülen durch. Für den Fall, daß die aufgenommene Energie größer als die Ionisierungsarbeit ist, kann aus dem Gasmolekül ein Elektron abgelöst werden. Das ausgelöste Elektron wird daraufhin ebenfalls beschleunigt und kann seinerseits wieder ein neues Elektron erzeugen. Es kommt zu einem lawinenartigen Anwachsen der Ladungsträger. Verstärkt wird dieser Effekt zusätzlich dadurch, daß das positive Gasion beim Auftreffen auf der Kathode zusätzliche Elektronen aus der Kathodenoberfläche herauslöst und somit das Anwachsen der Elektronenzahl zusätzlich erhöht. Wird der Entladespalt mit ausreichend Energie versorgt, so wachsen die Ladungsträgerlawinen derart an, daß es zum Durchschlag kommt. Neben der Townsend-Theorie existiert die für die FE gleichermaßen relevante Streamer-Theorie, wie in Bild 4-5 dargestellt.

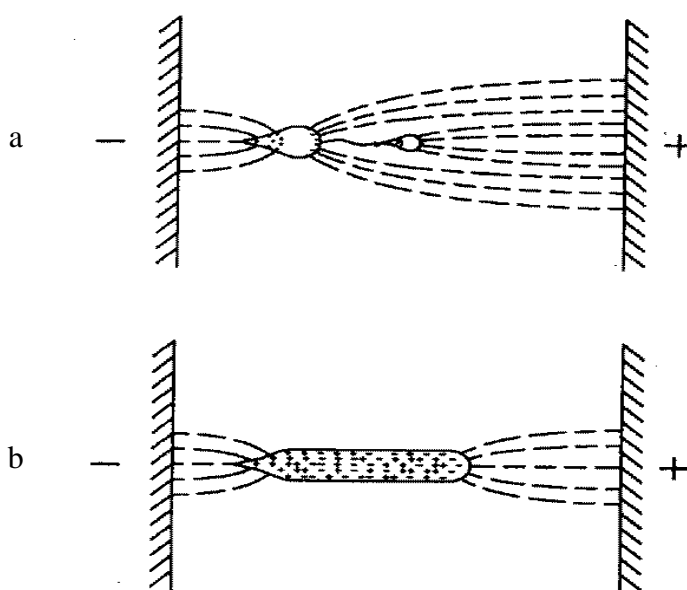


Bild 4-5: Schema des Streamer-Mechanismus (nach Kin82).
a: Sekundärlawinenbildung durch voraus-eilendes Photon in Richtung Anode (+ Pol)
b: Entstehung des Entladekanals mit starken Feldverzerrungen an den elektrodenseitigen Enden

Dabei wird ebenfalls von einem lawinenartigen Anwachsen von Elektronen durch Stoßionisation im Gasraum ausgegangen. Die Elektronenlawine bildet bei diesem Modell sogenannte Streamer, das sind leitende anoden- und kathodengerichtete Kanäle, deren Ausdehnungsgeschwindigkeit ein Vielfaches der Elektronengeschwindigkeit beträgt. Die Elektronenlawinen ionisieren durch Photoionisation an ihrem anodenseitigen Kopf sehr viele Gasmoleküle. Aufgrund der hohen Elektronendichte bzw. Ionen-dichte kommt es zu Feldverzerrungen. Insgesamt wird ein schnell wachsendes Gebiet hoher Leitfähigkeit erzeugt, das sich in Richtung der Anode und Kathode ausdehnt. Sind die Elektroden durch einen derartigen Streamer-Kanal verbunden, so beginnt der eigentliche Entladestrom zu fließen. Derartige Kanalaufbauphasen können innerhalb einer Na-

nosekunde abgeschlossen sein [Rae61].

Blasentheorie

Die Bildung einer Gas- bzw. Dampfblase vollzieht sich vor dem eigentlichen Durchschlag aufgrund von Joulschem Wärmeeintrag in das Dielektrikum. Dazu ist die lokale Erhitzung der Flüssigkeit auf ihre Siedetemperatur mit anschließender Verdampfung der Flüssigkeit notwendig. Die Erzeugung derartig hoher Temperaturen ist entweder eine Folge eines Stromflusses in der Flüssigkeit aufgrund von Feldemission oder -ionisation oder resultiert aus der Erhitzung der Flüssigkeit durch die Joulsche Wärme einer hochohmigen Kette von Abtragspartikeln, die sich aufgrund des elektrischen Feldes zwischen den Elektroden ausbilden kann [Kok63]. Eine weitere Quelle ist die Reibwärme der geladenen oder polarisierten Verunreinigungen, die sich aufgrund elektrostatischer Kräfte im Entladespalt bewegen. Die Ausdehnung der Blase zwischen den Elektroden bis zur vollen Überbrückung des Funkenspaltes kann entweder auf mechanische Kräfte im elektrischen Feld (Coulombsche Kraft) [Küp84] oder auf Überhitzungen durch lokale Stromdichteüberhöhungen (Thermische Expansion) zurückgeführt [Lab75] [Fuh85] werden. Denkbar ist auch ein Zusammenwirken beider Mechanismen. Dieser Ansatz liefert in guter Übereinstimmung mit praktischen Versuchen Ergebnisse, die auch für die Funkenerosion von Bedeutung sind. So kann gezeigt werden, daß die Stromstärke des vor der Entladung fließenden Stromes, der zum Durchschlag führt, druckabhängig ist [KaH61]. Entsprechende Blasenbildung kann auch direkt beim FE-Abtragsprozeß beobachtet werden und es ist zu vermuten, daß sich ungünstige Austrittsmöglichkeiten der Dampfblasen aus dem Arbeitsspalt neben der Verschmutzung durch Abtragspartikel sehr stark auf die Zündwilligkeit des Funkenspaltes auswirken. Durchschläge in flüssigen Kohlenwasserstoffen, die auf die beschriebene Blasenbildung zurückgeführt werden können, werden als verdeckte Gasdurchschläge bezeichnet.

Partikel-Theorie

Der Funkenspalt ist aufgrund der Abtragspartikel und von Fremdpartikeln verunreinigt. Hinzu kommt, daß die Partikel ionisiert sind oder ionisierbar vorliegen, d.h. sich aufgrund eines äußeren elektrischen Feldes bewegen können. Somit ist eine Ausrichtung der Partikel längs der Feldlinien mit anschließender Brückenbildung sehr wahrscheinlich. Kommt zum elektrischen Feld ein elektrischer Strom, der sehr rasch auf hohe Werte ansteigen kann, so liefert eine derartige Brücke eine mehr oder minder gut leitende Verbindung zwischen den Elektroden. Die Partikelbrücke selbst kann direkt einen elektrischen Durchschlag einleiten oder durch Joulschen Wärmeeintrag zur erwähnten Blasenbildung führen. Die Neigung zur Partikelbrückenbildung hängt davon ab, wie die Teilchen beschaffen sind. So spielen deren Gewicht, elektrische Eigenschaften und die Viskosität des Dielektrikums im Zusammenwirken mit dem äußeren elektrischen Feld eine entscheidende Rolle.

c) Der elektrische Durchschlag

Für hohe Feldstärken ist der Übergang vom leitenden Bereich zum Durchschlag fließend [Mir65]. Der Strom steigt im Durchschlagsbereich auf den vom äußeren Stromkreis vor-

gegebenen Maximalwert an. Dieser Vorgang ist durch die Widerstandsänderung des Entladekanals innerhalb einiger Nanosekunden um mehr als sechs Größenordnungen gekennzeichnet. Entsprechend kommt es, wie in der FE zu beobachten, zu einem massiven Spannungseinbruch von mehreren hundert Volt zum Zündzeitpunkt auf ca. 25 Volt nach dem Durchschlag. Die nach dem Durchschlag zu beobachtende Entladeform ist eine quasistationäre Bogenentladung, die bei ausreichender Energiezufuhr kontinuierlich brennen kann. Am Ende der Brenndauer wird der Entladestrom unterbrochen. Entsprechend der Abfallzeit des Stromes kommt es zum Zusammenbruch des leitfähigen Kanals und damit zu einer abrupten Druckänderung in der Umgebung des Entladekanals. Die umliegenden Partikel und insbesondere die Schmelze unter dem werkstückseitigen Fußpunkt des Entladekanals werden in den Funkenspalt gezogen und kühlen rasch ab. Das Dielektrikum im Funkenspalt gewinnt nach einer Erholzeit wieder seine Isolationsfähigkeit. Die Dauer der Wiedererlangung der vollen Isolationsfähigkeit hängt von der Rekombination der Ladungsträger im Entladekanal, von der Abkühlung des Kanals und für sehr kurze Erholzeiten von den Ausgleichsvorgängen im Entladekreis ab.

Die Betrachtung der verschiedenen Modellvorstellungen, die den elektrischen Durchschlag in flüssigen Dielektrika beschreiben, führt zu der Vorstellung einer Kombination der einzelnen Modelle zu einem für die FE-Anwendung plausiblen Modell. Grundsätzlich sind zwei aufeinanderfolgende Phasen der Durchschlagsbildung zu unterscheiden:

- Flüssigkeitsphase (Dielektrikum liegt in flüssigem Zustand vor)
- Gasphase (zwischen den Elektroden liegt ein ionisiertes Gas vor)

Während der ersten Phase sind die Partikeltheorie und die Elektronenlawinentheorie mit den beschriebenen Einschränkungen gültig. Es bilden sich leitfähige Brücken bzw. Gebiete höherer Leitfähigkeit. Es kommt zu der Blasenbildung mit den oben beschriebenen Effekten. Resultat dieser ersten Phase ist ein Gas-Dampfgemisch, das sich räumlich verteilt zwischen den Elektroden befindet. Nun beginnt die zweite Phase. Wie von der Townsend-Theorie in Verbindung mit dem Streamer-Mechanismus beschrieben, führt das lawinenartige Anwachsen der Ladungsträger zu einer leitfähigen Verbindung zwischen den Elektroden, die den Entladestrom schließlich aufnimmt und sich dabei so stark erhitzt, daß sich ein Plasmakanal bildet. Es stellt sich die für die FE typische stationäre Bogenentladung ein.

4.1.3. Entladephasen und Werkstoffabtrag

Eine anschauliche Grundlage für das Verständnis von Energieumsatz, Verschleiß und wirksamem Abtrag ist die Aufteilung der Einzelentladung in zeitlich aufeinanderfolgende Phasen gemäß Bild 4-6. Die vier Hauptphasen der FE-Entladung sind:

Phase 1

Der Arbeitsspalt wird mit einem Spannungsimpuls beaufschlagt. Die angelegte Spannung hat ein elektrisches Feld zur Folge, das ionisierbare Partikel im Arbeitsspalt ionisiert und vorhandene bewegliche Ionen im Dielektrikum bewegt. Der Stromfluß in dieser Phase ist minimal (unter 1 mA). Es findet kein

Abtrag statt. Die Dauer dieser Phase ist bestimmt von der elektrischen Isolationsfestigkeit des Dielektrikums. Die Zeitdauer dieser Phase wird der Zündverzögerungszeit t_d zugerechnet. Neben den elektrischen Effekten der Ionisation spielt die Polarisation des Dielektrikums eine wichtige Rolle.

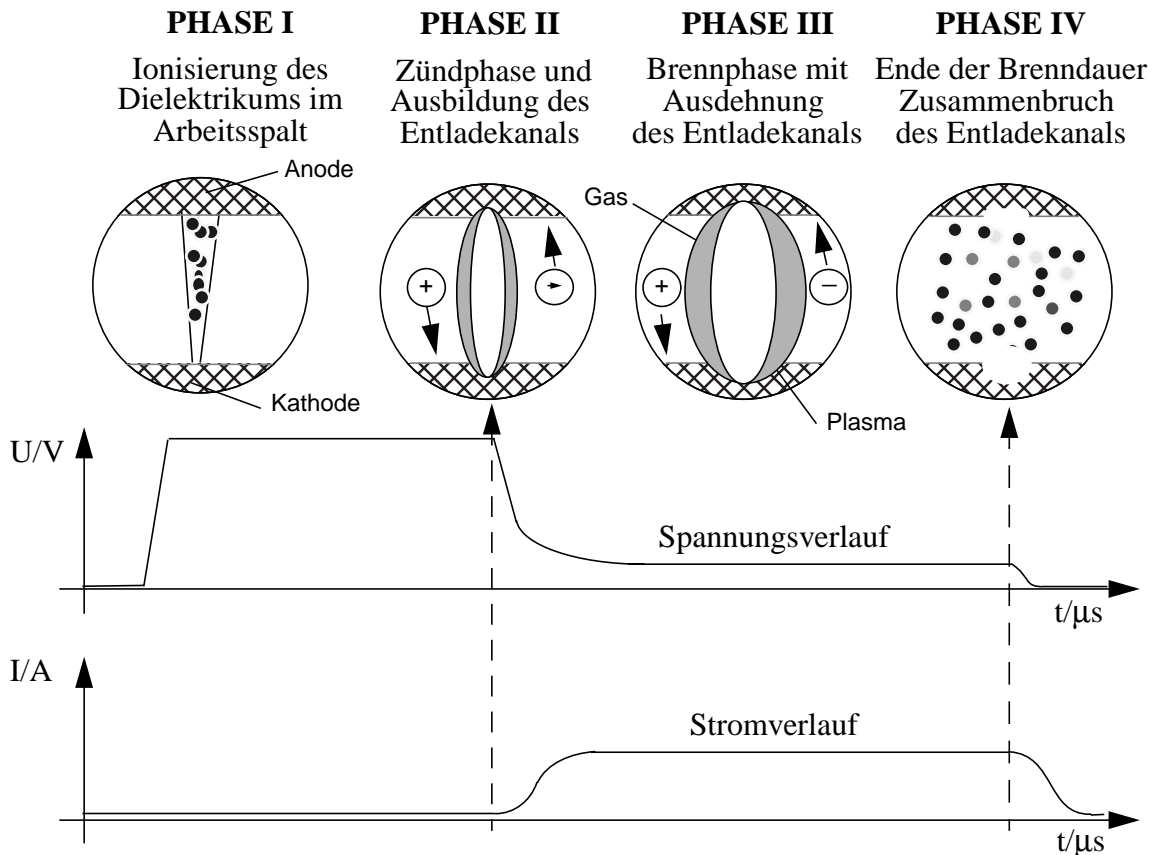


Bild 4-6: Schematische Darstellung der für den FE-Entladevorgang charakteristischen Entladungsphasen

Phase 2

Diese Phase ist die Aufbauphase des leitfähigen Kanals zwischen Werkstück- und Werkzeugelektrode. Hier wirken die beschriebenen thermoelektrischen Mechanismen, wie Partikelbrückenbildung, Townsendmechanismus in Verbindung mit der Streamerbildung. Die Aufbauphase ist im Falle optimaler Zündbedingungen nach 10^{-8} bis 10^{-6} Sekunden abgeschlossen. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit, mit der diese Phase abläuft, und der Tatsache, daß die eingebrachte Energie nahezu ausschließlich zur Bildung des Entladekanals verbraucht wird, wird in dieser Phase sehr wenig Elektrodenmaterial abgetragen. Lediglich die Randschichten der Elektroden bis zu einer Tiefe von ca. $5\mu\text{m}$ bis $10\mu\text{m}$ [Sol55] werden zum Teil verdampft. Insgesamt werden in dieser Phase nicht mehr als 5% des Gesamtabtrages realisiert. Der eigentliche Ladungstransport erfolgt nahezu vollständig durch Elektronen.

Phase 3

Hier findet die Energieübertragung zwischen Werkzeugelektrode und Werkstück mit Aufschmelzung des Werkstücks entsprechend der eingebrachten

Energiehöhe statt. Die Energie ist definiert durch den Arbeitsstrom und die eingestellte Brenndauer der Entladung. Während dieser Zeit ist der stationär brennende Bogen mit der starken kathodenseitigen Kontraktion zu beobachten. Die Kontraktion, die einen sogenannten "Hot Spot" liefert, kann laut [Eck61] [Mae51] als Folge des Steenbeck-Minimum-Prinzips angesehen werden. Dieses empirische Gesetz besagt, daß sich der Bogendurchmesser bei konstantem Strom so einstellt, daß die Brennspannung möglichst klein wird. Einschränkend muß bemerkt werden, daß in [WRo49] gezeigt wird, daß es sich bei dem Steenbeck Minimum Prinzip nicht um ein "echtes" Minimumprinzip, sondern vielmehr um eine "Faustregel" handelt. Als Grund wird die nicht "rein elektrische" Natur der Bogenentladung angegeben. Zusätzlich spielen noch thermische Prozesse (Wärmeleitung) und Materialkonstanten, wie unterschiedliches Wärmeleitvermögen, eine Rolle. Während dieser Entladungsphase dehnt sich der Kanal am anodenseitigen Ende des Plasmakanals aus. Mit der Ausdehnung nimmt die Energiedichte auf der Anodenoberfläche ab.

Phase 4

Diese letzte Phase beginnt mit dem Abschalten des Arbeitsstromes. Entsprechend der Abschaltgeschwindigkeit des Arbeitsstromes bricht der Kanal zusammen und bewirkt einen Unterdruck an seinen elektrodenseitigen Enden. Dieser Unterdruck wirkt in doppelter Hinsicht. Er führt erstens zum sofortigen Auswurf des zuvor in quasi-flüssigem Zustand vorliegenden Elektrodenmaterials auf der Kathode. Zweitens bewirkt der plötzliche Druckabfall eine Herabsetzung der Siedetemperatur, was zu spontanem Verdampfen des Elektrodenmaterials führen kann. Da der vorherige Plasmabogen auf der Kathodenseite im Gegensatz zur Anodenseite während Phase 3 stark kontrahiert, muß dort auch ein erheblich höherer Gasinnendruck vorhanden sein, der sowohl in axialer als auch in radialer Richtung wirkt. Das Abschalten führt deswegen auf der Kathodenseite vermutlich auf einen größeren Druckgradienten, der zu deutlich mehr verdampftem Kathodenmaterial führt. Anodenmaterial wird hierbei kaum oder überhaupt nicht verdampft, es sei denn, die Brenndauer wird sehr kurz gewählt, so daß das anodenseitige Kanalende noch kontrahiert vorliegt. Diese Phase dauert maximal 1 μ s. Die Zeitdauer bis zur vollständigen Deionisierung des Arbeitsspaltens zur Wiedererlangung der vollen Durchschlagsfestigkeit kann bis zu mehreren 10 μ s betragen und hängt von zahlreichen die Arbeitsaufgabe und die eingestellten Arbeitsparameter betreffenden Randbedingungen ab.

Prinzipiell können alle leitenden Materialien bearbeitet werden. Als Elektrodenwerkstoff kommen gleichermaßen alle leitenden Materialien in Frage. Neuere Untersuchungen [Tim96] beschäftigen sich auch mit der Bearbeitung von Keramiken, die zum Teil Halbleiter sind. Die Keramikbearbeitung beruht auf mechanischen Kräften, liefert sehr inhomogene Oberflächen und bereitet in bezug auf die Steuerung der effektiven Abtrag-

stiefe große Schwierigkeiten. Die Untersuchungen [Tim96] zeigen zwar prinzipielle Möglichkeiten der FE-Keramikbearbeitung auf, sind aber noch von der industriellen Anwendung entfernt. Eine Verwendung von Halbleitern als Elektrodenwerkstoff verbietet sich aufgrund des auftretenden ohmschen Verlustes. Wünschenswert sind Elektrodenwerkstoffe mit minimalem spezifischen Widerstand, wie etwa Kupfer, Aluminium oder Graphit. In der Anwendung haben sich Kupfer (Cu) als sogenanntes Elektrolytkupfer oder Wolframkupfer und Graphit durchgesetzt. Damit werden heute nahezu alle leitenden Werkstoffe, vorwiegend jedoch Stähle, bearbeitet. Hinsichtlich der Maschinenparameter wird in der Bearbeitung zwischen Stahl oder Stahllegierungen und Hartmetallen unterschieden. Beide Gruppen von Werkstoffen bedingen spezifische den Verschleiß, die Oberflächen und die Abtragsleistung betreffende Probleme.

Zur Herstellung der FE-Bearbeitungswerkzeuge wird meist sogenanntes Elektrolytkupfer verwandt, das sich durch seine hohe Leitfähigkeit auszeichnet [KoR60]. Für sehr abtragsintensive Bearbeitung wird aufgrund des günstigeren Verschleißverhaltens Graphit eingesetzt. Speziell für die Hartmetallbearbeitung wird zum Teil Wolframkupfer verwandt. Hierbei handelt es sich um gesinterte Wolframkupfer-Elektroden mit ca. 80% Wolframgehalt [VDI34]. In Tabelle 4-2 sind die für die FE-Bearbeitung wichtigsten Elektrodenwerkstoffdaten zusammengefaßt. Entsprechend der Schmelzpunkte und Siedepunkte der Elektroden wird die Werkstück-Werkzeugpaarung ausgewählt.

Werkstoff	Spez. Widerstand in $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Schmelzpunkt in $^{\circ}\text{K}$	Siedepunkt in $^{\circ}\text{K}$	Wärmeleitfähigkeit in $\text{cal/s} \cdot \text{cm} \cdot \text{grad}$
Wolfram W	0,05	3643	6273	(20 $^{\circ}\text{C}$) (500 $^{\circ}\text{C}$)
Elektrolytkupfer 99,8% Cu, 0,2% O	0,017	1356	2613	0,93(20 $^{\circ}\text{C}$) 0,85(500 $^{\circ}\text{C}$)
Wolframkupfer 72% W, 28% Cu	0,04	-	ca. 5100	(20 $^{\circ}\text{C}$) (500 $^{\circ}\text{C}$)
Graphit	>11	nicht schmelzend	3773	90W/mK

Tabelle 4.2: Werkstoffdaten für die wichtigsten Elektrodenwerkstoffe

Typischerweise wird das zu bearbeitende Werkstück als Kathode negativ und die Formelektrode als Anode positiv gepolt. Der Hauptgrund für die Wahl dieser Polung ist der sogenannte „Polaritätseffekt“. Darunter ist die Tatsache zu verstehen, daß sich bei gleicher oder verschiedener chemischer Zusammensetzung von Werkstückelektrode und Werkzeugelektrode bei der FE-Bearbeitung ein unterschiedlicher Abtrag auf den Elektroden ergibt [Sol55]. Der Polaritätseffekt hängt in erster Linie von der Wärmeleitfähigkeit der Elektroden ab. Dabei hat die Wärmeleitfähigkeit der Elektroden einen Einfluß auf beide Elektrodenabträge. Interessant ist allerdings, daß die Wärmeleitfähigkeit der Kathode einen starken Einfluß auf den Kathodenabtrag hat, wohingegen die Wärme-

leitfähigkeit der Anode geringen Einfluß auf den anodenseitigen Abtrag, den Verschleiß, hat. Offensichtlich geschieht die Energiefreisetzung auf der Kathoden- und Anodenoberfläche mit deutlich unterschiedlichen Zeitkonstanten [Sol55]. Dafür sind die Ladungsträger, hochbewegliche Elektronen und schwere positive Ionen, verantwortlich, deren Beweglichkeiten sich in Gasen um das ca. 500fache unterscheiden. Zu ähnlichen Ergebnissen ist van Dijck [Dij73] gekommen. Ausgehend von verschiedenen Werkstoffpaarungen (Cu-Cu, St-St) für Werkzeug und Werkstück konnte dort gezeigt werden, daß das Verhältnis von Elektronenstrom zu Ionenstrom maßgebend für den Leistungsumsatz und somit für den jeweiligen Abtrag auf den Elektroden ist. Die sich insgesamt ergebende Stromdichte, die unmittelbar für die Abtragsverteilung auf Anode und Kathode verantwortlich ist, variiert dabei von Material zu Material.

Die Charakterisierung des Verschleißes wird dabei üblicherweise, wie oben benannt, als sogenannter "relativer Volumenverschleiß" vorgenommen. Das bedeutet, man setzt den reinen Anodenabtrag ins Verhältnis mit dem erreichten Kathoden- oder Werkstückabtrag. So kann anhand von Erodierversuchen mit Kupfer-Stahl Elektrodenpaarungen gezeigt werden [BWi97], daß es möglich ist, den Abtrag bis zu einem Prozentsatz von 99,8% auf die Kathode zu konzentrieren. Das bedeutet einen relativen Anodenabtrag, als relativer Volumenverschleiß bezeichnet, von unter einem Prozent. Nach [Dij73] kann, basierend auf dem Verhältnis von Elektronenstrom zu Ionenstrom, dazu folgende Faustregel abgeleitet werden:

Eine Verkleinerung der Stromdichte führt zu einer Verminderung des Verschleißes.

So liefert eine Cu-Cu Elektrodenpaarung größeren Anodenabtrag, wohingegen eine St-St Kombination größeren Kathodenabtrag ergibt. Die Stromdichte, die dabei aus dem Aufschmelzradius bestimmt wurde, ist für Stahl vier Mal kleiner als für Kupfer. Im Falle der für die FE-Bearbeitung wichtigen Werkstoffpaarung Cu^+ - St^- nimmt der gemessene relative Verschleiß oder Anodenabtrag mit längeren Impulsen ab, da die Stromdichte wegen der räumlichen Ausdehnung der Fußpunkte ebenfalls abnimmt.

4.2. Funkenerosives Energieübertragungssystem

Der Energieeintrag in das "Abtragungssystem Funkenspalt" mit Werkstück- und Werkzeugelektrode bestimmt mit den jeweils geltenden Randbedingungen den Stoffumsatz, d.h. die Abträge auf den Elektroden. Zwischen Elektrodenabtrag und Energieeintrag besteht ein Zusammenhang, der vorrangig empirisch nachgewiesen wurde [Sol55]. Andere Arbeiten zeigten, daß es in Teilen möglich ist, unter bestimmten Annahmen Modelle für die zu erwartenden Abträge auf der Anode (Verschleiß) oder der Kathode (wirksamer Abtrag) zu entwickeln [PBE89]. Besonders ausführlich beschäftigt sich van Dijck mit den Problemen der Wärmeübertragung und den resultierenden Stoffumsätzen bei der FE-Bearbeitung. Er kommt zu dem Schluß, daß der Abtrag vorrangig durch den Auswurf von geschmolzenem Elektrodenmaterial während der Druckabfälle zu Beginn und vor allem am Ende der Entladung realisiert wird. Dabei wird deutlich, daß mehr als 90% der eingebrachten Energie nicht direkt zum Abtrag durch Aufschmelzen oder Verdampfen füh-

ren, sondern als Verluste, hauptsächlich in Form von Konvektion in den Elektroden, nahezu wirkungslos verbraucht werden [Dij73]. Offensichtlich besteht ein Zusammenhang zwischen zeitlichem Verlauf des Energieeintrages und der absoluten eingebrachten Energiemenge. Der Wirkabtrag wird sowohl von der absoluten Stromhöhe und Impulsdauer während der Brennphase als auch von der Flankensteilheit des Stromes während des Abschaltens bestimmt.

Im Mittelpunkt steht die Frage nach einer Gesamtenergiebilanz oder einem Gesamtwirkungsgrad. Grundlage weiterer Betrachtungen bildet ein Energieübertragungsmodell, das Quellen und Senken enthält. Bild 4-7 zeigt schematisch den Energieübertragungsweg für die FE-Senkbearbeitung.

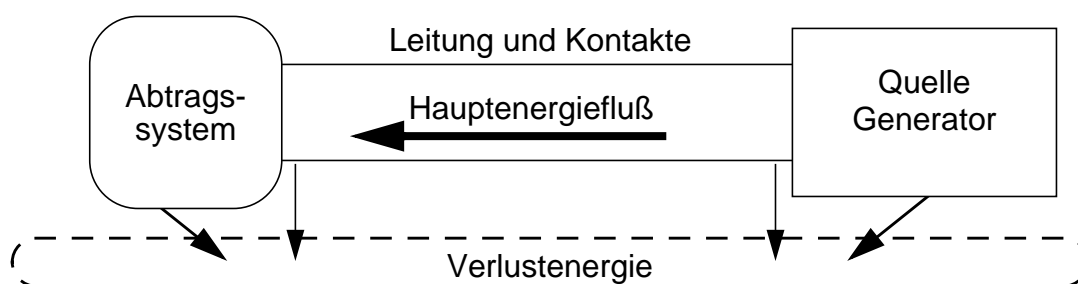


Bild 4-7: Schematische Darstellung des Energieflusses beim FE-Abtragen

Die Verluste sind in erster Linie ohmscher, kapazitiver und induktiver Natur. Ferner treten Verluste in Form der Erwärmung des Dielektrikums und der Elektroden auf. Ein dritter Verlustanteil resultiert aus abgestrahlter Leistung auf verschiedenen Frequenzen. Das Spektrum der elektromagnetischen Verluststrahlung reicht von elektromagnetischer Strahlung im Frequenzbereich technischer Wechselströme, der Sendefrequenzen von Rundfunksendern über langwellige Wärmestrahlung bis hin zu ultravioletter Strahlung.

Zur Vereinfachung soll nur die an den Klemmen des Generators zu messende abgegebene Wirkenergie in die Energiebilanz einfließen. Die dort bereitgestellte Energiemenge repräsentiert die Summe aller dem Abtragsystem, bestehend aus Zuleitungen, Kontakten und dem Funkenspalt selbst, zugeführten Energien. Die energietragenden Größen Strom und Spannung erlauben zusammen mit den zeitlichen Größen Zündverzögerungszeit, Brenndauer und Pausendauer die quantitative Bestimmung der umgesetzten Energie. Die Leitungsverluste sind aufgrund der sehr komplexen Leitungsgeometrien nicht ohne weiteres quantitativ beschreibbar. Entsprechende Messungen der Leitungsbeläge und Analogiebetrachtungen zeigten allerdings, daß der prozentuale leitungsresultierende Verlustanteil in der Gesamtenergiebilanz vernachlässigt werden kann. Der Hauptanteil der als Verlustleistung umgesetzten Energie ist dem Funkenspalt zuzuordnen. In Anlehnung an die Entladungsentwicklung sollen die Energieumsätze zunächst qualitativ in den einzelnen Entladungsphasen nach Bild 4-6 getrennt betrachtet werden. Der Vollständigkeit halber wurde eine Phase 0 zusätzlich zu den vier Phasen eingeführt, die den Zeitraum der Pausendauer (Funkenspalt ist strom- und spannungslos) umfaßt.

4.2.1. Energieverteilung in den Entladephasen

Die einzelnen Entladephasen sind durch die Art des jeweils stattfindenden Energieumsatzes charakterisiert. Gemeinhin beschränkt sich die Energiebetrachtung, wie z.B. in [VDI34], auf die Brennphase. Damit kann gemäß folgender Formel die Entladeenergie allgemein berechnet werden

$$W_e = \int_{t_e} u_e(t) i_e(t) dt \quad \text{Glg.4-1}$$

Für die Betrachtung des Zündvorganges und insbesondere des Verschleißes ist dies eine einfache aber unzureichende Energiebestimmung. Tabelle 4-2 gibt einen Überblick über die auf die Entladungsphasen bezogenen Energieumsätze.

<i>Nr.</i>	<i>Prozeßphase</i>	<i>Energieumsätze</i>
<i>0</i>	Pause Spalt ist strom- und spannungslos	Die vom Generator abgegebene und somit im Spalt umgesetzte Leistung bzw. Energie ist null
<i>I</i>	Ionisierungsphase an den Spalt wird die Zündspannung U_z gelegt: $du/dt > 0$, $di/dt \sim 0$	Die im Spalt umgesetzte Energie resultiert aus der Zündspannungsflanke in Verbindung mit dem minimalen "Leckstrom" des Erodierespalt im Isolierzustand. Die umgesetzte Wirkleistung ist sehr gering bei $I_a < 100\mu A$; $R_{spalt} > 1M\Omega$
<i>II</i>	Zündphase am Spalt liegt die Zündspannung U_z , die auf Brennspannungsniveau zusammenbricht, der eingestellte Arbeitsstrom $i_a(t)$ beginnt zu fließen $di/dt > 0$; $du/dt < 0$	Der Vorgang des Energieeintrages ist bestimmt von den Flanken (Wechselenergie) und dem integralen Anteil (Gleichenergie) der energietragenden Größen $i(t)$, $u(t)$. Dabei wird Energie im Innenwiderstand der Quelle, in der Übertragungsleitung und im zündenden Arbeitsspalt umgesetzt
<i>III</i>	Brennphase am Spalt stellt sich die Brennspannung u_e ein, es fließt der Arbeitsstrom $i_a(t)$	Nahezu gleichförmiger Energieeintrag. Umgesetzte relevante Energie im Funkenspalt und im Innenwiderstand der Quelle.
<i>IV</i>	Abschaltphase am Spalt liegt die Restspannung an, es fließt ein Ausgleichsstrom $di/dt < 0$; $du/dt < 0$	Die vom Generator abgegebene Energie ist null. Im Spalt und auf der Leitung wird die gespeicherte Restenergie abgebaut.

Tabelle 4.2: Energieumsätze während der einzelnen Phasen

4.2.2. Energieverteilung im Arbeitsspalt

Im Hinblick auf den tatsächlichen Abtrag ist der Energieumsatz im Arbeitsspalt, bestehend aus Anode, Plasmakanal und Kathode, von zentraler Bedeutung. Die Aufteilung des "Wärmestroms" ist in Bild 4-8 nach [Dij73] dargestellt. Die zugeführte Energie umfaßt ausschließlich die an den Elektrodenkontakten zugeführte elektrische Energie. Die elektrische Energie wirkt als Joulscher Wärmeeintrag in das Abtragssystem. Besteht die Werkzeugelektrode (Anode) aus Kupfer, so werden ca. 97% der Wärme in die Elektrode abgeführt. Die Verdampfungswärme mit maximal 0,5% kann dabei vernachlässigt werden. Insgesamt werden 7% der zugeführten Wärmeenergie für das Aufschmelzen von

Anodenmaterial verbraucht. Der Großteil der Schmelzwärme (5%) bleibt wirkungslos, da das Material vor einem Ausschleudern oder Verdampfen wieder erstarrt. Die Werkstückelektrode (Kathode), in diesem Fall aus Stahl bestehend, nimmt 66% der eingebrachten Wärme auf und führt diese ohne Wirkung ab. Hier werden 28 % der Wärmeenergie in der Schmelze gespeichert. Allerdings tragen nur 5% der Kathodenwärme zum Verdampfen von Werkstoff bei. Interessanterweise beträgt der Energieeintrag in den Plasmakanal weniger als ein Prozent der zugeführten Energie [Dij73].

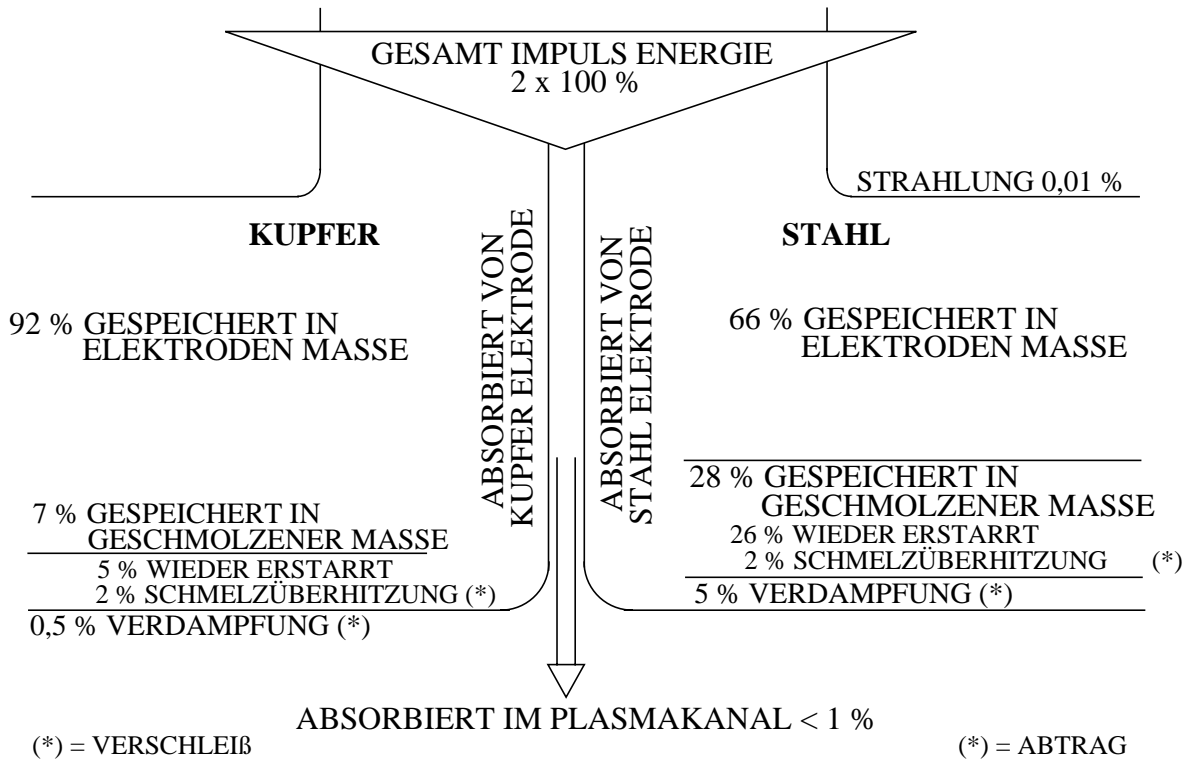


Bild 4-8: Thermisches Gleichgewicht in elektroerosiven Entladungen [Dij73]

Aus Bild 4-8 geht hervor, daß das Verhältnis der Energien zum Aufschmelzen und zum tatsächlichen Abtragen ca. 4 zu 1 beträgt. Der Abtragsmechanismus steht demnach in Verbindung mit dem Volumen an hochüberhitztem Material innerhalb der Schmelze, das zum Zeitpunkt des Abschaltens vorhanden ist [Dij73]. Insgesamt werden mehr als 90% der zugeführten Energie in Form von Wärme in den Elektroden ohne direkte Abtragswirkung abgeführt.

Die mikroskopischen Vorgänge auf den Elektroden ergeben, daß auf der Kathodenseite Ionen und auf der Anodenseite Elektronen den Hauptanteil des Energieumsatzes bestreiten. Aufgrund des realen Massenverhältnisses zwischen Elektronen und Ionen von ca. 1 zu 1800 unterscheiden sich die Energieumsätze. Daraus kann auch die für den Abtrag wichtige unterschiedliche Kontraktion der Plasmasäule und der Elektrodenenden abgeleitet werden [Eck61]. Das Modell zur Kontraktion, geht davon aus, daß eine höhere Stromdichte infolge von Kontraktion zu einer Abnahme des Spannungsabfalls über dem Kontraktionsgebiet führt [WeT52]. Dies steht in Einklang mit der allgemeinen Vorstellung von kleinerer anodenseitiger Kontraktion mit kleinerer Fußpunkttemperatur und kleinerem Anodenabtrag.

Die makroskopische Betrachtung berücksichtigt das elektrische Verhalten der Energieübertragungstrecke. Da zwischen Spalt und Generator Induktivitäten, Kapazitäten und in geringem Maße ohmsche Übergänge in Form von Leitungen und Kontakten liegen, ist die Stromanstiegsgeschwindigkeit beschränkt [Wol79]. Betrachtet man die Brennphase als quasi stationär mit einem konstanten Gleichstrom unter Einbeziehung der zu messenden Brennspannung u_b , die im Bereich zwischen 18V bis 32V liegt, so ergibt sich eine Spaltenergiebilanz als Summe der Energien, die in die Elektroden eingespeist werden und der Energie, die im Plasmakanal verbraucht wird [MoH67]. Eine weiterführende Erörterung der makroskopischen Energiebetrachtung unter Einbeziehung des elektrischen Entladekreises mit seinen transienten Übergängen liefert, wie in [WRo49] ausgeführt, Aussagen über die Dauer eines Entladefunkens in Abhängigkeit von der Funkenstrecke l und des Umgebungsdrucks p . So dauert die Entladung um so länger, je länger die Funkenstrecke ist, und um so kürzer, je höher der Druck ist. Letzteres bedeutet, daß bei kleinerem Spaltabstand die Spannungsflanken, die sich aus dem Zusammenbrechen der Zündspannung ergeben, steiler werden.

Die zeitliche Entwicklung der energietragenden Größen ist insbesondere während der Ionisierungsphase, Zündphase und der Abschaltphase von Interesse. Für Ionisierung und Zündung haben die energietragenden Größen mit ihrem dynamischen, meist sprungförmigen Verhalten eine bislang größtenteils vernachlässigte Wirkung. Im Rahmen eigener Versuche stellte sich heraus, daß sich die sogenannte Zündverzögerungszeit t_d offensichtlich abhängig von der Pulsformung von Strom und Spannung ändert. So konnten bei der Verwendung des im Rahmen dieser Arbeit in Teilen entwickelten Generators [BWB95c] sehr viel kürzere Zündverzögerungszeiten beobachtet werden als bei dem Vorgängermodell, das als sogenannter "statischer Impulsgenerator arbeitete". Lagen bei dem Impulsgenerator die Zündverzögerungszeiten im Mittel deutlich über $10\mu\text{s}$, so liegen diese jetzt unter $5\mu\text{s}$. Dieser Effekt ist mit der frequenzabhängigen Polarisierung des Dielektrikums zu begründen.

4.3. Steuerung und Regelung des funkenerosiven Abtragungssystems

Die Regelung eines FE-Abtragungssystems bedeutet, den Energieumsatz im System stets abtragungsoptimal zu gestalten. Abtragungsoptimal bedeutet größtmöglicher Abtragsfortschritt unter Berücksichtigung eines maximal erlaubten Verschleißes und der mindestens geforderten Werkstückoberflächenqualität. Die dazu notwendigen Prozeßparameter beschreiben den FE-Prozeß zu jedem Zeitpunkt und machen im Falle einer Abweichung des Prozesses von der Sollwertvorgabe ein Einwirken zur Prozeßkorrektur möglich. Problematisch ist dabei, daß fast alle Parameter voneinander abhängen.

4.3.1. Funkenerosives Übertragungssystem

Der Begriff Übertragungssystem ist als eine abgegrenzte Anordnung von aufeinander einwirkenden Prozessen definiert [DIN66]. Mit Prozeß bezeichnet man die Umformung und den Transport von Materie, Energie und Information. Innerhalb technischer Systeme wirken i.d.R. einer oder mehrere Prozesse zusammen. Das Verhalten eines Systems, d.h.

seine Wirkung nach außen, ist somit bestimmt vom Verhalten seiner Prozesse. Rückwärts führt die Beschreibung des Systemverhaltens, z.B. mit mathematischen Methoden der Systemtheorie, auf die Charakterisierung der systemeigenen Prozesse.

Die vollständige Charakterisierung der Übertragungseigenschaften des „Übertragungssystems FE-Senkprozeß“ würde die durchgängige mathematische Formulierung der Systemeigenschaften erfordern. Da keine vollständige Beschreibung möglich ist, kann die Modellbildung für den Abtragsprozeß auch nicht zu einem geschlossenen Modell führen. Deswegen sollen im Folgenden Modellierungsansätze angegeben werden, welche in der realisierten Prozeßführungsstruktur Verwendung finden.

Zur Behandlung von Fragestellungen, die ein beliebiges Übertragungssystem betreffen, wird, falls möglich, immer die Übertragungsfunktion bestimmt [Unb90]. Damit können eindeutige Aussagen über die Übertragungscharakteristik eines Systems gemacht werden. So können das Dämpfungsverhalten und die Phasenverschiebung als technisch wichtigste Eigenschaften ermittelt werden. Besonders wichtig ist die Übertragungsfunktion zur Beschreibung des sogenannten Schwingverhaltens [Unb87]. Das Schwingverhalten eines Systems ist bestimmt von der Anzahl der Energiespeicher und resultiert aus dem Pendeln der Energie zwischen mindestens zwei Energiespeichern.

Die Dynamik der Übertragungstrecke beschreibt die Art des möglichen Schwingverhaltens eines Übertragungssystems. Die Regelung eines schwingungsfähigen Systems kann prinzipiell nur mittels eines dynamischen Reglers zu akzeptablen Ergebnissen führen. Dieser bei der Auslegung von Reglern zu berücksichtigende Aspekt führt insbesondere bei sogenannten "Fuzzy Controllern", die prinzipbedingt kein dynamisches Verhalten besitzen, zu Schwierigkeiten [Wit93b]. Zur Befriedigung einer vorgegebenen Systemdynamik sollte die Ordnung von Regler und Regelstrecke idealerweise übereinstimmen, was im Grenzfall zu einer vollkommenen Kompensation der Streckendynamik führt. Diese theoretische optimale Reglersynthese scheitert allerdings an den zwangsläufigen Fehlern im Modell und dem vertretbaren Aufwand, so daß meist mit Reglern kleinerer Ordnung versucht wird, ein akzeptables Schwingverhalten des Gesamtsystems zu realisieren [Lud77].

In Bild 4-9 ist eine schematische Darstellung des funkenerosiven Übertragungssystems als Mehrgrößensystem dargestellt.

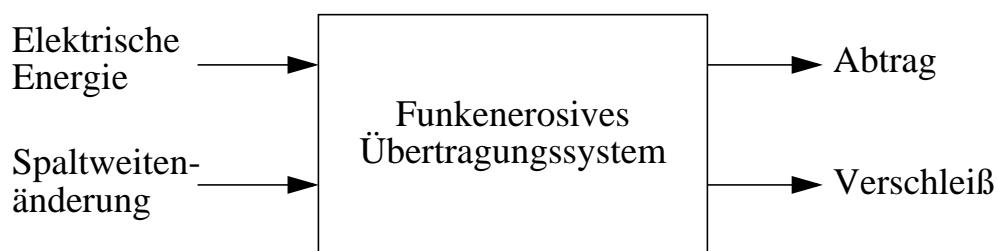


Bild 4-9: Schema des funkenerosiven Abtragssystems

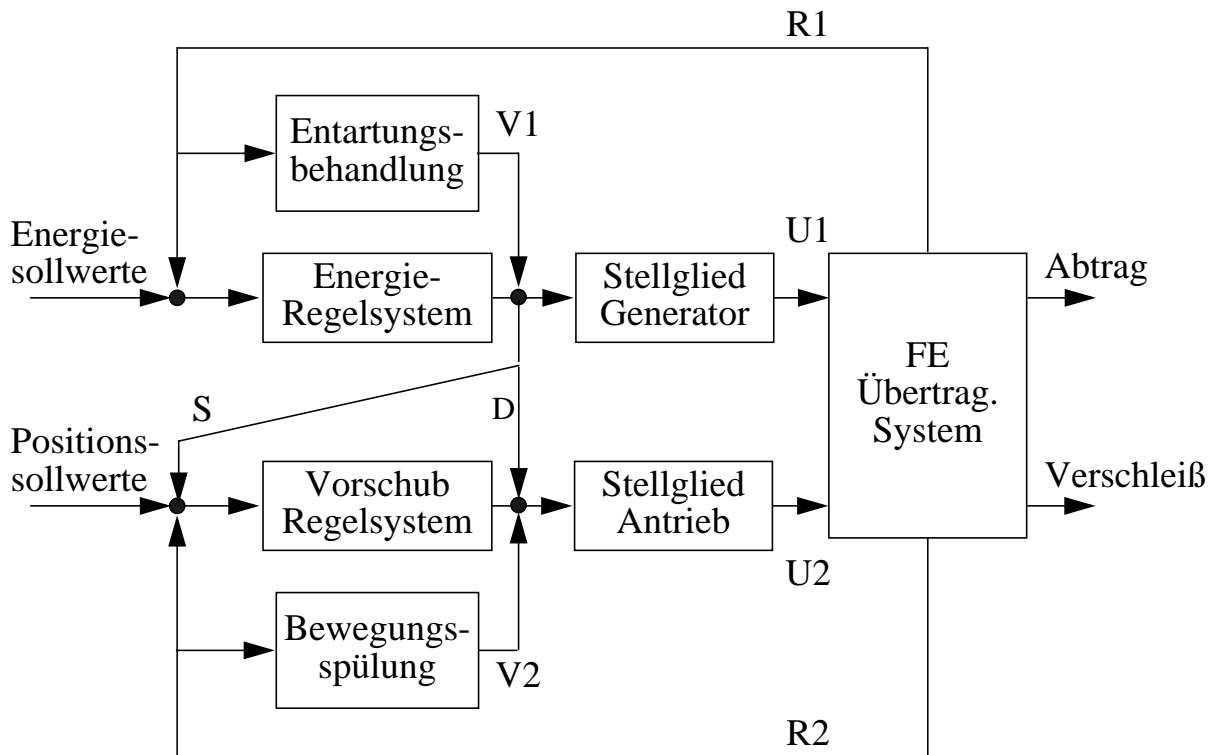
Die Systemgrenzen des resultierenden Systems sind bestimmt durch den Funkenspalt mit Dielektrikum sowie Werkzeug- und Werkstückelektrode. Umfassendere Systemgrenzen würden die Komplexität des Systems unnötig erhöhen. Die Eingangsgrößen sind die elektrischen energietragenden Größen Strom und Spannung und die geometrische Spaltweitenänderung. Die Ausgangsgröße ist der Werkstück- und Werkzeugabtrag. Ohne das funkenerosive Übertragungssystem definiert zu haben, lassen sich die Systemeigenschaften für das FE-Übertragungssystem diskutieren. Das FE-System ist mit Sicherheit *kausal*. Aufgrund des Zusammenwirkens der Eingangsgrößen und der internen ausgeprägten nichtlinearen Wirkzusammenhänge handelt es sich bei dem FE-System um ein *nichtlineares System*. Das bedeutet konkret, daß bei doppeltem Arbeitsstrom nicht der doppelte Abtrag zu erwarten ist. Vielmehr kann u.U. bei sonst gleichen Einstellungen die Verdopplung des Arbeitsstromes zu Nullabtrag führen, wenn auf die sich dann einstellende erhöhte Spaltverschmutzung nicht adäquat reagiert wird. Der fortlaufende Arbeitsprozeß bewirkt ein Einsenken der Elektrode in ein Werkstück. Dabei ändern sich die geometrischen, thermischen und elektrischen Verhältnisse. Das System ist also *zeitvariant*. Je nach Prozeßfortschritt über der Zeit ändern sich die Ausgangsgrößen bei gleichbleibenden Eingangsgrößen. Der Funkenspalt mit den Elektroden und dem Dielektrikum bildet mehrere Energiespeicher. Dabei werden thermische Energie, elektrische Energie und mechanische Energie in unterschiedlicher Form gespeichert. Insofern besitzt das FE-System ein sehr ausgeprägtes Gedächtnis und gilt deswegen als *dynamisches System*. Streng genommen ist das FE-System ein *kontinuierliches System*, dessen sämtliche Arbeitsparameter sich stetig über der Zeit verändern. Die Entwicklung einzelner Parameter ist während des Prozesses nicht vorhersagbar. Dies liegt zum Teil daran, daß die Randbedingungen für die Parameterentwicklung nicht gemessen werden können. So ist z.B. die Ermittlung des aktuellen Ortes mit größter Überschlagswahrscheinlichkeit im Funkenspalt meßtechnisch nicht möglich. Die zufällige Verteilung und Bewegung der Abtragspartikel kann ebenfalls nicht überwacht werden. Daraus ergibt sich insgesamt ein *stochastisches System*. Prinzipiell handelt es sich bei dem FE-System um ein *stabiles System*. Die Stabilität wirkt sich dabei allerdings nicht unbedingt positiv auf den gewünschten Abtrag aus. Für einen zu großen Abstand und für einen sehr kleinen Abstand wäre der Abtrag gleich null. Im ersten Fall würde Leerlauf und im zweiten Kurzschluß vorliegen. Das bedeutet, die gemeinhin anzuwendende Stabilitätsbedingung ist erfüllt. Da aber das Ziel ein abtragsoptimaler Prozeß ist, wird für die weitere Verwendung der Begriff Stabilität präzisiert. *Stabil im Sinne des FE-Abtrags bedeutet, daß der Prozeß abtragsintensiv ohne Lichtbögen und Kurzschlüsse abläuft*. Da der Prozeß von Natur aus nach dieser Definition *instabil* ist, weil keine a priori Kenntnisse über einen sicheren und zugleich abtragsintensiven Spaltabstand passend zu den Energiegrößen Strom und Spannung vorliegen, bedarf es einer stabilisierenden Regelung.

Die Charakteristiken des FE-Energieübertragungssystems zeigen deutlich, daß eine herkömmliche Identifikation [Ise92] und Modellbildung nicht möglich ist.

Kenngößen und regelungstechnische Ansätze

Das FE-Energieübertragungssystem für die regelungstechnische Betrachtung beinhaltet

den Funkenspalt mit dem eigentlichen Abtragsprozeß. Regelziel ist ein stabiler Erodierbetrieb. Aus Bild 4-10 ist die grundlegende Regelstruktur für funkenerosive Senkprozesse dargestellt. Die Regelstrecke ist das funkenerosive Übertragungssystem, welches aus dem Funkenspalt, gebildet aus den Elektroden, und dem Dielektrikum besteht. Am Abtragsprozess sind zwei Regelkreise beteiligt: der Energiereglerkreis und der Vorschubregelkreis. Beide Regelkreise verfügen über ihre eigene Stellvorrichtung. Die Energieeinspeisung erfolgt mittels des anlageneigenen Erodiergenerators. Die Spaltweitenregelung zur Verfärbung der Pinole realisiert ein Antriebssystem. Ergebnis beider Teilregelkreise sind zwei Stellgrößen U_1 und U_2 . Zur Ermittlung des Regelfehlers existieren Sollwertvorgaben (Energiegrößen und Positionsgrößen) und rückgekoppelte Größen R_1 und R_2 . Die Rückkopplung für den Teilregelkreis Energie umfaßt die Entladungsart, wie Leerlauf, Kurzschluß oder Lichtbogen, und alle den Energieumsatz betreffenden Größen, wie die Zündverzögerungszeit t_d oder die Spaltspannung u_s . Der Regelkreis zur Spaltweitenregelung beinhaltet die Rückkopplung der Pinolenposition z_{Pos} . Im Fall der reinen Senkerosion entspricht der Sollwert dem Endmaß.



V1, V2: Vorsteuerungssignale R1, R2: Rückgekoppelte Signale U1, U2: Stellgrößen
S: Istwerte für die Spaltweitenregelung D: Direktsteuerungssignale

Bild 4-10: Schema des Regelkreises für den funkenerosiven Abtragsprozeß

Für Mehrachsbetrieb werden Bahnpunkte vorgegeben. Die Verkettung der Regelkreise erfolgt über die Signale S (Spaltweitenregelung) und D (Direktsteuerung). Die für die Spaltweitenregelung verwandten Signale sind die Abweichungen der tatsächlichen mittleren Zündverzögerungszeit t_d oder Brennspannung u_g von einem gewünschten Wert. Das Signal D repräsentiert den direkten Durchgriff des Energiereglerkreises auf die Antriebsaktorik unter Umgehung der Antriebsregelung. Die für jeden Regelkreis vorhandenen Einheiten zur Übersteuerung der Regelung sind Elemente der Vorsteuerung,

die nur zu diskreten Zeitpunkten aktiviert werden. Die Signale sind V1 und V2. Beide Einrichtungen zur Vorsteuerung sind gekennzeichnet durch eine um den Faktor 10 kürzere Antwortzeit als der eigentliche Regler. Die Wirkungsweise ist ereignisgesteuert und kann als quasi-diskret bezeichnet werden. Im Bedarfsfall kann die Antriebsregelung mittels der Bewegungsspülung übersteuert werden. Wie im Verlauf vorliegender Arbeit realisiert, führt die Pinole dabei eine eigenständige Bewegung unabhängig von der Spaltweitenregelung aus. Sie verarbeitet dabei als Regelgröße, im Gegensatz zur Spaltweitenregelung, nicht elektrische Funkenspaltgrößen S , sondern ausschließlich die Pinolenposition aus R2. Gleiches gilt für den elektrischen Energiereglerkreis, der mittels der Prozeßentartungsbehandlung außer Kraft gesetzt werden kann. Treten Kurzschlüsse oder Lichtbögen auf, so greift auch diese Vorsteuerung mit V1 direkt an der Regelung vorbei in den Prozeß ein und setzt z.B. den Arbeitsstrom auf null.

Die Regelstrategie für das funkenerosive Abtragen ist eine Folgeregelung. Als geeignete Regelgrößen für eine durchgängige Beschreibung des Abtragsprozesses kommen folgende Prozeßparameter in Frage:

- die elektrische Leitfähigkeit im Funkenspalt bzw. in seiner Umgebung
- der absolute geometrische Abstand der Elektroden (Spaltweite)
- der Arbeitsfortschritt gemessen als Eindringgeschwindigkeit des Werkzeugs

Hieraus geht hervor, daß ein klassischer Ansatz für die Funkenerosion nicht möglich ist, da die genannten Größen entweder nicht meßbar sind (Spaltweite), sich stochastisch ändern (Leitfähigkeit) oder für sich alleingegenommen die Ergebnisgrößen nicht aussagekräftig wiedergeben (Arbeitsfortschritt). Die Steuerung bzw. Regelung des Abtragsprozesses bedient sich deswegen einiger Hilfsgrößen, die für die Abtragswirksamkeit der Einzelentladung keine Aussage zulassen, aber über eine Anzahl von Entladungen den Prozeßtrend näherungsweise beschreiben. Durch Hinzufügen spezieller Regelkreisglieder, die hier als Vorsteuerungselemente bezeichnet werden, kann schließlich ein stabiler und relativ abtragsintensiver Prozeß realisiert werden.

Regelungstechnisch stellt dieser Ansatz der Folgeregelung eine restriktive und erzwingende Steuerung dar, die mit schaltenden Rückführungen versehen ist [At 96]. Dabei kann das Ziel der Regelung damit beschrieben werden, den Prozeß in zulässigen Bereichen zu halten. Zulässige Bereiche sind Prozeßzustände, die dem Regelziel nicht entgegenstehen. Für den FE-Abtragsprozeß sind die zulässigen Bereichsgrenzen gekennzeichnet durch mindestens geforderten Abtrag und gerade noch akzeptablen Verschleiß. Das FE-Regelsystem kann damit als „ereignisdiskretes“ System bezeichnet werden.

Kern des Systems sind quasi-kontinuierliche Elemente in Verbindung mit diskreten Ereignissen. So stellt der Abtragsprozeß einen quasi-kontinuierlichen Prozeß dar, der von Ereignissen, wie spontan auftretenden Kurzschlüssen oder aufgabenbedingter Parameteränderung, beeinflußt oder unterbrochen wird. Die im Regelkreis als Vorsteuerungen vorgesehene Bewegungsspülung und Entartungsbehandlung übernehmen dabei den „re-

striktiven“ Bestandteil der Regelung. Ihre Aufgabe besteht darin, den Prozeß aus „verbotenen“ Bereichen zurückzuholen, um insgesamt einen im Sinne der Funkenerosion stabilen Abtragsprozeß zu realisieren. In der praktischen Umsetzung wird mittels rückgekoppelten Größen, die gemittelt den Prozeßtrend beschreiben, eine Führungsgrößenregelung als Folgeregelung realisiert. Beim Erreichen von Bereichsgrenzen wird über Vorsteuerglieder restriktiv eingegriffen, um den Prozeß zu stabilisieren.