

## Allgemeines Funkenerosion

- Voraussetzungen:
  - elektrisch leitende Werkstoffe
  - Dielektikum
  
- Vorteile
  - große Formelementevielfalt
  - große Aspektverhältnisse
  - hohe Genauigkeit
  - gute Oberflächenqualität
  - emissionsarm
  - kaum Werkzeugverschleiß
  - Bearbeitung harter und schwer zerspanbarer Werkstoffe
  
- Nachteile:
  - geringe Produktivität vs. gute Automatisierbarkeit
  - technisch – technologisch komplexes Verfahren
  - elektrisch leitende Werkstoffe benötigt
  
- Alleinstellungsmerkmale
  - WEDM
    - hohes Aspektverhältnis
    - nahezu beliebige Konik
  - SEDM
    - schmale , tiefe Einsenkungen
    - Innenkonturen scharfkantig
  
- typische Verfahren
  - Schneidteile - WEDM
  - Spritzguß - WEDM
  - Druckguß - SEDM
  - Massivumformwerkzeuge - SEDM
  
- Verfahrensprinzipien
  - EDM (Electro Discharging Machining)
    - umfasst alle Bearbeitungsverfahren, welche Materialabtrag durch Funken zwischen Werkzeug und Werkstück in einem flüssigen Plasma aufweisen
  - SEDM (Slicing Electro Discharging Machining)
    - Senkerodieren – Negativ der Werkzeuges wird in Werkstück abgebildet
      - hohe Genauigkeit
      - geringe Produktivität
      - für nicht kreisrunde Bohrungen
  - WEDM (Wire Electro Discharging Machining)
    - Drahterodieren – Formelemente werden durch gesteuerten Draht erzeugt
    - konische Formen erstellbar
      - hohe Genauigkeit
      - geringe Produktivität

- für flache komplexe Formelemente

- Aufbau SEDM Maschine:
  - Werkzeug
  - Pinole
  - Pinolenantrieb
  - Werkstück
  - Arbeitsbehälter
  - Vorratsbehälter mit Dielektrikum
  - Filter
  - Pumpe
  - Regeleinrichtung
  - Generator
- Gestufte Bearbeitung SEDM:
  - Schruppen – Elektrode 1
  - Schlichten – Elektrode 1
  - Feinschlichten – Elektrode 2

#### Wirkmechanismen

- Thermisches Plasma
  - Plasma ist ionisiertes Gas oder Flüssigkeit
  - physikalische Eigenschaften wie Gas
  - therm. Plasma entsteht primär bei hohen Drücken
  - physikalischen Eigenschaft sind abhängig von thermischen Verhältnissen
  - Elektr. Leitfähigkeit ist Ergebnis der Ionisation
  - Temperaturen: Säule bis  $10^5$ °C Plasmakanalfußpunkte  $3...7 \cdot 10^3$ °C
  - Strom: > 1A
  - Funkenspannung / Bogenspannung < 30V sonst kein Plasma, sondern nur Glimmentladung
- Allg. Prozeßablauf
  - 1.) Spannung hoch auf Zündspannung  $U_z$ , Aufbau eines elektrischen Feldes
  - 2.) Halten  $U_z$ , erste Entladungsvorgänge
  - 3.) Vermehren der Ladungsträger, Stoßionisation, Aufbau Plasma
  - 4.) Plasma etabliert
  - 5.)  $U_z$  sinkt auf  $U_f$  ab (Flankenspannung bzw. Brennspannung), I steigt auf  $I_f$  (Impulsstrom) => Ausbildung der Gasblase durch Anschmelzen der Plasmakanalfußpunkte
  - 6.)  $I_f$  erreicht => Ausbreitung Gasblase, vergrößern Schmelzbäder wie 6.)
  - 7.) wie 6.)
  - 8.) Abfall  $I_f$  und  $U_z$  => Abbau Plasma => Materialaustrag
  - 9.) Materialverteilung und Disionisation
- Prozesse während der Entladung
  - 1.) Stromfluß über Elektronen nicht über schwere Ionen

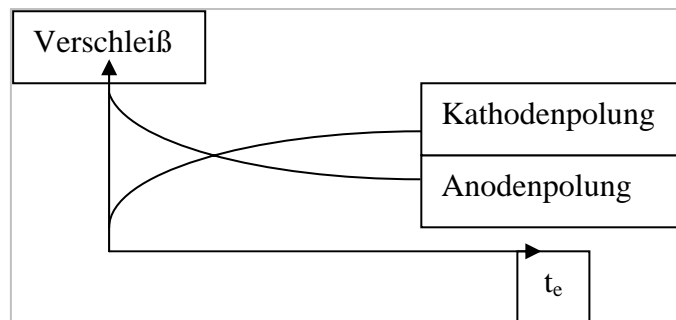
schmale Plasmakanalfußausbildung an Anode (WZ) => hohe Energiedichte, hohe thermische Belastung

Abtrag an Anode stärker als an Kathode

- 2.) Ionenfluß gewinnt an Bedeutung  
PKFP an Anode breitet sich aus => thermische Entlastung Anode  
Energieumsatz an Kathode steigt
- 3.) Stagnation Erwärmung Anode
- 4.) Energieumsatz Kathode steigt  
Anode beginnt Widererstarrung
- 5.) PKFP dehnt sich weiter aus, besonders an Kathode  
Anode Widererstart  
lange Entladezeiten senken Energiedichte
- 6.) Materialaustrag an Anode und Kathode

- Polaritätseffekt

- o Abtragsvolumen
  - erst stärker an Anode, dann stärker an Kathode
- o Verschleiß
  - Kathodenpolung (für kurze Entladezeiten WEDM)
  - Anodenpolung (für lange Entladezeiten SEDM)



## Dielektrikum

- Aufgaben

- o Isolierung
  - Werkstück isolieren während Pausendauer
- o Ionisation
  - Bereitstellung der optimalen Bedingungen
  - schnelle Deionisation
  - Einschnürung des Plasmakanals
- o Kühlung
  - kühlen des Werkstoffes
  - abschirmen (kühlen) Plasmakanal
- o Austragen
  - wegsphülen der Abtragpartikel

- Arten

- o Kohlenwasserstoffdielektrikum
  - kleiner Spalt
  - guter Abtrag
  - geringer Verschleiß

- beeinflussbare Viskosität
  - entflammbar
  - Entsorgungsproblem
  - hautunverträglich
  - hohe Randzonenschädigung
  - für SEDM
- Deionisiertes Wasser
  - besser Genauigkeit
  - bessere Oberfläche
  - keine Entsorgungsprobleme
  - bessere Kühlung
  - mehr Verschleiß
  - weniger Abtrag
  - Deionisation nötig
  - für WEDM
- Spaltkontamination
  - Durchmischung Dielektrikum mit Gas oder Abtragpartikeln sowie Erwärmung des Dielektrikums werden unter dem Begriff zusammengefasst
  - gewisse Kontamination notwendig für guten Prozeß und mind. Spaltbreite
  - so großer Spalt instabiler Prozeß
- Spülprinzipien
  - Eigenspühlung
    - Spalt kann nicht unterkonterminiert werden
    - am Anfang gute Zündung
    - im Prozeß schlechter werden
  - Bewegungsspülung
    - Ausgleich der Nachteile der Eigenspühlung durch zusätzliche Bewegung
    - Produktivität sinkt / darum eher Adaptives Spülen
    - Reproduzierbares Spaltmaß
  - Offene Spühlung
    - wirkt nur an Randbereichen
    - keine großen Aspektverhältnisse
    - einfach anwendbar
  - Interne Druckspühlung
    - i.d.R. gut anwendbar
    - Inhomogen Strömungsverhältnisse => inhomogener Verschleiß
  - Interne Saugspühlung
    - selbe wie Interne Druckspühlung
    - + Verstopfungsrisiko

#### Generatorotechnik

- RC Generator
  - Vorteile: einfache Bauweise, gute Selbstregelung
  - Nachteile: keine konstante Impulsenergie, bipolare Impulse, hoher Verschleiß
- Impulsgenerator
  - Vorteile: konstante Impulsenergie, Pulsform und Pulsparameter reproduzierbar (einstellbar)

- Nachteile: komplizierte Bauweise (viele aktive Elemente), große Trägheit der aktiven Teile (nicht für kurze Pulse)
- Ohmsche Spannungsquelle (Senkerosion)
  - Vorteile: einfache Bauweise; billig, steiler Flankenanstieg
  - Nachteile: keine konstante Stromamplitude, Stromregelung diskret (abhängig von Wertevorrat), niedriger Wirkungsgrad
- Impulsregime
  - isofrequente Regime
    - $t_i, t_o, f_p = \text{konst}$
    - $t_e = \text{unkonst}$
    - Tastverhältnis =  $t_i/t_p$
    - relativ stabiler Prozeß, Spannung liegt an bis  $t_i$  verstrichen
  - isoenergetisches Regime
    - $t_e, t_o = \text{konst}$
    - $f_p = \text{unkonst}$
    - Tastverhältnis =  $t_e/t_p$
    - Spannung liegt an bis  $t_e$  vorbei
    - reproduzierbare Pulsparameter
    - Generatoreseitige Rückkopplung notwendig

#### Elektrodenwerkstoffe

- Graphit
  - Vorteile: hohe Abtragraten, da hohe Energiedichte; geringer Verschleiß, geringe Dichte (größere Elektroden möglich); geringere Wärmedehnung, Feinkorngraphit => sehr gute Oberflächen
  - Nachteile: Feinkorngraphit sehr teuer; spezielle Anforderung an Maschinen z.B: Absaugung des entstehenden Staubes
- Kupfer
  - Vorteile: neigt weniger zur Lichtbogenbildung bei kleinem Spalt, in Extrembereichen besser Qualität als Feinkorngraphit
  - Nachteile: hohe Dichte, schwer bearbeitbar

#### Vorschubregelung

- Zweck der AC-Regelung:
  - Das Werkzeug muß dem Abtrag / Verschleißfortschritt nachgeführt werden
  - dazu wird die Zündzeit gemessen, denn es kommt nur zu Zündung, wenn der Spalt die richtige Größe hat
  - zu Messung gibt es Komperatoren, welche Spannungsverlauf überwachen oder Strom- bzw. Spannungen werden gemessen
- Indikatorengrößen
  - $u_{\text{esoll}}$  und  $t_{\text{dsoll}}$
- Sollwerteinfluß
  - Regler vergleicht Sollwerte mit Istwerten und führt Werkzeug nach

#### Prozeßentartung

- Prozeßentartung sind elektrsiche Ereignisse welche keinen Abtrag verursachen
  - Fehlzündungen: Spalt zu klein

- Kurzschluß: kein Spalt
- Leerlauf: Spalt zu groß
- andere Prozeßentartungen
  - Brückenbildung: durch zu kleinen Spalt oder Abtragpartikelansammlungen
  - schwache Deionisation
  - falsche Prozeßparameter
  - Problematische Werkstoffkombinationen
- Brückenbildung führt zu stationären Entladungen => Lichtbogengefahr => Einbrand
- Stationäre Entladungen: Funkenbildung an einem Ort
  - Gegenmaßnahmen: Sofortabschalten, Impulsausblendung, erhöhen Pausendauer, verringern Impulsstrom für nachfolgende Impulse

### Parametertechnologie

- technologische Zielgrößen:
  - Restriktive Zielgrößen: Oberflächenrauheit
  - Optimierte Zielgrößen: Verschleiß (relativer Verschleiß); Produktivität (Abtrag)
  - informative Zielgrößen: Wirkspalte: lateral oder frontal
- Prozesskonfiguration: gelten nur für einen Prozeß, sind abhängig von:
  - Maschine: Impulsgenerator, Vorschubregelung
  - Werkstoffe: Werkstoff beider Elektroden
  - Dielektrikum
- Einflüsse auf Abtrage:  $t_e$ ,  $i_f$  und Tastverhältnis
  - $t_e \uparrow$  Abtrage  $\downarrow$ , da sich Plasmakanal weiter ausdehnt, somit die Energiedichte sinkt
  - $i_f \uparrow$  Abtrage  $\uparrow$ , höhere Energiedichte bedeutet mehr Ladungsträger
  - Tastverhältnis  $\uparrow$  Abtrage  $\uparrow$
- Einflüsse auf Rauheit:  $t_e$ ,  $i_f$ 
  - $t_e \uparrow$  Rauheit  $\uparrow$
  - $i_f \uparrow$  Rauheit  $\uparrow$
- Abtragintensive Verschleißarme Bearbeitungsverfahren
  - verschleißarm: Graphitelektrode und  $t_e \uparrow$  da mit zunehmender Entladedauer der Erstarrungsprozeß der Anode voranschreitet und somit der Abtrag sich verringert
    - $i_f \downarrow$
  - Abtragsinsensiv: entgegengesetzt
- Kompromißfeld: siehe Punkt oben drüber – um verschleißarm zu arbeiten ist es notwendig  $t_e$  zu erhöhen eine unendliche Erhöhung bringt nichts, da der Abtrag sinkt. Also den Punkt  $t_e$  suchen, ab dem Verschleiß konstant ist und nicht weiter erhöhen.

## Drahterodieren

- Allgemein
  - geringe Entladedauer, da dünner Draht vor thermischen Überlastungen geschützt werden muß
  - geringe Endladeenergien
  - Nadelimpuls, kurze Impulse mit hoher Stromdicht
  - Werkzeug kathodisch gepolt
  - Dielektrikum: Deionisiertes Wasser
    - kleinere Abtragpartikel
    - größerer Spalt – da bessere Leitfähigkeit
    - bessere Wärmeabfuhr
  
- Drahtmodifikationen
  - es haben sich Messing bzw. Zink beschichtete Drähte bewehrt gegenüber Kupfer. Messing hat stärkeren Verschleiß als Kupfer, jedoch lässt sich Messing gut kalt verformen. Zugfestigkeitssteigerung bis auf 1000 N/mm<sup>2</sup>.
  - Zink hat geringen Schmelzpunkt, sorgt für gute Spaltkontamination.
  - Zink hat hohe Affinität zu Sauerstoff, somit bildet sich Oxidhaut auf Zinkteilen, dies verhindern ein ankleben am Werkstoff und der Zinkteilchen untereinander.
  - Drahtdurchmesser: größerer Drahtdurchmesser bedeutet mehr Schnitttrate. Da die Strombelastbarkeit mit dem Quadrat des Durchmessers ansteigt, während Abtrag nur linear.
  - Feinschnitt: mit Zink überzogener Draht
  - Schrappschnitt: mit Zink überzogen und wärmebehandelt, da Zink sonst verdampft wäre bevor er aus Werkzeug austritt.
  
- Technologie Zielgrößen
  - Restriktiven Zielgrößen: Oberflächenrauheit, Konturgenauigkeit
  - Optimierten Zielgrößen: Produktivität (Abtrag), Randzonenschädigung
  - Informativen Zielgrößen: Wirkspalt (laterale, Aufmaß, Offset = Aufmaß+Drahtradius+Spalt)
  
- Prozeßkonfiguration
  - Maschinenkonfiguration: Impulsgenerator, Maschine (Vorschubregelung)
  - Werkstückkonfiguration: Werkstoffe der Elektroden
  - Dielektrikum: Deionisierte Wasser
  
- Schittrate
  - Entladeenergie steigt, Schnitttrate steigt
  - Impulsfrequenz steigt, Schnitttrate steigt
  - Werkstückhöhe steigt, Schnitttrate steigt bis Optimum danach Abfall
    - vor Optimum
      - geringe Werkstückdicke, dadurch hohe Energiedichten, hohe thermische Belastungen des Drahtes, bis Riß
    - nach Optimum
      - starke Zunahme der Spaltkontamination, Prozeßstörung, Fehlentladungen

- Rauheit
  - Impulsenergie (Entladezeit, Impulsstrom)
    - Erhöhung führt zu Vergrößerung des Schnittspaltes, durch steigende Kontamination des Arbeitsspalt, Anwachsen der Kräfte, größere Schwingung des Drahtes.
    - Entladedauer hoch, großer Krater > große Rauheit
  - Werkstoff
  - Vorschubgeschwindigkeit
    - steigt, dann steigt Rauheit, da Wahrscheinlichkeit sinkt Unebenheiten noch einglätten zu können
  - Drahtgeschwindigkeit
  - Impulsfrequenz
    - je höher, desto besser Oberflächenqualität, da mehr Entladungen pro Schnitt, somit nachschneiden von Unebenheiten möglich
    - Aufgrund der Erhöhung und kürzer werdenden Pausenzeit kann es zu thermischen Überbelastungen des Drahtes kommen => Grenze
  - Aufmaß
    - nur relevant für Nachschnitte
      - Nachschnitte bringen Oberflächenglättung und Abbau der Randzone (weiße Schicht), jedoch nur bis zum 3. Nachschnitt, jeder weitere Nachschnitt bringt nur noch Oberflächenglättung
- Aufmaß beim Nachschnitt
  - Größe ist abhängig von der Anzahl der Nachschnitte und der Entladeneenergie
    - bei geringer Entladeneenergie sind die Abstoßkräfte geringer, somit sinkt die Ausbauchung der Drahtes und die Parallelität steigt
  - kleines Aufmaß bedeutet weniger Spaltkontamination, dies führt zu einem Abreißen des Abtragvorganges (Fehlzündung), Vorschub fährt trotzdem weiter > Riß des Drahtes
- Formfehler beim Drahterodieren
  - durch seitliche Drahtschwingung
  - oberer Schnittspalt kleiner als unterer

## Randzone

- Merkmale der Randzonenbeeinflussung beim Erodieren
  - Randschicht (weiße Schicht)
    - Schmelzen und Abschrecken – Verhärtung
    - Einlagern von Bestandteilen des Werkzeuges
    - ungleichmäßige Verteilung
    - Poren
    - Mikrorisse (besonders bei sprödharten Werkstoffen)
    - Zugspannungen
  - Umwandlungszone
    - Phasenumwandlung unter dem Schmelzpunkt des Materials, Gefügeschäden (Korngrenzenrisse)
  - Eigenspannungszone



- Eigenspannungen bis ins Grundgefüge
  - umwandlungsfreie Gefüge
    - keine Veränderung durch den thermisch erosiven Prozess
- Aufbau der beeinflussten Randzone
  - Randschicht
  - Umwandlungszone
  - Wärmeeinflußzone
  - über alle drei kommt die Eigenspannungszone
  - Grundgefüge

## ECM

- thermische Abtragen: Schmelzen, Verdampfen
- chem. Abtragen ohne äußere Stromquelle: Rosten
- gehört zum elektrisch-chemischen Abtragen mit äußerer Stromquelle
- Vorteile:
  - kein Werkzeugverschleiß
  - kein Aufbrauchen des Wirkmediums (wässrige Lösung: NaCl), lediglich Wasser wird verbraucht
  - keine Randzonenschädigung
  - keine thermische Belastung des Werkstückes
  - kein Wärmeverzug
  - mit steigender Energiedichte steigt Produktivität und Oberflächengüte
  - Bearbeitung harter und schwer zerspanbarer Werkstoffe
  - kathodische Polung des Werkzeuges
- Nachteile:
  - geringe Produktivität
  - elektrische Leitfähigkeit des Werkstoffes
  - keine chemische Beständigkeit des Werkstoffes
  - sehr hoher Energieaufwand
  - 99% der reingesteckten Energie werden in Wärme umgesetzt nur 1% zum Abtragen

- Produktivität:

$$m = A_m \cdot I \cdot t \cdot \eta / n \cdot \kappa$$

m	abgetragene Masse
A <sub>m</sub>	Atommasse
I	Stromstärke
t	Zeit
η	Wirkungsgrad
n	Atomwertigkeit
κ	Leitfähigkeit

- Vorschub:

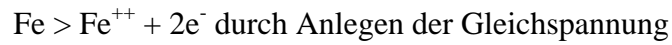
$$v_f = V_{sp} \cdot s$$

V<sub>sp</sub> Materialkonstante Eisen = 2,21 mm<sup>3</sup>/minA

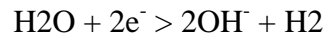
s      Stromdichte = I/A

- Reaktionen

An Anode: herauslösen von Eisen



An Kathode:



Wasserstoff entsteht, bei hohen Abtragraten absaugen sonst  
Explosionsgefahr

- Elektrolyt:

- elektrische Leitfähigkeit
- Wärmetransport
- Transport der Abtragpartikel
- Transport Wasserstoff

- Abbildungsfehler: verhindern durch Isolation des Werkzeuges

- Spaltbreite

- $b = (\text{U}_{\text{ag}} - \text{U}_{\text{z}}) \cdot \kappa / s \cdot \sin \alpha$

- quasistationärer Vorgang: Abtraggeschwindigkeit solange gering bis  
geometrisches Gleichgewicht

- an kleineren Spalten höhere Energiedichten > mehr Abtrag, bis  
Gesamtspalt eine Höhe hat

- Wirkspalt abhängig von Temperatur, Temp. hoch > Wirkspalt groß

-