

FERTIGUNGSTECHNIK



Wintersemester 2020/21

GLIEDERUNG DER VORLESUNG

1	Einführung: Grundlagen der Fertigungstechnik		
2	Die verschiedenen Fertigungsverfahren		
2.1	Urformen (Gießen, Additiv, ...)	2.4	Fügen (Schweißen, Löten, ...)
2.2	Umformen (Massiv-, Blech-, ...)	2.5	Beschichten
2.3	Trennen (Drehen, Fräsen, ...)	2.6	Stoffeigenschaft ändern
3	Messen in der Fertigung		
4	Prüfungsvorbereitung		

EINTEILUNG

Trennen

Zerteilen	Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide	Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide	Abtragen	Zerlegen	Reinigen
DIN 8588	DIN 8589-0	DIN 8589-0	DIN 8590	DIN 8591	DIN 8592

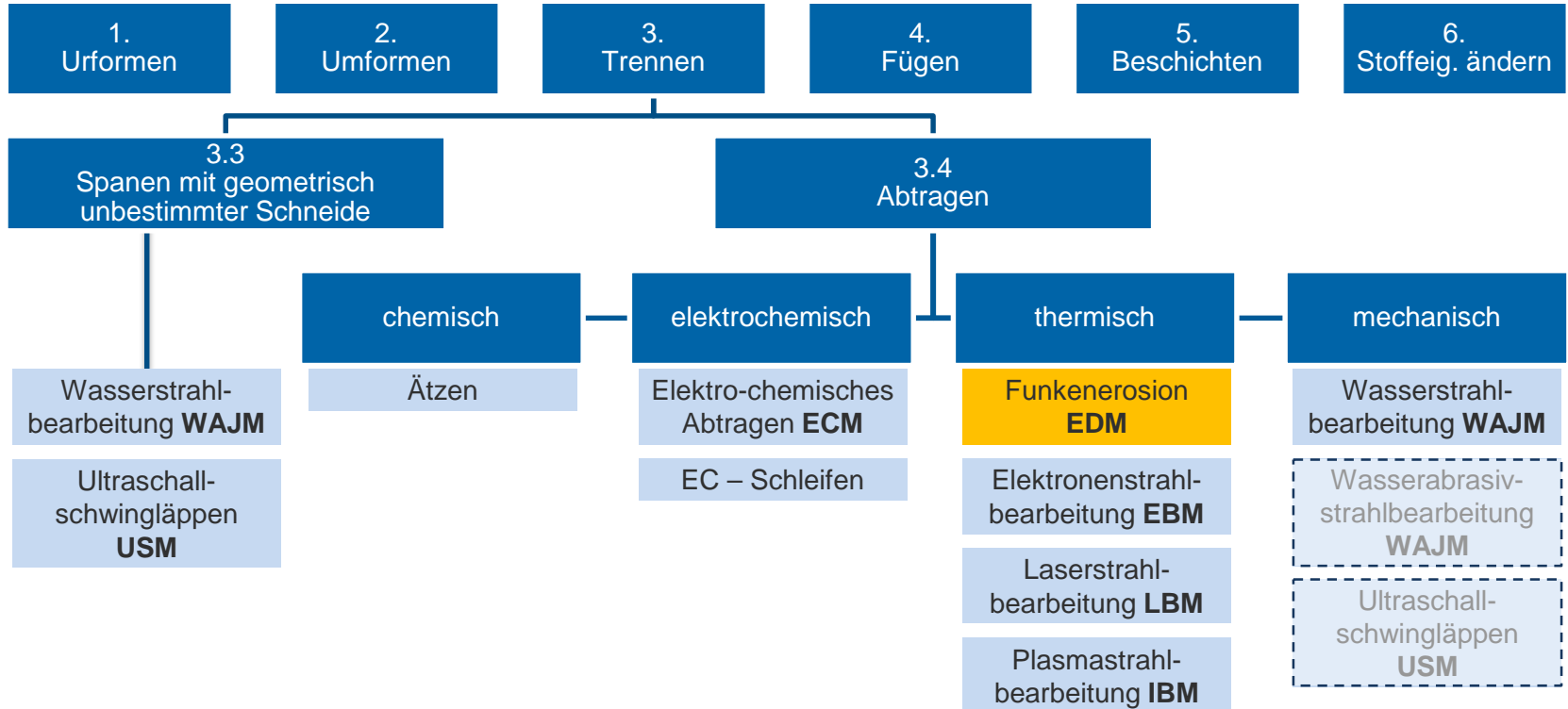
2.3 Trennen

ABTRAGEN

- Nichtmechanisches Abtrennen von Stoffteilchen von einem festen Körper (DIN 8580)
- Sowohl Entfernen von Werkstoffschichten als auch das Trennen von Teilen aus Grundwerkstoff
- Keine bis sehr geringe Kräfte notwendig
- Erzielung hoher Genauigkeiten
- Unterteilung nach Vorgang in der Wirkzone in:
 - **Thermisches Abtragen**
 - Aufhebung des Werkstoffzusammenhalts durch Wärmevorgänge im festen, flüssigen oder gasförmigen Zustand
 - **Funkenerosion**
 - **Strahlabtragen** (Licht, Laser, Elektronenstrahl)
 - **Gasabtragen**
 - **Chemisches Abtragen**
 - **Elektrochemisches Abtragen**

2.3 Trennen

ABTRAGEN

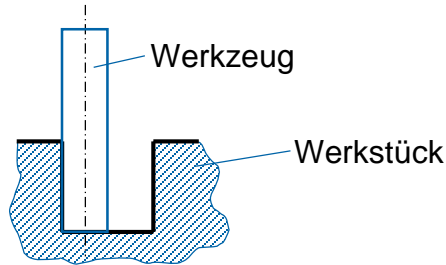


Quellen: TU Chemnitz IWP

2.3 Trennen

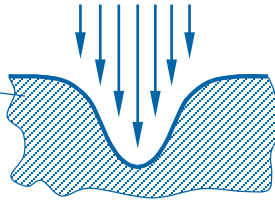
ABGRENZUNG ZUR SPANENDEN BEARBEITUNG

Spanen



Formwerkzeug mit bestimmter oder unbestimmter Schneide

Abtragen



Medium (Strahl), das auf physikalischem und/oder chemischem Weg einen Materialabtrag bewirkt

Elementare Abtraggeometrie wird durch physikalische Feldgrößen bestimmt, die oft einer Gauß-Verteilung folgen, z. B.

- Chem. Konzentration
- Temperatur
- Elektr. Stromdichte

Anwendung abtragender Verfahren:

- Bearbeitung **hochfester Werkstoffe**
- Herstellung komplexer und/oder komplizierter **Formelemente**
- **Großflächige Bearbeitungen** → parallele Bearbeitung (chem. Abtragen)

FUNKENEROSION



2.3 Trennen

FUNKENEROSION / EDM – ELECTRO DISCHARGE MACHINING auch: ERODIEREN

- **Werkstoffabtrag** an elektrisch leitfähigen Werkstücken **durch aufeinanderfolgende, zeitlich voneinander getrennte, elektrische Entladungen** („Funken“) in einem el. nicht leitfähigen Medium („Dielektrikum“)
- **Abbildung der Werkzeugelektrode** (entspr. Werkzeuggeometrie) **im Werkstück** unter Zugabe des Arbeitsspalt (gap) mittels sehr hoher Anzahl ($> 10^5 \text{ s}^{-1}$) aufeinanderfolgender, unabhängiger Funkenentladungen zwischen Werkzeug und Werkstück
- ➔ **Vorteil:** Bearbeitung aller el. leitfähigen Materialien unabhängig von Härte, Zähigkeit etc.
- Abbildegenauigkeit, Werkzeugverschleiß und Prozessgeschwindigkeit abhängig von
 - Schmelz-/Verdampfungstemperatur und Wärmeleitfähigkeit beider Elektrodenwerkstoffe
 - Einstellparameter (Entladedauer t_e , Pausendauer t_0 , Entladestrom i_e , Entladespannung u_e)
 - Somit von der Entladeenergie W_e $W_e = \int_{t_e} u_e(t) \cdot i_e(t) dt \approx U_e \cdot i_e \cdot t_e$
 - Die Entladeenergie W_e bestimmt das abgetragene Materialvolumen V_{we}

2.3 Trennen

VORGÄNGE UND PHASEN BEI DER FUNKENEROSION

Zündphase:

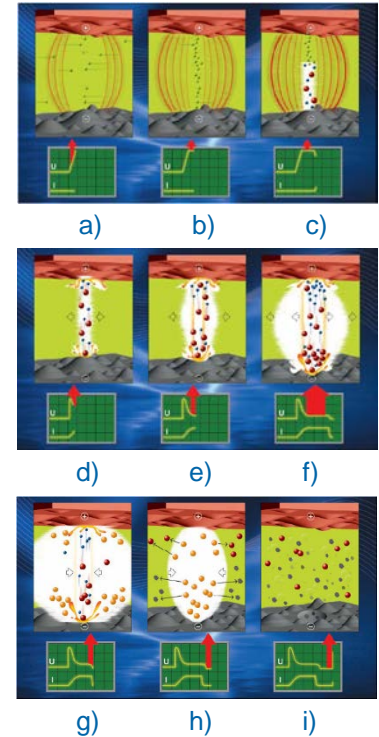
- Anlegen der Leerlaufspannung, Aufbau eines elektrischen Feldes (a)
- Ausrichten von geladenen Teilchen, Bläschen, Partikeln im Spalt (b)
- Überschlag: Bildung eines leitfähigen Entladekanals in Form einer Plasma-Gasblase, sichtbar als Funke (c)

Entladephase:

- Stromfluss, Umwandlung von kinetischer Energie in Wärmeenergie durch Stoßprozesse der beschleunigten Elektronen und Ionen. Absinken der Spannung auf Entladespannung. Starke Erhitzung der Umgebung des Plasmakanals. (d)
- Weitere Ausdehnung des Entladekanals, steigender Stromfluss (e)
- Entstehung eines Gegendruckes infolge der Zähigkeit des umgebenden Dielektrikums → Einschnürung des Entladekanals an Elektrode und Werkstück → hohe Stromdichte → intensive Erwärmung mit nachfolgendem Aufschmelzen und Verdampfen des Materials (e, f), Entladekanal erreicht Gleichgewichtszustand (f)

Pausenphase:

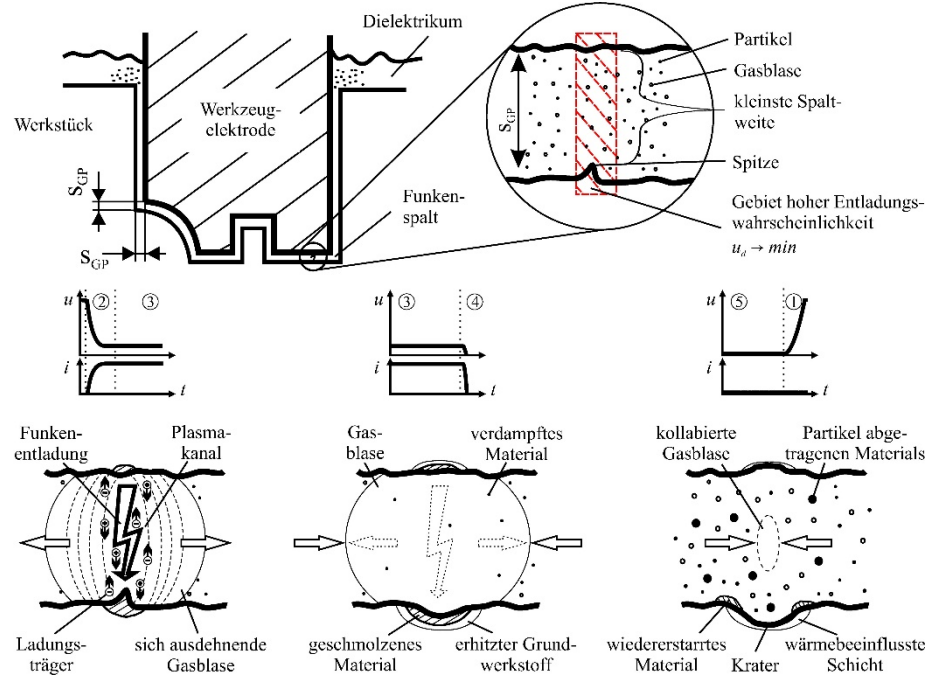
- Implosion der Gasblase durch Abschalten der Spannung und damit der äußeren Energiezufuhr → Ausschleudern der Schmelze (g, h)
- Abtransport der erstarrten Abtragpartikel durch das Dielektrikum (i)



2.3 Trennen

VORGÄNGE UND PHASEN BEI DER FUNKENEROSION

- Materialabtrag **sowohl an Werkzeug als auch am Werkstück**
 - kurze Pulse: vermehrt Abtrag an der positiv gepolten Elektrode
 - negative Ladungsträger (Elektronen) besitzen geringere Masse (werden stärker beschleunigt) als positive Ladungsträger (Ionen) und führen zu Beginn der Entladung an der positiv gepolten Elektrode zu einem Materialabtrag
 - lange Pulse: vermehrt Abtrag an der negativ gepolten Elektrode
 - positive Ladungsträger führen mit zunehmender Pulsdauer (aufgrund der größeren Masse) zu einem zunehmenden Materialabtrag an der negativ gepolten Elektrode
- ➡ Wahl der Polarität Werkzeug/Werkstück entsprechend

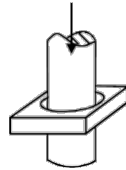
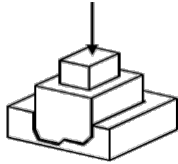


2.3 Trennen

VERFAHRENSVARIANTEN ERODIEREN

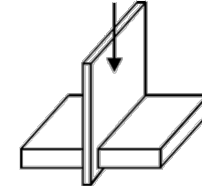
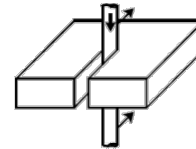
Funkenerosives Senken

Gravieren / Senken mit Formelektroden „Bohren“



Funkenerosives Schneiden

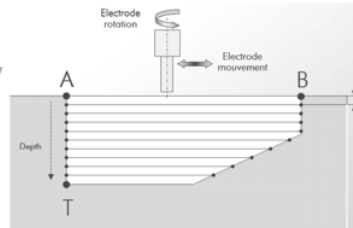
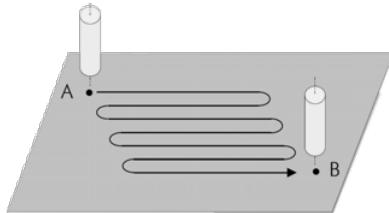
Erodierschneiden mit Drahtelektrode Erodierschneiden mit Blattelektrode



Sonderformen:

Funkenerosives „Fräsen“

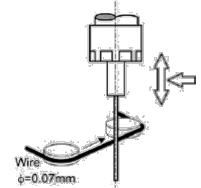
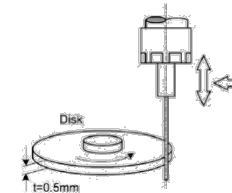
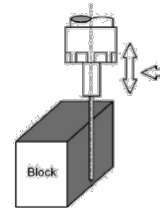
Erzeugen einer komplexen Geometrie mit einfacher Elektrode



Funkenerosives „Schleifen“

Erzeugen der Werkzeugelektrode durch Erodieren

Stationärer Block / drehende Scheibe / ablaufender Draht



Quellen: TU Chemnitz IWP

2.3 Trennen

AUFBAU EINER ERODIERMASCHINE I

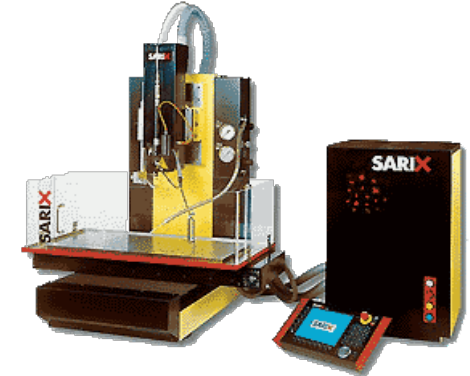
Grundaufbau analog konventioneller WZM: Gestell, Achsen, Steuerung

Zusätzliche, spezielle Komponenten für EDM:

- **Gestell:**
 - Auslegung der Konstruktion für Arbeiten mit Dielektrikumsbad (Becken) → Korrosionsschutz
- **Dielektrikumskreislauf, Spülung:**
 - Tank und Filter, Pumpe, bei deionisiertem Wasser Harzpatrone
- **Generator:**
 - Leistungselektronik zur Steuerung und Erzeugung der Erodierimpulse
 - Zuleitungen zur Elektrode und zum Werkstück
- **Steuerung:**
 - Sensorik für Spaltweitenregelung: Spannungs- und Stromauswertung
- **Achsen:**
 - schnelle Z-Achse (Erodiervorschub)

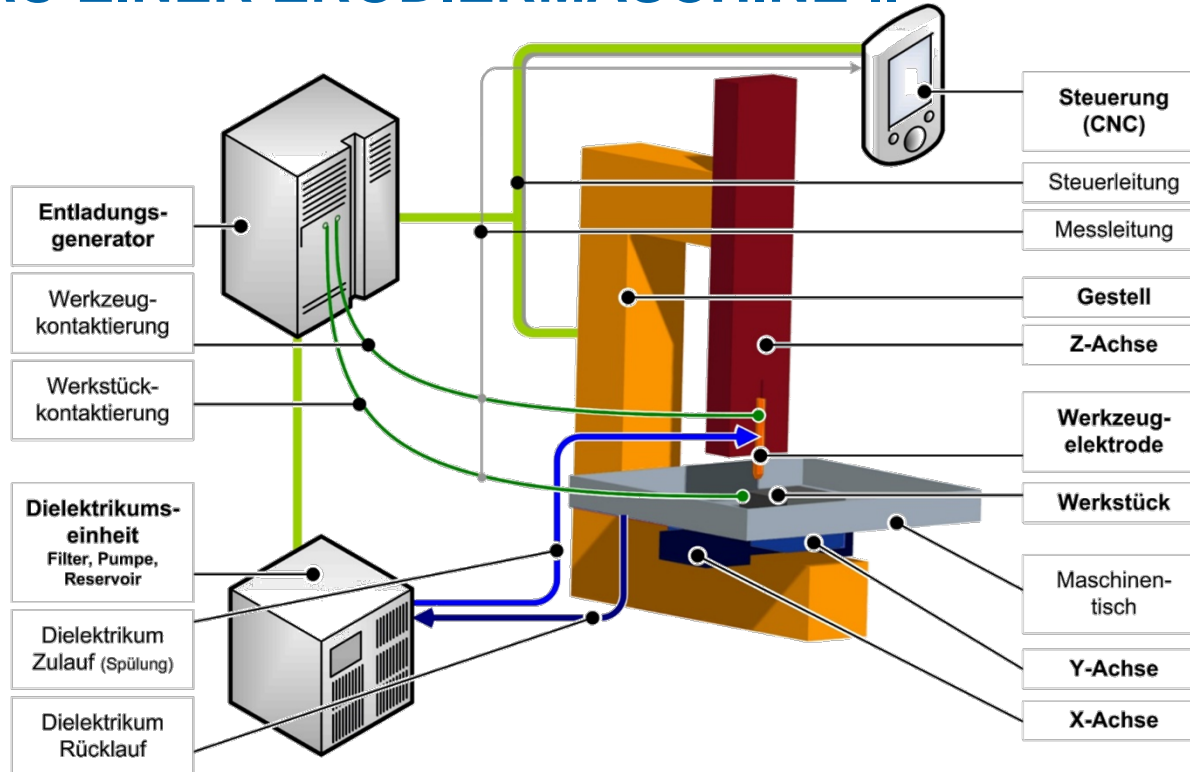


Senkerodiermaschine (AGIE)



Senkerodiermaschine für die Mikrobearbeitung (Sarix)

AUFBAU EINER ERODIERMASCHINE II



2.3 Trennen

PROZESSKENNGRÖSSEN

Bearbeitungszeit (s)

- Zeit bis gewünschtes Materialvolumen abgetragen ist
- Anteil wirksamer Einzelentladungen im Prozess

Abtragsrate v_e ($\mu\text{m}^3/\text{s}$)

- abgetragenes Materialvolumen am Werkstück bezogen auf Bearbeitungszeit
- Ort des größeren Abtrags wird durch Polarität in Abhängigkeit der Impulszeit bestimmt

Verschleißrate v_w ($\mu\text{m}^3/\text{s}$)

- abgetragenes Materialvolumen am Werkzeug bezogen auf Bearbeitungszeit

Relativer Verschleiß ϑ (%)

- Verhältnis Verschleißrate zu Abtragsrate

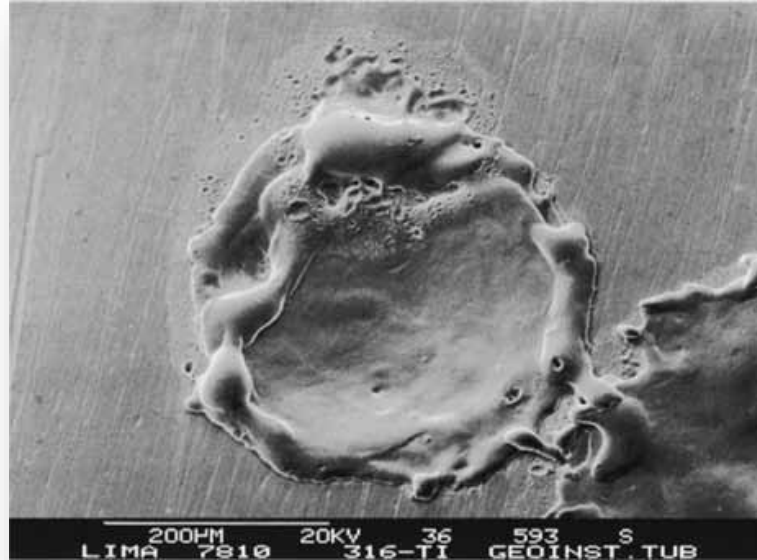
2.3 Trennen

Makro- und Mikrobearbeitung – Parameter

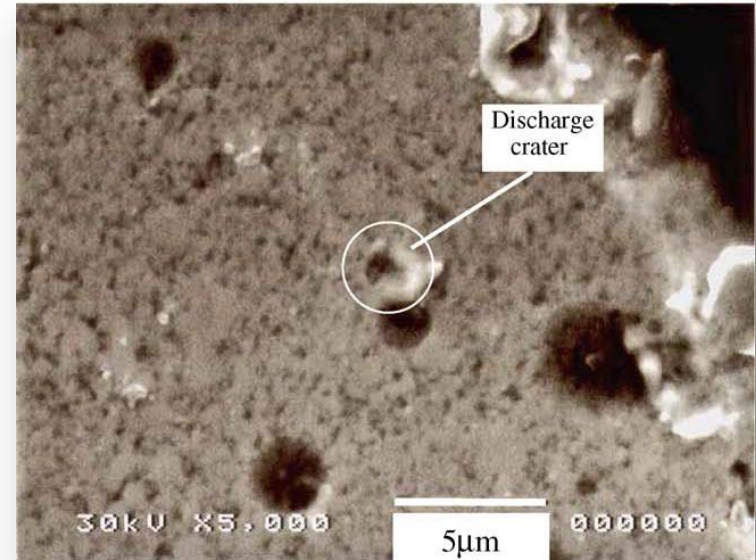
	Makro-EDM	Mikro-EDM	Faktor
Impulsdauer (t_i)	1 ... 5.000 μ s	0,05 ... 1 μ s	20 ... 5.000
Spannung (u_0)	80 ... 200 V	80 ... 200 V	1
Strom (i_e)	50 ... 150 A	2 ... 15 A	20
Elektroden-gewicht	5 ... 100 kg	0,1 ... 100 g	1.000
Werkstückgewicht	bis 5.000 kg	0,5 g ... 5 kg	1.000
Funkenspalt	30 ... 100 μ m	5 ... 15 μ m	6
Generatortyp	Isopuls-Generator	RC-Schwingkreisgenerator	
Dielektrikum / Spülung	Öl und Wasser, innengespülte Elektrode, Hochdruck,	Öl und Wasser, nur Außenspülung möglich	

2.3 Trennen

Makro- und Mikrobearbeitung – Parameter



Einzelentladung Makro EDM ca. \varnothing 200 μ m

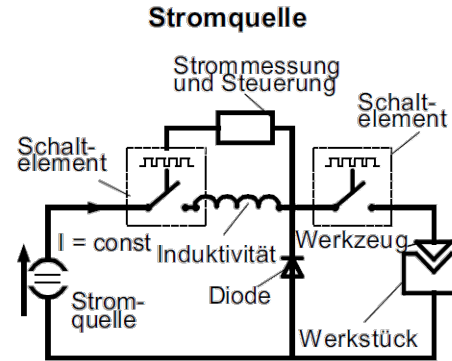
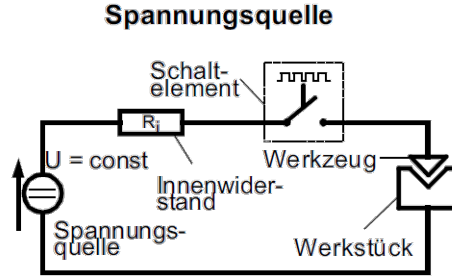


Einzelentladung Mikro EDM ca. \varnothing 2 μ m

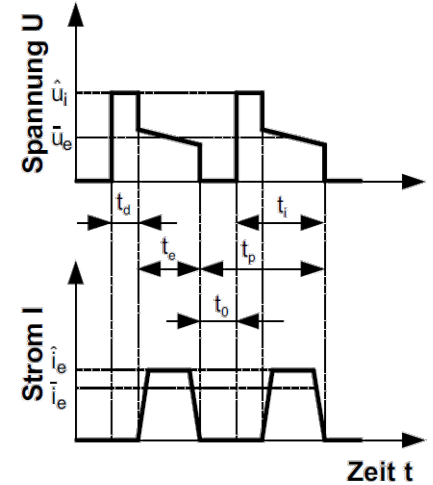
2.3 Trennen

MAKRO-EDM: ISOPULSGENERATOR

- hohe Abtragleistung ist angestrebt
-> hohe Entladeenergie
- Entladeenergie bestimmt sich aus Impulsdauer und Entladestrom
- Entladepulsform einstellbar**
- Impulsdauer t_i 0,5 μ s bis >2000 μ s
- Polarität: Werkzeug positiv (positive Ladungsträger bestimmen den Abtrag am Werkstück)
- kein Überspringen \rightarrow geringer Verschleiß am Werkzeug



Spannungs- und Stromverlauf (schematisch)

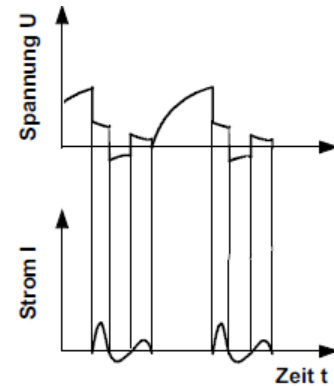
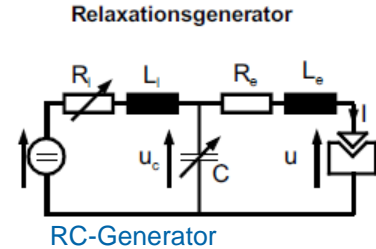


- t_i : Impulsdauer
- t_e : Entladedauer
- t_p : Periodendauer
- t_d : Zündverzögerungszeit
- t_0 : Pausendauer
- \hat{U}_i : Leerlaufspannung
- \bar{U}_e : mittlere Entladespannung
- \bar{I}_e : mittlerer Entladestrom
- \hat{I}_e : maximaler Entladestrom

2.3 Trennen

MIKRO-EDM: SPEICHER-/ RELAXATIONSGENERATOR

- geringe Oberflächenrauheit / geringe Abtragrate wird angestrebt
- Im Kondensator gespeicherte Energie entlädt sich über Funkenspalt
- Kondensator wird im Schwingkreisprinzip (RC-) wieder aufgeladen
- **Ladespannung und Kapazität des Kondensators bestimmen Entladeenergie**
- Impulsdauer t_i 10 bis 500 ns
- Polarität: Werkzeug negativ (negative Ladungsträger bestimmen den Abtrag am Werkstück)
- Wechsel der Polarität beim Überschwingen der Entladung bewirkt einen zusätzlichen Abtrag am Werkzeug (höherer Verschleiß am Werkzeug)



DIELEKTRIKUM I

Aufgaben:

Gewährleistung der Isolation zwischen Elektrode und Werkstück

Schaffung optimaler Bedingungen für Aufbau des elektrischen Feldes

Kühlung der Elektrode und des Werkstücks

Abtransport der Abtragpartikel

Eingesetzte Dielektrika

Wasser (häufig Drahterodieren)

Synthetisches Öl (häufig Senkerodieren)

gasförmiges Fluid (Dry EDM, Forschung)

Mischung gasförmiges + flüssigen Fluid (Near Dry EDM, Forschung)

2.3 Trennen

DIELEKTRIKUM II - WASSER

Hauptanwendungsgebiet

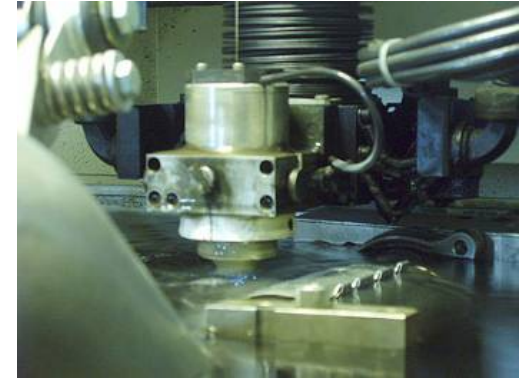
- Drahterodieren (Aufgrund der besseren Spülbarkeit und des größeren Funkenspalts im Vergleich zu Öl)

technische Eigenschaften:

- Leitfähigkeit: $\sim 1 \mu\text{S} / \text{cm}$
- Durchschlagsfestigkeit: $13 \text{ MV} / \text{m} \rightarrow 13 \text{ V} / \mu\text{m}$
 Funkenspalt: **10 μm bei 130 V**
- Hohe Abtragraten, mittlere Oberflächenqualität, hoher Werkzeugverschleiß
- Korrosionsprobleme (Bauteil wird in Wasser getaucht)

Aufbereitung:

- Filtern der Abtragpartikel
- Reduzierung der Leitfähigkeit mittels Harzfilter (Deionisieren)
- Kühlen



Drahterodieren im Wasserbad

2.3 Trennen

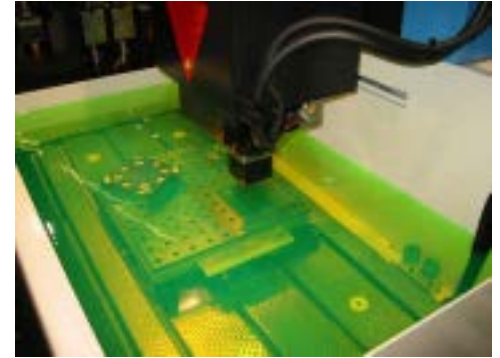
DIELEKTRIKUM III – KOHLENWASSERSTOFFE (ÖL)

Hauptanwendungsgebiet

- Senkerosion (Bessere Konturgenauigkeit und Oberflächenqualität aufgrund des kleineren Funkenspaltes)

technische Eigenschaften:

- Leitfähigkeit: $\sim 0,1 \mu\text{S} / \text{cm}$
- Durchschlagsfestigkeit: ca. $22 \text{ MV} / \text{m} \rightarrow 22 \text{ V} / \mu\text{m}$
 Funkenspalt: $5,9 \mu\text{m}$ bei 130 V
- Mittlere Abtragraten, hohe Oberflächenqualität und Präzision, geringer Werkzeugverschleiß
- Keine Korrosionsprobleme, aber Brandgefahr und Umweltproblematik



Senkerodieren im Ölbad

Aufbereitung:

- Filtern der Abtragpartikel
- Kühlen

2.3 Trennen

DIELEKTRIKUM IV – LUFT

Hauptanwendungsgebiet

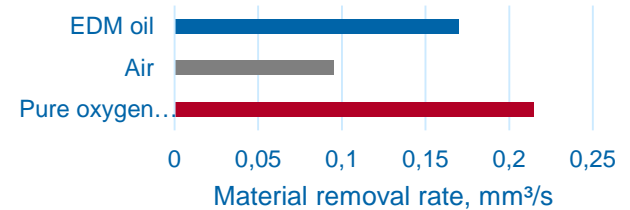
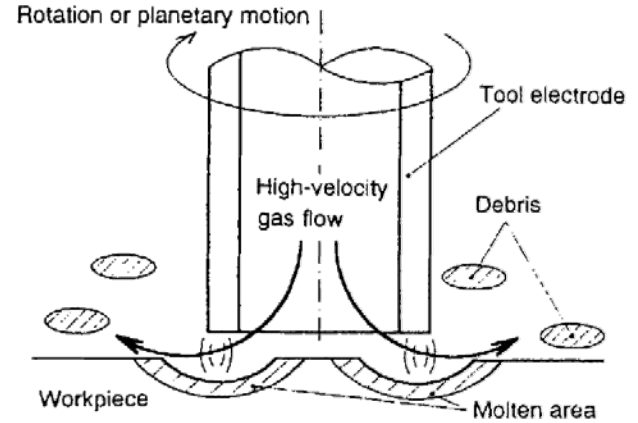
- Forschung

Technische Eigenschaften:

- Durchschlagsfestigkeit: 3 MV / m \rightarrow 3 V / μ m (Luft)
43,3 μ m bei 130 V
- Abtragrate von Sauerstoffgehalt abhängig (oxidierende Wirkung)
- Nur mit Hohlelektrode einsetzbar
- Hohe Durchflussgeschwindigkeit angestrebt, damit schmelzflüssiges Material schnell erstarrt

Near Dry

- Mit Flüssigkeit/Tropfen versetztes gasförmiges Dielektrikum
- Entsprechende Mischeigenschaften



Influence of concentration of oxygen in the gas on the material removal rate. (Discharge current: 20 A, open voltage: 280 V, pulse duration: 350 μ s, duty factor: 70 %, workpiece: steel (S45C) tool electrode: \varnothing 8,6 mm copper)

2.3 Trennen

DIELEKTRIKUM V

Parameter	Einheit	Wasser	Öl	Luft
Brennbarkeit		nein	ja	nein
Dichte	g / cm ³	≈ 1	0,75 – 0,9	0,0012
Viskosität bei 40 °C	mm ² / s	0,7	1,3 – 2,5 (oder höher)	0,017
Siedepunkt	°C	100	> 170	ca. -170
elektr. Leitfähigkeit	μS / cm	1 – 5 (entionisiert)	≈ 10 ⁻¹⁰	-
Spezifische Wärmekapazität	J / kg*K	4,1	≈ 1,7	≈1
Wärmeleitfähigkeit	W / (m·K)	0,6	≈ 0,15	0,0242
Dipolmoment		ja – permanentes	nein	nein
Ionenbildung		möglich	nicht möglich	möglich
Durchschlagsfestigkeit	MV / m	13	14-22	3

Quellen: TU Chemnitz IWP

2.3 Trennen

WERKZEUGMATERIALIEN

Dielektrikum:

- Kohlenwasserstoffe
 - Hohe Durchschlagfestigkeit
 - Hohe Abbildgenauigkeit

Werkzeugelektrodenwerkstoff:

- Kupfer
 - Hohe Wärmeleitfähigkeit, leichte Spanbarkeit
- Grafit
 - Hohe Sublimationstemperatur, leicht
 - Besonderheit: relativer Verschleiß nimmt mit steigendem Entladestrom ab → Verwendung für Schruppbearbeitung

- Wolframkupfer
 - Hartmetall
- } Meist Mikro- und Präzisionsbearbeitung, da hohe Werkzeugkosten

$$\text{relativer Verschleiß } \vartheta(t) = \frac{\text{Verschleißrate } V_E(t)}{\text{Abtragsrate } V_W(t)}$$

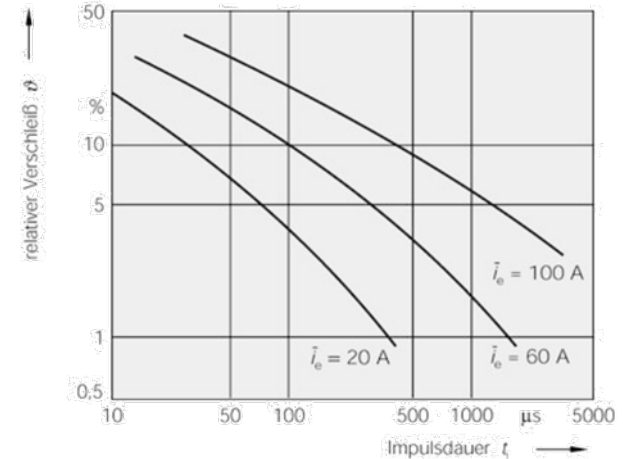


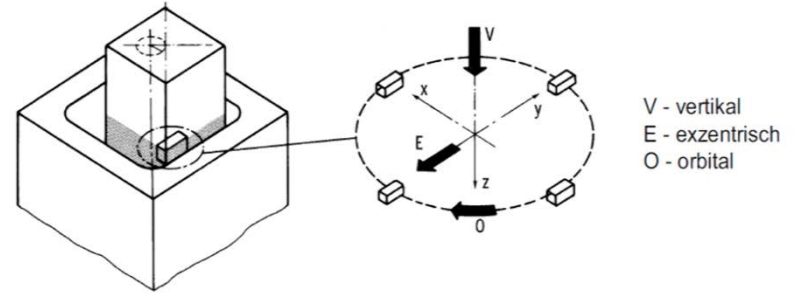
Abb.: rel. Verschleiß von Kupfer

2.3 Trennen

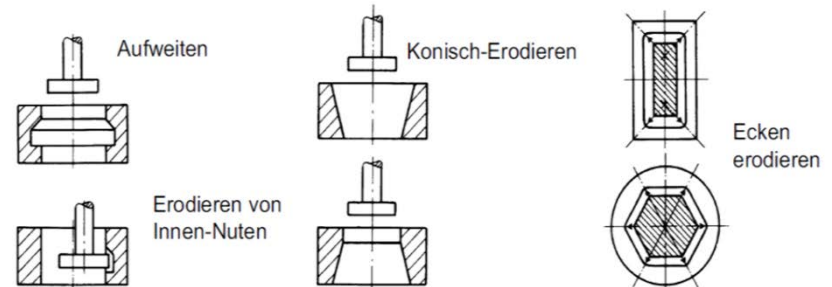
EDM SENKEN

- **Abbilden der Werkzeugkontur im Werkstück**
- Einachsige Zustellbewegung des Werkzeugs
- Überlagerte **Planetärbewegung möglich**
- Werkzeug wird vor allem durch spanende Prozesse hergestellt
- Mikrowerkzeuge werden auch durch funkenerosives Abrichten (umkehren der Polarität) hergestellt

Grundbewegung der Planetärerosion



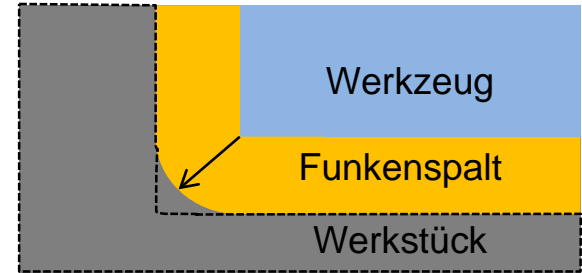
Anwendungsbeispiele



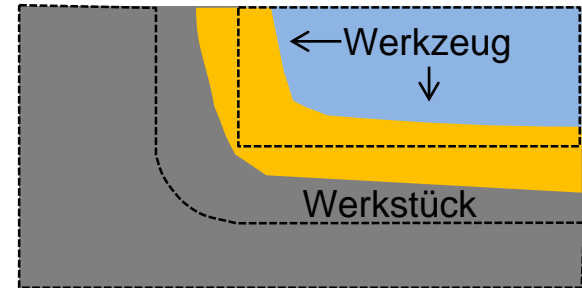
2.3 Trennen

GEOMETRIE UND ELEKTRODENVERSCHLEISS

- **Kleinster innerer Radius ist durch Funkenspalt vorgegeben**
- **Werkzeugverschleiß führt zu weiteren Ungenauigkeiten**
- **Kompensation des Verschleißes**
 - **Einsatz mehrerer (unverschlissener) Werkzeuge um die geforderte Kontur zu erreichen (Schruppen-Schlichten-Feinschlichten)**
 - **durch Planetärbewegung (Nachsetzen)**
 - **Ausgleich nur für Flächen möglich**
 - **Durch Verschleiß größer abgebildete Radien lassen sich nicht kompensieren**
 - **Zustellung in Vorschubrichtung (Z)**



Kleinster Radius wird durch Funkenspalt bestimmt



Verschleißkompensation durch Nachsetzen des Werkzeuges

Quellen: TU Chemnitz IWP

2.3 Trennen

ANWENDUNG UND DIMENSION

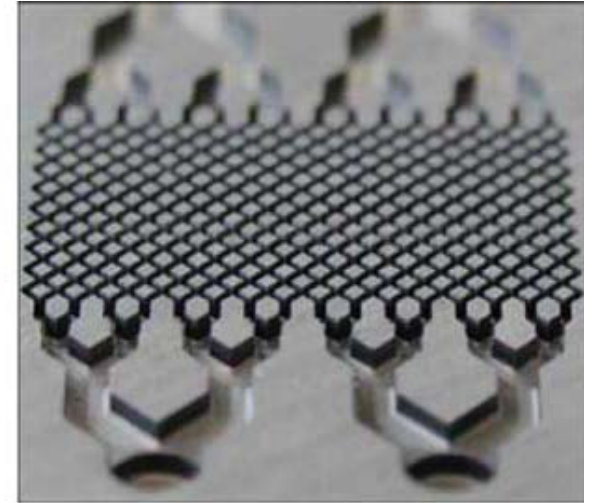
- Prototypen oder Kleinserien in gehärteten Stählen oder anderen harten/zähen Materialien
- Hauptanwendungsgebiet:
 - Werkzeuge zum Spritzgießen, Umformen
- Geringste Strukturbreiten im Bereich von 20 μm bis 40 μm
- Kanäle mit einer Breite von 20 μm , Eckenradius bis 10 μm und Aspektverhältnis bis 25
- Abweichung von der Sollgeometrie bis $\pm 1 \mu\text{m}$

Vorteile

- Kontur ist im Werkstück enthalten

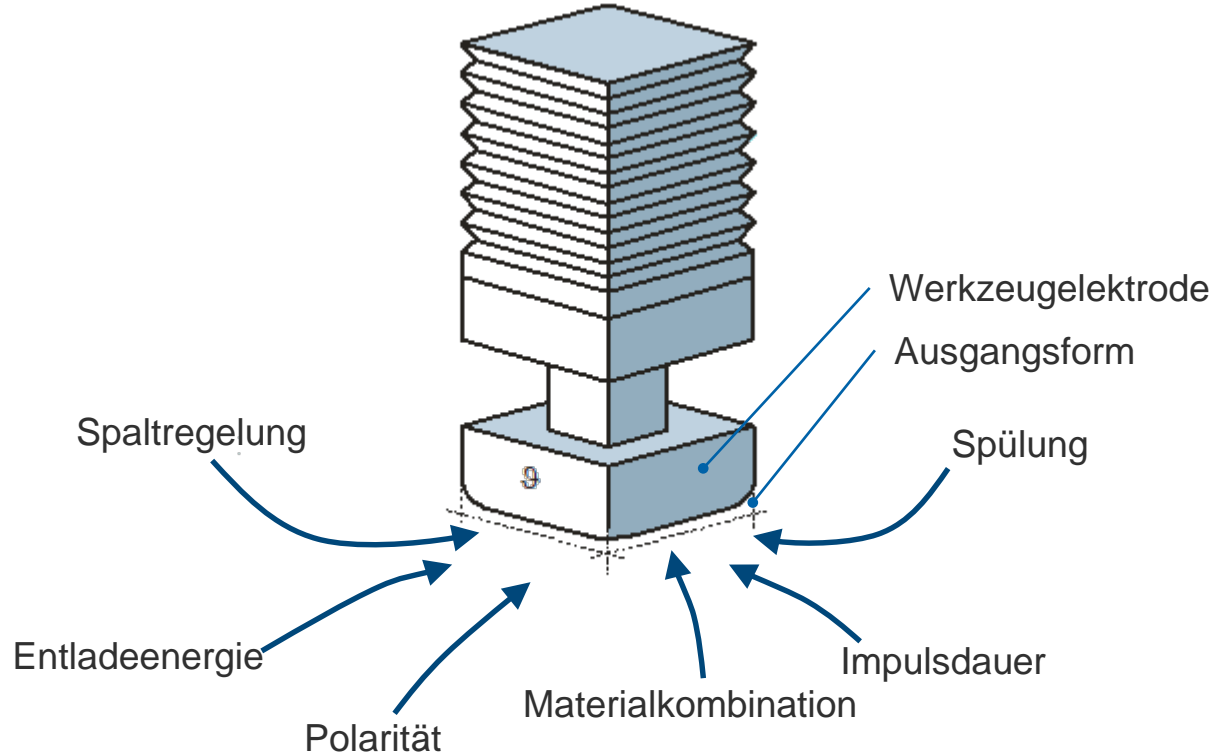
Nachteile

- Abtrag an der Ecken und Kanten des Werkzeugs sorgt für Abweichungen von der Sollgeometrie



Mikro Flüssigkeitsmischer

EINFLUSSGRÖSSEN AUF DEN ELEKTRODENVERSCHLEISS



2.3 Trennen

ÜBERSICHT ABRICHTEN

Allgemein:

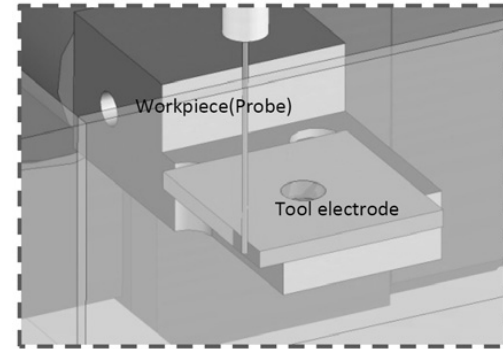
- Abrichten: Verändern der Werkzeugform
- Abrichten am Block:
Micro-electrical Discharge Grinding
(μ -EDG Drilling)
- Abrichten am Ablaufenden Draht
Micro Wire Electrical Discharge Grinding
(μ -WEDG)

Anwendung:

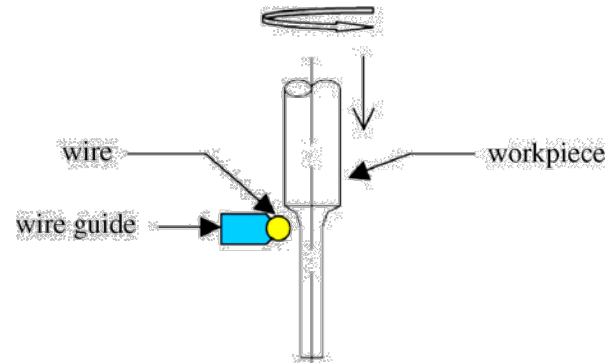
- Herstellung besonders dünner Elektroden
(μ -WEDG)
- Herstellung verschiedener Werkzeugformen
(μ -EDG, μ -WEDG)

Genauigkeitsbeeinflussende Faktoren

- Verschleiß am Werkzeug
- Positionierung Werkstück relativ zum Werkzeug



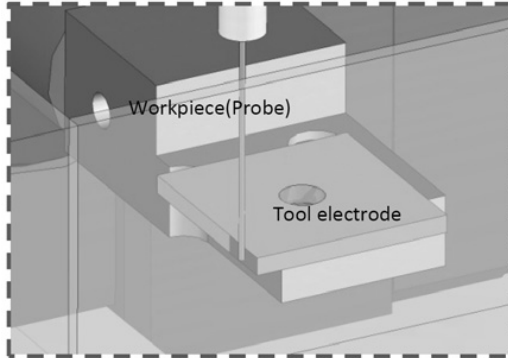
Abrichten am Block



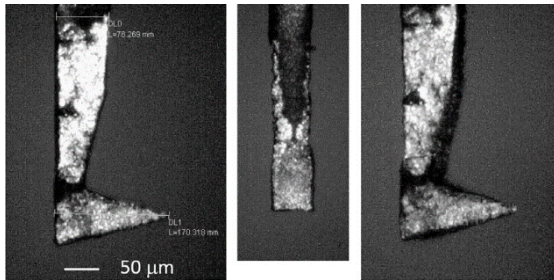
Wire electro discharge grinding (WEDG)

2.3 Trennen

Abrichten am Block (EDG)



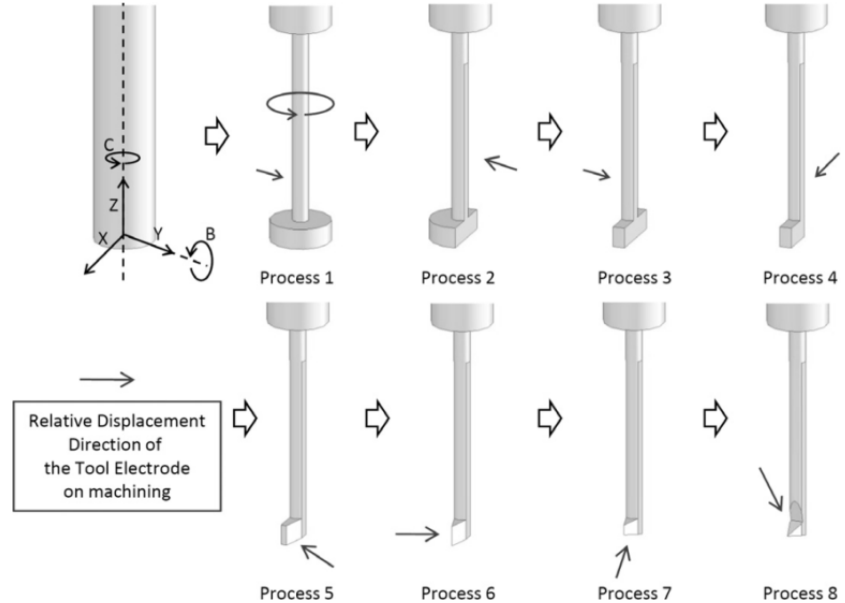
Übersicht



Bearbeitetes Werkstück



Zielform des Tastelementes



Bearbeitungsablauf

2.3 Trennen

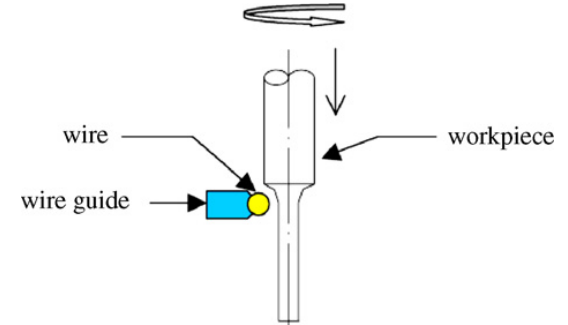
ABRICHTEN AM ABLAUFENDEN DRAHT (WEDG)

Drahtabrichten

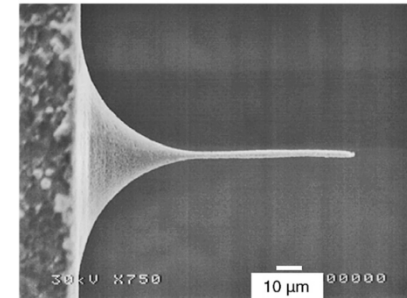
- Elektrodendurchmesser (Werkstück) wird verringert
- ablaufender Draht als Werkzeug
- Verschleiß am Werkzeug (Draht) hat keinen Einfluss auf Geometrie des Werkstücks da immer unverbrauchter Draht zugeführt wird
- Abrichten erfolgt in der Regel in einer Aufspannung auf einer Maschine

Genauigkeitsbeeinflussende Faktoren

- Durchmesserchwankungen des Drahtes
- Positionierung des Werkstückes (Elektrode) relativ zum ablaufenden Draht



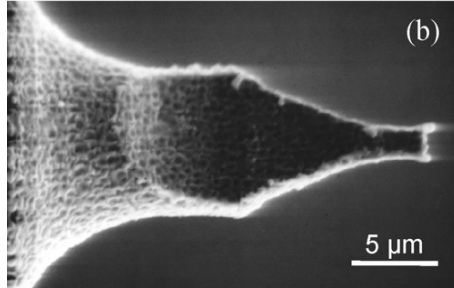
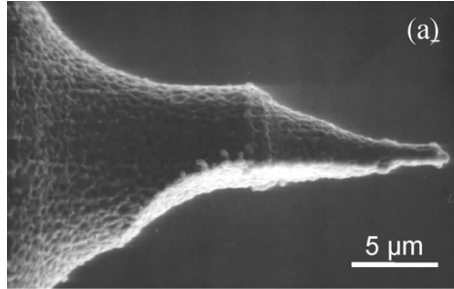
Schema beim Abrichten einer Elektrode



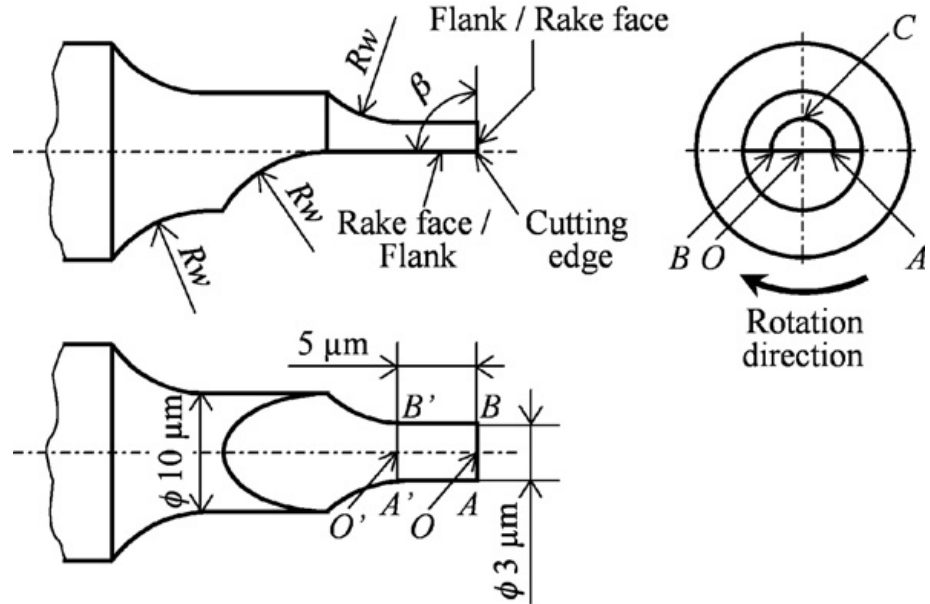
Abgerichtete Elektrode

2.3 Trennen

ANWENDUNG



Mikrofräser 90 nm

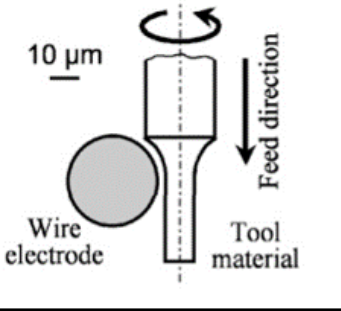
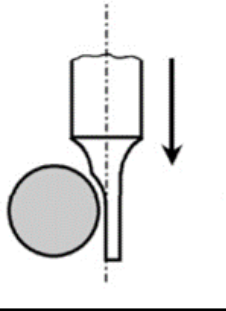

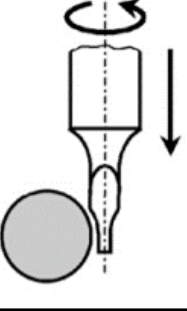


Zielgeometrie Mikrofräser 90 nm

2.3 Trennen

ANWENDUNG

Bearbeitungsfolge Mikrofräser 90 nm

Process steps				
	(a) Rough machining	(b) Semicylindrical shape processing	(c) Wedge angle processing	(d) Finish machining
Open-circuit voltage	60–70 V	45–55 V	45–55 V	35–45 V
Electrostatic capacitance	Stray capacitance	Stray capacitance	Stray capacitance	Stray capacitance
Rotation of tool material	Rotated	Not rotated	Not rotated	Rotated

Quellen: TU Chemnitz IWP

2.3 Trennen

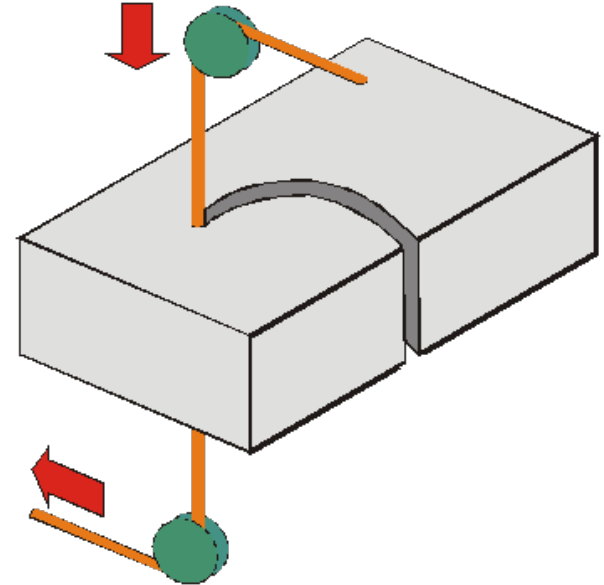
FUNKENEROSIVES SCHNEIDEN / DRAHTERODIEREN

Beim funkenerosiven Schneiden wird als **Werkzeug** eine i.d.R. vertikal **ablaufende Drahtelektrode** (Durchmesser zwischen 0,01 und 0,5 mm) eingesetzt. Die Drahtelektrode wird **von einem Dielektrikum umspült**.

Das Werkstück wird zur Erzeugung einer beliebigen Schnittlinie in der zum Draht senkrechten Ebene mit einer Bahnsteuerung bewegt. Moderne Anlagen erlauben eine Schrägstellung des Drahtes zum Erzielen schräger Schnitte.

Der Drahtverschleiß spielt keine Rolle, da dieser durch das Abwickeln von einer Rolle ständig erneuert wird.

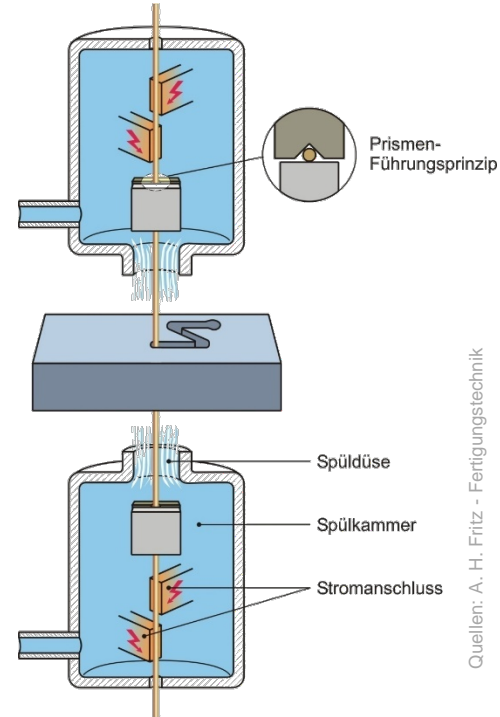
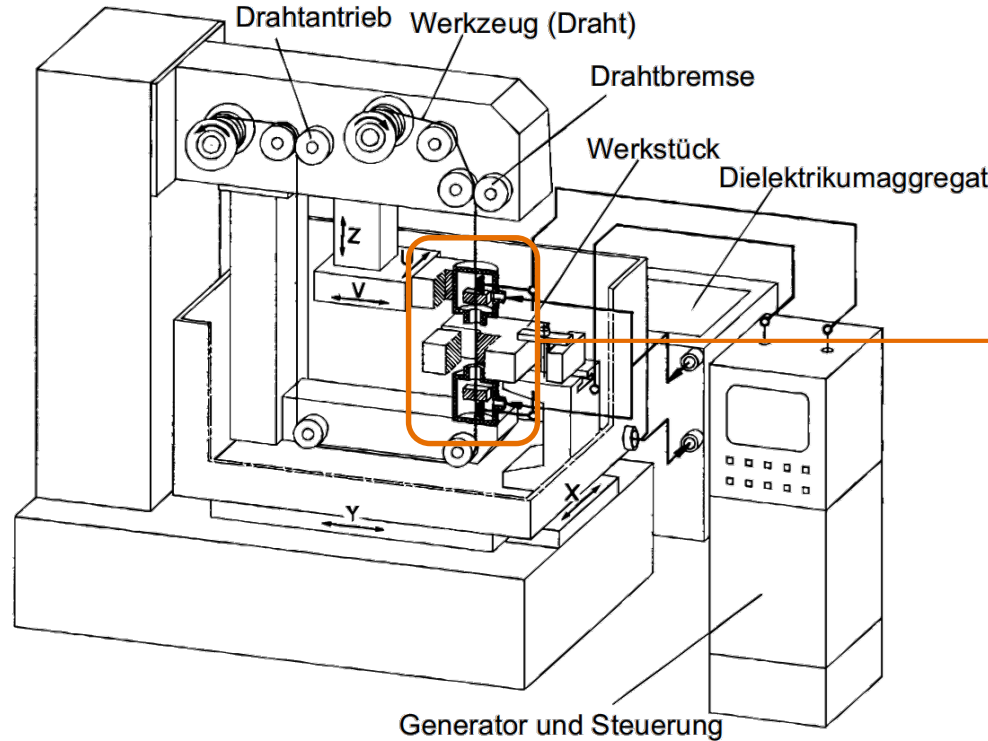
Herstellung von Schneidwerkzeugen (Stempel und Matrize), Ziehwerkzeugen, Tannenbaumprofilen für Turbinenbau → meist sehr harte und zähe Werkstoffe.



FUNKENEROSIVES SCHNEIDEN

2.3 Trennen

DRAHT-ERODIERMASCHINE: AUFBAU



Quellen: A. H. Fritz - Fertigungstechnik

2.3 Trennen

DRAHT-ERODIERMASCHINE: AUFBAU / ABLAUF

Eine Drahterodieranlage besteht aus einem **Gestell** sowie den beiden **Drahtführungssystemen** oben und unten und deren **Antrieb** sowie dem **Arbeitsbehälter** mit Kreuztisch (→ Werkstückspanntisch)

Mittels Relativbewegung zwischen Werkstück und Tisch in der xy – Ebene können beliebige Formen erzeugt werden.

Das unabhängige Bewegen der beiden Drahtführungsköpfe zueinander ermöglicht das Herstellen konischer Konturen.

Ablauf:

- Haupt- bzw. Vollschnitt
- Folgende Nachschnitte mit reduzierter Entladeenergie zur Minimierung der thermisch beeinflussten Zone; Verbesserung der Oberflächengüte

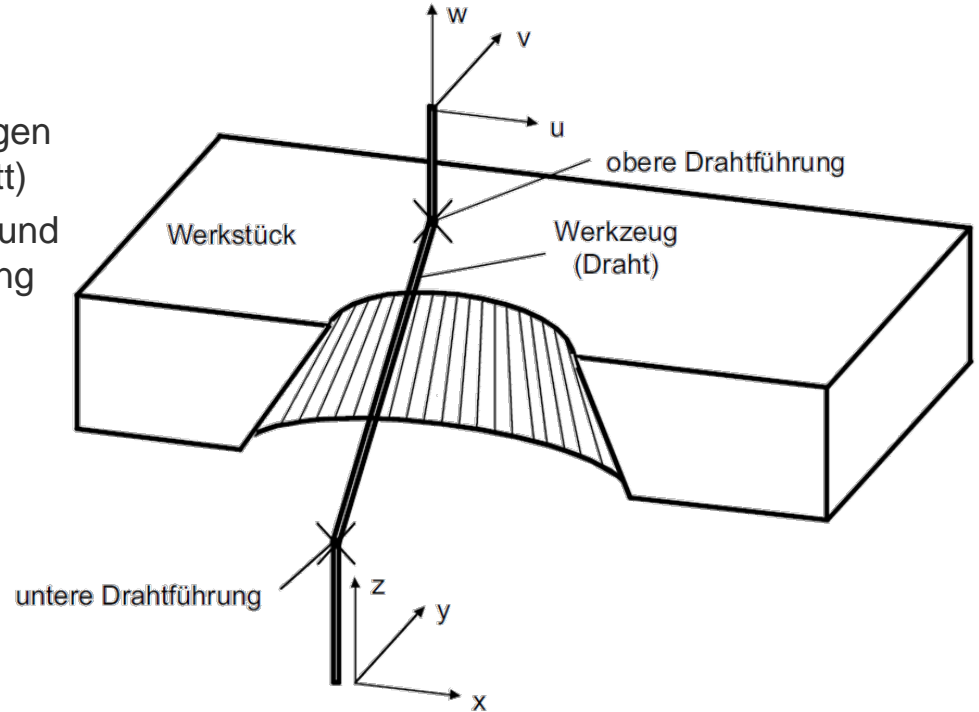
Durchschnittsrate ist einerseits abhängig vom Vorschub, der Werkstückhöhe, vom Werkstoff des Werkstückes und des Drahtes sowie vom Drahtdurchmesser, andererseits von der Entladeenergie und der Impulsfrequenz

2.3 Trennen

FUNKENEROSIVES SCHNEIDEN MIT MEHREREN AXSEN

Kinematik

- In zwei Führungen geführter Draht
- Gemeinsame Bewegung der Führungen in X- und Y- Richtung (gerader Schnitt)
- Bewegung der oberen Führung in u- und v- Richtung relativ zur unteren Führung (konischer Schnitt)



Prinzipskizze Drahtschneiden

Quellen: TU Chemnitz IWP

2.3 Trennen

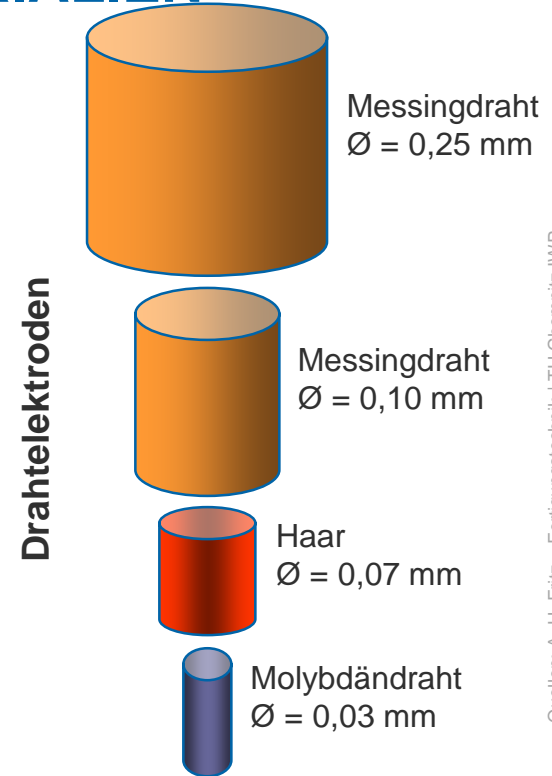
DRAHTERODIEREN: WERKZEUGMATERIALIEN

Dielektrikum:

- Deionisiertes Wasser
 - Sehr gute Spüleigenschaften wegen geringerer Viskosität
 - Geringe el. Durchschlagfestigkeit
 - größerer Arbeitsspalt -> größere minimale Innenradien
- Kohlenwasserstoffe / Öle
 - Hohe Durchschlagfestigkeit
 - Hohe Abbildgenauigkeit
 - Für hochgenaue Anforderungen
 - Aber höhere Viskosität (schwierigere Spülung)

Drahtwerkstoff (Werkzeugelektrode):

- Messing
 - Wolfram
 - Molybdän
 - Stahl
- } Mikrobearbeitung



Quellen: A. H. Fritz – Fertigungstechnik | TU Chemnitz IWP

2.3 Trennen

DRAHTERODIEREN: WERKZEUGMATERIALIEN

Werkstoffe zur Beschichtung der Drähte:

- Mehrlagiger Aufbau um hohe thermische und mechanische Stabilität bei guter elektrischer Leitfähigkeit zu erreichen
- Messing, Kupfer und Zink
 - Zinkschicht verdampft während der Entladung und verbessert die Zündfähigkeit im Arbeitsspalt; verhindert Aneinanderhaften der Abtragspartikel



Mehrschichtig aufgebauter Draht

2.3 Trennen

FUNKENEROSIVES SCHNEIDEN IN DER MIKROTECHNIK

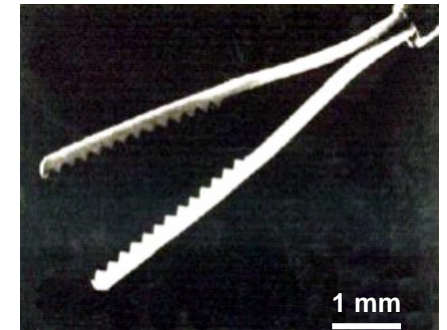
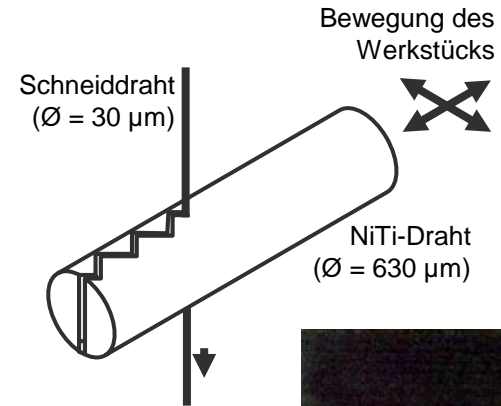
Anwendungen:

- Mikrozahnräder für Mikromotoren und Uhren
- Medizintechnik
- MEMS
- Werkzeugfertigung für Mikro-Senk-EDM

Dimension

- Formgenauigkeiten bis $\pm 1 \mu\text{m}$ bei hohen Aspektverhältnissen über 100 mit mehreren Nachschnitten möglich

Chirurgische Fasszange



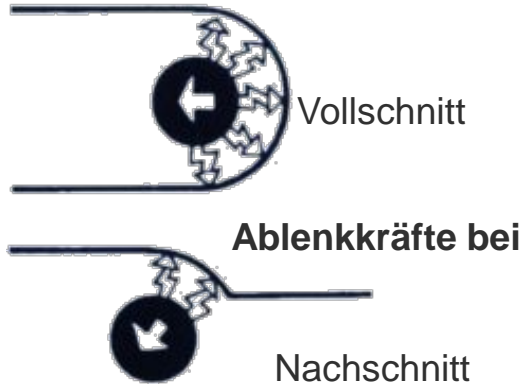
Quellen: TU Chemnitz IWP

2.3 Trennen

GENAUIGKEITSBEEINFLUSSENDE PARAMETER

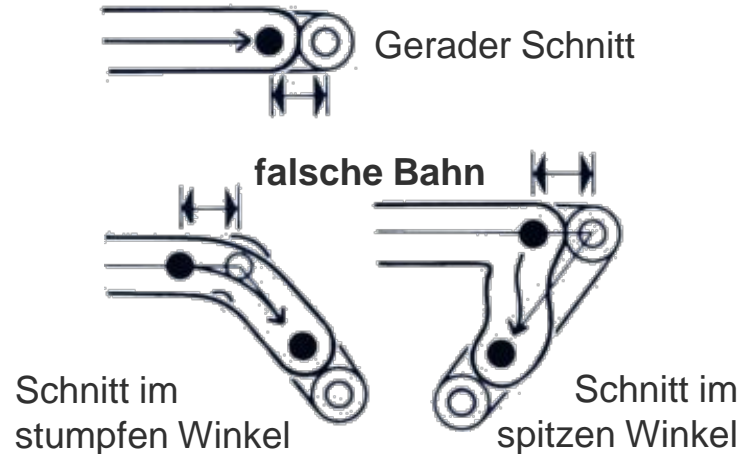
Ursachen für Vibrationen:

- Stöße des Drahtantriebes
- Veränderliche Draht-Elastizität
- Unsymmetrische Spülung
- Antriebsschritte der Achsenbewegung
- Entladungskräfte



Ursachen für Positionsfehler:

- Elektrostatische Kräfte (Spannung zwischen Draht und Werkstück)
- Elektromagnetische Kräfte (Stromfluss im Draht)



2.3 Trennen

VORTEILE + NACHTEILE DER FUNKENEROSIVEN BEARBEITUNG

Vorteile:

- Kein mechanischer Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück (+)
- Kein Einfluss der mechanischen Eigenschaften des Werkstückwerkstoffs (Härte, Festigkeit) auf Fertigungsprozess (+)
- Bearbeitung von Superlegierungen und pulvermetallurgischen Stählen (+)
- Bearbeitung dünnwandiger, filigraner und komplexer Werkstücke (+)
- Bearbeitung von sehr tiefen Bohrungen, auch mit Hinterschnitten möglich

Nachteile:

- Prozessbedingter Werkzeugverschleiß (-)
- Gefügeänderung in der Randschicht des Werkstücks (-)
- Oberflächenrauheit verfahrensbedingt (Krater) gegeben (-)
- Gratbildung (Kantenaufwurf) (-)
- Relativ langsam im Vergleich zum Spanen (-)

2.3 Trennen

ALLGEMEINE SICHERHEITSVORSCHRIFTEN

Achtung: Gefahr von Stromstößen!

- Während der Erosion ist im Arbeitsbereich eine erhöhte und gefährliche elektrische Spannung vorhanden.
- Bei Befehlsausübung der Maschine niemals den Kopf, die Elektrodenträgereinheit und die Elektrode mit den Händen berühren und keinerlei Metallgegenstände in den Arbeitsbereich einführen.



Bei Einsatz eines brennbaren Dielektrikums:

- Bearbeitung im Bad mit einer Mindestüberdeckung von 10 mm oder mehr (Größere Überdeckung bei Generator höherer Leistung)
- Besondere Aufmerksamkeit bei Bohrungsdurchbrüchen,
 - Bereich hinter der Bohrung muss mit Dielektrikum gefüllt sein

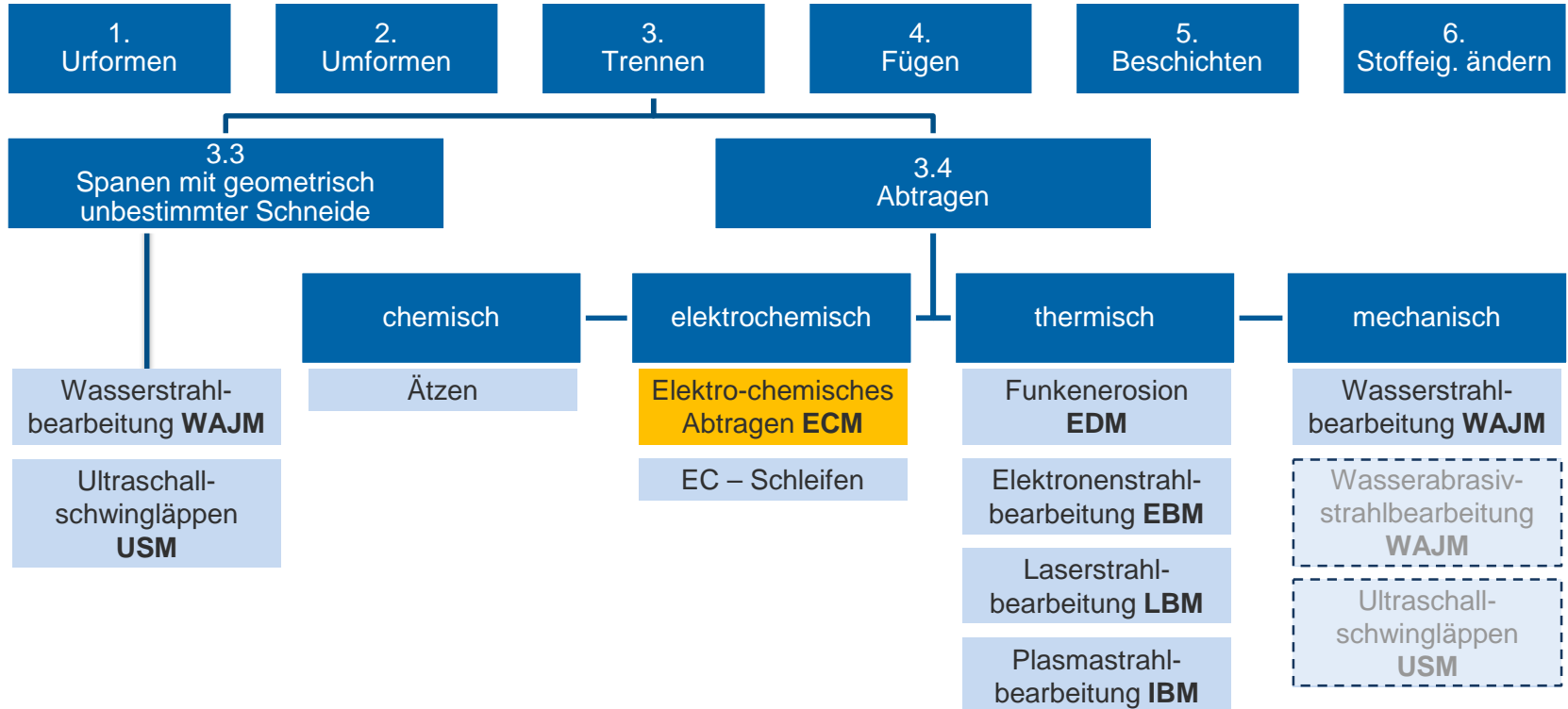


Auf ausreichende Spülung achten!

- Verhütung von Bränden und schädlicher Gasbildung
- Abtransport von Abfallstoffen aus dem Erosionsprozesses

2.3 Trennen

ABTRAGEN



Quellen: TU Chemnitz IWP

2.3 Trennen

ELEKTROCHEMISCHES ABTRAGEN

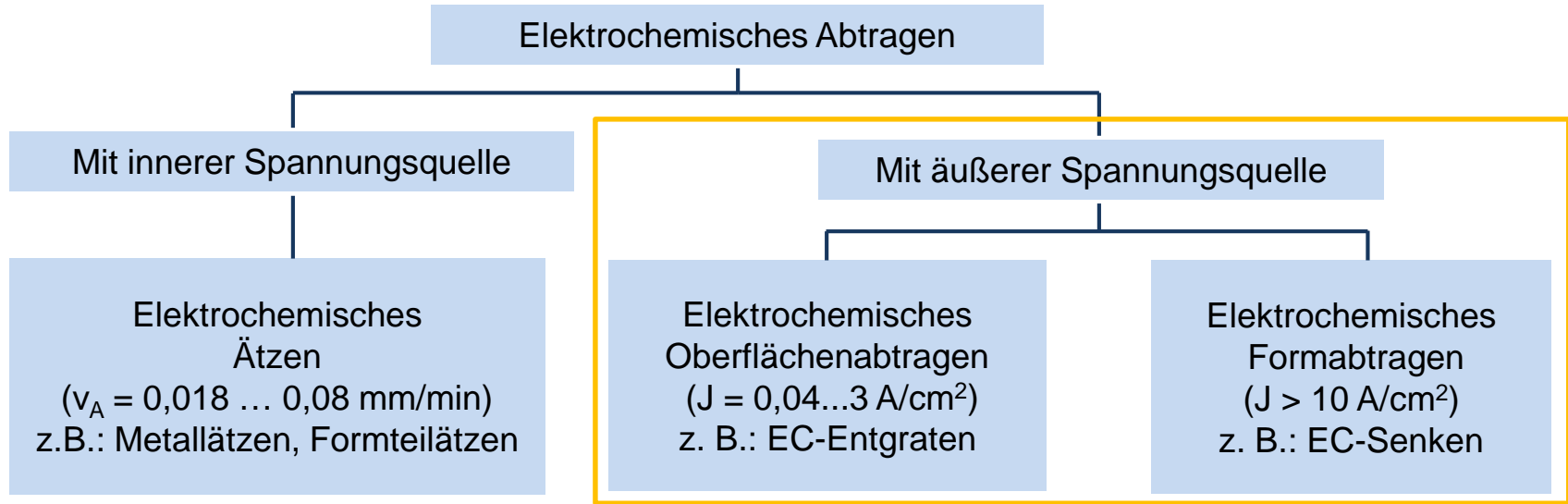
ECM – Electrochemical Machining

Synonyme: Elektrochemische Metallbearbeitung, Elysieren

Definition (DIN 8590):

- Fertigungsverfahren, bei dem metallischer Werkstoff unter Einwirkung eines elektrischen Stromes und einer Elektrolytlösung anodisch aufgelöst wird.
- Stromfluss kann entweder durch Anschluss an eine Stromquelle oder aufgrund von Lokalelementbildung am Werkstück (Ätzen) bewirkt werden.

ELEKTROCHEMISCHES ABTRAGEN



J ... Stromdichte v_A ... Abtragsgeschwindigkeit

2.3 Trennen

VERFAHRENSVARIANTEN

ECM:

→ Senken, Entgraten, Kammer- und Konturbearbeitung, Polieren, Gravieren, Mikrobearbeitung

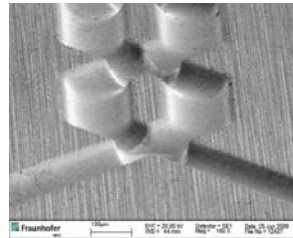
EC-Senken

Elektrochemisches Abtragen
Bsp:
 Blisk-Vorbearbeitung



Jet-ECM

Elektrochemisches Abtragen mit Freistrahlen
Bsp:
 Mikromischer



PECM

Gepulstes elektrochemisches Abtragen
Bsp:
 Mikrostruktur



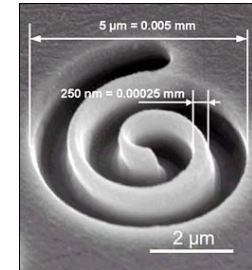
EC-Bohren

Elektrochemisches Bohren
Bsp:
 Instrumentierungsbohrungen



UPECM

Ultrakurz gepulstes EC-Abtragen
Bsp:
 Mikrogeometrie



2.3 Trennen

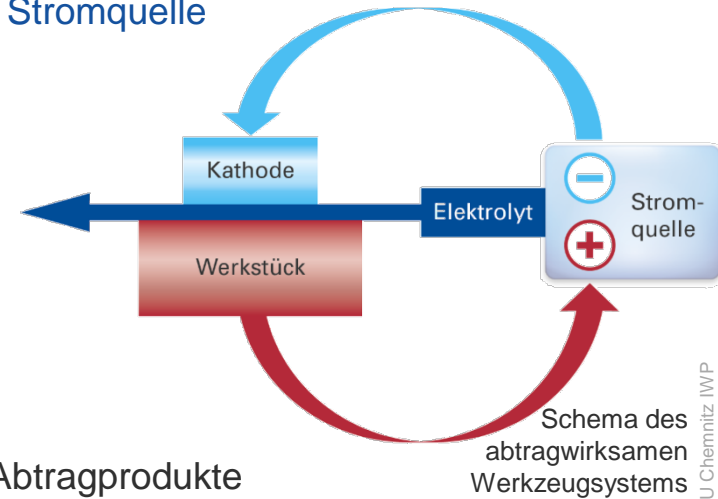
ECM – VERFAHRENSPRINZIP

Anodisches Auflösen eines metallischen Werkstücks an dessen Grenzfläche zu einem flüssigen Ionenleiter, dem Elektrolyt, unter dem Einfluss von elektrischem Ladungstransport.

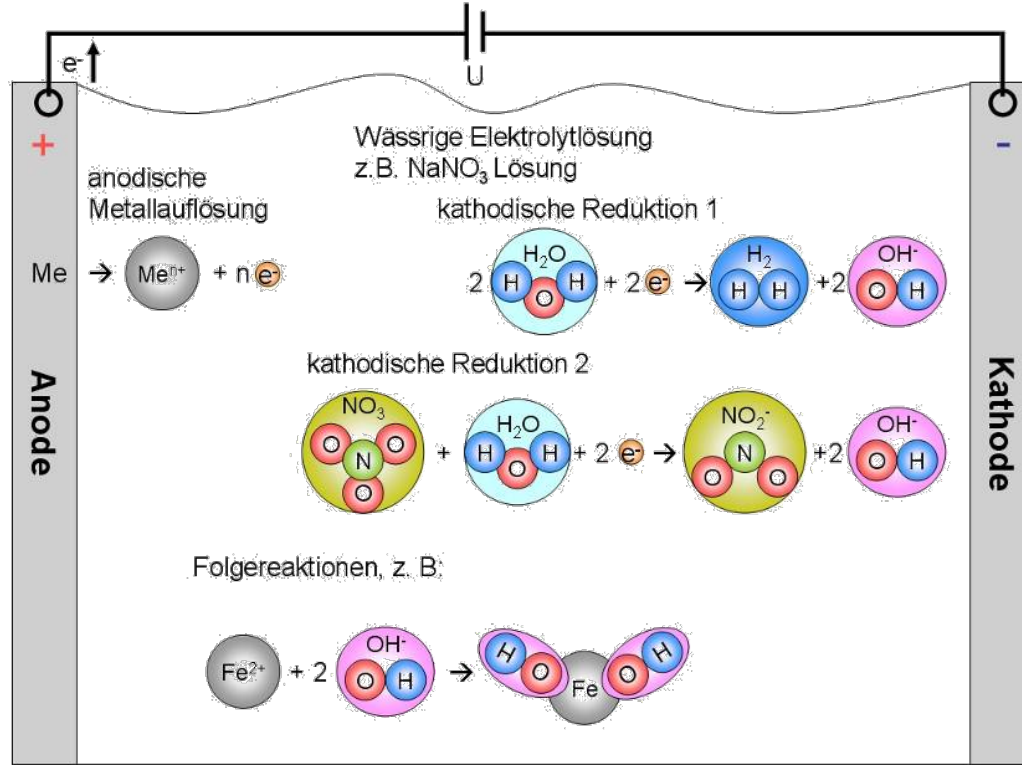
Abtragwirksames Werkzeugsystem: **Kathode** + **Elektrolyt** + **Stromquelle**

- **Anode (+)**
 - Elektronenmangel
 - **Übergang von Metallionen in Elektrolytlösung**
- **Kathode (-)**
 - Kein Abtrag
- **Elektrolyt**
 - Stromtransport, elektrisch leitende Flüssigkeit
 - Ausfallreaktionen ermöglichen ein Entfernen der Abtragprodukte

→ Berührungsfreie Bearbeitung ohne thermische und mechanische Beeinflussung des Werkstückes

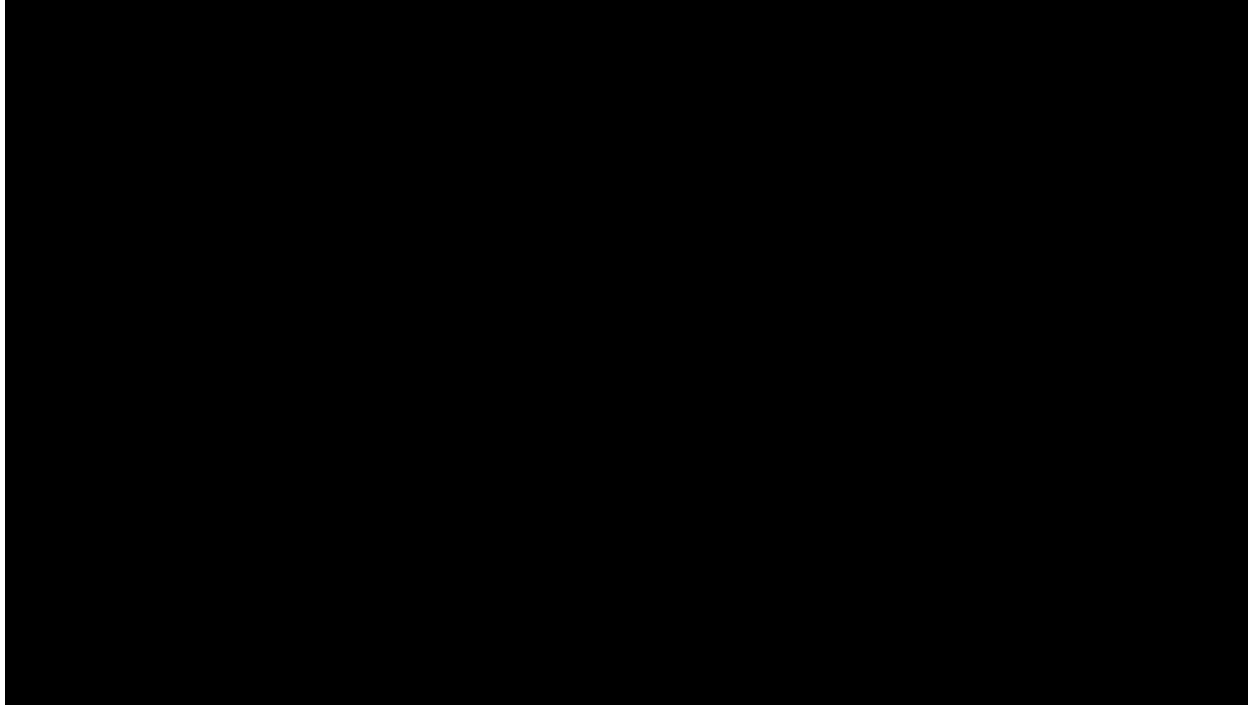


ECM – VERFAHRENSPRINZIP



Prinzip der anodischen Metallauflösung

ECM – VIDEO



2.3 Trennen

ECM – BERECHNUNG DES ABTRAGS

Faradaysches Gesetz:

Die abgetragene Masse m ist proportional zur geflossenen elektrischen Ladung Q .

$$Q = \int I \cdot dt$$

$$m = \eta \cdot \frac{M}{z \cdot F} \cdot Q$$

$$V = \eta \cdot \frac{M}{\rho \cdot z \cdot F} \cdot Q$$

Q elektrische Ladung

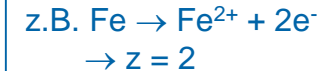
I Stromstärke

t Bearbeitungszeit

m abgetragene Masse

M Molmasse

z elektrochemische Wertigkeitsänderung



F Faradaykonstante (96458 A·s/mol)

η Stromausbeute

V aufgelöstes Materialvolumen

ρ Dichte

2.3 Trennen

ECM – BERECHNUNG DES ABTRAGS

Spezifische Materialgrößen

$$m_{sp} = \frac{M}{z \cdot F}$$

m_{sp} spezifischer Masseabtrag
 V_{sp} spezifisches Abtragsvolumen

$$V_{sp} = \frac{M}{\rho \cdot z \cdot F}$$

Materialkonstante für eine bekannte Reaktion, falls die elektrochemische Wertigkeitsänderung z konstant bleibt

Die Bearbeitbarkeit eines Werkstoffs hängt deshalb nur von seinen elektrochemischen Eigenschaften bzw. von dessen Reaktionsprodukten ab, nicht aber von den mechanischen Eigenschaften.

$$V_{spLeg} = \frac{1}{\rho_{Leg}} \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{100} \cdot \frac{M_i}{z_i \cdot F}$$

Besteht ein Werkstoff aus mehreren Legierungselementen $Me_1 \dots Me_n$ mit den Massenprozentanteilen $p_1 \dots p_n$ und den Molmassen $M_1 \dots M_n$, so lässt sich ebenfalls das spezifische Abtragsvolumen der Legierung V_{spLeg} durch Superposition der Einzelkomponentenabträge berechnen.

2.3 Trennen

VORTEILE DES ELEKTROCHEMISCHEN ABTRAGENS

- Kein mechanischer Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück
- Kein prozessbedingter Werkzeugverschleiß
- Keine Gefügeänderung im Werkstück
- Untergeordneter Einfluss der mechanischen Eigenschaften des Werkstückwerkstoffs (Härte, Festigkeit) auf Fertigungsprozess
- Geringe Prozesstemperatur: 20°C bis 80°C
- Keine Gratbildung
- Hohe Abbildegengenauigkeit
- Hohe Reproduzierbarkeit
- Bearbeitung von Superlegierungen und pulvermetallurgischen Stählen
- Bearbeitung schwer zugänglicher Stellen (Hinterschnitte)
- Einbringen komplizierter Formen in Hohl-, Verzahn- und Nutprofilteile
- Bearbeitung dünnwandiger, filigraner und komplexer Werkstücke
- Parallelisierung des Prozess durch Stromversorgung begrenzt, nicht durch Abtragmechanismus

2.3 Trennen

NACHTEILE DES ELEKTROCHEMISCHEN ABTRAGENS

- Komplexer Schutz von Umwelt und Bedienpersonal
- Komplexer Wirkmechanismus
- Komplexer Einfluss des Werkstückwerkstoffes
- Hochqualifiziertes Personal notwendig
- Grad der Prozessbeherrschung ist bei anderen Fertigungsverfahren teilweise deutlich höher
- Unzureichende Standardisierung
- Teilweise hohe Vorrichtungskosten
- Teilweise hohe Entsorgungskosten
- Aufwendige Anlagentechnik

2.3 Trennen

EINFLUSSGRÖSSEN IM ECM

Funktionsbestimmende Größen des Bauteils:

Werkstoff

- Chem. Zusammensetzung
- Gefügestruktur

Geometrie

- Fläche
- Radien
- Kontur

Arbeitsergebnis

Genauigkeit
Oberflächengüte



Prozessgrößen

Elektrolyt

- Art
- Konzentration
- Temperatur
- pH-Wert
- Verschmutzung
- Spülstrategie

Einstellparameter

- Spannung
- Vorschubgeschwindigkeit
- Arbeitsabstand





Peripheriegrößen:

Maschinen und Werkzeuge

- Mechanische Steifigkeit
- Thermische Stabilität

2.3 Trennen

ELEKTROLYTE FÜR DAS ECM

Basis	Konzentr.	Anwendung	Bemerkung
NaCl Natriumchlorid	5 - 20 %	legierte und unlegierte Stähle	preisgünstig, ungiftig, einfache Überwachung, starke Streuwirkung, Lochfraßgefahr
NaClO ₃ Natriumchlorat	20 - 45 %	Stähle	hohe Abtragleistung, geringe Streuwirkung, gute Oberflächen, Handhabung gefährlich, Verpuffungsgefahr 
NaNO ₃ Natriumnitrat	10 - 20 %	legierte und unlegierte Stähle Al-Cu-Zn-Leg.	universell anwendbar, hautverträglich, wenig Streuwirkung, passivierend bei Stählen 
Na ₂ SO ₄ Natriumsulfat	10 %	Cu-Legierungen	nur für Sonderfälle
HCl Salzsäure H ₂ SO ₄ Schwefelsäure	10 %	Ni-Cr-Co-Leg., Sonderfälle	sehr glatte Oberfläche, kein Hydroxidanfall, ätzend, Wiederaufbereitung nicht möglich, hoher Sicherheitsaufwand notwendig, 
NaOH Natriumhydroxid	bis 10 %	W und Mo	ätzend, Handhabung gefährlich 

Quellen: TU Chemnitz IWP

2.3 Trennen

KOMPONENTEN EINER EC-ANLAGE

Arbeitsraum

Bearbeitungsbereich der Maschine
 Enthält: Vorrichtungen, Werkzeuge und Werkstücke, Stromanschlüsse und Anschlüsse für Elektrolytversorgung, Zustell- und Vorschubeinrichtungen

Elektrolytversorgung

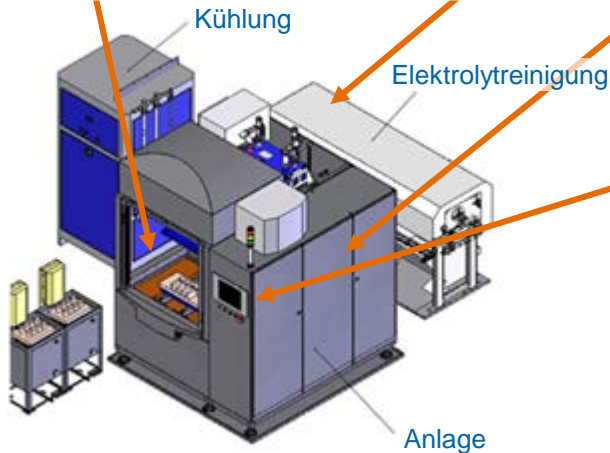
Umfasst: Arbeitskreislauf, Temperaturregelung, pH-Wert- und Leitfähigkeits-Regelung, Reinigungskreislauf

Stromquelle

In der Regel wird kontinuierlicher oder gepulster Gleichstrom verwendet. In Sonderfällen auch Wechselstrom oder bipolare Pulsströme.

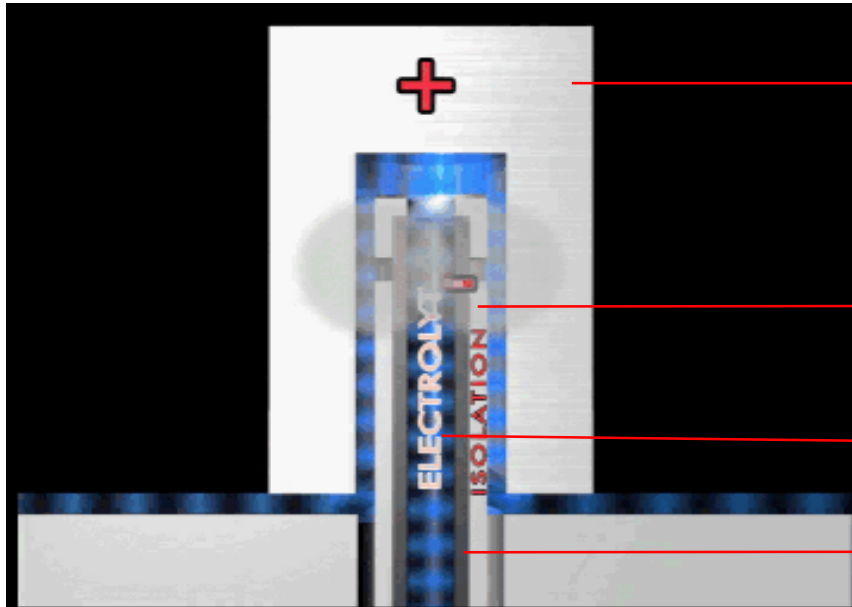
Anlagensteuerung

Steuerung von Spannung, Strom, Elektrolytzufuhr, Zustell- und Vorschubbewegungen



2.3 Trennen

VERFAHREN KAMMER- UND KONTURBEARBEITUNG



Werkstück
(Anode)

Isolation

Elektrolyt

Elektrode
(Kathode)

ANWENDUNGSBEISPIEL INNENKONTUREN

Beispiel: Hochdruck-Einspritzdüse Dieselmotoren (Querschnitt)



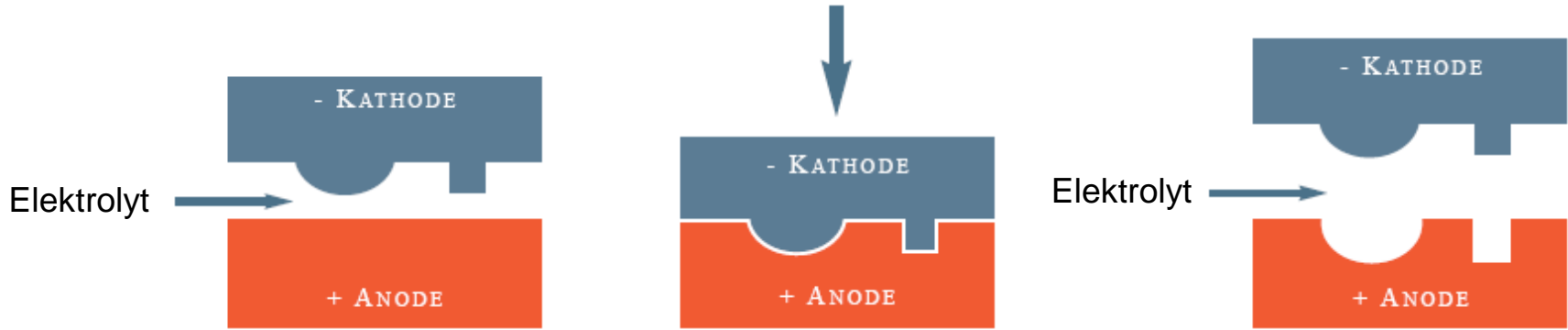
Rohling vor der ECM-Bearbeitung



Einbringen eines kugelförmigen Hohlraumes zur Verbindung der beiden Kanäle

2.3 Trennen

BEARBEITUNGSPROZESS ECM SENKEN



1. Schritt:

Arbeitsspalt geöffnet.
Elektrolyt wird zugeführt.

2. Schritt:

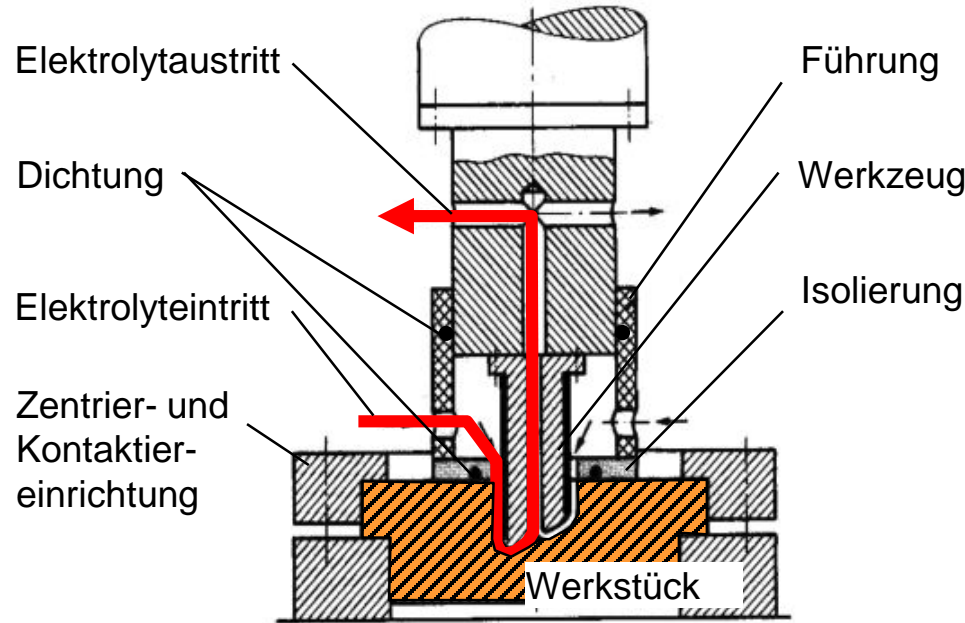
Arbeitsspalt schließen.
Einsenken der Formelektrode.
Kontinuierliche Spülung mit
Elektrolyt unter hohem Druck.

3. Schritt:

Arbeitsspalt öffnen.
Kathode wurde in
Anode abgebildet.

2.3 Trennen

ECM SENKEN: PRINZIPAUFBAU VORRICHTUNG



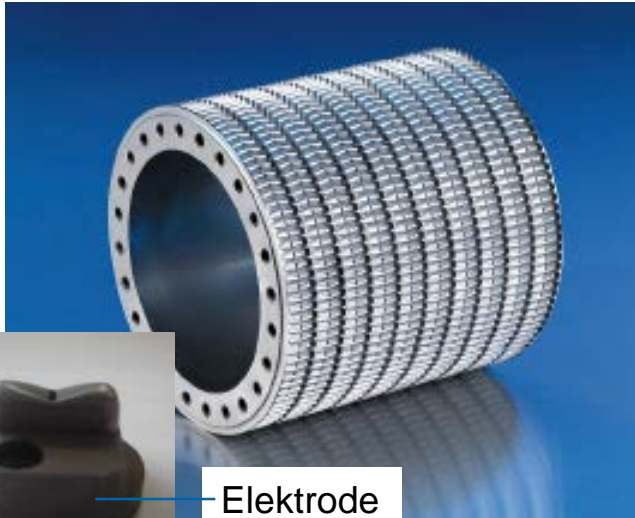
Funktionen einer ECM-Senkvorrichtung

- Werkstück spannen und kontaktieren
- Werkzeug spannen und kontaktieren
- Lagezuordnung von Werkzeug und Werkstück
- Elektrolyt zuführen
- Elektrolyt abführen

Quellen: König, Klocke: Fertigungsverfahren Bd. 3

2.3 Trennen

ECM SENKEN: ANWENDUNGSBEISPIELE



Elektrode

Bearbeitung von Tablettenkalanderswalzen für die Pharmaindustrie

Formgröße: 5,88mm x 20,0mm; Stegdicke: 0,53 +/- 0,05mm

Oberflächenqualität durch ECM: $R_t=5,0\mu\text{m}$



Bearbeitung von Turbinenscheiben für Rolls Royce Deutschland

ECM SENKEN: ANWENDUNGSBEISPIELE



2.3 Trennen

ECM-BEARBEITUNG – PROZESSABLAUF

Vorreinigung:

- Späne
- Öl
- Fett



ECM-Prozess



Nachreinigung:

- Schlamm
- Salz



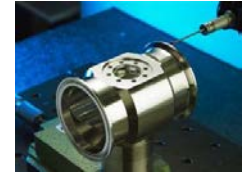
Konservierung:

- Korrosion



Qualitätssicherung:

- Fehler
- Prozessabweichung



Automatisierung:

- Handlingsysteme, z. B. Industrieroboter, Einlegegeräte



2.3 Trennen

JET-ECM

ELEKTROCHEMISCHES ABTRAGEN MIT ELEKTROLYTSTRAHL

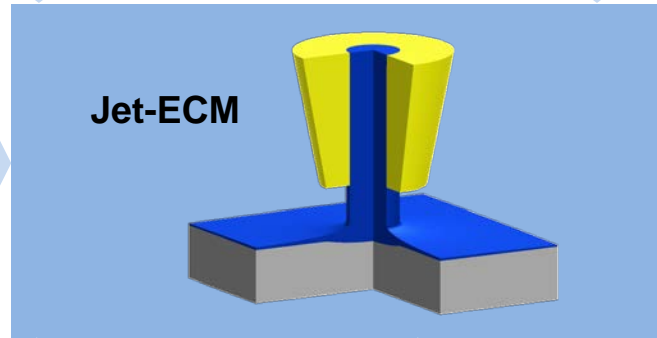
Randbedingungen des Jet-ECM Prozesses

Elektroden mit geringem Formspeicherungsgrad
→ Flexibilität

Formgebender Abtrag
→ min. 3-Achssystem

Neutrale Elektrolyte
→ NaNO₃, NaCl

Lokalisierter Abtrag
→ Kein Streuabtrag



Kontinuierlicher Gleichstrom
→ Hohe lokale Abtragraten

Hohe Elektrolyt-Strömungsgeschwindigkeit
→ Versorgung des Arbeitsspalt

2.3 Trennen

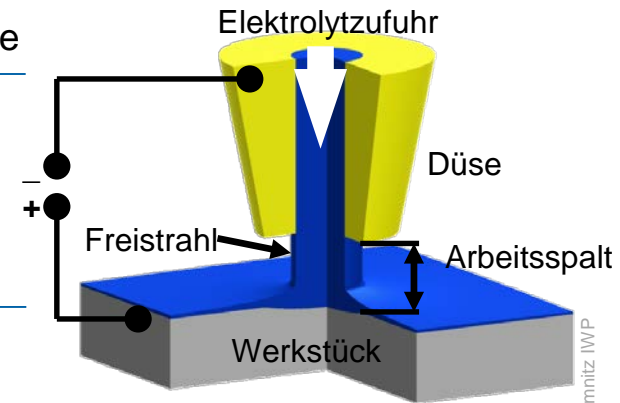
JET-ECM

- Prinzip:**
- Lokalisierung der elektrischen Stromdichte in einem **geschlossenen Freistrah**
 - Formgebender Abtrag durch **Bewegung der Düse** und Steuerung der elektrischen Stromstärke

- Eigen-schaften:**
- Elektrische Stromdichten bis **2000 A/cm²** (DC)
 - Vorschub bis **150 mm/min**
 - Sehr gute Elektrolytversorgung ($v_{\text{Jet}} > 70 \text{ km/h}$)
 - Hohe geometrische Flexibilität

- Varianten:**
- Fräsen, Schneiden, Bohren, Drehen

- Einsatz-gebeite:**
- Mikrofluidik, Miniaturisierung von Bauteilen
 - Herstellung von mikrostrukturierten Oberflächen
 - Schneiden von Folien



2.3 Trennen

JET-ECM: VORTEILE, NACHTEILE, GRENZEN

Vorteile:

- Flexible Geometrie, da keine **Formelektroden** erforderlich
- Keine **Seitenspaltaufweitung**, da Elektrolytdüse in hinreichendem Abstand zur Werkstückoberfläche verbleibt
- Hohe lokale Abtragraten
- Verwendung neutraler Elektrolyte

Nachteile:

- Nur geringe **Aspektverhältnisse** möglich
- Nur kleine Flächen bearbeitbar, da Parallelisierung des Prozesses bisher nicht erfolgt

Grenzen:

- Strukturgrößen: $\geq 25 \mu\text{m}$
- Aspektverhältnis: ≤ 3
- Abtraggeschwindigkeit: $\leq 6 \text{ mm/min}$
- Schnittbreite $\geq 1,5 \times$ Düsendurchmesser

2.3 Trennen

PECM – GEPULSTE ELEKTROCHEMISCHE BEARBEITUNG

PECM = Pulsed Electrochemical Machining

Prinzip:

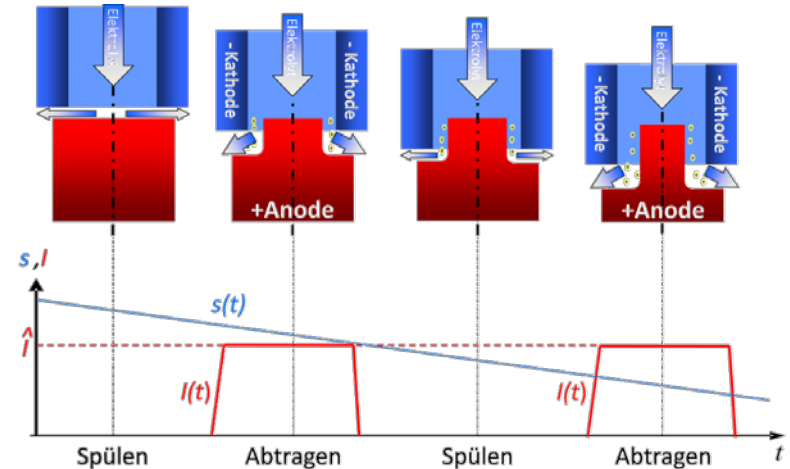
- Anodische Metallauflösung mit **gepulsten** Strom
- Lokalisierung des Abtraggebietes durch **verkleinerten** Arbeitsspalt
- Oftmals Kombination mit **oszillierendem** Arbeitsspalt

Vorteile:

- Schruppen/Schlichten/Polieren in einem Arbeitsgang möglich
- Hohe Abbildegengenauigkeit
- Oberflächenqualität bis $R_a = 0,03 \mu\text{m}$

Einsatzgebiete:

- Formen- und Werkzeugbau: Stanzwerkzeuge, Matrizen, Stempel
- Mikrosystemtechnik



Prinzipdarstellung PECM

Quellen: TU Chemnitz IWP

2.3 Trennen

BEISPIEL EINER PECM-ANLAGE



Elektrolytsystem
2000 l, NaNO₃
pH-Wert, Temp. und
Leitfähigkeitsregelung

Bearbeitungszentrum

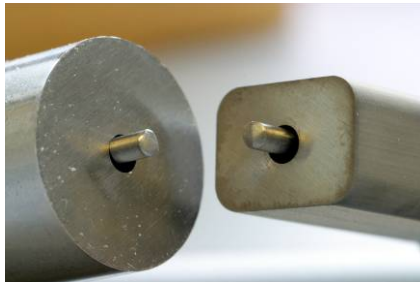
Prozess- und
Maschinensteuerung

Generatoren
je 2000 A

2.3 Trennen

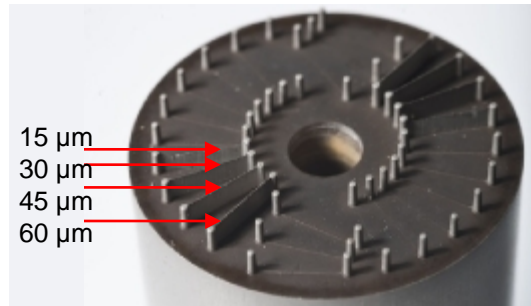
ANWENDUNG

Erzeugung von hohen Oberflächengüten:



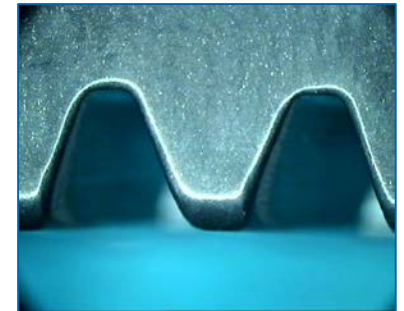
Stempelrohling und Lochstempel, 0,2 mm/min, HSS, Ra 0,18 µm

Erzeugung kleinster Mikrostrukturen:



Mikrostegestrukturen: Höhe 1,5 mm, Länge 7 mm, Dicken: 15 µm bis 60 µm, Werkzeugstahl

Entgraten von Stirnradverzahnungen



Bearbeitungszeit: 30 s

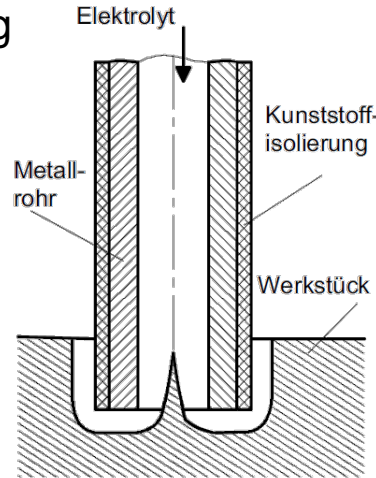
2.3 Trennen

EC – BOHREN

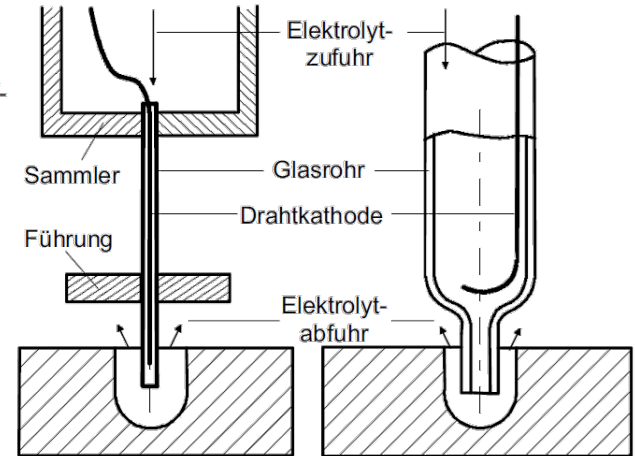
Merkmale:

- Herstellung mehrerer Bohrungen unterschiedlicher Form in einem **Arbeitsgang** auch extrem schräg zur Oberfläche
- Wirtschaftliche Fertigung von Bohrungen in **hochfesten Werkstoffen**
- Hohe **Aspektverhältnisse**
- Verwendung **saurer Elektrolyte** wie HNO_3 oder H_2SO_4

STEM: Shaped Tube Electrolytic Machining



ECF: Elektro-chemisches Feinbohren

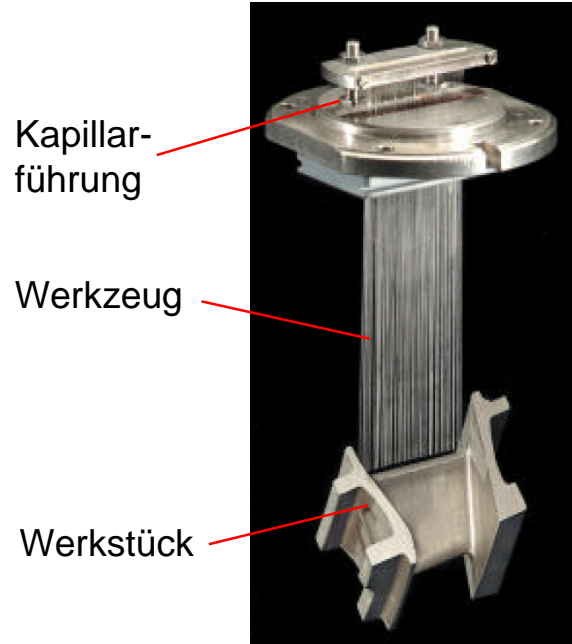


ESD: Electro Stream Drilling

Quellen: TU Chemnitz IWP

2.3 Trennen

BEARBEITUNGSBEISPIELE



Kapillar-
führung

Werkzeug

Werkstück

ECF Bohrungen \varnothing 0,2 mm
61 Filmkühlungsbohrungen gleichzeitig unter
spitzem Winkel (Turbinenschaufel)



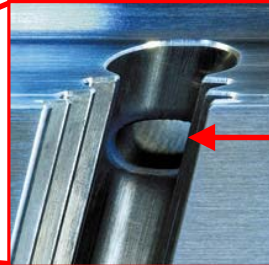
Instrumentierungsbohrungen
an einem Blik

2.3 Trennen

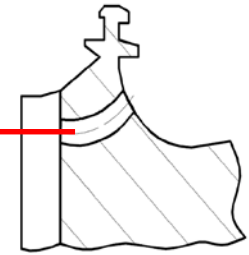
HERSTELLUNG VON GEKRÜMMTEN BOHRUNGEN



Hochdruckturbinenscheibe mit umlaufenden Turbinenschaufelschuhen



bogenförmig verlaufende, elliptische Kühllochbohrungen, Bearbeitungszeit: 20h für 74 Bohrungen



Schnitt in radialer Richtung

Quelle:
Maschinenfabrik Köppern GmbH &Co. KG

2.3 Trennen

HERSTELLUNG VON QUERBOHRUNGEN



Dieselpumpe

Quelle: PEMTec



Herstellung der Verbindung von Kraftstoffzulaufbohrung zur Hauptbohrung bei Einspritzdüsen

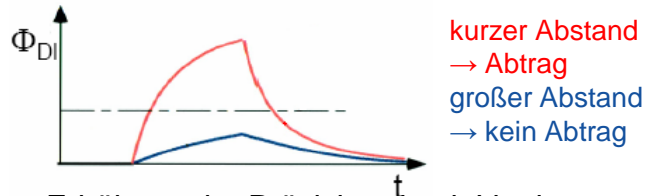
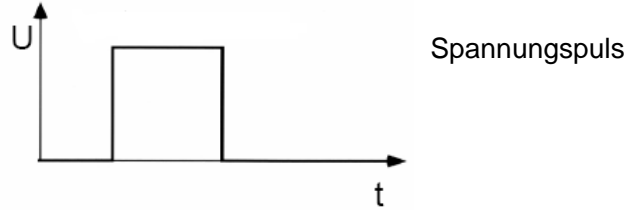
Quelle: Kohler ECM-Technik

2.3 Trennen

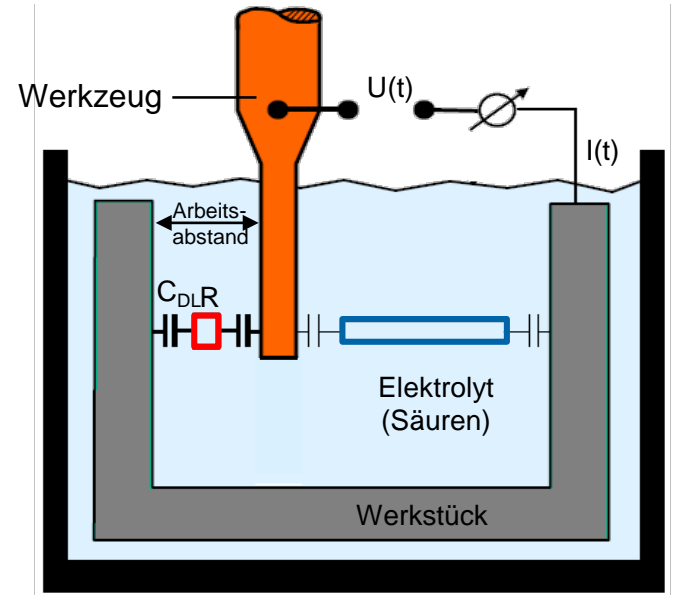
UPECM – ULTRAKURZ GEPULSTE EC BEARBEITUNG

UPECM = Ultrashort Pulsed Electrochemical Machining

Prinzip: lokalisierte anodische Metallauflösung durch ultrakurze Spannungspulser



- Erhöhung der Präzision durch Verringerung des Arbeitsspalts
- Strukturierung mit Hilfe von Mehrachskinematik, ähnlich mechanisches Fräsen
- Einsatzgebiete: feinmechanische Bauelemente, Formeinsätze für Mikrospritzguss



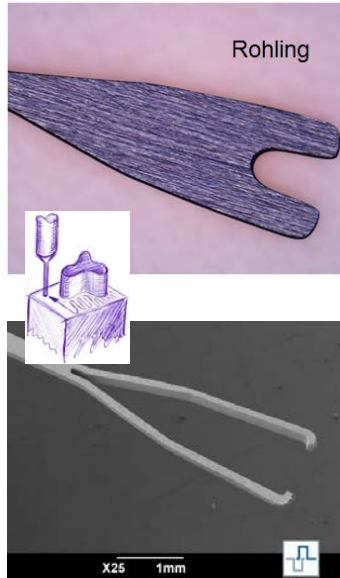
Prinzipdarstellung UPECM

Quellen: TU Chemnitz IWP

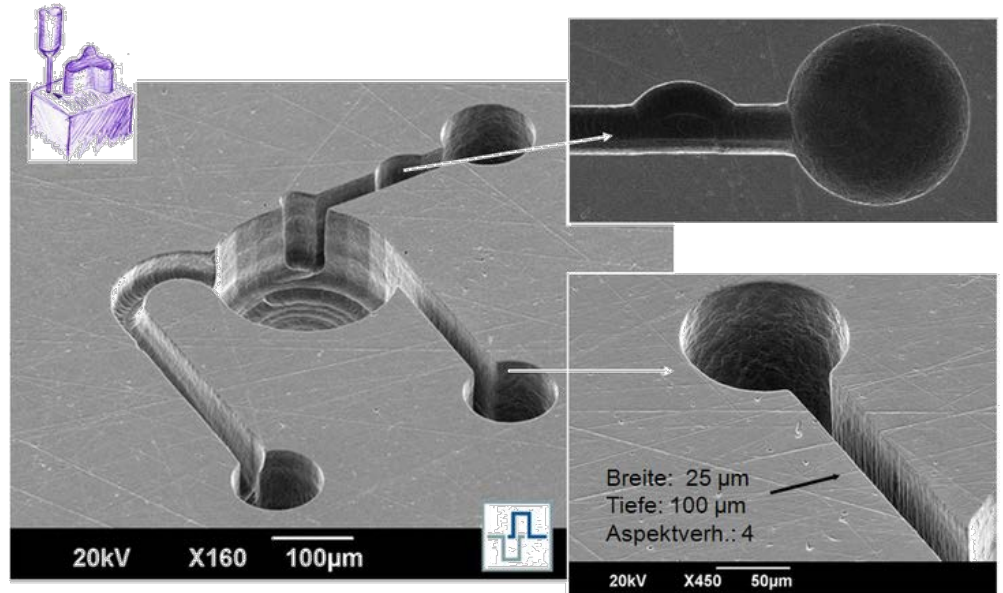
2.3 Trennen

VERFAHRENSVARIANTEN UND ANWENDUNGEN

Herstellung kleinster Strukturen



Mikrogreifer in 7C27Mo2
Durchmesser 0,3 mm



Mikroreaktorstruktur in Edelstahl 1.4441

2.3 Trennen

UPECM: VORTEILE, NACHTEILE, GRENZEN

Vorteile:

- Sehr hohe **Strukturauflösung** durch geringe **Spaltweiten**
- Hohe **Aspektverhältnisse** realisierbar
- **Formgebendes** Verfahren mit mehrachsiger Elektrodenkinematik → keine **Formelektroden** benötigt

Nachteile:

- Sehr geringe **Abtragraten** aufgrund des geringen Anteils der Abtragdauer pro Pulsperiode
- Aufgrund des sehr geringen **Arbeitsspalts** ist die Verwendung von **Säuren** (z.B. Essigsäure, Salzsäure, Flusssäure) notwendig, um Abtragprodukte in Lösung zu halten und Verstopfen zu vermeiden

Grenzen:

- **Strukturgröße:** einige 100 nm bis einige μm
- **Aspektverhältnis:** bis zu 200

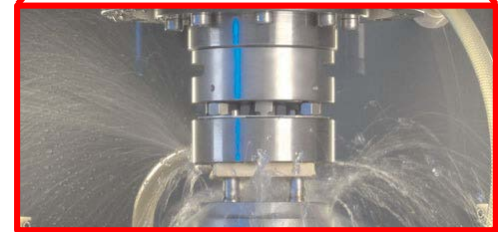
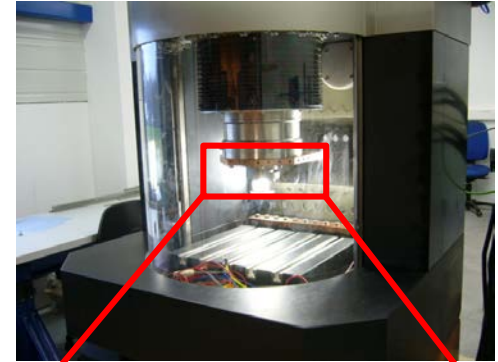
2.3 Trennen

SICHERHEITSASPEKTE BEIM ECM

Sicherheitsgefährdende Faktoren:



- Mechanisch bewegte Komponenten
- **Elektrizität**
- Elektrolytlösung
- **Chemikalien**
- Gasentwicklung
- **Reaktionsprodukte**
- Elektromagnetische Felder



Streueffekte während einer PECM-Bearbeitung

2.3 Trennen

GEFÄHRDUNG DURCH BEWEGTE ANLAGENKOMPONENTEN

Mechanisch bewegte Komponenten:

Bohr- und Senkverfahren:

- Vorschubbewegung
- Arbeitsspalt-Oszillation

bei mehrachsigen Verfahren zusätzlich:

- Antriebe für die X- und Y-Achse



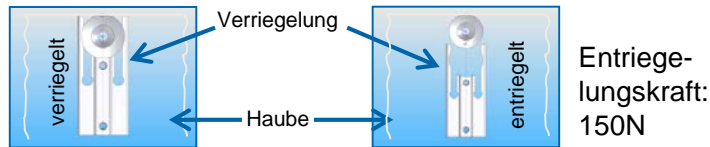
Quetschgefahr!

- beim **Wechsel** des Werkzeugs und / oder des Werkstücks
- beim **Anschließen** der Versorgungsleitungen
- bei der **Positionierung**

Hydraulische und pneumatische Komponenten:

Abdeckung der Prozesskammer – Druckluft

Elektrolytfluss – Hochdruckpumpe



Mechanische Sicherung der Abdeckhaube



Druckminderer:
Druckbegrenzung 2 bar

Pneumatische Sicherung der Haube

2.3 Trennen

GEFÄHRDUNG DURCH ELEKTRIZITÄT

Anwendung von gepulstem oder kontinuierlichem Gleichstrom, je nach Verfahren bis zu

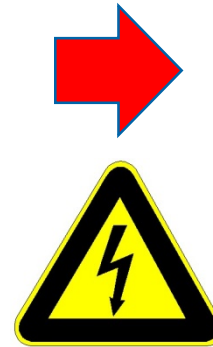
- mehrere 100 V bzw.
- mehrere 1000 A

NOT-AUS-Schalter

- Schalten die gesamte Anlage stromlos
- teilweise sind Türkontaktschalter in den Not-Aus-Stromkreis integriert



Not-Aus-Schalter



Lebensgefahr!

Kontrolle der **Abdeckungen** und der **Stromkabel** auf

- Festsitz
- Beschädigte Isolation
- Bruch



Fingersichere Verdrahtung

2.3 Trennen

ELEKTROLYTLÖSUNG UND CHEMIKALIEN

Als Elektrolyt wird in der Regel pH-neutrale, wässrige Natriumnitrat-Lösung verwendet:

- Natriumnitratlösung (Reinelektrolyt)
- Natriumnitrat (Natronsalpeter)



Zusätzlich können weitere Chemikalien zum Ausgleich des pH-Wertes oder zur Cr(VI)-Reduzierung zum Einsatz kommen

- Salpetersäure 5-10%
- Natriumhydroxid 5-10%
- Eisen(II)-sulfat 5-10%



Maßnahme:

- beim Umgang mit Chemikalien geeignete **Schutzkleidung** tragen:



2.3 Trennen

VERHALTEN BEIM UMGANG MIT CHEMIKALIEN

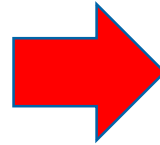
- Not- und Augendusche bereithalten
- Notfallruffnummern bereithalten
- geeignete Schutzbekleidung tragen
- Sicherheitshinweise aus Sicherheitsdatenblättern und Betriebsanweisungen beachten.
- Berührung mit Augen, Haut und Kleidung vermeiden
- Dämpfe und Nebel (Aerosol) nicht einatmen
- für gute Be- und Entlüftung sorgen
- Gefäße nicht offen stehen lassen
- im Arbeitsbereich nicht essen, trinken, rauchen
- im Anschluss gründlich mit geeignetem Reinigungsmittel waschen
- Unbefugten ist der Zutritt verboten
- Elektrolytbenetzte Teile nicht mit Luft abblasen



2.3 Trennen

GASENTWICKLUNG

während der EC-Bearbeitung entstehen Prozessgase durch Elektrolyse



Maßnahme:

Absaugung der Prozessgase notwendig

Bildung von:

- Sauerstoff an der Anode
- Wasserstoff an der Kathode

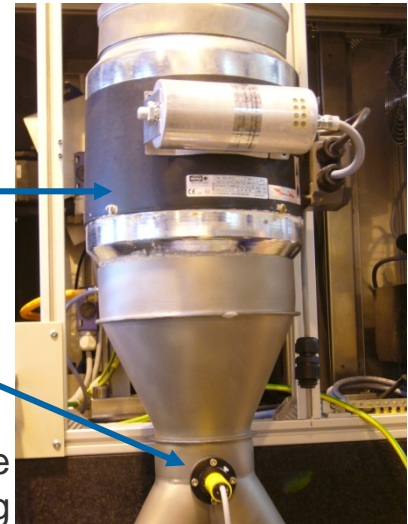
- Explosionsgefahr durch Entzündung von Wasserstoff
- Knallgas-Reaktion



Ventilator, explosionsgeschützt

Strömungswächter

Explosionsschutz
Absaugeinrichtung



2.3 Trennen

REAKTIONSPRODUKTE

Wassergefährdungsklassen (WGK)

Umweltbundesamt - Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe (VwVwS)

Reinelektrolyt: Natriumnitratlösung = Wasser + Natriumnitrat

- WGK 1, VwVwS – 27.07.2005, Kenn-Nummer: 378

Verschmutzter Elektrolyt

- WGK 3, Gefährdungsstufe C
- Inhaltsstoffe in Abhängigkeit der bearbeiteten Materialien:

- **Chrom (VI)**
- Chrom
- Mangan
- Molybdän
- ...



Kann Krebs erzeugen
 Kann vererbare Schäden verursachen
 Giftig beim Einatmen und Verschlucken
 Gesundheitsschädlich bei Berührung mit der Haut
 Allergieentstehung durch Hautkontakt möglich
 Wassergefährdende Flüssigkeit, kann in Gewässern
 längerfristig schädliche Wirkungen haben

Verhalten beim Umgang mit
 Chemikalien unbedingt beachten!

2.3 Trennen

UMWELTSCHUTZ

- Aufstellort und Raum wannenartig ausbilden
- Überwachung durch Leckagesensor
- Kanalanschlüsse im Arbeitsbereich vermeiden
- Boden wasserdicht und chemikalienbeständig versiegeln
- Elektrolyt und Elektrolytverschmutzte Gegenstände fachgerecht entsorgen
- Elektrolyt und Chemikalien nicht in die Kanalisation und ins Erdreich gelangen lassen
- Elektrolyt in doppelwandigen Behältern zwischenlagern
- Chemikalien in Gefahrgut-Lagerschränken aufbewahren
- Sicherheitsdatenblätter beachten



PECM-Anlage mit Wannenkonstruktion



Additive Fertigung

FERTIGUNGSTECHNIK 20/21 – 13

Technische Universität Bergakademie Freiberg
IMKF - Additive Fertigung
Agricolastraße 1, 09599 Freiberg, Germany

Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler
Tel: +49 3731 39 30 66
henning.zeidler@imkf.tu-freiberg.de



imkf
INSTITUT FÜR MASCHINENELEMENTE
KONSTRUKTION UND FERTIGUNG



TU Bergakademie Freiberg | Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung | Professur für Additive Fertigung
Agricolastraße 1 | 09599 Freiberg DE | Tel.: +49 3731 39 2986 | <http://www.imkf.tu-freiberg.de> | Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler