

# Mikroerosion

Franz Ludwig Bruhns; Jens Ginzler

## Zusammenfassung:

Neue Entwicklungen in der Mikrosystemtechnik bieten ein großes Marktpotential, jedoch erfordert die wirtschaftliche Fertigung von Mikromechanischen Bauteilen eine speziell auf diesen Anwendungsfall abgestimmte Fertigungstechnologie. Der Funkenerosion fällt in diesem Zusammenhang eine wichtige Schlüsselposition zu, da die ihr zugrundeliegenden Wirkprinzipien die Herstellung von Bauteilen mit Submikrometerpräzision erlauben. Die Anwendung der Erosionstechnologie zur Mikrofertigung stellt jedoch besondere Anforderungen an die Elemente einer funkenerosiven Senkanlage. Nachfolgend werden die Besonderheiten einer auf die Mikroerosion abgestimmten Maschinenauslegung aufgezeigt. Außerdem werden Ansätze vorgestellt, um mittels Funkenerosion Prozeßketten zur Fertigung von Mikrobauteilen aufzubauen.

**Keywords:** micromachining, mirco-EDM, miniaturization

## Einleitung

Die Miniaturisierung von Bauteilen gehört zu den wichtigsten Zukunftstrends. Die fertigungstechnischen Verfahren zur Herstellung mikrosystemtechnischer Komponenten entstammen überwiegend der Elektronikindustrie. Hier können diese Produktionstechniken etwa zur Herstellung von Halbleitern in der Massenfertigung effektiv eingesetzt werden. Mikromechanische Bauteile werden jedoch in kleinen bis mittleren Stückzahlen benötigt, da je nach Anwendung die Anforderungen stark voneinander abweichen. Für die Mittelserienfertigung von mikrosystemtechnischen Komponenten werden deshalb alternative Herstellungsverfahren benötigt. Die Funkenerosion bietet sich für die Lösung dieser Problemstellung an. Da der Abtragsmechanismus bei der elektroerosiven Bearbeitung auf thermischen Effekten beruht, kann nahezu prozeßkräftefrei operiert werden. Werkstoffe können unabhängig von ihren mechanischen Eigenschaften mit hoher geometrischer Gestaltungsfreiheit bearbeitet werden. Komplexe Geometrien lassen sich dadurch in gehärtetem Stahl oder Hartmetall mit Submikrometerpräzision abbilden.

## Was ist Mikroerosion ?

Die industrielle Nutzung des erosiven Effektes begann 1954 mit der Verfügbarkeit der ersten funkenerosiven Senkanlagen. Mit den Varianten „funkenerosives Senken“ und „funkenerosives Schneiden“ hat sich diese Technologie als Fertigungsverfahren etabliert [1]. Vor allem im Werkzeug- und Formenbau ist die Funkenerosion zur Schlüsseltechnologie avanciert

[10]. Das Anwendungsfeld reicht vom Großformenbau mit Elektrodengewichten im Tonnenbereich bis hin zur Mikrosystemtechnik. Von Mikroerosion wird im allgemeinen gesprochen, wenn die herzustellende Geometrie kleiner als 500 µm ist [2].

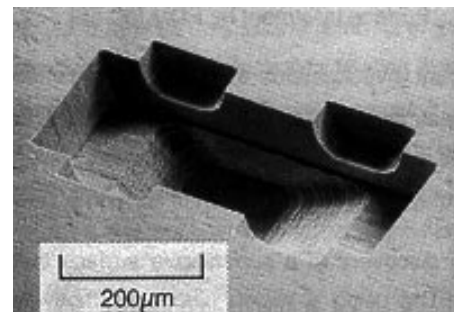


Bild 1: Beispiel einer funkenerosiv hergestellten Mikroform nach [5]

## Spezielle Maschinenauslegung für die Mikroerosion

Die Mikrobearbeitung stellt besondere Anforderungen an die einzelnen Elemente einer Erodiermaschine.

Der **Generator** stellt die für den Abtragsvorgang notwendige Energie zur Verfügung. Die während einer Funkenentladung umgesetzte Energie ist wie folgt definiert:

$$W_e = \int_{t_e} U_e(t) \cdot i_e(t) \approx \bar{U}_e \cdot \bar{i}_e \cdot t_e \quad (\text{Gl. 1})$$

$W_e$  : Entladeenergie

$\bar{i}_e$  : Mittelwert des Entladestromes

$\bar{U}_e$  : Mittelwert der Entladespannung

$t_e$  : Entladedauer

Um kleinste Materialpartikel definiert abtragen zu können, muß die Entladeenergie weitestgehend reduziert werden. Bei der Mikroerosion werden durch die Impulse kleinste Energiemenge bis hinunter zu  $2 \mu\text{J}$  zugeführt [3]. Nach Gleichung Gl. 1 ist eine Reduktion der Entladeenergie möglich durch:

- einen geringen mittleren Entladestrom  $\bar{i}_e$
- eine kurze Entladedauer  $t_e$

Die Spannung  $\bar{u}_e$ , die sich während einer Entladung über dem Spalt einstellt, ist materialspezifisch. Deshalb kann nicht über die mittlere Entladespannung  $\bar{u}_e$  Einfluß auf die Entladeenergie genommen werden. Ein Generator, der für die Mikroerosion geeignet ist, muß demnach in der Lage sein, kleinste Entladeströme in Verbindung mit kürzesten Entladedauern bereitzustellen.

Die Generatoren in konventionellen Erodiermaschinen sind darauf ausgelegt, ein möglichst breites Anwendungsspektrum abzudecken. Diese universellen Generatoren unterstützen neben der Schruppbearbeitung mit ihren hohen Entladeenergien auch den Schlichtvorgang mit nur geringer Energiezufuhr. Für die Mikroerosion sind diese Generatoren zumeist nicht geeignet. Um Entladedauern von wenigen Nanosekunden zu ermöglichen sind speziell angepasste Generatoren notwendig. Im einfachsten Fall basiert eine Energiequelle für die Mikroerosion auf einer gesteuerten Kondensatorentladung [2].

Eine besondere Bedeutung hat bei der Mikroerosion die **Spaltweitenregelung**. Der Abstand zwischen der Werkzeug- und Werkstückelektrode muß ständig an den Erosionsprozeß angepaßt werden, damit möglichst viele abtragswirksame Zündimpulse stattfinden können. Der direkte Kontakt zwischen den Elektroden muß dabei vermieden werden, da auf diese Weise Kurzschlüsse entstehen. Bei der Mikroerosion ist die Spaltweite kleiner als  $10 \mu\text{m}$ . Demzufolge muß der Mechanismus zur Regelung der Spaltweite sehr präzise arbeiten. Abtragspartikel verursachen weitere Schwierigkeiten. Da die Spaltweite sehr klein ist können Partikel, die sich in diesem Bereich befinden, leicht einen indirekten Kurzschluß zwischen Werkzeug- und Werkstückelektrode verursachen. In diesem Fall ist eine schnelle Reaktion der Spaltweitenregelung vorteilhaft.

In konventionellen Erodiermaschinen wird die Spaltweite zumeist aufgrund der mittleren Zündverzögerungszeit  $t_d$  (Bild 2) geregelt.

Die Zündverzögerungszeit ist jedoch eine stochastisch stark schwankende Größe. Aus diesem Grund ist während der Bearbeitung eine oszillierende Pinole als Folge der Regelbewegung zu beobachten.

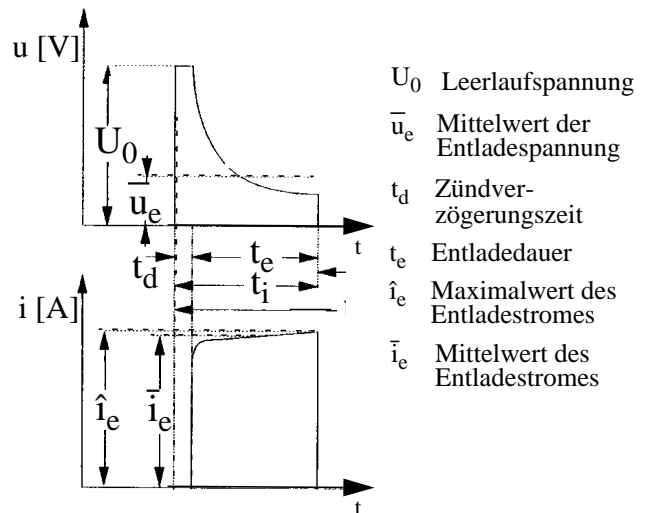


Bild 2: Elektrische Kenngrößen der Funkenentladung

Für die Mikroerosion ist diese oszillierende Bewegung der Werkzeugelektrode nachteilig, da sich aufgrund der extrem engen geometrischen Verhältnisse im Funkenpalt leicht Kurzschlüsse ergeben können. Einen Ausweg verspricht die Regelung der Spaltweite auf der Basis anderer Prozeßkenngrößen, die weniger starken stochastischen Schwankungen unterliegen. So kann bei Verwendung der relativen Kurzschluß- und Leerlaufhäufigkeiten die Spaltweite präzise und ohne oszillierende Schwankungen so eingestellt werden, daß sich stets ein abtragsoptimaler Prozeßverlauf ergibt [6].

Auch die in modernen Erosionsanlagen vorhandenen Einrichtungen zur **Lichtbogen- und Kurzschlußbehandlung** bedürfen einer besonderen Anpassung an die Mikroerosion. Lichtbogenartige Fehlentladungen stellen bei der Funkenerosion eine ernstzunehmende Gefahr für den Prozeßverlauf dar. Diese Fehlentladungsart kann leicht zu Oberflächenbeschädigungen an Werkzeug- und Werkstückelektrode führen. In diesem Fall kommt auch der Erosionsprozeß zum Erliegen. Neuere Untersuchungen zu lichtbogenartigen Fehlentladungen zeigen jedoch, daß sich diese Entladungsart vorwiegend im Verlauf der Entladezeit durch Mutation aus einer normalen Entladung bildet [7].

Da bei der Mikroerosion sehr kurze Entladezeiten verwendet werden, ist die Gefahr gering, daß eine normale Entladung während der äußerst geringen Entladedauer in eine Fehlentladung mutiert.

Die Möglichkeit einer Zerstörung der Elektrodenoberflächen durch lichtbogenartige Fehlentladungen ist somit im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung reduziert.

Eine größere Gefahr geht von Kurzschlüssen aus, die sich aufgrund der geringen Spaltmaße leicht einstellen können. Die Spaltweitenregelung kann zwar dazu beitragen, die Zahl der Kurzschlüsse zu reduzieren, dennoch sollte der Generator über eine wirksame Kurzschlußerkennung verfügen, um für diesen Fall den Energiefluß rasch zu unterbrechen.

### **Prozeßketten**

Um eine technisch und wirtschaftlich erfolgreiche Massenproduktion von Mikroteilen zu gewährleisten, ist die Kombination unterschiedlicher Mikrofertigungsverfahren ein vielversprechender Ansatz. Die Mikroerosion bildet dabei einen zentralen Bestandteil innerhalb der verschiedensten Prozeßketten.

Sollen Mikrobauteile durch Umformprozesse hergestellt werden, so bietet die Mikroerosion Möglichkeiten zur Herstellung der Abformwerkzeuge. Die für einen Einsatz in der Umformtechnik einsetzbaren Werkzeuge müssen hochwärme- und hochverschleißfeste Eigenschaften aufweisen [11]. Die Funkenerosion bietet in diesem Fall für die Bearbeitung neben der Mikropräzision zusätzlich noch Vorteile aufgrund des breiten Spektrums der damit bearbeitbaren Materialien (z.B. Hartmetall) [13].

Eine weitere Prozeßkette kann durch die Urformverfahren gebildet werden. Mikropulverspritzgießen und Mikroguß bieten Möglichkeiten zur Herstellung von hochbelastbaren metallischen und keramischen Mikrobauteilen [15]. Für die Herstellung dreidimensionaler mikrostrukturierter Formeinsätze aus verschleißbeständigen Materialien ist ebenfalls die Mikroerosion ein geeignetes Herstellungsverfahren [16].

Die für Mikroerosion notwendigen Werkzeugelektroden können mittels spanabhebende Verfahren erzeugt werden.

Hier bietet die Mikrozerspanung außerdem die Möglichkeit zur Herstellung von dreidimensionalen Strukturen in leicht zerspanbarem Elektrodenmaterial.

### **Aktuelle Forschungstrends**

Das funkenerosive Abtragen ist eine vergleichsweise junge Fertigungstechnologie. Die physikalischen Zusammenhänge während der funkenerosiven Bearbeitung sind noch immer nicht vollständig bekannt. Durch die Ausdehnung dieser Technologie in den Bereich der Mikrobearbeitung treten Fragestellungen nach physikalischen Zusammenhängen erneut in den Vordergrund. So beruht der Abtrag auf der Wärmewirkung eines Plasmakanals, der sich während der Zündphase einer Funkenentladung bildet. Bei der Mikroerosion wird dieser Prozeß mit geringsten Energiemengen betrieben. Dadurch ergibt sich die Frage nach den minimal notwendigen Energiemengen, die zur Durchführung dieses Verfahrens notwendig sind und damit gleichzeitig in Bezug auf die Miniaturisierung die Grenzen dieser Technologie definieren.

Die Herstellung der Werkzeugelektroden durch speziell angepasste Erosionstechnologien stellt ebenfalls ein im Zusammenhang mit der Mikroerosion wichtiges Forschungsgebiet dar [8], [9].

Ein zentrales Problem der Mikrobearbeitung besteht in der Handhabung von Mikrobauteilen [12]. Für die Automatisierung von Prozeßketten sind hochgenaue Greifer notwendig. Für den industriellen Einsatz von Mikrobauteilen müssen außerdem Möglichkeiten zur Qualitätssicherung untersucht werden [14].

## References

- 1 König W.: „Fertigungsverfahren“; Band 3 - Abtragen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990
- 2 Masuzawa T.: „Micro-EDM“, Proc. 13th International Symposium for Electro Machining (ISEMXIII), Bilbao, 2001, S. 3 - 19
- 3 Koch O., Ehrfeld W., Michel F., Gruber H. P. „Recent progress in micro-electro discharge machining - Part I: Technology“, Proc. 13th International Symposium for Electro Machining (ISEMXIII), Bilbao, 2001, S. 737 - 746
- 4 Masuzawa T.: „An Approach to Micromachining through Machine Tool Technology“, Proc. of 2nd. International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1991, S. 47 - 52
- 5 Masuzawa T., Takawashi T.: „Recent Trends in EDM/ECM Technologies in Japan“, Proc. 12th International Symposium for Electro Machining (ISEMXII), Aachen, 1998, S. 1 - 15
- 6 Behrens A., Ginzel J.: „A comparison of different input values for gap-width controllers used in electro-discharge machining“, Proc. 13th International Symposium for Electro Machining (ISEMXIII), Bilbao, 2001, S. 93 - 107
- 7 Behrens A., Ginzel J.: „Arc detection in electro-discharge machining“, Proc. 13th International Symposium for Electro Machining (ISEMXIII), Bilbao, 2001, S. 125 - 140
- 8 Koch O., Ehrfeld W., Michel F., Gruber H. P. „Micro Electro discharge Machining for Mould Insert Generation - Application and Technology“, Proc. MicroTec2000, Hannover, 2000, S. 19 - 24
- 9 Sheu D.-Y., Masuzawa T.: „Development of Large-Scale Production of Microholes by EDM“, Proc. 13th International Symposium for Electro Machining (ISEMXIII), Bilbao, 2001, S. 747 - 758
- 10 Eversheim W., Klocke F.: „Werkzeugbau mit Zukunft“, Springer Verlag, Berlin, 1997
- 11 Gillner A.; Bayer A.; Groche P., Erhardt R. : „Laserstrahlunterstütztes Mikroumformen metallischer Bauteile“, DFG-Kolloquium 2001: Erweiterung der Formgebungsgrenzen bei Umformprozessen, 11.-12.9.2001, Bonn
- 12 Weck M.; Petersen B.: „Adhesion problems during handling of micro parts - vibration assisted release of objects“, Proc. EUSPEN-European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Turin, 2001, P.148-151 (Vol.1)
- 13 Uhlmann E.; Spur G.; Doll U.: „Application of - EDM in the machining of micro structured forming tools“, Proc. 3rd International Machining and Grinding, Dearborn, Mich. : SME, 1999, P.561-573
- 14 Spath D.; Elsner J.: „Qualitätssicherung in der Mikrosystemtechnik“ In. QZ Qualität und Zuverlässigkeit 11/2001, 46 Jg, P.1408-1409, Hanser Verlag
- 15 Masuzawa T. „State of the art of Micromachining“, Annals of CIRP, Vol. 49/2/2000, S. 473 - 488
- 16 Hüntrup V., Wenda A., Beck M., Meisel M.: „Möglichkeiten und Grenzen der Mikrozerspanung“, Carl Hanser Verlag, München; FeM Mikrotechnik Jahrg. 107 (1999) 11, S. 64 - 67