

# 1. Einleitung

Durch die ständige Miniaturisierung von einzelnen Baugruppen, komplexen Bauteilen und Produkten in fast allen Industriezweigen ist es erforderlich, Fertigungsverfahren und Prozesse zu entwickeln, mit denen diese Produkte preisgünstig und qualitätsgerecht hergestellt werden können. Die der Mikrosystemtechnik heute zugänglichen Fertigungstechnologien haben ihren Ursprung meist in der Halbleiterindustrie. Die mit diesen Verfahren strukturierbaren Werkstoffe weisen aber häufig nicht die konstruktiv notwendigen Eigenschaften auf, um komplexe mikrosystemtechnische Bauteile und Baugruppen zu fertigen. Weiterhin werden die Fertigungsverfahren der Halbleiterindustrie durch die geringe zur Verfügung stehende Auswahl strukturierbarer metallischer Werkstoffe beschränkt. Überwiegend verwendete metallische Werkstoffe für Formwerkzeuge sind galvanisch abgeschiedene Schichten aus Nickel und Nickelverbindungen. Weiterhin sind die Fertigungstechnologien der Halbleiterindustrie nur wirtschaftlich bei der Massenfertigung von mikrostrukturierten Bauteilen einsetzbar, da eine sehr kostenintensive Infrastruktur für Reinraumtechnik usw. aufgebaut und unterhalten werden muss. In der Medizintechnik werden hochentwickelte Instrumenten- und Implantatstähle verwendet, die zur Zeit mit sehr aufwendigen Fertigungsverfahren strukturiert werden. Allerdings fehlen auch in diesem Bereich Fertigungsverfahren, mit denen Konstruktionswerkstoffe wie Werkzeugstähle, Warmarbeitsstähle, Nickel- und Cobaltbasislegierungen und Werkstoffe der Medizintechnik bearbeitet werden können um beispielsweise Mikroturbinen und Mikroimplantate fertigen zu können. Für die Entwicklung von Sensoren in der Luft- und Raumfahrtindustrie und dem stationären Gasturbinenbau stehen ebenfalls noch keine Fertigungsverfahren zur Verfügung, mit denen hochwarmfeste Stähle, Nickel- und Cobaltbasislegierungen und auch Titanaluminide mikrostrukturiert werden können. Eine weitere Aufgabenstellung für die Strukturierung von metallischen Werkstoffen ist die Herstellung von Formeinsätzen für die Massenfertigung von mikrostrukturierten Polymerbauteilen. Komplexe Formeinsätze können zur Zeit nur mit einigen miniaturisierten Fertigungsverfahren wie Ultrapräzisionsfräsen und Ultrapräzisionsdrehen in Werkstoffen mit geringer Härte gefertigt werden, da die häufig verwendeten Präzisionswerkzeuge Diamantschneiden besitzen und daher für eine Stahlbearbeitung nicht geeignet sind. Die verhältnismäßig weichen, bearbeitbaren Metalle wie Nickel, Kupfer und Messing

sind für die Massenabformung (Hard Tooling) von vielen Polymeren nicht geeignet. Ein weiteres Problem stellt die geringe Standzeit der Werkzeuge dar. Für eine Vielzahl von sehr interessanten Polymeren mit sehr guten optischen, mechanischen, und biologischen Eigenschaften stehen noch keine industriell einsetzbaren Abformverfahren zur Verfügung. Eine sehr interessante Methode, diese Werkstoffe zu bearbeiten und mit Mikrostrukturen zu versehen, sind die Verfahren der elektrochemischen Bearbeitung. Die Fertigungsverfahren der elektrochemischen Bearbeitung (ECM, Electrochemical Machining) werden nach DIN 8580 zu den abtragenden Fertigungsverfahren gezählt, wobei ein kathodisch gepoltes Formwerkzeug mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit in ein anodisch gepoltes Werkstück eingesenkt wird. Zur Abfuhr der Reaktionsprodukte und der Wärme wird ein Elektrolyt mit hoher Strömungsgeschwindigkeit durch den entstehenden Spalt gedrückt. Durch elektrochemische Reaktionen löst sich der Werkstoff an der Anode örtlich begrenzt auf, und es können Durchbrüche oder Raumformen erzeugt werden. Ein besonderer Vorteil des Verfahrens ist das Bearbeiten von Werkstoffen beliebiger Härte aufgrund des nichtmechanischen Metallabtrags. Durch die Abbildung des Werkzeugs im Werkstück können außerdem komplizierte Geometrien realisiert werden. Typisch für das Verfahren ist die Fertigbearbeitung eines Werkstückes in einem Arbeitsgang. Im Vergleich zu den funkenerosiven Fertigungsverfahren können mit Hilfe der elektrochemischen Bearbeitung höhere Abtragsleistungen realisiert werden. Ist der elektrochemische Abtragsprozess unter Kontrolle, treten keine oder vernachlässigbar kleine Verschleißerscheinungen an der Werkzeuglektrode auf. Die elektrochemischen Fertigungsverfahren werden schon seit Jahrzehnten erfolgreich in der industriellen Praxis eingesetzt. Durch die Weiterentwicklung der Steuerungstechnik konnte in den letzten Jahren die Abbildgenauigkeit der ECM-Fertigungsverfahren immer weiter erhöht werden, so dass die Fertigung sehr feiner Strukturen möglich wurde. Dadurch wurden die Voraussetzungen geschaffen, um diesem Fertigungsverfahren eine breite Palette von Anwendungsmöglichkeiten in der Mikrosystemtechnik zu eröffnen. Durch das neu entwickelte Verfahren des elektrochemischen Senkens mit oszillierender Werkzeuglektrode ist es möglich, die Vorteile dieser Technologie auch für mikrosystemtechnische Anwendungen zu nutzen. Allerdings existieren noch keine Untersuchungen über Voraussetzungen, technologische Parameter, Arbeitsergebnisse und Kosten dieses Fertigungsverfahrens für mikrosystemtechnische Anwendungen. Diese Lücke soll durch die hier vorgestellte Arbeit kleiner werden. Das gesamte Aufgabengebiet der Mikrosystemtechnik, welches sich mit der Strukturierung von hoch- und niedrig legierten Stählen und anderen Konstruktionswerkstoffen beschäftigt, macht es erforderlich, auch das komplexe Umfeld der eigentlichen Bearbeitungsverfahren zu betrachten und weiter zu entwickeln.

## 2. Theoretische und experimentelle Grundlagen

### 2.1. Historischer Überblick

Erstmalig wurden im sechsten Jahrhundert v. Chr. Funkenentladungen und deren künstliche Erzeugung durch Menschen, hervorgerufen durch elektrostatische Ladungstrennung bei Reibung eines Tierfells an Bernstein, von THALES VON MILET durchgeführt und beschrieben (Gut71). SIR WILLIAM GILBERT benutzte 1600 als Erster das Wort "electric" (von Elektron, griechisch für Bernstein), um Materialien zu beschreiben, die die Eigenschaft haben, Anziehungen auszuüben. Es wurde beobachtet, dass Werkstoffe wie Glas nach dem Reiben an Seide eine abstoßende Kraft auf Bernsteinteilchen ausüben. BENJAMIN FRANKLIN schlug 1774 eine "one-fluid"-Theorie für die Erklärung elektrischer Phänomäne vor. Auf ihn geht die Konvention zurück, dass die Ladung, die an einem Glasstab nach dem Reiben mit Seide entsteht, als ein positiver Ladungsüberschuss betrachtet wird. Elektrochemische Vorgänge wurden im 18. Jahrhundert beobachtet. Durch die Entdeckungen und Überlegungen von GALVANI (1791) und VOLTA (1795) wurden die Grundlagen der Elektrochemie geschaffen. Die weiteren experimentellen Untersuchungen elektrochemischer Phänomene wurden mit Hilfe der von VOLTA 1800 entwickelten galvanischen Elemente durchgeführt. So genannte Voltasche Säulen bestanden aus einer alternierenden Anordnung aus Silber- und Zinkplatten, zwischen denen sich mit wässriger Elektrolytlösung getränkte Tücher befanden. Unter Verwendung derartiger hintereinander geschalteter galvanischer Elemente wurden 1803 von BERZELIUS und 1807 von DAVY wässrige Lösungen untersucht. 1834 wurden von FARADAY die nach ihm benannten Gesetze über die qualitativen Verhältnisse der Stoffumsetzung bei Elektrolysevorgängen aufgestellt. Durch die zur damaligen Zeit vorhandenen Energiequellen konnten allerdings nur geringe elektrochemische Abtragraten erzielt werden. Die technische Anwendung elektrochemischer Verfahren wurde erstmals von PIRANI und SCHRÖTER beschrieben. Der Berliner Physikprofessor MARCELO VON PIRANI und sein Mitarbeiter beschrieben erstmalig im April 1924 einen elektrochemischen Formgebungsprozess für die Fertigung von Bohrungen in harten metallischen Werkstoffen