

Fertigung einer Bedampfungsmaske durch Mikrobohren und Nutzung des Elektropolierens zur Gratentfernung

T. Gietzelt¹⁾, L. Eichhorn¹⁾, M. Guttmann²⁾

Karlsruher Institut für Technologie (Campus Nord), ¹⁾Institut für Mikroverfahrenstechnik,
²⁾Institut für Mikrostrukturtechnik, PF 3640, 76021 Karlsruhe

Zusammenfassung

Bei der Mikrobearbeitung duktiler Werkstoffe kann es je nach Schärfe der Werkzeugschneide zu mikroskopischen plastischen Verformungen und zu Gratbildung an den Strukturen kommen. Weitgehend vermeiden lässt sich die Gratbildung durch Verwendung von Werkzeugen aus monokristallinem Diamant, da deren Schneide nahezu ideal scharf präpariert werden kann. Werden Werkzeuge aus Hartmetall (Werkstoffverbund aus Wolframkarbid und Bindemetallmatrix) oder beschichtete Werkzeuge verwendet, ist die Schneidkante im Mikrobereich schartig bzw. verrundet.

Grate an mikrostrukturierten Abformwerkzeugen behindern die Entformbarkeit replizierter Mikrostrukturen und müssen entfernt werden. Aber auch für viele andere Anwendungen sind gratfreie Mikrostrukturen erforderlich. Im vorliegenden Beispiel wurde eine Aufdampfmaske durch Mikrobohren hergestellt.

Voraussetzung für die erfolgreiche Gratentfernung durch Elektropolieren ist die Auswahl eines geeigneten Werkstoffs da nicht alle Materialien elektropolierbar sind. Zu vermeiden sind mehrphasige Werkstoffe bei denen sich Lokalelemente ausbilden oder Materialien, die eine passive Komponente, wie z. B. Blei in einigen Messingsorten, enthalten.

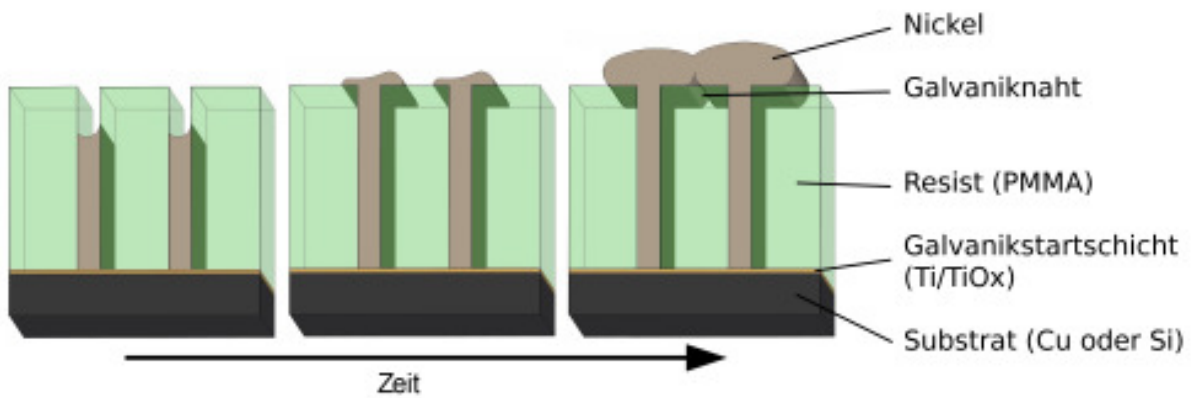
1 Motivation

Im LIGA-Prozess wird ein mikrostrukturierter Photoresist ausgehend von einer elektrisch leitfähigen Kontaktschicht am Strukturgrund in den Strukturkavitäten galvanisch mit einem Metall oder einer Legierung aufgefüllt. Ziel ist die Herstellung mikrostrukturierter Metallteile oder eines Abformwerkzeuges mit dem Mikrobauteile durch Heißprägen oder Mikrospritzgießen vervielfältigt werden können.

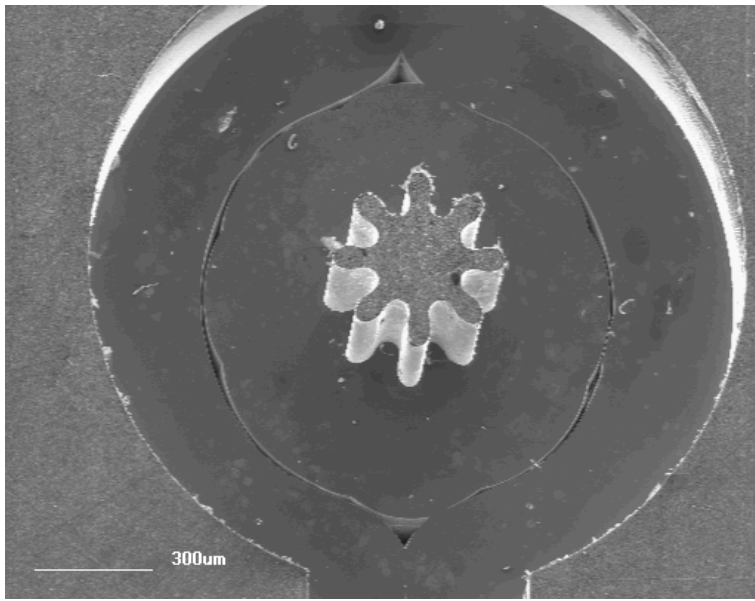
Die Geschwindigkeit der galvanischen Auffüllung hängt unter anderem von der Breite der Mikrokavitäten ab, da neuer Elektrolyt durch Diffusionsprozesse an die Stelle der Abscheidung transportiert werden muss. Im Ergebnis ist die Wachstumshöhe eine Funktion der Grabenbreite. Im Extremfall können Strukturen übergalvanisiert werden bevor sie vollständig aufgefüllt wurden [1, 8]. Hierdurch ergeben sich Lunken bzw. Defektstellen in den galvanischen Schichten.

Zudem ändert sich bei Erreichen der nicht leitfähigen Oberfläche des Resists mit zunehmender Ausbreitung der galvanischen Wachstumsfront deren Fortschreitwinkel. Beim Zusammentreffen zweier Wachstumsfronten auf der Resistoberfläche bilden sich in der galvanisch abgeschiedenen Schicht Bindenähte aus (Abb. 1). Wird diese galvanische Replikation als Abformwerkzeug zur Massenfertigung eingesetzt, tragen alle abgeformten Teile diese Fehlstellen.

Zur Abhilfe kann die Resistoberfläche vor der galvanischen Abscheidung mittels Bedampfen oder Sputtern mit einer leitfähigen Beschichtung (Metallisierung) versehen werden. Wird diese im Verlauf der galvanischen Abscheidung durch die Wachstumsfront kontaktiert, wächst die Oberfläche gleichmäßig auf. Zu beachten ist, dass die Seitenwände der Mikrostrukturen nicht mit beschichtet werden dürfen, weshalb für die Metallisierung zusätzlich eine Beschichtungsmaske angefertigt werden muss. Außerdem ist zu beachten, dass die Haftfestigkeit einer durchgehenden Metallisierung auf dem Resist aufgrund innerer Spannungen in der sehr dünnen Metallisierung meist nur sehr schlecht ist.



a)

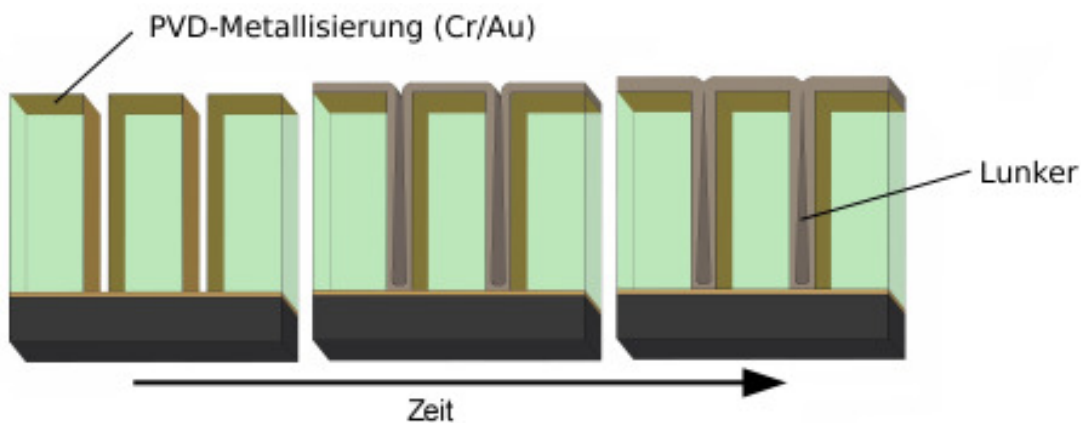


b)

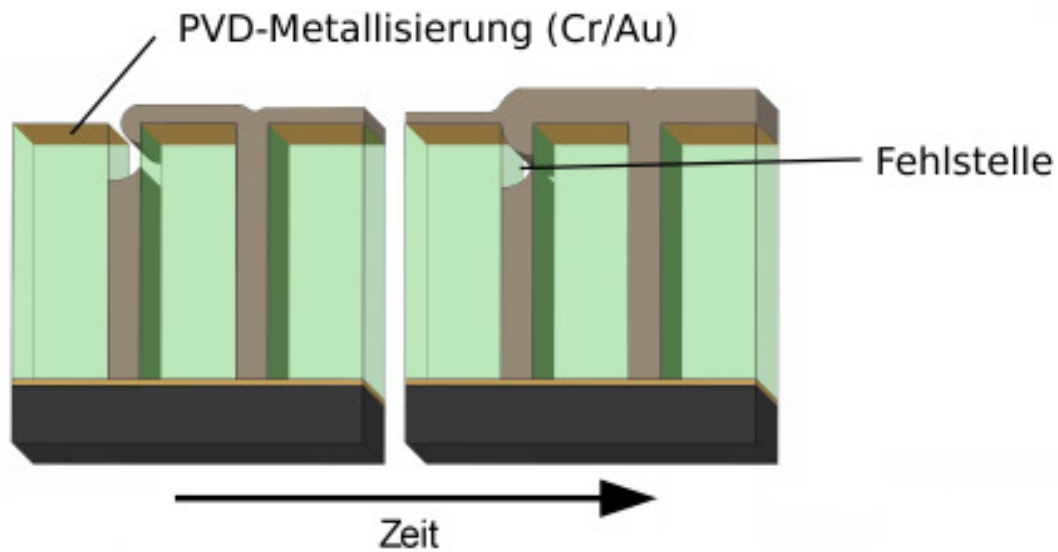
Abb. 1: Schema a) und reales Beispiel b) des Überwachsens nicht leitfähiger, großflächiger Resistbereiche mit Fehlstellenbildung

Auch durch in den Strukturkavitäten festsitzende Gasblasen kann das galvanische Befüllen enger Gräben mit hohen Aspektverhältnissen behindert werden.

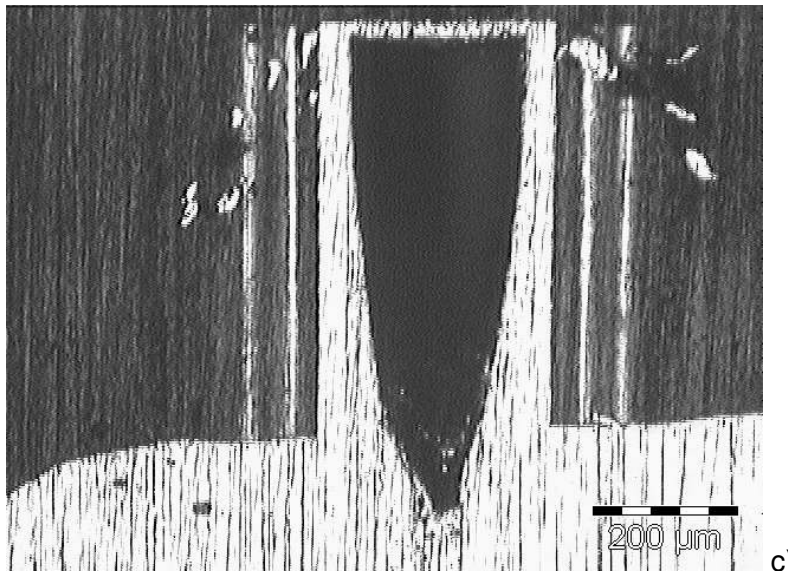
Abb. 2 zeigt Strukturdetails eines UV-LIGA-Formeinsatzes, welcher sowohl Galvanik-Bindenähte durch fehlende leitfähige Beschichtung großer Resistflächen als auch unvollständige Befüllung kleiner Kavitäten aufweist. Meist sind die Gaseinschlüsse in so hergestellten Abformwerkzeugen flüssigkeitsgefüllt, was zusätzliche Probleme bei Temperaturbelastung während der Abformprozesse verursacht.



a)



b)



c)

Abb. 2: Illustration der Fehlstellen- bzw. Lunkerbildung, a) durch vollflächige Resistmetallisierung mit leitfähiger Beschichtung der Seitenwand, b) durch Überwachsen noch nicht vollständig aufgefüllter, enger Strukturen, c) reales Beispiel

Oft ist die unvollständige Befüllung aufgrund Übergalvanisierens nicht auf den ersten Blick erkennbar. Nach Einwirkung äußerer Kräfte wie sie z. B. beim Mikrospritzgießen oder Mikroheißprägen auftreten, auch in Verbindung mit Temperatureinflüssen, werden solche Fehler dann offenbar (Abb. 3).

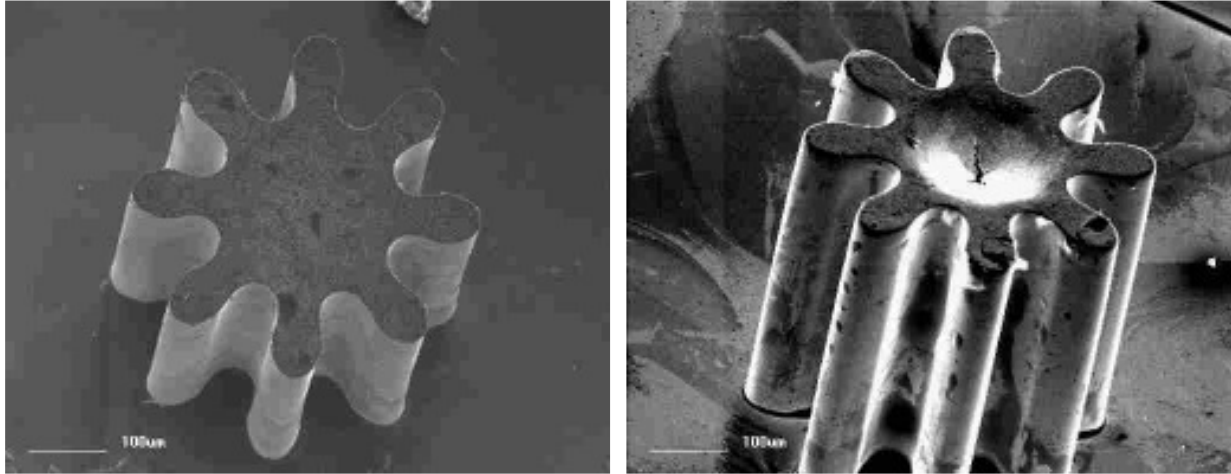


Abb. 3: Mikrozahnrad-Pin nach Galvanoformung (links) und mit Beschädigung nach Mikrospritzgießen (rechts)

Aus diesen Gründen ist eine selektive Metallisierung großer Resistbereiche insbesondere bei Aspektverhältnissen > 3 vorteilhaft. Bei Einsatz einer Punktm metallisierung werden die einzelnen Punkte durch die fortschreitende Wachstumsfront kontaktiert und verhindern die Ausbildung von Bindenähten beim Zusammentreffen aufgrund des gleichbleibend geringen Fortschrittswinkels (Abb. 4) [8].

Allerdings muss ein ausreichender Abstand der punktförmigen Metallisierung zum Rand bzw. den Seitenwänden der Mikrostrukturen eingehalten werden, um aufgrund der Toleranz bei der Ausrichtung der Bedampfungsmaske bezüglich der Resiststruktur eine Metallisierung der Strukturseitenwände sicher zu vermeiden.

Generell sind verschiedene Verfahren zur Herstellung solcher Bedampfungsmasken möglich. Neben Ätzverfahren und lithographischen Verfahren können Lochmuster auch mikromechanisch erzeugt werden. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die große Flexibilität bezüglich des Designs. Mikrobohren ist vor allem vorteilhaft, um verschiedene Layouts hinsichtlich Punktgröße und Punktabstand zu untersuchen oder unterschiedliche Resiststrukturen zu bedampfen. Allerdings ist zu beachten, dass die kleinsten verfügbaren Vollhartmetall-Mikrobohrer derzeit einen Durchmesser von $30\ \mu\text{m}$ aufweisen [2]. Sollen hingegen mehrere Substrate mit festem Design bedampft werden, bieten Ätzen und lithographische Verfahren Vorteile [8].

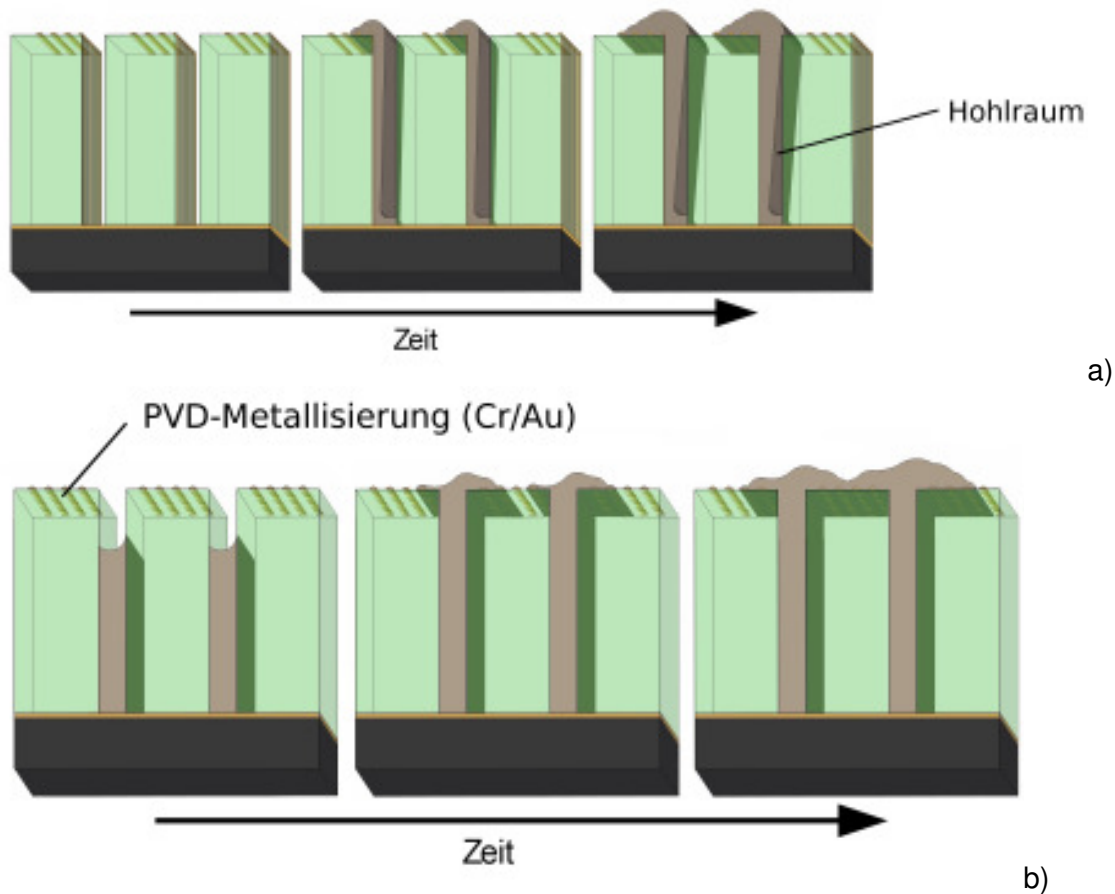


Abb. 4: Punktuell metallisierte Resistoroberfläche, a) Fehlstellenbildung durch fehlerhafte Justage der Bedampfungsmaske oder Designfehler und leitfähiger Beschichtung der Seitenwand, b) gleichmäßige Abscheidung bei richtig ausgeführter Bedampfung

2 Werkstoffauswahl und werkstofftechnische Betrachtungen

Als Material für die Bedampfungsmaske wurde MS 63 (CuZn37) ausgewählt. Im Gegensatz zu MS58 (CuZn39Pb3) handelt es sich um eine bleifreie Messingsorte.

Bei 454 °C kann das kubisch flächenzentrierte Kupfer im thermodynamischen Gleichgewicht maximal 38,95 % Zink als α -Mischkristall lösen. Bei größeren Zinkgehalten bilden sich auch kubisch raumzentrierte β -Mischkristalle, die sich je nach Zinkgehalt im Bereich von 454-468 °C in geordnete β' -Mischkristalle umwandeln. Somit liegt oberhalb von 38,95 % Zinkgehalt ein zweiphasiges Messing bestehend aus kubisch flächenzentrierten α -Mischkristallen und kubisch raumzentrierten β - bzw. β' -Mischkristallen vor. Ein solches Gefüge besitzt z. B. MS58. Ein Kristallgemisch aus α - und β -Mischkristallen mit unterschiedlichen Eigenschaften beider Phasen ist schlechter umformbar aber besser zerspanbar als ein homogenes Material.

Da das Lösungsvermögen des α -Mischkristalls für Zink mit sinkender Temperatur abnimmt, ist es jedoch möglich, dass bei ungeeigneter Wärmebehandlung auch in MS63 mit einem Zinkanteil von 37 % geringe Anteile an β - bzw. β' -Mischkristallen vorliegen (Abb. 5)

Der Zerspanbarkeitsindex von MS63 wird mit 35 % gegenüber 100% für MS58 angegeben [3].

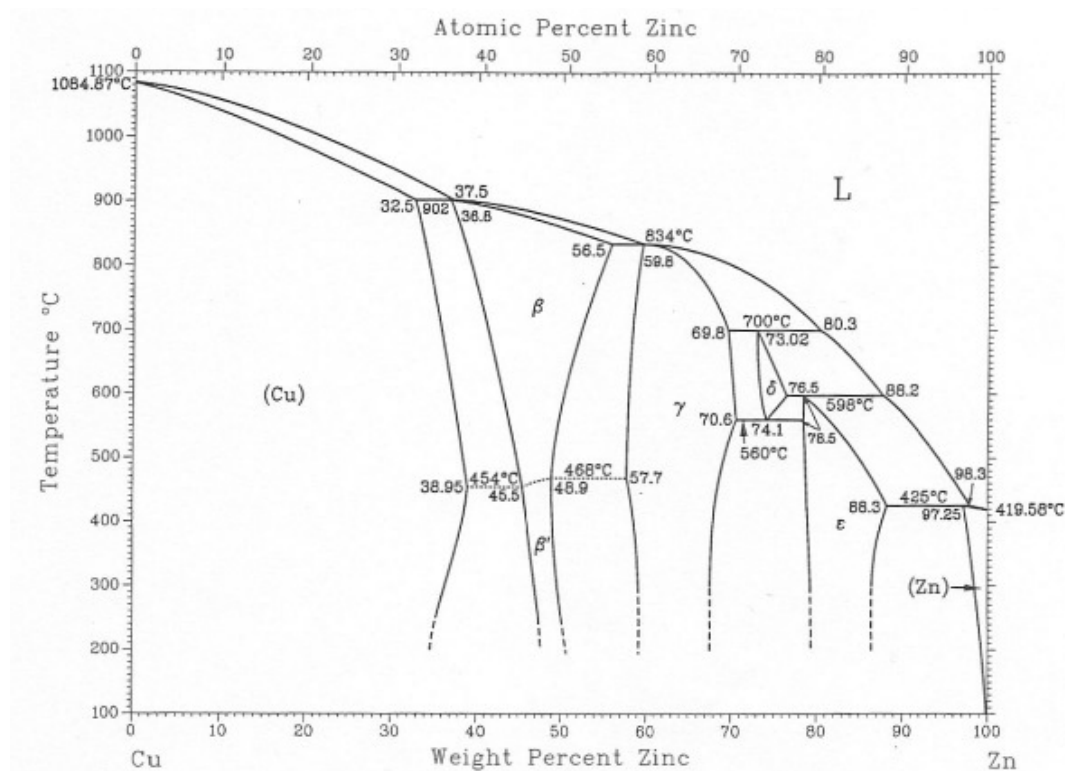


Abb. 5: Binäres Zustandsdiagramm des Systems Cu-Zn [4]

Blei wird oft zulegiert, um kurz brechende Späne zu erzeugen. Es verstärkt die spanbrechende Wirkung zweiphasiger Messinge indem es sich in Form von Ausscheidungen an den Korngrenzen ablagert und bei plastischer Deformation im Mikrobereich bei der Zerspannung zum Spanbruch führt. Kurzbrechende Späne sind insbesondere bei der Herstellung kleiner Teile auf Zerspanungsautomaten wichtig, um die Späne gut abführen zu können und die Beschädigung von Werkzeugen durch Wirrspäne zu verhindern.

Aus Umweltgesichtspunkten ist die Verwendung von Blei kritisch zu sehen und wird in neu entwickelten Werkstoffen z. B. in Ecobrass (CuZn21Si3) der Wieland-Werke substituiert. Hierbei bildet Silizium mit Kupfer die spröde κ -Phase, welche im Gegensatz zu Blei als harter Spanbrecher wirkt [5]. Das entsprechende Zustandsdiagramm für Kupfer-Silizium oberhalb 400°C ist in Abb. 6 dargestellt.

Bei der Interpretation binärer Zustandsdiagramme ist zu berücksichtigen, dass sie nur für das thermodynamische Gleichgewicht gelten. Zudem können weitere Legierungselemente zu Veränderungen der Stabilitätsbereiche der jeweiligen binären Phasen führen.

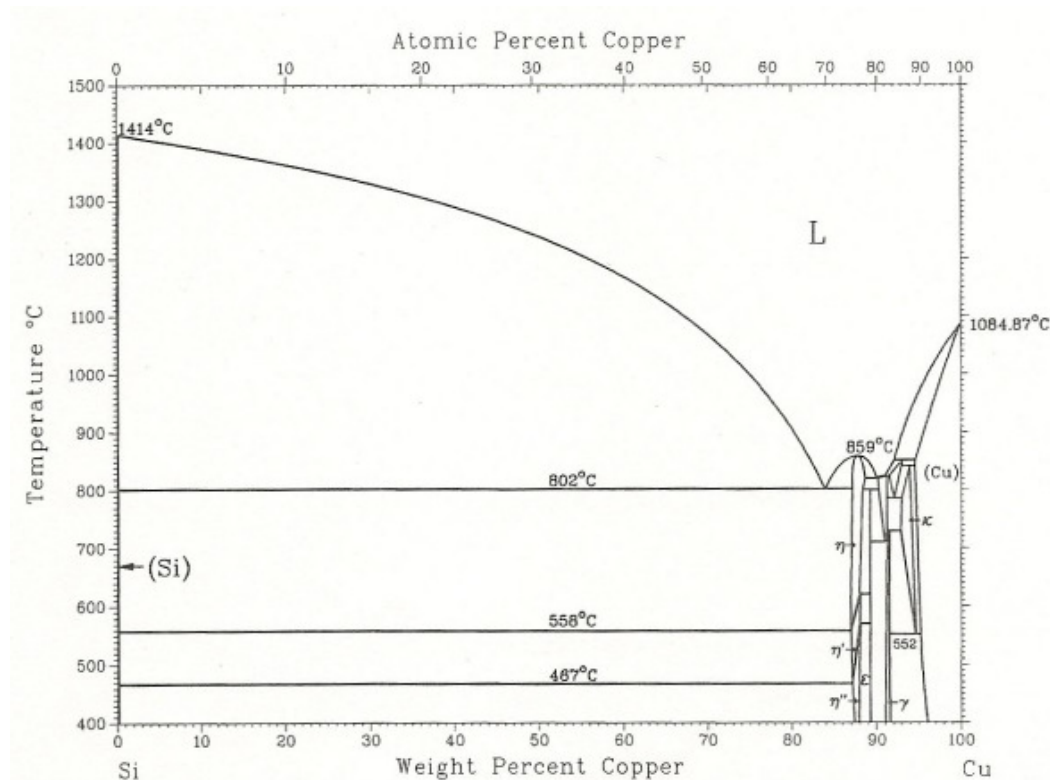


Abb. 6: Binäres Zustandsdiagramm des Systems Cu-Si [4]

Weder MS58 noch Ecobrass ist aufgrund der Mehrphasigkeit elektropolierbar. Bei MS58 wird aufgrund der sich passiv verhaltenden Bleipartikel nur das umgebende Messing abgetragen. Am Ende stehen die Bleieinlagerungen erhaben aus der Oberfläche hervor oder fallen heraus.

3 Herstellung der Bedampfungsmaske mittels Mikrobohren

Als Werkstück diente eine 100 µm dicke MS63-Folie. Auf einem massiven Messingsubstrat wurde mit einer Ultrafräse SP2600 von der Firma Leica Microsystems GmbH eine perfekt ebene Oberfläche erzeugt. Ein Klebefilm aus Wafermount 562 von der Firma Kager Industrieprodukte GmbH mit einer Dicke von 100 µm wurde zugeschnitten, um die ca. 100 mal 70 mm messende MS63-Folie aufzukleben. Dieser Aufbau wurde in einen Vakuumtrockenschrank gelegt und mit einer ebenen Auflage und ca. 2 kg beschwert. Nach Aufheizen auf ca. 100°C und einer Durchwärmzeit von einer Stunde wurde Vakuum angelegt, um Luft einschließen zuverlässig aus der Klebeschicht zu entfernen. Nach weiteren zwei Stunden wurde die Heizung ausgeschaltet, der Trockenschrank bei Erreichen von 50°C belüftet und das fertig gebondete Substrat entnommen. Mit dem Klebefilm definierter Dicke wurde eine sehr gleichmäßige Klebung erzeugt, da kein Kleber aus der Fuge verdrängt werden muss. Messungen mit einem Heidenhain-Taster zeigten eine Ebenheit innerhalb 5 µm.

Das Layout der Bedampfungsmaske zeigte eine sehr unregelmäßige Struktur. Insgesamt waren ca. 114.500 Löcher auf Lücke mit 50 µm Stegbreite auf einer Fläche von 63 mal 23 mm zu bohren. Abb. 7 zeigt das gesamte Design der Bedampfungsmaske im Durchlicht. Dunkle, nicht mit Mikrobohrungen versehene Bereiche entsprechen belichteten Bereichen, in denen der Photoresist herausgelöst wurde. Ein Detail der Bedampfungsmaske, auf dem die einzelnen Mikrobohrungen erkennbar werden, zeigt Abb. 8.

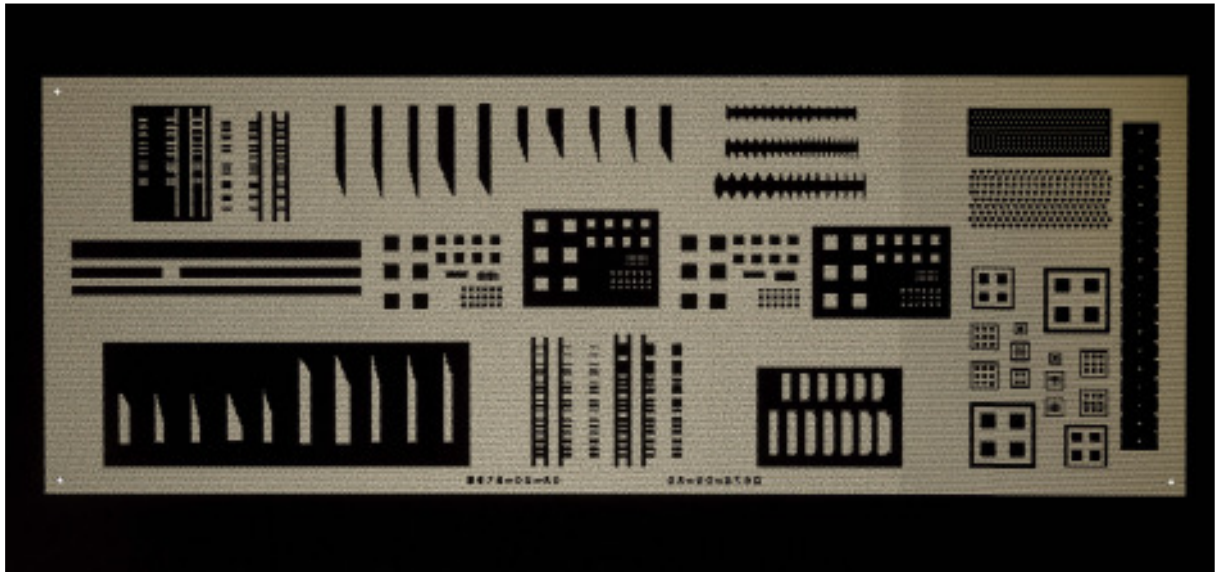


Abb. 7: Bedampfungsmaske mit gebohrten 50 µm-Löchern (Strukturfeld 63 x 23 mm)

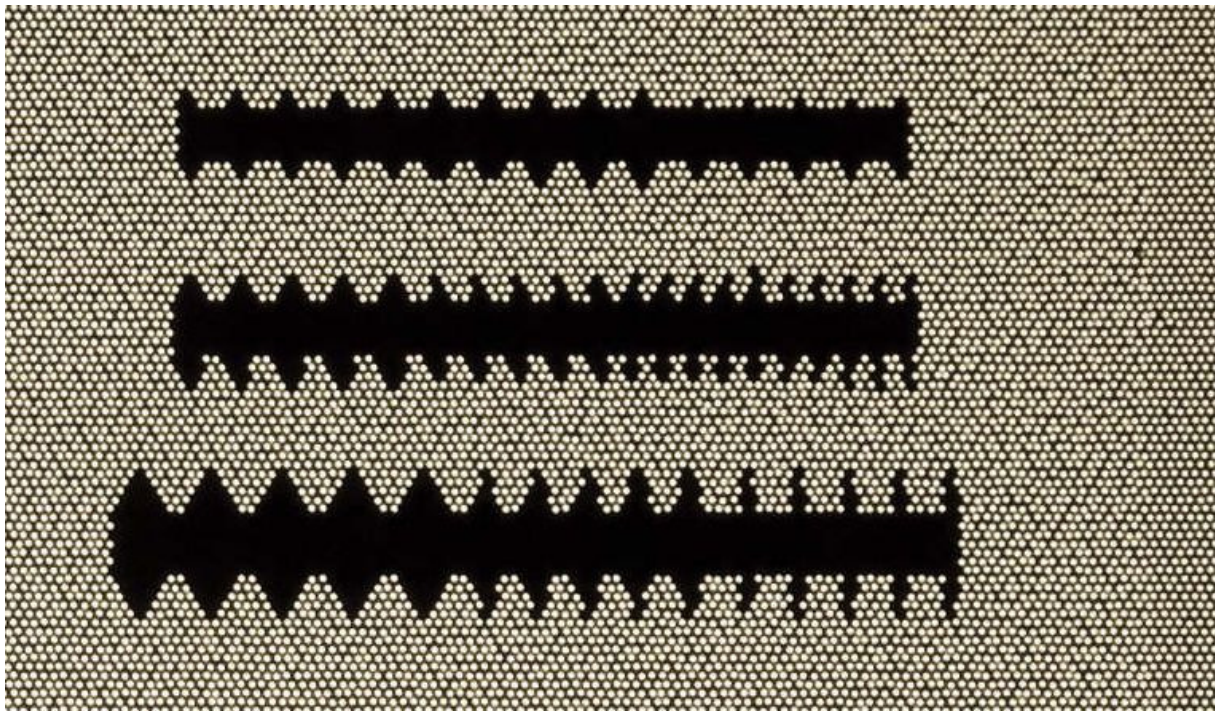


Abb. 8: Detailansicht eines Strukturelements auf der Bedampfungsmaske

Auch bei der Umsetzung von CAD-Daten in NC-Code treten für die Mikrotechnik typische Schwierigkeiten auf. So neigt der Postprozessor (Hypermill V 7.5 von Open Mind) zur Erstellung des NC-Programms aus den CAD-Daten bei sich vielfach wiederholenden Strukturen zur regellosen Abarbeitung. Neben unnötigen Verfahrensbewegungen ist dies auch aufgrund der thermischen Drift der Maschine über den langen Bearbeitungszeitraum und der notwendigen Werkzeugwechsel nicht tolerierbar. Es ist nur über zusätzliche Maßnahmen wie die Unterteilung des Designs in mehrere Felder möglich, die geordnete Abarbeitung der Vielzahl von Mikrobohrungen zu erzwingen.

Gefertigt wurde die Bedampfungsmaske auf einer Präzisionsfräsmaschine der Firma Kern Micro- und Feinwerktechnik, Typ HSC 2216.

Der Bohrungshub betrug 200 µm, wobei als Sicherheitsabstand zur Oberfläche des Werkstücks 50 µm gewählt wurden. Somit standen bei einer Foliendicke von 100 µm weitere 50 µm

Reserve für thermische Drift von Werkzeugmaschine und Spindel sowie zum Durchbrechen der Bohrerspitze zur Verfügung.

Abb. 9 zeigt rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen eines 50 μm -Mikrobohrers im Neuzustand. Die nutzbare Länge betrug 1 mm. Der Mikrobohrer bestand aus unbeschichtetem Vollhartmetall. Der eigentliche Verwendungszweck dieser Werkzeuge ist die Leiterplattenfertigung. In der Detailaufnahme der Schneidkante ist eine gewisse Schartigkeit erkennbar. Diese entsteht beim Schleifprozess, da der Verbundwerkstoff Hartmetall aus harten Schneidpartikeln, meist Wolframkarbid, welche in eine weiche Bindemetallphase, meist Kobalt, eingelagert sind, besteht. Bei immer kleineren Werkzeugdimensionen kommt der Entwicklung feinkörnigerer Hartmetallsorten große Bedeutung zu, um über den Querschnitt des Werkzeuges isotrope Werkstoffeigenschaften zu erzielen. Bei Ultrafeinstkornhartmetallen, die für Mikrofräswerkzeuge bereits eingesetzt werden, liegt die mittlere Partikelgröße des Wolframkarbids bei 0,2 μm [6].

Die nicht ideal scharfe Schneidkante unbeschichteter Hartmetallwerkzeuge sowie der Verschleiß führen bei der Bearbeitung duktiler Materialien zu Gratbildung.

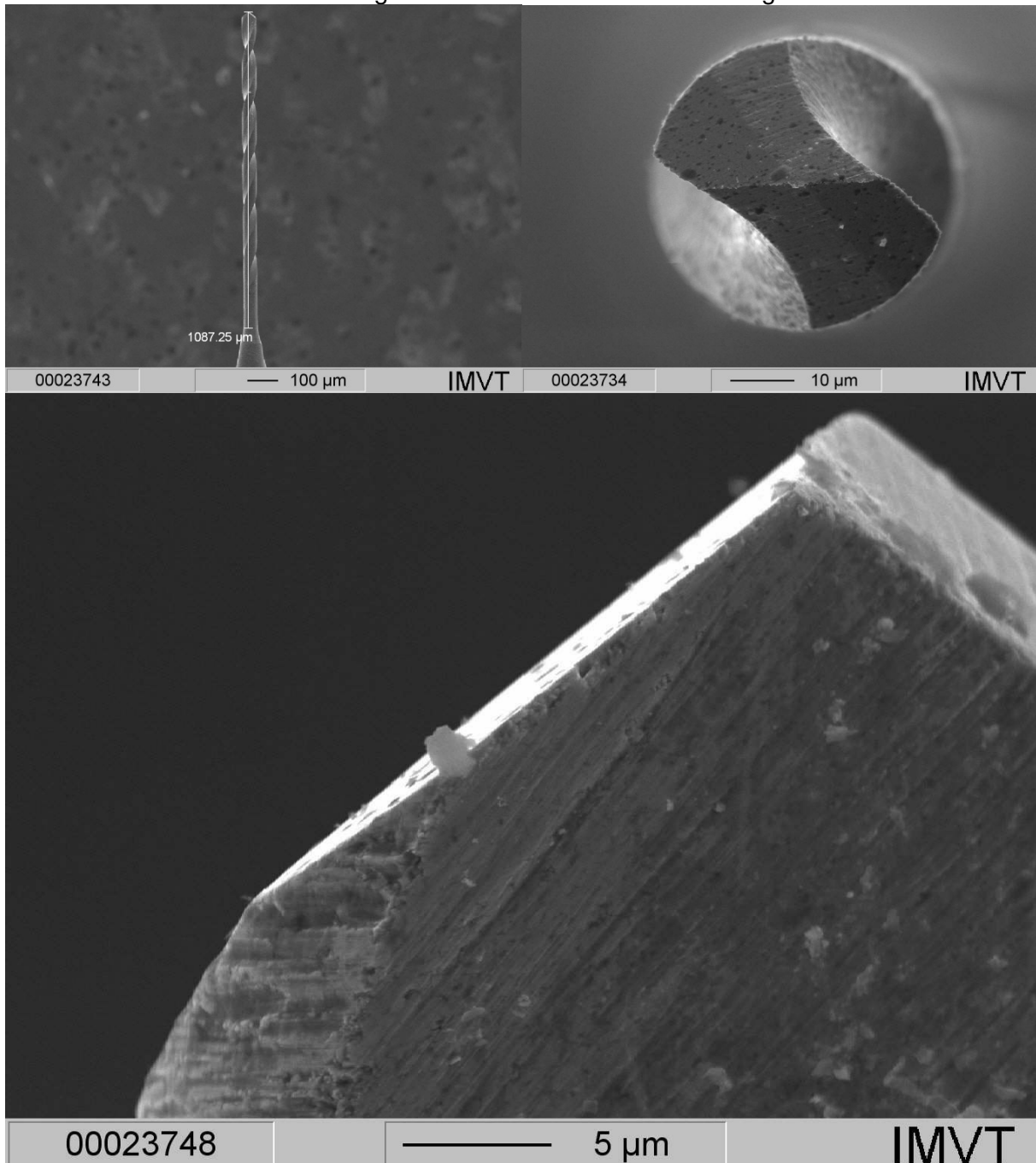


Abb. 9: 50 µm-Vollhartmetall-Mikrobohrer mit 1 mm nutzbarer Länge im Neuzustand. (In der Detailaufnahme der Schneidkante sind die Mikroscharten vom Fertigungsprozess gut erkennbar)

Die Mikrobohrer wurden in einer 1/8"-Spannzange gehalten. Mit einer Messuhr wurde der Rundlauf des Werkzeugs, der 2 µm nicht übersteigen sollte, am Schaft kontrolliert.

Beim Bohren wird das Werkzeug ausschließlich auf Torsion beansprucht, während bei Fräsbearbeitung zusätzlich Biegung bzw. seitliche Abdrängung des Werkzeugs auftritt. Zudem erfolgt beim Bohren eine kontinuierliche Spannbildung, während beim Fräsen das Werkzeug durch ständig neue Schneideneingriffe vibrierenden Belastungen ausgesetzt ist, die zur Bildung von Rattermarken am Werkstück führen können. Daher ist die Belastung und Stabilität von Bohrwerkzeugen wesentlich günstiger. Selbst mit sehr langen Mikrobohrern werden gute Werkzeugstandzeiten erreicht. In ungünstigen Fällen kann Ausknicken ein Problem sein.

Im Vorfeld wurden verschiedene Bearbeitungstests durchgeführt. Verschiedene Drehzahlen und Vorschubwerte sowie das Bohren der Tiefe von 200 µm in einem oder drei Zustellungen wurden getestet. Aufgrund der geringen Achsbeschleunigung der HSC 2216 von 2 m/s² führen mehrere Zustellungen pro Mikrobohrung zu einem erheblichen Anstieg der Bearbeitungszeit. Schließlich wurde die Bearbeitung mit einer Drehzahl von 15.000 min⁻¹ und einem Vorschub von 90 mm/min (3 µm Zustellung pro Schneide) in einer Zustellung ausgeführt. Es wurde im Schwall mit Wicos VA ST80.6 der Firma WILKE Kühlschmiertechnik GmbH geschmiert.

Für 1000 Mikrobohrungen wurde eine Bearbeitungszeit von ca. 15 Minuten ermittelt. Die Vorversuche zeigten zudem, dass ein Hochskalieren der Parameter z. B. auf 40.000 min⁻¹ bei entsprechend größerem Vorschub nicht erfolgreich war.

Nach Bohren von ungefähr einem Drittel der Mikrobohrungen wurde jeweils das Werkzeug gewechselt und die Bedampfungsmaske somit an drei Arbeitstagen gefertigt. Ein verschlissener 50 µm-Mikrobohrer ist in Abb. 10 gezeigt. Deutlich ist der abrasive Verschleiß der Schneidkante erkennbar.

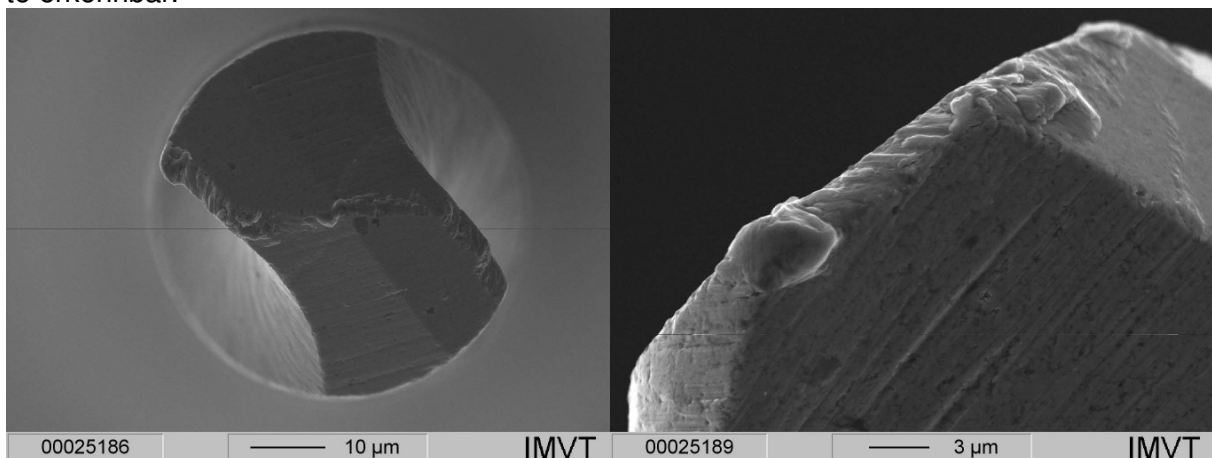


Abb. 10: Verschlissener 50 µm Vollhartmetall-Mikrobohrer mit Verschleißmarken

4 Bearbeitungsergebnis und Gratentfernung mittels Elektropolieren

Nach Ablösen der Bedampfungsmaske vom Substrat zeigte sich, dass die Lochränder mit starken Graten belegt waren (Abb. 11 und Abb. 12). Insbesondere an der Unterseite war die Gratbildung aufgrund des Durchtritts der Bohrspitze und des Werkzeugverschleißes extrem. Die deutlich schlechtere Zerspanbarkeit von MS63 im Vergleich zu MS58 ist für die starke Gratbildung verantwortlich [3].

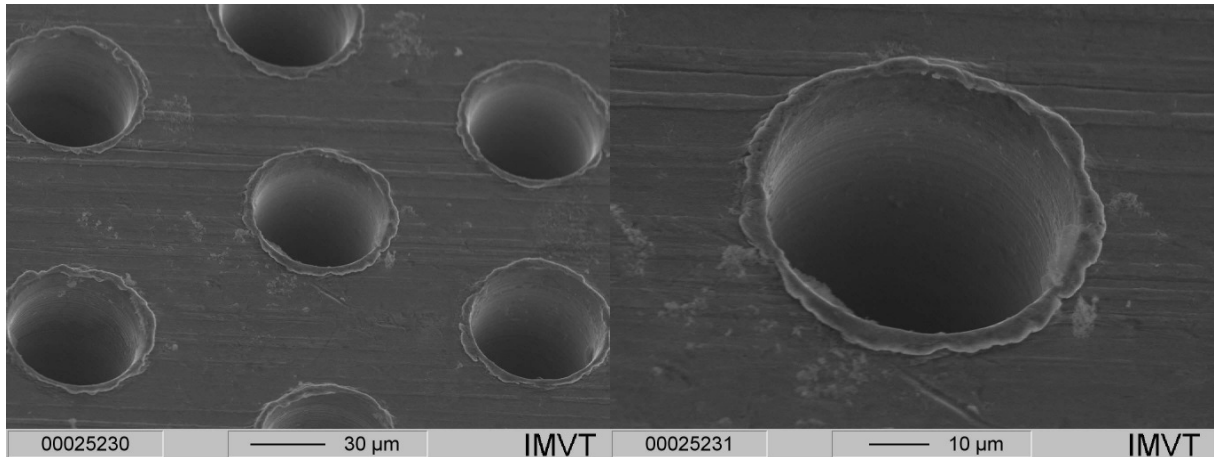


Abb. 11: Strukturelemente auf der Oberseite der Bedampfungsmaske mit Grataufwürfen durch plastische Verformung des Messings während des Mikrobohrens

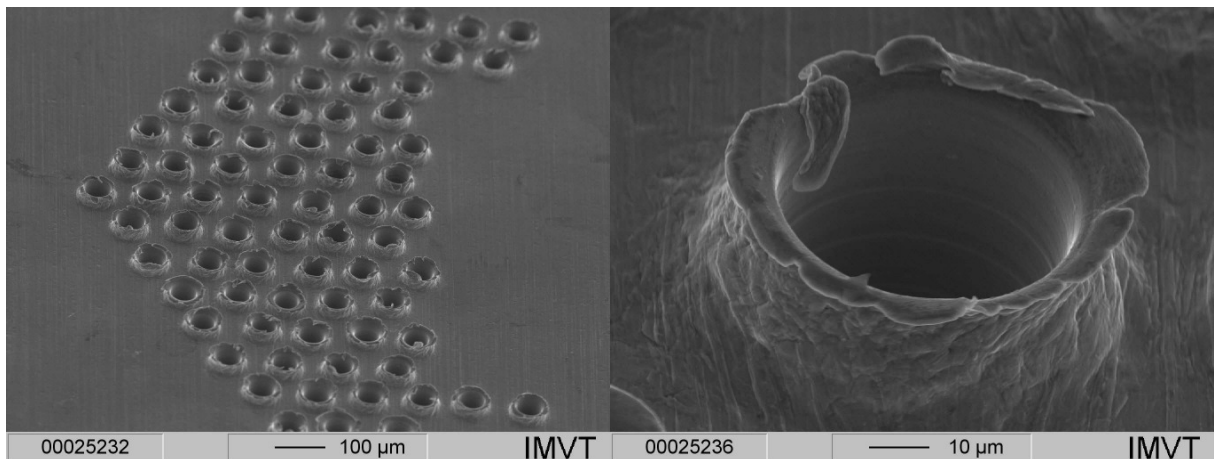


Abb. 12: Strukturelemente auf der Unterseite der Bedampfungsmaske mit massiven Graten durch plastische Verformung des Messings während des Mikrobohrens

In diesem Zustand wäre es nicht möglich, die Bedampfungsmaske zu verwenden ohne den Resist zu beschädigen oder Positionierprobleme zu haben. Deshalb wurden die Grate durch Elektropolieren entfernt, was bei MS 63 sehr gut möglich ist.

Es wurde ein kommerzielles Produkt, Polstar B1 von der Firma Enthone GmbH eingesetzt. Polstar B1 enthält Phosphorsäure und wird im Temperaturbereich von 20 bis 23°C verwendet [7]. Als Spannung sind 6 bis 10 V und als Stromstärke 5 bis 6 A/dm² zu wählen. Die Materialabtragsrate wird mit 1 bis 3 µm/min angegeben.

Die Bedampfungsmaske wurde am Rand mit einer Kontaktklemme kontaktiert. Da diese Klemmen meist beschichtet sind, sollte die Kontaktstelle nicht mit in die Lösung eingetaucht werden, um Lokalelementbildung zu vermeiden. Die Bedampfungsmaske wurde zu ca. 50 % eingetaucht und zur Vermeidung einer scharfen Trennlinie während des Elektropolierens die Eintauchtiefe geringfügig variiert. Die Spannung wurde auf 6 V eingestellt und der Prozess anfangs nach 2 Minuten, im Folgenden jede Minute unterbrochen, um das erreichte Ergebnis unter dem Lichtmikroskop zu inspizieren. Da der Materialabtrag entsprechend der Feldliniendichte erfolgt und diese an Graten am höchsten ist, muss der Prozess in ausreichend kurzen Zeitintervallen zur Inspektion unterbrochen werden, da nach der Gratentfernung die Verrundung der Kanten einsetzt. Aus dem gleichen Grund ist die Behandlung auch nur für gleichmäßig mit Grat belegte Strukturen zu empfehlen, da an Stellen ohne Grat sonst bereits Kantenverrundung einsetzt.

Nachdem die gesamte Fläche der Bedampfungsmaske elektropoliert worden war, wurde das Ergebnis abschließend im Rasterelektronenmikroskop untersucht. Abb. 13 und Abb. 14 zeigen, dass sogar auf der extrem gratbehafteten Unterseite der Bedampfungsmaske der Grat vollständig entfernt werden konnte ohne die Kanten der Bohrung unzulässig zu verrunden.

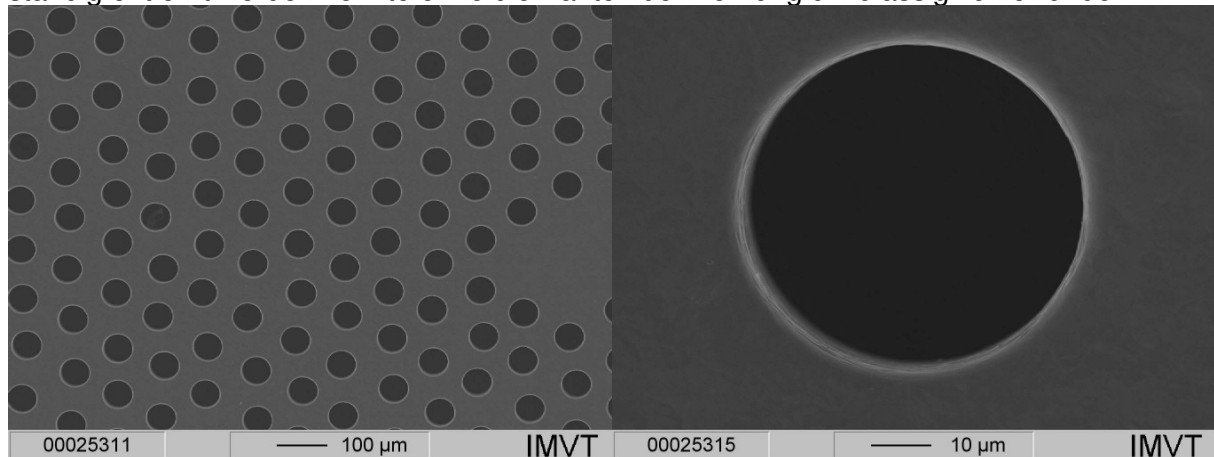


Abb. 13: Strukturelemente auf der Oberseite der Bedampfungsmaske nach der Gratentfernung durch Elektropolieren

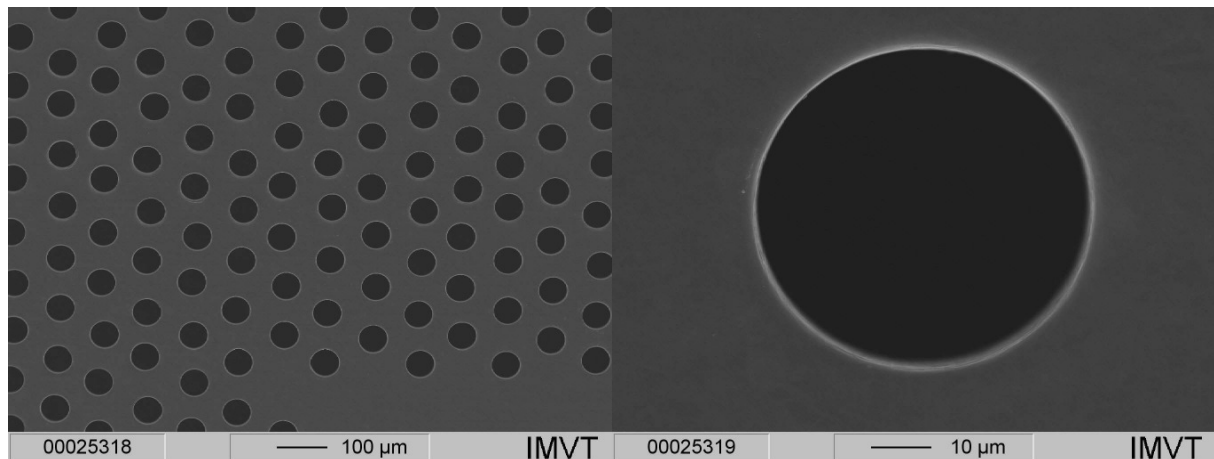


Abb. 14: Strukturelemente auf der Unterseite der Bedampfungsmaske nach der Gratentfernung durch Elektropolieren

5 Schlussfolgerungen

Durch die Herstellung einer Bedampfungsmaske mit über 100.000 Mikrobohrungen wurde die Zuverlässigkeit des Verfahrens Mikrobohren demonstriert. Wenn die Bearbeitungsparameter durch Tests optimiert werden, sind Werkzeugversagen durch Ausknicken oder Verschleiß auch über mehrere Stunden Bearbeitungszeit hinweg kein Problem.

Die thermische Drift von Maschine und Spindel konnten beherrscht werden, woran das sehr ebene Aufkleben der Messingfolie einen großen Anteil gehabt haben dürfte.

Mikrobohren ist eine sehr flexible Technik, die die Herstellung einer Maske vermeidet, wenn Designänderungen im Laufe des Prozesses der Bedampfung nicht von vornherein ausgeschlossen werden können.

Es wurde ferner gezeigt, dass die exzessive Gratbildung in dem duktilen Messing tolerierbar ist, da die Grate mittels Elektropolieren wirkungsvoll und vollständig entfernt werden können. Voraussetzung dafür ist jedoch eine gleichmäßige Gratbildung, da der Materialabtrag entsprechend der Feldliniendichte erfolgt.

6 Danksagung

Die Autoren danken besonders Herrn Dennis Scherhauser für seine hervorragende und sorgfältige Arbeitsweise. Ohne seine Hilfe wären weder das extrem ebene Aufkleben der Messingfolie noch die Optimierung der Bearbeitungsparameter möglich gewesen.

7 Literatur

-
- 1 M. Guttman; E. Walch, G. Schanz, J. Konys: „Mikrostrukturen herstellen. Galvanische und außenstromlose Abformung von verlorenen Kunststoffformen“, *Metalloberfläche*, 54(2000) Nr.11, pp. 16-28
 - 2 Flyer und Anfrage auf der Messe productronica München 9.-13.11.2009 bei Hartmetallwerkzeugfabrik Andreas Maier GmbH, 88477 Schwendi-Hörenhausen, Stegwiesen 2
 - 3 http://www.matthey.ch/fileadmin/user_upload/downloads/fichetechnique/DE/CuZn37.pdf
 - 4 T. B. Massalski (Ed.): „Binary Alloy Phase Diagrams“, 2. Auflage, Bd. 2, 1990, ASM International, ISBN 0-87170-405-6
 - 5 http://www.wieland.de/commonmedia/content/media/de/prospekte_2/pressundziehprodukte/ecobrass/Ecobrass_Technik_Nutzenprospekt.pdf
 - 6 http://www.hcstarck.de/medien/allgemein/downloads/filename_Folien_Hagen_HCSTARCK.pdf
 - 7 T. Gietzelt: „Einsatz des Elektropolierens in der Mikrosystemtechnik“, *Galvanotechnik*, vol. 99, No. 2, (2008), pp. 456-461
 - 8 S. Winter, S. Wilson, M. Guttman: „Partielle Resistmetallisierung für hohe Aspektverhältnisse“, *Mikroproduktion*, Heft 03 (2009) pp. 46-50