

# Tintendruck - allein zum Drucken viel zu schade.

Ein Drop-on-Demand-Metal-Jet-Druckkopf für das Wafer-Bumping

Wolfgang Wehl, Jörg Wild, Björn Lemmermeyer, Fachhochschule Heilbronn, Institut für Mechatronik Heilbronn

*Moderne Verfahren der Aufbau- und Verbindungstechnik wie TAB, CSP und Flip-Chip benötigen als elektrische und mechanische Verbindungselemente und als Abstandshalter Bumps. Diese Bumps werden in der Massenproduktion heute galvanisch oder durch Schablonendruck hergestellt. Beide Verfahren weisen viele Nachteile auf: Galvanik ist teuer und giftig; mit Schablonendruck lassen sich keine sehr kleinen Bumps drucken und beide Verfahren benötigen Masken. Zur Vermeidung dieser Nachteile entwickelt das Institut für Mechatronik Heilbronn einen Drop-on-Demand-Metal-Jet-Druckkopf für das Wafer-Bumping. Entwicklungspartner sind die EKRA GmbH in Bönnigheim und die First Sensor Technology GmbH in Berlin.*

*Herzstück des Druckkopfes, der ähnlich einem Tintendruckkopf arbeitet, ist ein Mikrosystem. Mit ihm lassen sich aufgeschmolzene Metalle und Legierungen bei Temperaturen bis 300 °C verspritzen. Der mikrotechnisch gefertigte Siliziumchip ist recht einfach aufgebaut. Angetrieben wird das System durch thermisch isolierte, piezoelektrische Aktoren. Mit dem ersten Prototypen des Druckkopfes lassen sich über drei Tausend Metalltröpfchen mit Durchmessern von 70 µm verspritzen. Die Tröpfchen erstarren bei Auftreffen auf dem Substrat sofort zu glatten, runden Bumps. Der Drop-on-Demand-Metal-Jet-Drucker eignet sich sowohl für das Rapid-Prototyping von Bumps als auch zur Massenproduktion.*

## Die Elektronikindustrie hat ein Fertigungsproblem

Es gibt sehr viele Gründe, die gegen das heute in der Aufbau- und Verbindungstechnik noch überwiegend eingesetzte Die- und Drahtbonden sprechen. Die wichtigsten sind:

- großer Platzbedarf, da sich Kontakte nur eindimensional anordnen lassen
- fast linear mit der Zahl der Kontakte wachsende Fertigungskosten
- sequentieller Fertigungsprozess
- schlechte HF-Eigenschaften

Die inzwischen vielfältig entwickelten simultanen Verbindungstechnologien wie u. a. das Flip-Chip-Verfahren (FC) benötigen allesamt als Verbindungselemente Bumps (Abb. 1), d. h. kleine, elektrisch leitfähige Materialdepots – in der Regel Lote –, über die später die elektrische und zum Teil mechanische und thermische Verbindung zwischen Chip und Bauelement hergestellt wird.

Die Industrie setzt heute in der Massenfertigung von Bumps zwei Verfahren ein: Zum einen die galvanische Abscheidung der Lote auf den Bond-Pads und zum anderen der Schablonendruck von Lotpaste.

## Tintendruck, die Technologie zum Dosieren kleinster (Flüssigkeits-) Mengen

Aufgrund der offensichtlichen Nachteile der beiden Bump-Herstellverfahren nach Tab. 1 liegt es nahe, nach besseren Lösungen zu suchen. Das vor gut 25 Jahren erstmals bei Siemens in Deutschland entwickelte Drop-on-Demand-Tintendruckverfahren bietet dazu genügend Ansatzpunkte. Auf Basis des damaligen Grundprinzips wurden in-

zwischen eine Vielzahl von Druckköpfen entwickelt, die heute in annähernd jedem mit PC ausgestatteten Büro oder Haushalt stehen.

Besonders interessant erscheinen dabei die Phase-Change-Drucker (auch Hot-Melt oder Solid-Ink genannt), die z. B. von Tektronix verkauft wurden. Bei diesen Druckern wird eingefärbtes Wachs auf rund 150 °C erhitzt und in flüssiger Form verspritzt. Das Wachs muss also auf dem Papier nicht eintrocknen sondern nur wieder erstarren. Daneben ist der besondere Vorteil dieses Verfahrens, dass es weitgehend unabhängig vom Druckmedium ist.

Auch wenn es viele Druckkopfvarianten gibt, so lassen sie sich alle in zwei Gruppen einteilen. Zum einen in Druckköpfe mit piezoelektrischen Aktoren (Abb. 2) und zum anderen in solche mit thermoelektrischen Aktoren (Abb. 3) [3]. Zum Verspritzen flüssiger und damit sehr heißer Metalle sind jedoch beide Druckköpfe in der vorliegenden Form ungeeignet. Vollkommen scheidet das thermoelektrische Wandlerprinzip aus, da hier das Fluid zum Tropfenausstoß verdampft werden müsste – undenkbar für metallische Lote!

Aber auch für piezoelektrisch betriebene Druckköpfe stellen die hohen Temperaturen flüssiger Lote zwischen 200 und 300 °C ein großes Problem dar: Leistungsfähige piezokeramische Materialien, die heute vorzugsweise auf Basis von Blei-Zirkonat-Titanat hergestellt werden, verlieren jenseits der Curie-Temperatur  $\delta_c$  von etwa 350 °C vollständig ihre piezoelektrischen Eigenschaften. Eine zufriedenstellende Langzeitstabilität lässt sich dabei nur gewährleisten, wenn die Betriebstemperatur bezogen auf die Celsius-Temperaturskala nicht mehr als 50% der



Prof. Dr.-Ing. W. Wehl



Prof. Dr.-Ing. J. Wild



Dipl.-Ing. (FH) B. Lemmermeyer

	Galvanische Abscheidung	Schablonendruck
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ausgezeichnete Miniaturisierbarkeit</li> <li>geringe Toleranzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>relativ preiswert</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>sehr hohe Investitionen bedingen meist Fertigung durch externen Dienstleister</li> <li>umweltschädliche Prozesse</li> <li>zeitaufwändige und teure Produktion</li> <li>Maske(n) erforderlich <math>\Rightarrow</math> für Rapid-Prototyping nicht geeignet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>kein hohes Miniaturisierungspotenzial</li> <li>größere Bumpgrößen-Toleranzen</li> <li>Reflow-Prozess erforderlich</li> <li>Schablone erforderlich <math>\Rightarrow</math> für Rapid-Prototyping nicht geeignet</li> </ul>

Tabelle 1 zeigt die Vor- und Nachteile dieser beiden Verfahren. Die jeweiligen Nachteile der beiden Verfahren sind derart gravierend, dass sie als Technologiebremse für die schnelle Verbreitung der sonst so vorteilhaften simultanen Verbindungstechniken angesehen werden müssen (1).

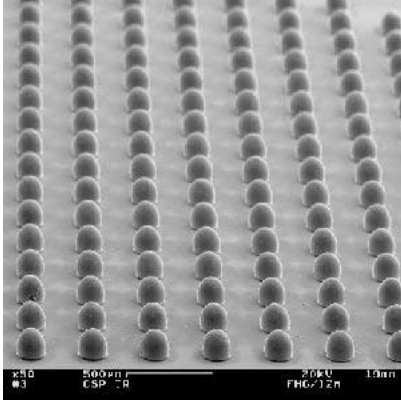


Abb. 1: Bumps (Quelle FhG-IZM)

Curie-Temperatur erreicht, also maximal etwa 175 °C.

Da sich bei allen bislang entwickelten piezoelektrischen Tintendruckköpfen der Aktor mehr oder weniger unmittelbar im Bereich des Fluids befindet, wären diese Prinzipien zum Verspritzen von flüssigen, heißen Metallen ungeeignet.

### Der Lotdruckkopf

Für uns war somit die Aufgabenstellung klar: Der zu entwickelnde Lotdruckkopf musste folgende Hauptei-

genschaften aufweisen:

- (hoch-) temperaturbeständiges, einfach zu fertigendes fluidführendes Mikrosystem mit geringsten Fertigungstoleranzen und hoher Wärmeleitfähigkeit
- piezoelektrischer Antrieb, der thermisch vom fluidführenden, heißen System entkoppelt ist, der jedoch seine mechanische Energie exzellent in dieses System einkoppeln kann
- geregelte Heizung des fluidführenden Systems
- Versorgungssystem für Lot
- Betrieb im bzw. mit Schutzgas
- automatische Reinigungs- und Parkstation

Zu entwickeln war weiter ein Verfahren zur sicheren Erstinbetriebnahme und zur regelmäßigen In- und Außerbetriebnahme im Drucker. Abb. 4 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau des am Institut für Mechatronik Heilbronn entwickelten Lotdruckkopfes. Er besteht aus drei Modulen, dem Fluidsystem, dem Antrieb und der Heizung.

### Das Mikrosystem, Herzstück des Lotdruckkopfes

Herzstück des Druckkopfes ist der von Lemmermeyer am Institut für Mechatronik Heilbronn entwickelte, fluid-

förmige und mikrotechnisch gefertigte Silizium-Chip mit zur Zeit zehn Düsen (Abb. 5). Gefertigt wird er von der First Sensor Technology GmbH in Berlin. Seine durch einen anisotropen Trockenätzprozess hergestellten Kavitäten sind einheitlich 50  $\mu$ m tief.

Abgedeckt werden die Kanäle, Drosseln und Düsen durch Pyrex®-Glas, das durch anodisches Bonden mit dem Silizium-Chip untrennbar und temperaturbeständig verbunden ist. Optional könnte das Pyrex®-Glas später für noch höhere Temperaturbeständigkeit durch einen zweiten Silizium-Wafer ersetzt werden.

Die strukturierten Wafer werden in einem weiteren Herstellschritt von der Rückseite auf 100  $\mu$ m abgedünnt, so dass unter den Druckkammern 50  $\mu$ m dicke Membranen (Abb. 6) entstehen. Die Düsen entstehen beim Aussägen der Chips aus dem Wafer mit einer einfachen Wafersäge. Die Lotzufuhr erfolgt durch ein Loch im Versorgungskanal auf der Rückseite des Chips. Hergestellt wird es mit einem Nd:YAG-Laser.

### Der thermisch entkoppelte, piezoelektrische Antrieb

Das Antriebsmodul des Lotdruckkopfes muss eine ganze Reihe sich teilweise widersprechender Forderungen erfüllen:

- möglichst direkte (steife) Einkopplung mechanischer Energie in die Druckkammer des Mikrosystems
- hohe Eigenfrequenz
- geringe Wärmeableitung aus dem lotführenden Mikrosystem und Überhitzungsschutz der piezoelektrischen Aktoren
- angepasste Wärmeausdehnungskoeffizienten und an der Schnittstelle zum Chip temperaturbeständig

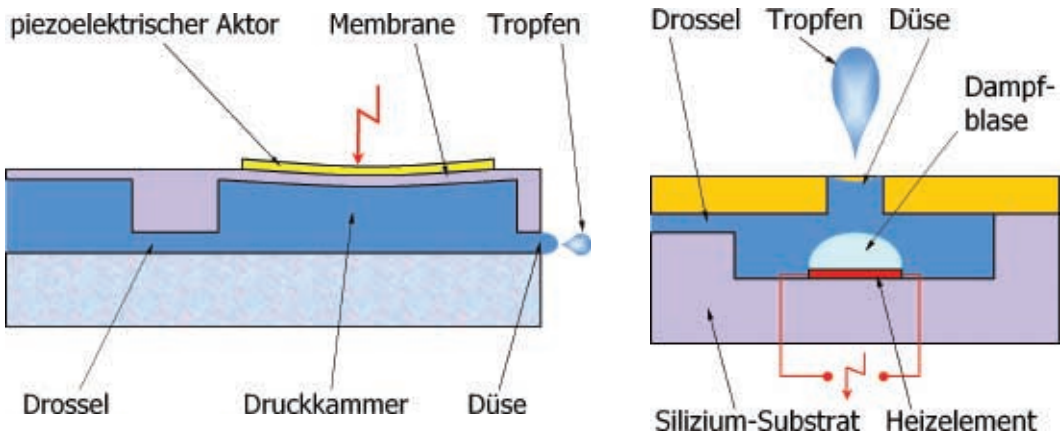


Abb. 2 und 3: Tintendruckprinzipien. Links: piezoelektrischer Aktor (Piezo-Jet), rechts: thermoelektrischer Aktor (Bubble-Jet)

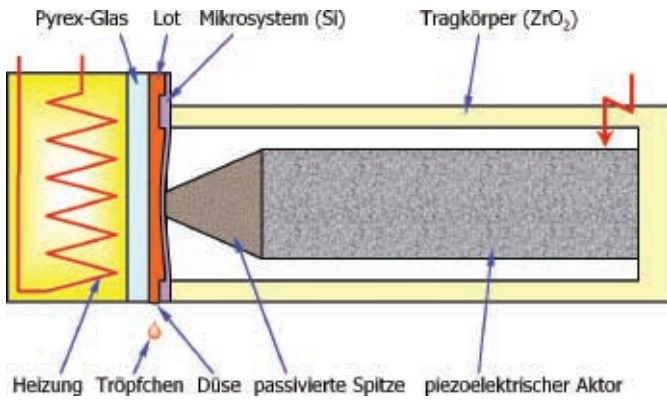


Abb. 4: Schema des Metal-Jet-Druckkopfes mit piezoelektrischen Lamellenaktoren

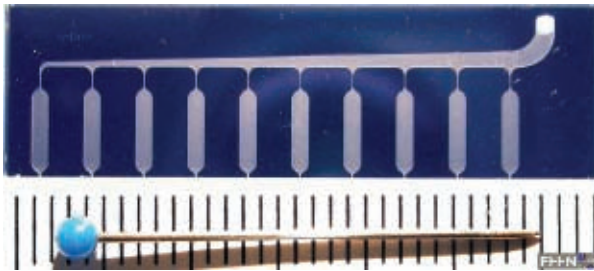


Abb. 5: Mikrotechnisch gefertigter Chip des Metal-Jet-Druckkopfes mit zehn Düsen

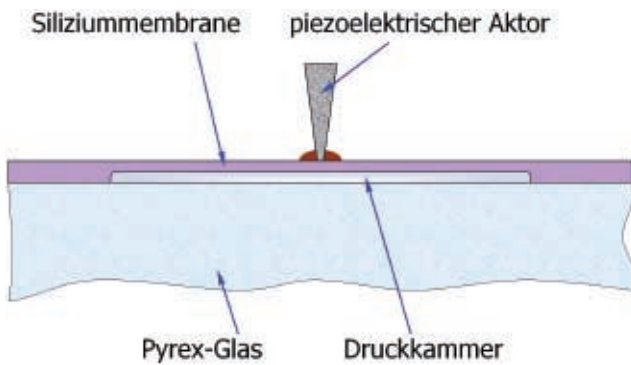


Abb. 6: Querschnitt durch das fluidführende Mikrosystem

Piezoelektrische Keramiken erfüllen diese Forderungen weitgehend. So sind sie steif und sehr schlecht wärmeleitend. Über einen zum Patent [4] angemeldete Anordnung gelingt auch die thermische Entkopplung: Genutzt wird der Quereffekt von lamellenförmigen Aktoren, wobei der vordere, dem Mikrosystem zugewandte Teil zum einen angespitzt und zum anderen elektrisch passiviert ist. In diesem Bereich schadet ihm keine Überschreitung der kritischen 175 °C.

Im Gegensatz zu Standarddruckköpfen nach Abb. 2 und 3 muss jedoch beim Lotdruckkopf der Kreis des Kraftflusses über ein Hilfsteil geschlossen werden. Dazu wurde am Institut ein

recht komplexer Trätkörper aus Zirkonoxid entwickelt (Abb. 7). Zirkonoxid weist ebenfalls eine relative geringe Wärmeleitfähigkeit auf.

Das Mikrosystem, die piezoelektrischen Aktoren und der Trätkörper werden zur Zeit durch temperaturbeständige Kleber verbunden. Mittelfristig erwarten wir indes Vorteile, wenn wir die temperaturbelasteten Verbindungsstellen mit einer Schweiß- oder Diffusionstechnik fügen.

### Heizung, Lottank und Gesamtaufbau

Geheizt wird das Mikrosystem des Lotdruckkopfes von der Pyrex-Glassseite

mit einer einfachen, temperaturgeregelten Widerstandsheizung in einer Rohrwendelpatrone. Auch der Lottank aus Edelstahl besitzt seine eigene Widerstandsheizung. Aus dem Lottank fließt das Lot über ein weiteres keramisches Bauelement um die Ecke in die Versorgungsöffnung des Mikrosystems (Abb. 5). Alle Teile des Druckkopfes (Abb. 8) sind direkt oder indirekt an einem später gerätefesten Halteteil befestigt. Die im Betrieb heißen Bauelemente wie z. B. das Mikrosystem, die Heizung und der Lottank werden durch einen speziell angefertigten schaumkeramischen Körper aus Trolit® optimal isoliert.

### Stand der Entwicklung

Ausgehend von Versuchsmustern wurde nach Förderung durch das BMBF im Rahmen des Programms „Forschung für die Produktion von morgen“ (Projekt JET) am Institut für Mechatronik Heilbronn seit Sommer 2000 mit Hochdruck an der Entwicklung des Lotdruckverfahrens gearbeitet. Eine besondere Herausforderung stellten weniger die verschiedenen Bauelemente selbst als vielmehr die sichere, temperaturbeständige und teilweise flüssigkeitsdichte Verbindung der Bauelemente dar.

Wir untersuchen das Spritzverhalten der Druckköpfe in einem speziellen Prüfstand (Abb. 9) unter stroboskopischer Beleuchtung. Der Prüfstand erlaubt dabei sowohl die Beobachtung der Tropfenbildung in der Düse als auch des Tropfenfluges (Abb. 10) bei verschiedenen Spritzfrequenzen.

Bei Betriebsspannungen von etwa 100 V ließen sich Lottropfen mit Parametern nach Tabelle 2 erzeugen. Je nach Betriebsart ließen sich bis zu 3000 Tropfen pro Sekunde auf Abruf ausstoßen. Diese Lottropfen erstarren



Abb. 7: Keramischer Trätkörper (a) mit eingeklebten piezoelektrischen Aktoren (b) und Mikrosystem (c) (Ansicht von unten)

auf dem Substrat vorwiegend zu relativ glatten, runden Bumps (Abb. 11 und 12), so dass der bei anderen Bumping-Verfahren obligatorische Reflow-Prozess hier eventuell entfallen könnte. Obwohl die Tropfen bis zu  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  schnell sind, zerplatzen sie beim Auftreffen auf das Substrat nicht - ihre kinetische Energie reicht nicht, um die zusätzliche Oberfläche zu bilden.

### Zusammenfassung und Ausblick

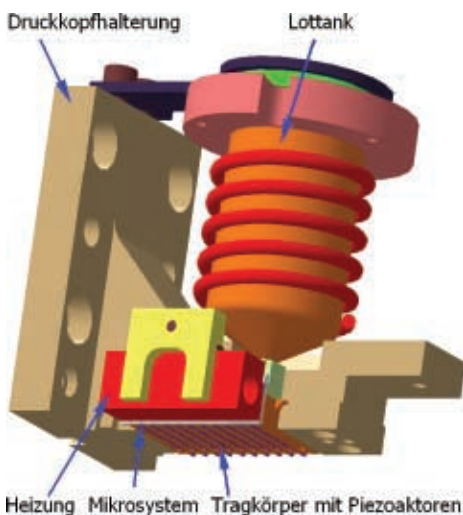
Das Institut für Mechatronik Heilbronn konnte nachweisen, dass sich Lote mit dem selbst entwickelten Lot-

druckkopf bei mindestens  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  ähnlich wie Tinten aus einem Tintendruckkopf verspritzen lassen. Die Lottropfen erstarren unmittelbar beim Auftreffen auf das Substrat und bilden glatte, runde Bumps.

Es ist zu hoffen, dass das Metal-Jet-Verfahren eines Tages den simultanen Chipverbindungstechnologien endgültig zum Durchbruch verhelfen wird. Zuvor muss aber noch intensiv an der Zuverlässigkeit des Druckkopfes gearbeitet werden. Um Entwicklungszeit zu gewinnen, streben wir zukünftig eine noch engere Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Feingerätebau und Mikro-

technik (Prof. Heinzl) an der Technischen Universität München an. An diesem Lehrstuhl werden seit Jahrzehnten erfolgreich Drop-on-Demand-Drucksysteme entwickelt und untersucht.

Das Metal-Jet-Verfahren wäre später jedoch keineswegs auf die Herstellung von Lotpumps beschränkt. In gleicher Weise könnte man durch einen Rapid-Prototyping-Drucker temperaturbeständige, präzise Bauelemente herstellen oder für 3D-MID-Bauelemente räumliche Metallisierungen erzeugen. Wir planen deshalb schon heute, den Druckkopf für Fluidtemperaturen von bis zu  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  weiterzuentwickeln.



	Tintentropfen	Lottropfen
Dichte $\rho$ in $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1000	8400
Oberflächenspannung $\sigma$ in $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	0,05	0,3
Durchmesser $d$ in $\mu\text{m}$	70	70
Masse $m$ in $\mu\text{g}$	0,18	1,5
Volumen $V$ in pl	180	180
Oberfläche $O$ in $10^{-9} \text{ m}^2$	15	15
Fluggeschwindigkeit $v$ in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	4	4

Tabelle 2: Kenngrößen von Tinte, Lot und deren Tropfen

Abb. 8: 3D-Zeichnung des Druckkopfes (ohne thermische Isolierung), konstruiert mit Catia V5

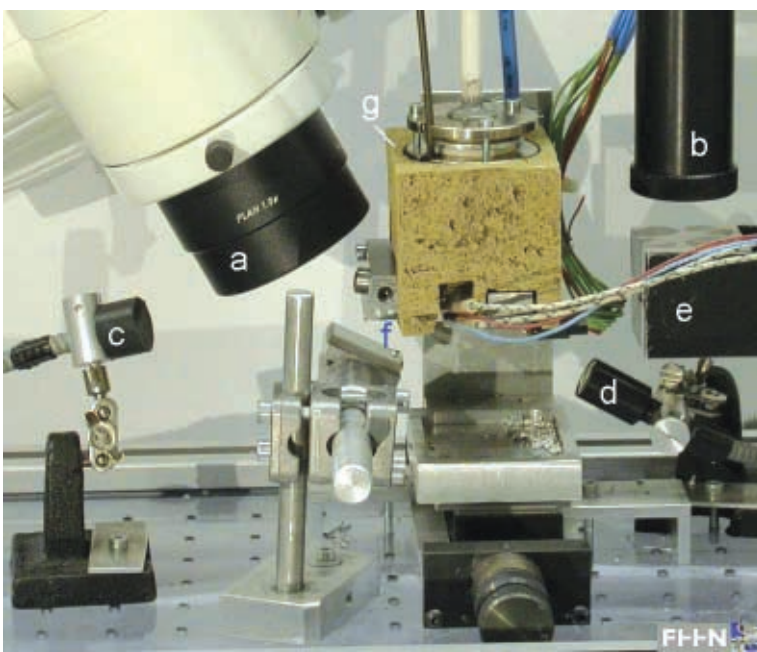


Abb. 9: Prüfstand für die komfortable Untersuchung von Drop-on-Demand-Drucksystemen. a+b: Beobachtungssystem 1+2; c+d: Stroboskopische Beleuchtung 1+2; e: Prisma; f: Spiegel; g: Metal-Jet-Druckkopf mit thermischer Isolierung

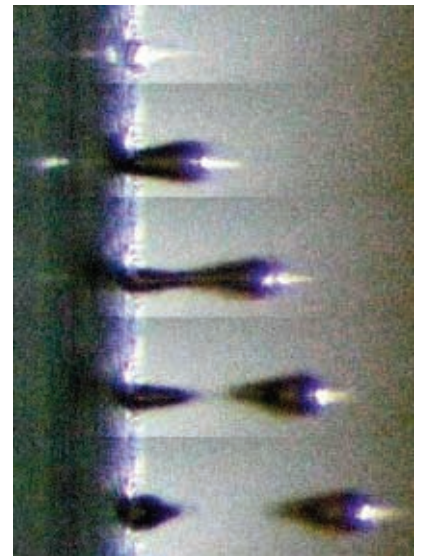


Abb. 10: Ausstoß von Lotropfen und erste Flugphase bei  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

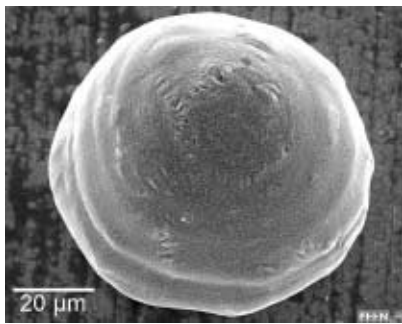


Abb. 11: Gedruckter Lotbump

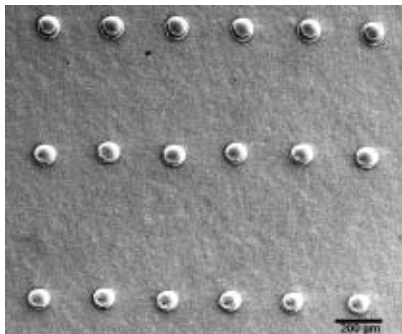


Abb. 12: Lotbumps auf Goldsubstrat

### Literatur

- [1] Reichl, H.: Direktmontage, Berlin; Heidelberg: Springer, 1998
- [2] Wehl, W.: Akustik und Fluidmechanik in Kanälen und Düsen von Tintenschreibwerken, Dissertation, 1984, Technische Universität München
- [3] Wehl, W.: Tintendrucktechnologie: Paradigma und Motor der Mikrosystemtechnik, F&M, 1995, 103 (1995) 6, p. 318 - 324 (Teil 1), 103 (1995) 9, S. 486 - 491 (Teil 2)
- [4] Wehl, W.; Wild, J.: Druckkopf zum Ausspritzen eines heißen flüssigen Mediums und Verfahren zur Herstellung einer metallischen Lot umfassenden Verbindungsstelle, Patentanmeldung DE 199 31 110 A1, 1999

### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wehl, Fachhochschule Heilbronn, Institut für Mechatronik Heilbronn, Max-Planck-Str. 39, 74081 Heilbronn, Tel.: 07131/504-325, e-mail: wehl@fh-heilbronn.de, URL: [www.mm.fh-heilbronn.de/imh.htm](http://www.mm.fh-heilbronn.de/imh.htm)

### Nachwort

Das Metal-Jet-Projekt des Instituts für Mechatronik Heilbronn wurde der Öffentlichkeit erstmals auf der 14<sup>th</sup> European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition (EMPC) im Juni 2003 vorgestellt und erhielt dafür den „Best Paper Award“.

Das Institut für Mechatronik Heilbronn ist Mitglied im Institut für Angewandte Forschung (IAF) der FH Heilbronn.