

3D Rapid-Prototyping durch Drucken von flüssigem Metall unter Verwendung der StarJet Technologie

3D Rapid prototyping by direct printing of liquid metal using the StarJet technology

N. Lass¹, A. Tropmann¹, L. Riegger^{1,2}, R. Zengerle¹, P. Koltay^{1,2}

¹Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik, Lehrstuhl für Anwendungsentwicklung

²BioFluidix GmbH, Georges Köhler Allee 106, 79110 Freiburg Germany

Zusammenfassung

In dieser Arbeit präsentieren wir einen neuen Ansatz für das direkte 3D-Prototyping von Metallstrukturen basierend auf der StarJet Technologie [1]. Im Gegensatz zu dem früheren Funktionsmuster (V0) verfügt die neue Version des StarJets (V1) über hitzebeständigere Komponenten, die es erlauben den Dispenser bei **Temperaturen bis $T_{max} = 500^{\circ}\text{C}$** zu betreiben (früher $T_{max} = 250^{\circ}\text{C}$). Dies ermöglicht das **Dispensieren einzelner Tropfen aus Metall wie z.B. ZAMAK** (Schmelztemperatur $T_{melt} = 420^{\circ}\text{C}$). Gleichzeitig wurde das Design und der Herstellungsprozess der sternförmigen Düsenchips optimiert. **Die maximale Dosierfrequenz konnte somit um einen Faktor 10 auf $f_{max} = 4 \text{ kHz}$ erhöht werden.** Darüber wurde die Abweichung der Tropfenflugbahn von der Symmetrieachse des Düsenchips auf unter $\Delta = 0,28^{\circ}$ minimiert. In diesem Artikel berichten wir über die experimentellen Ergebnisse und präsentieren verschiedene 3D Metallstrukturen welche erfolgreich gedruckt wurden.

Abstract

We present a novel approach for 3D-prototyping of porous metal structures by direct non-contact liquid metal printing, based on the StarJet technology [1]. In contrast to our previous work, the presented droplet generator features an improved nozzle chip design and actuator housing that allows operation at temperatures up to $T_{max} = 500^{\circ}\text{C}$ (formerly $T_{max} = 250^{\circ}\text{C}$). This enables the ejection of single droplets of metals with higher melting points like for example magnesium or zinc alloys like ZAMAK. The droplet generation frequency could be increased by a factor of 10 to $f_{max} = 4 \text{ kHz}$. Furthermore, deviations of the droplet trajectory from the symmetry axis of the nozzle are reduced to $\Delta = 0.28^{\circ}$ by the new design. This paper reports on experimental results obtained with the improved device and presents 3D metal structures with various porosities.

1 Einleitung

Für das Rapid-Prototyping von Metallstrukturen gibt es eine Vielzahl etablierter Verfahren. Für viele Anwendungen wäre es aber von Vorteil, 3D-Metallstrukturen durch direktes Drucken von flüssigem Metall realisieren zu können. Neben der Prototypenherstellung [2] können derartige Verfahren auch zur Erzeugung von Solderbumps für das Flip-Chip-Bonden [3], oder zum Drucken elektrischer Schaltkreise [4] verwendet werden. Beim Drucken von flüssigem Metall gibt es allerdings eine Reihe von Herausforderungen, die zu überwinden sind. Der wichtigste Punkt dabei ist, dass die zur Herstellung des Aktuators verwendeten Materialien bei Erreichen der Betriebstemperatur nicht degradieren oder sich verformen. Folglich müssen nicht temperaturstabile Teile thermisch vom System isoliert werden. Speziell wenn Piezoaktoren zur Tropfengenerierung verwendet werden, müssen diese thermisch entkoppelt oder gekühlt werden [3]. Ausschlaggebend dabei ist die Curie-Temperatur, welche typischerweise im Bereich zwischen 150°C und 300°C liegt [5], bei deren Überschreiten diese Materialien ihre Funktionalität verlieren. Des Weiteren müssen bei der Kon-

struktion einige Designregeln bedacht werden, da es durch die Temperaturwechsel während des Betriebs zu mechanischen Spannungen im System kommen kann. Daraus können Undichtigkeiten und somit ein verändertes Dosierverhalten des Systems resultieren. Während des Betriebs sind darüber hinaus die geschmolzenen Metalle im Reservoir vor Korrosion zu schützen. Eine Möglichkeit hierfür ist Schutzgas durch den Aktuator zu leiten, wodurch der Sauerstoff verdrängt und somit eine Korrosion unterbunden wird. Der in dieser Arbeit vorgestellte StarJet V1, wird pneumatisch angetrieben. Dabei wird der Gasfluss sowohl zur Tropfenerzeugung verwendet als auch zur Inhibierung der Oxidation des flüssigen Metalls. Der gesamte Aktuator besteht aus einem Gehäuse aus Bronze sowie einem Siliziumchip mit sternförmiger Düsenöffnung. Die maximale Betriebstemperatur ist im Prinzip nur durch den Schmelzpunkt des Gehäusematerials limitiert. Durch den digitalen Betriebsmodus ist es möglich, die Porosität der gedruckten Strukturen einzustellen. Eine Anwendung für eine derartige poröse Struktur wäre die Fabrikation von Masterformen die z.B. für das Thermoforming bzw. Kaltabformen von Lab-on-Foil Systemen benötigt werden [6]. Diese hätten den Vorteil,

dass sie ein Entgasen während des Abformprozesses gewährleisten würden. Ziel dieser Arbeit ist es, derartige Masterstrukturen im Rapid-Prototyping-Verfahren herzustellen.

2 Fabrikation

Die Tropfenerzeugung beim StarJet Verfahren beruht auf dem Einsatz einer sternförmigen Düse (**Abbildung 1**). Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens wurde in früheren Arbeiten veröffentlicht [1].

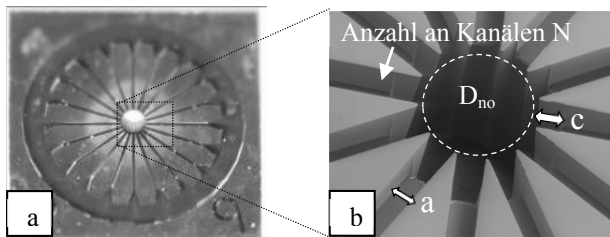


Abbildung 1: a) Photo des StarJet Düsenchips b) Erläuterung der Parameter

Die Herstellung dieser Düsen erfolgt mittels reaktivem Ionenätzen der sternförmigen Struktur in einen Siliziumwafer (Dicke $t = 380 \mu m$). Der neuentwickelte zweiseitige Prozess P2 (siehe Abb.2) ermöglicht eine genaue Kontrolle der Ätztiefe und verhindert ein Überätzen der Strukturen. Die einzelnen Herstellungsschritte sind in **Abb. 2** dargestellt. 1) Auf die Oberseite des Wafers wird eine $5 \mu m$ dicke Photoresistschicht (AZ4533) aufgebracht und lithografisch mit der Geometrie der Bypass-Kanäle strukturiert. 2) Die Kanäle werden mittels DRIE (Deep Reactive Ion Etching) $100 \mu m$ tief in den Wafer geätzt. 3) Der Wafer wird gereinigt und die Unterseite mit einer $10 \mu m$ dicken Resistschicht (AZ9260) versehen, in die lithografisch die Düsengeometrien übertragen werden. 4) Die Düsenstrukturen werden mittels DRIE durch den Wafer hindurch geätzt und die Chips durch Sägen vereinzelt.

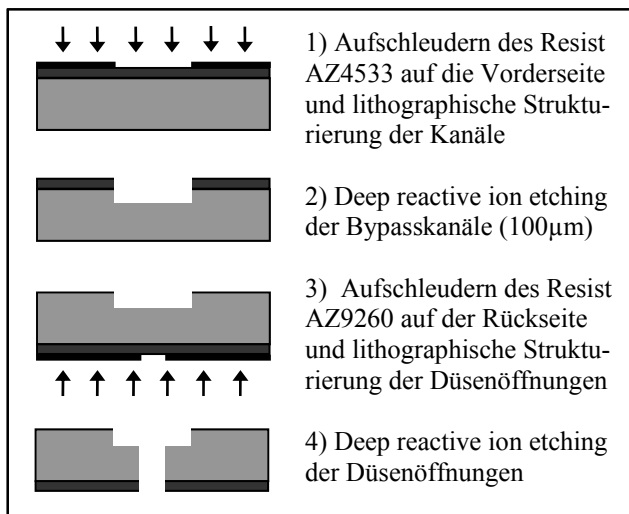


Abbildung 2: Herstellungsprozess der StarJet Düsen

Durch diesen zweiseitigen Prozess können die Ätzeiten viel genauer eingehalten werden, wodurch die Oberflächenrauigkeit reduziert und die Formtreue der Strukturen deutlich verbessert werden (**siehe Abb. 3 a**) und **b**) im Vergleich zu c) und d)).

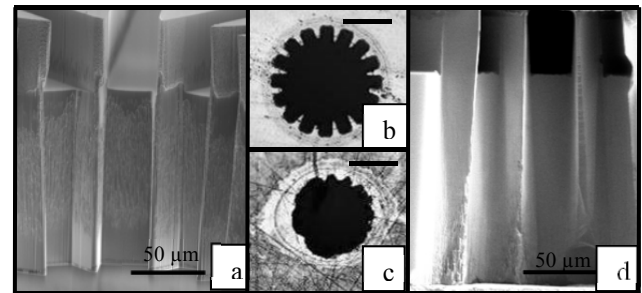


Abbildung 3: Querschnitt (a) und Unteransicht (b) der neuen StarJet Düsen P2 im Vergleich zur Unteransicht (c) und Querschnitt (d) von P0[1]; Maßstab(b und c): $100 \mu m$

Entwickelt wurden 34 unterschiedliche Chipdesigns die durch die Parameter a , c , d_{in} und N , wie in Abbildung 1b) dargestellt, definiert sind. Die Parameter der verwendeten Chips können **Tabelle 1** entnommen werden.

Tabelle 1: Parameter der verwendeten StarJet Düsen

	#06	#12	#22
N	12	12	16
a [μm]	20	40	20
c [μm]	40	60	60
d [μm]	89	183	144

3 Experimentaler Aufbau

Der weiterentwickelte StarJet V1 (siehe **Abbildung 4**) ist aus Bronze gefertigt und hat einen maximalen Durchmesser von 17 mm bei einer Höhe von 64 mm .

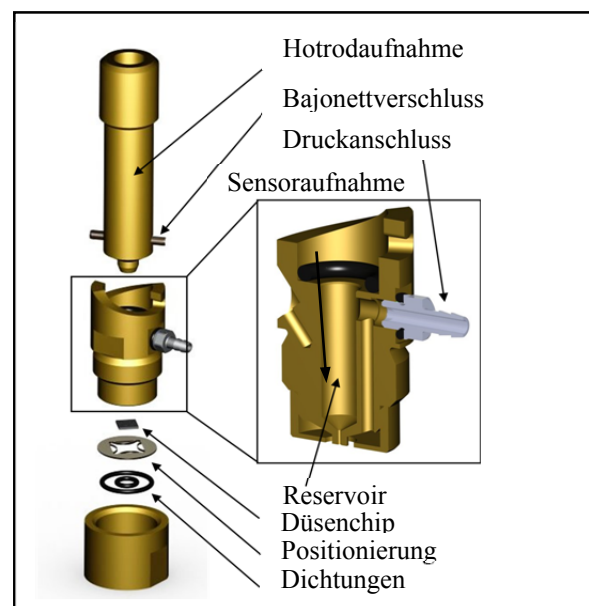


Abbildung 4: StarJet V1 Prototyp

Die Düsenchips werden mechanisch unter dem beheizten Reservoir fixiert und mittels einer lasergeschnittenen Positionierung zentriert. Eine dünne Bohrung verbindet die Chips mit dem Reservoir. Über einen Stickstoffanschluss (siehe Abbildung 4) kann das Reservoir und der Chip mit Druck beaufschlagt werden wodurch Mikrotropfen flüssigen Metalls generiert werden. Gleichzeitig verhindert das durch die Bypasskanäle strömende Gas eine Oxidation des Metalls. Ein externes Magnetventil regelt den Stickstofffluss für die pneumatischen Aktuierung, indem es zwischen einem niederen Spüldruck (20 hPa bis 50 hPa) und einem höheren Aktuierungsdruck (150 hPa bis 1000 hPa) zur Tropfenerzeugung umschaltet. Über dem Reservoir befindet sich die Aufnahme für die Heizpatrone (HotRod, Hotset, 100 W). Die gesamte Heizeinheit kann, zum Befüllen des Reservoirs, durch einen Bajonettverschluss schnell vom Rest des Druckkopfes getrennt werden. Die Temperatur, welche am Reservoirausgang anliegt, wird mittels eines NiCr-Ni Thermoelements erfasst und an die Regeleinheit übergeben. Die Regeleinheit basiert auf einer selbstentwickelten Steuerelektronik die mittels USB mit einem PC verbunden ist und sowohl die Temperatur als auch die Ventilsteuerzeiten regelt. Für die 3D Druckversuche die in dieser Arbeit vorgestellt werden, wurde der Druckkopf über einem sich drehenden Substrat platziert. Der Abstand zwischen Düsenausgang und Substrat betrug dabei konstant $h = 20\text{ mm}$. Folglich wurde der Abstand zur Oberfläche der gedruckten Strukturen mit wachsenden Strukturgrößen zunehmend geringer.

4 Experimente und Ergebnisse

Der StarJet verfügt über zwei Betriebsmodi, den DropOnDemand-Modus und den Continuous-Modus (siehe [1]). Im DropOnDemand-Modus wurden einzelne, monodisperse Metalltropfen erzeugt. Dabei kann die Frequenz zwischen $f_{min} = 0,5\text{ Hz}$ und $f_{max} = 50\text{ Hz}$ eingestellt werden, indem der Antriebsdruck getaktet wird. Der selbstregelnde Continuous-Modus erlaubt Frequenzen zwischen $f_{min} = 5\text{ Hz}$ und $f_{max} = 4\text{ kHz}$. Dabei hängt die Frequenz des Systems vom Aktuierungsdruck und der Düsengeometrie (Abb.4) ab. Für die in dieser Arbeit vorgestellten Strukturen wurde der Continuous-Modus verwendet. Der Tropfendurchmesser wird dabei in wesentlichen nur vom Düsendurchmesser beeinflusst. Die bisher produzierten Chips haben Düsenöffnungen im Bereich von $50\text{ }\mu\text{m}$ bis $306\text{ }\mu\text{m}$ woraus Tropfengrößen zwischen $d_{drop} = 48\text{ }\mu\text{m}$ und $360\text{ }\mu\text{m}$ resultieren. Bislang wurden mit dem StarJet Druckkopf erfolgreich Metalle mit Schmelzpunkten zwischen $T_m = 210^\circ\text{C}$ (Sn95Ag4Cu1) und $T_m = 420^\circ\text{C}$ (ZAMAK, Zn96Al4) dispensiert. **Abbildung 5** zeigt die Abhängigkeit der Tropfengenerierungsfrequenz und des Tropfendurchmessers vom Aktuierungsdruck bezogen auf Chip #12. Mit diesem Chip können durch Erhöhen des Drucks in 0,05 bar Schritten, Tropfen mit Frequenzen zwischen 100 Hz und 690 Hz erzeugt werden. Übersteigt der Aktuierungsdruck einen Wert von 0,27 bar wird das Metall unkontrolliert aus der

Düse gedrückt. Drücke von weniger als 0,15 bar reichen dagegen nicht für einen Tropfenausstoß aus.

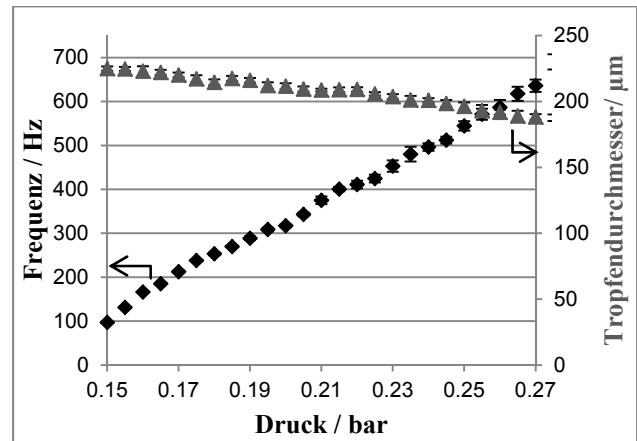


Abbildung 5: Frequenzverlauf und Tropfendurchmesser in Abhängigkeit des Aktuierungsdruck (gemessen mit Chip #12)

Der Druckbereich in dem ein Düsenchip benutzt werden kann, variiert dabei in Korrelation mit der Düsengeometrie. In früheren Arbeiten [7] schien der Tropfendurchmesser nahezu unabhängig vom Aktuierungsdruck (in Bereichen zwischen 0,12 und 0,22 bar) und wurde hauptsächlich vom Düsendurchmesser bestimmt. Mit dem neuen Setup konnte eine 20 % Änderung des Tropfendurchmessers nachgewiesen werden. Dabei verringerte sich der Tropfendurchmesser mit zunehmendem Aktuierungsdruck. Diese Änderung hängt voraussichtlich mit den stark gestiegenen Frequenzen (700 Hz vs. 140 Hz) zusammen. Die hohe directionale Genauigkeit, (Strahlabweichung $\Delta < 0,28^\circ$) ermöglicht es, Dreidimensionale Strukturen zu drucken (sogar bei einem konstanten Abstand zwischen StarJet und Substrat von bis zu 20 mm). Mit Düsenchip #6, der Tropfen mit $d_{drop} = 120\text{ }\mu\text{m}$ erzeugt, wurden einzelne Tropfen auf ein sich drehendes Substrat gedruckt. Dabei entstanden poröse, röhrenartige Strukturen (**Abb. 6**). Als Druckmedium diente Sn95Ag4Cu1, das bei $T = 230^\circ\text{C}$ dispensiert wurde, woraus 300 µm dicke Wände resultierten. Durch eine Anpassung der Druckfrequenz an die Rotationsgeschwindigkeit des Substrates konnten homogene Strukturen mit verschiedenen Durchmessern ($d_{struct} = 5,5\text{ mm bis } 22\text{ mm}$) gedruckt werden.

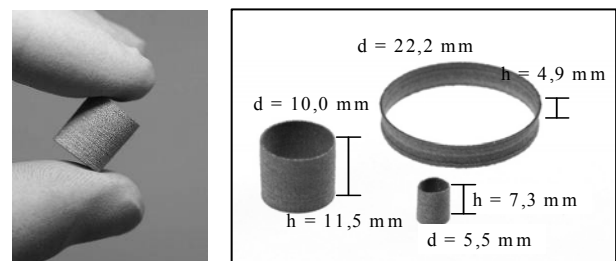


Abbildung 6: Gedruckte röhrenartige Strukturen

Die Strukturen in Abbildung 6 wurden bei Raumtemperatur in Sauerstoffatmosphäre hergestellt und es wurden keine Nachbearbeitungen, wie Reflow Prozesse oder ähnliches, vorgenommen. Die Tropfen halten fest genug zusammen um relativ stabile, dünnwandige Strukturen zu erzeugen. Die Porosität der Strukturen ist auf der REM Aufnahme in **Abbildung 7** deutlich zu erkennen.

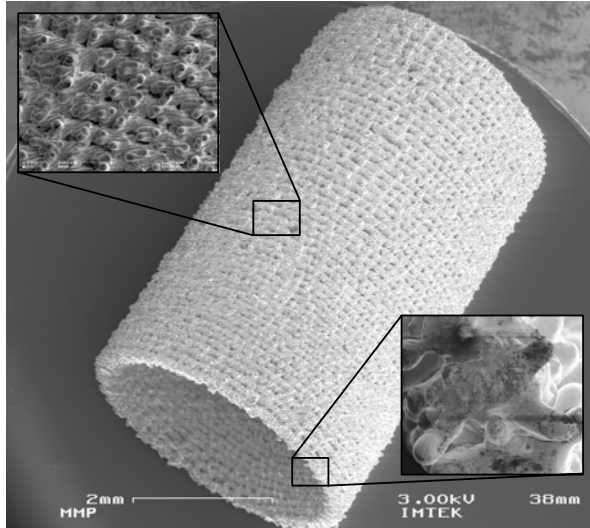


Abbildung 7: REM Bild einer gedruckten Struktur mit 315 µm Wandstärke.

Die vergrößerte Ansicht zeigt, dass die Tropfen beim Auftreffen auf die Oberfläche ihre runde Form verloren haben und erstarren während sie am Zerplatzen waren. Daraus resultieren die Porosität der Strukturen und die im Vergleich zum Tropfendurchmesser erhöhte Wandstärke. Rauheitsmessungen der Oberfläche mit dem Profilometer (Tencor, P11) ergaben, dass die Oberfläche eine Rauheit von $R_t = 103 \mu\text{m}$ aufweist. Auffällig ist auch, dass die Oberfläche kaum Oxidationen zeigt, was auf die Umspülung mit Stickstoff zurückzuführen ist. Diese Porosität ist für eine Vielzahl von Anwendungen, wie z.B. für die oben genannten Master für das Mikrothermoformen erstrebenswert. In Fällen in denen dies nicht erwünscht ist, können durch eine Erhöhung der Temperatur und der Druckfrequenz die Tropfen ineinander verschmolzen werden wodurch massive Strukturen entstehen.

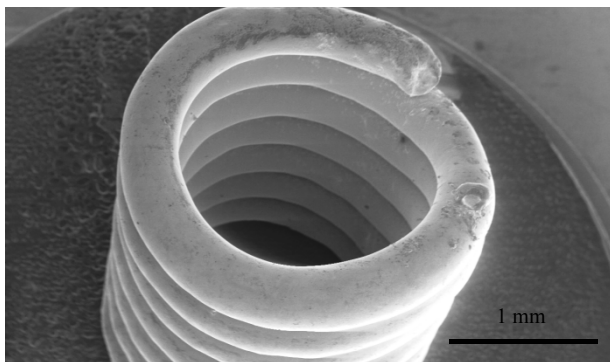


Abbildung 8: Massive spulenartige Struktur

Die in **Abbildung 8** dargestellte Struktur wurde bei 320°C mit Frequenzen im Bereich von 650 Hz gedruckt. Da sich die Tropfen beim Auftreffen wieder vereinen und auf Grund der Oberflächenspannung zusammenziehen weisen diese Strukturen eine deutlich glattere Oberfläche auf. Durch eine Variation der Druckparameter können also die Oberflächeneigenschaften der gedruckten Strukturen gezielt beeinflusst werden.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Die vorgestellten Experimente zeigen, dass die StarJet Technologie prinzipiell für das 3D-Prototyping von porösen sowie soliden Metallstrukturen eingesetzt werden kann. Dabei wurden erfolgreich Metalle mit Schmelzpunkten bis $T_{max} = 420^\circ\text{C}$ gedruckt. Die gezeigte Verbesserung des Herstellungsprozesses der Düsenchips erhöhten die Qualität der Tropfengenerierung in Bezug auf die Druckfrequenz ($f_{max} = 4 \text{ kHz}$) und die Genauigkeit der Tropfenflugbahn ($\Delta = 0,28^\circ$). Die vorgestellten röhrenartigen Strukturen zeigen die Abhängigkeit der Wanddicke und Porosität der gedruckten Strukturen von der Tropfen- und Substrattemperatur sowie weiteren Druckparametern. Allerdings sind die bisher durchgeführten Experimente nur ein erster Schritt in Richtung 3D-Prototyping durch direktes Drucken von flüssigem Metall. In zukünftigen Arbeiten wird das Erstarrungsverhalten der Tropfen und die daraus resultierenden Materialeigenschaften der Strukturen untersucht werden, bevor komplexere, stabilere Strukturen realisiert werden können.

6 Literatur

- [1] T. Metz, G. Birkle, R. Zengerle, P. Koltay, "Star-Jet: Pneumatic Dispensing of Nano- to picoliter Droplets of liquid metal" IEEE MEMS 2009, pp.43-46
- [2] Wenbin Cao, Miyamoto, Yoshinari, "Freeform fabrication of aluminum parts by direct deposition of molten aluminum" Journal of Materials Processing 173 (2006) 209–212
- [3] D. Schuhmacher et al. „Erzeugung von Mikrotropfen aus flüssigem Lötzinn mittels einer hochparallelen und kontaktlosen Drucktechnik“ IEEE MEMS 2007, pp. 357-360
- [4] M. ESSION, D.M. Keicher, W.D. Miller, „Manufacturing electronic components in a direct-write process using precision spraying and laser irradiation“, Patent CA000002373149A1, 2000
- [5] W. Wehl, J.B. Wild, B. Lemmermeyer, „A drop-on-demand metal jet printer for wafer bumping“ Proc. IMAPS 2003
- [6] M. Focke et al., 2010, Lab Chip Vol.10, pp.2519-2526
- [7] A. Tropmann, P. Koltay, N. Paust, R. Zengerle, C. Ziegler: StarJet: Pneumatische Generierung monodisperser Tropfen wässriger Lösungen im Nano- bis Pico-terbereich. SPRAY 2010