

# StarJet: Pneumatische Erzeugung von Nano- bis Picoliter Tropfen flüssigen Lötzinns in einer sternförmigen Düse

Tobias Metz, Gerhard Birkle, Dr. Christoph Ziegler, Prof. Roland Zengerle and Dr. Peter Koltay, HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen, GERMANY, Universität Freiburg - IMTEK, Freiburg, GERMANY, koltay@imtek.de

## Kurzfassung

Der StarJet ist ein neuer drop-on-demand Dispenser zur kontaktfreien Erzeugung von Tropfen flüssigen Lötzinns mit Volumen im Nano- bis Pikoliterbereich. Das System basiert auf einer sternförmigen Düsengeometrie in der Tropfen flüssigen Metalls durch Kapillarkräfte geführt werden. Die Tropfenerzeugung wird durch ein selbstregulierendes Wechselspiel realisiert. Dieses findet zwischen dem flüssigen Metall und einer pneumatisch induzierten Schutzgasströmung in den äußeren Kanälen des Sternprofils statt. Dabei stellt sich bei statischer Aktuierung eine natürliche Eigenfrequenz des Tropfenabrisses ein. Dieses Prinzip der Tropfenerzeugung wurde zuerst in Simulationen mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) nachgewiesen. In einer ersten experimentellen Realisierung wurden Tropfen flüssigen Lötzinns mit Volumen von 120 pl bis 3,6 nl bei Eigenfrequenzen zwischen 30 und 400 Hz generiert. Einzeltropfen können durch Aktuationszeiten im Bereich der Eigenperiode des Systems generiert werden. Durch wiederholtes Dispensieren an einer festen Position wurden Säulen erstarrter Zinntropfen mit einer Höhe beispielsweise von 20 mm bei einer Breite von 300 µm erzeugt. Dies verdeutlicht die gute Richtungsstabilität des Systems.

## 1 Einleitung

Die kontaktfreie Dosierung kleiner Flüssigkeitsvolumina ist seit mehr als zwanzig Jahren ein wichtiges Feld der Mikrosystemtechnik. Anwendungen reichen vom Tinten drucken [1] über das Drucken von Microarrays [2] bis hin zum Rapid Prototyping [3]. An Bedeutung gewinnt zunehmend die Dosierung von flüssigen Metallen [4]. Anwendungsfelder sind Lötstellen [5] oder das Schreiben von elektrischen Leiterbahnen in Spezialanwendungen [3] aber auch die Beladung miniaturisierter Quecksilberschalter für RF Anwendungen [6].

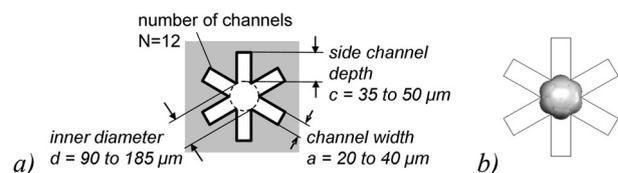
Die Dosierung flüssiger Metalle wartet mit einigen Herausforderungen auf: Teile der Dosiervorrichtung müssen bei der Schmelztemperatur des flüssigen Metalls (bei Löt zinn zwischen 180°C und 350°C) operieren. Die hohen Temperaturen sowie die Temperaturänderungen während des Aufheizens und Abkühlens können mechanische Spannungen induzieren. Die Oxidation der Oberflächen wird durch die hohen Temperaturen beschleunigt ebenso wie die Oxidation des flüssigen Metalls. Letzteres muss sowohl während des Freiflugs der Tropfen als auch während des Aufschmelzens im Reservoir verhindert werden. Dazu wird meist ein konstanter Fluss von Schutzgas eingesetzt. Wenn die Tropfenerzeugung über eine Piezo-Keramik erfolgt [5], so ist deren Arbeitsbereich durch die Curie-Temperatur nach oben beschränkt (typischerweise zwischen 150°C und 300°C). Deshalb müssen entweder spezielle Keramiken verwendet oder die Keramiken thermisch isoliert werden. Aufgrund der hohen Oberflächenspannung von flüssigen Metallen ist ein kapillares Befüllen schwierig.

Das StarJet System wird aufgrund des einfachen Aufbaus von vielen der genannten Problemen kaum beeinträchtigt. Die mikroskopische Düse muss nicht selbst befüllend sein, und ein großer Kontaktwinkel zwischen flüssigem Metall und Düsenmaterial ist sogar wünschenswert. Der unbedingt erforderliche Fluß von Schutzgas wird für die Trop-

fenerzeugung genutzt, weshalb keine komplexen Aktuatoren erforderlich sind.

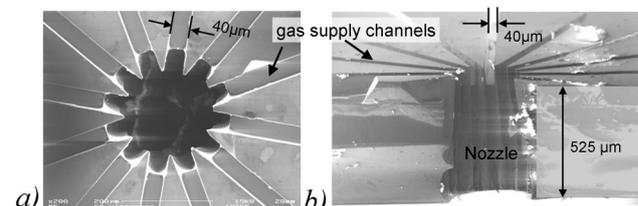
## 2 Funktionsprinzip

Zentrales Element des StarJet Dispensers ist das sternförmige Düsenprofil (Bild 1a).



**Bild 1:** a) Schematisches Profil der sternförmigen Düse, b) CFD Simulation: Tropfen in sternförmiger Düse.

Besteht das sternförmige Profil aus einem durch das flüssige Metall nicht benetzbaren Material (z.B. Silizium) werden Flüssigkeitstropfen durch Kapillarkräfte ins Zentrum gezwungen (zentriert) (Bild 1b) und dringen nicht in die äußeren Bereiche ein. In Bild 2 ist eine mittels Tiefenätzen in Silizium gefertigte sternförmige Düse gezeigt.

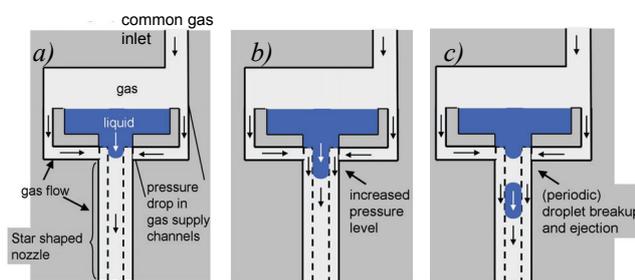


**Bild 2:** REM Bilder einer geätzten StarJet Düse.

Bild 1b zeigt das Ergebnis einer Simulation mittels Computational Fluid Dynamics (CFD), wobei ein Tropfen flüssigen Lötzinns in einer sternförmigen Düse zentriert wurde. Bereits früher [7] wurde für Gasblasen in benetzenden Kanälen gezeigt, dass durch die Zentrierung der Wider-

stand der Blasen gegen Bewegung entscheidend verringert wird. Dies resultiert aus der quer zur Bewegungsrichtung reduzierten Kontaktlinie. Der gleiche Effekt erhöht auch die Mobilität des flüssigen Metalls in der Düse.

Der Mechanismus der Tropfenerzeugung im StarJet ist in Bild 3 dargestellt. Ein Flüssigkeitsreservoir ist direkt über dem Einlass des Düsenchips platziert. Auf der dem Reservoir zugewandten Oberfläche des Chips finden sich horizontale Gasführungskanäle die in den Seitenkanälen der Düse münden (siehe Bild 2b). Der Leerraum über dem Reservoir steht in pneumatischem Kontakt mit diesen Kanälen. Wird Druck angelegt so resultiert ein Gasfluss durch die Kanäle und die Düse. Dieser geht mit einem Druckabfall  $\Delta p$  über das Flüssigkeitsreservoir einher (Bild 3a). Ist dieser Druckabfall größer als der Kapillardruck der Flüssigkeit am Düseninlass, so wird die Flüssigkeit in die Düse gedrückt (Bild 3b).



**Bild 3:** Funktionsprinzip des StarJet Dispensers

Die eindringende Flüssigkeitssäule bleibt im Zentrum der sternförmigen Düse. Der Gasfluss in den äußeren Kanälen der Düse bleibt erhalten, wird aber mit zunehmender Länge der Flüssigkeitssäule gedrosselt. Damit nimmt der Druckabfall in der sternförmigen Düse zu und über die Gasführungskanäle und das Reservoir  $\Delta p$  ab. Fällt  $\Delta p$  unter den Kapillardruck der Flüssigkeitssäule, so kollabiert die Säule in der Düse und ein Tropfen reißt ab (Bild 3b). Dieser wird durch das strömende Schutzgas ausgestoßen (Bild 3c).

Bevor ein gebildeter Tropfen ausgestoßen wurde kann kein Metall in die Düse nachfließen, wodurch der Prozess stabilisiert wird. Bei konstantem Aktuationsdruck wiederholt sich der Vorgang sobald der Tropfen die Düse verlassen hat. Das Ergebnis ist eine periodische Tropfenerzeugung.

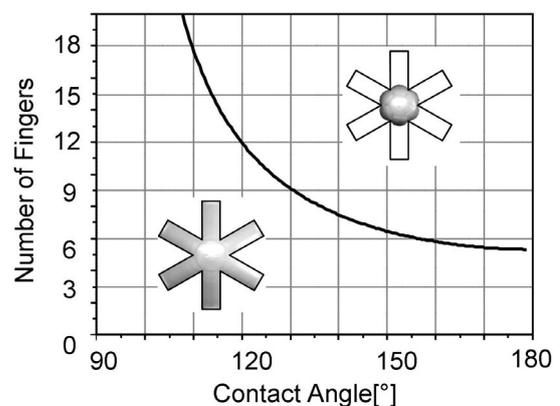
Das sternförmige Profil reduziert die Kontaktreibung des Tropfens mit der Wand wodurch die Ablenkung des Tropfens am Düsenrand verringert wird und ein stabiler Tropfenflug unterstützt wird. Bei niedrigen Aktuationsdrücken werden keine Tropfen erzeugt, so dass ein konstantes Spülen mit Schutzgas möglich ist, was das Metall im Reservoir vor Oxidation bewahrt. Die Tropfen sind im Flug eine Zeit lang ebenfalls von Schutzgas umgeben.

### 3 Design der sternförmigen Düse

Ein Tropfen wird in der sternförmigen Düse zentriert, wenn der abstoßende Kapillardruck in Richtung der (nichtbenetzenden) äußeren Kanäle größer ist als der Kapillardruck des Tropfens im Zentrum der Düse. Für einen gegebenen Kontaktwinkel  $\theta$  gibt es, bei einem regelmäßigen Sternprofil, eine minimale Anzahl  $N$  von Fingern welche für das Zentrieren eines Tropfen erforderlich ist. Diese kann mittels Gleichung (1) ermittelt werden.

$$N > \pi \left( \arctan \left( \frac{2 \cos^2 \theta}{2\theta - \pi - 2 \cos \theta \sin \theta} \right) \right)^{-1} \quad (1)$$

Die Ableitung von Gleichung (1) erfolgt analog der Ableitung der Bedingung für das Zentrieren von Gasblasen in benetzenden Kanälen [7]. In Bild 4 ist Gl. (1) als Phasendiagramm ausgewertet. Für Parameterpaare  $N, \theta$  im Gebiet oberhalb des Graphen werden die Tropfen zentriert.

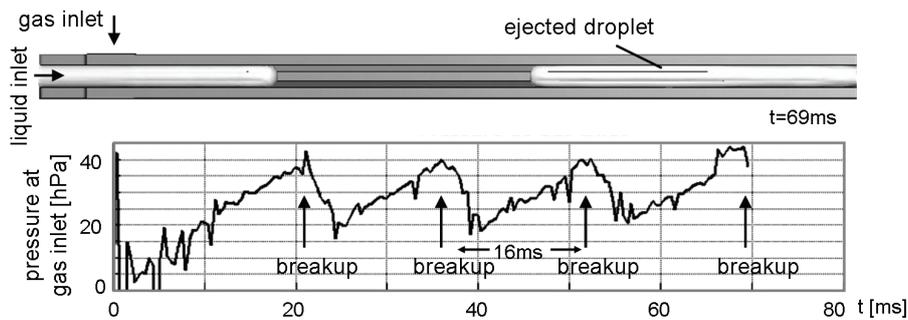


**Bild 4:** Phasendiagramm für Tropfen in sternförmigen Profilen. Oben zentriert, unten füllend.

### 4 Simulation

Der Mechanismus des Tropfenabrisses durch pneumatische Aktuation in der sternförmigen Düse wurde zuerst in CFD Simulationen nachgewiesen. Dabei wurde des Software-Paket CFD-ACE+ [8] von ESI-CFD benutzt. Es werden die Navier-Stokes'schen Gleichungen für zwei Fluidphasen, unter Berücksichtigung der Grenzflächenspannung zwischen den Phasen und einem Kontaktwinkel der Grenzfläche mit der festen Wand gelöst.

Das Ergebnis einer Simulation ist in Bild 5 gezeigt. Dabei wurde nur das innere der sternförmigen Düse unter vereinfachten Randbedingungen modelliert: An der Stelle wo die Gasführungskanäle in die sternförmige Düse münden wird ein konstanter Gasfluss als Randbedingung angelegt. Am Übergang zwischen Flüssigkeitsreservoir und Düse wird Flüssigkeit mit Überdruck gegenüber dem Düsenauslass gesetzt. Trotz der statischen Randbedingungen bricht die in die Düse eindringende Flüssigkeitssäule periodisch ab sobald der Druckgradient einen kritischen Wert überschreitet.



**Bild 5:** Ergebnis einer CFD Simulation des Tropfenabrisses in der StarJet Düse mit vereinfachten Randbedingungen Konstanter Druck am Flüssigkeitseinlass ( $p = 120 \text{ hPa}$ ; Quecksilber:  $\rho = 1350 \text{ kgm}^{-3}$ ;  $\sigma = 484 \text{ Nm}^{-1}$ ;  $\eta = 1,55 \text{ Pa s}$ ) Konstante Geschwindigkeit am Gaseinlass ( $1 \text{ ms}^{-1}$ , air); Umgebungsdruck am Düsenende rechts.

## 5 Experimentelle Arbeiten

### 5.1 Chip Herstellung

Testchips mit sternförmigen Düsen wurden mittels Tiefenätzen in Silizium hergestellt. Dabei wurde zuerst das Düsenprofil und dann die Gasführungs Kanäle in einen 525  $\mu\text{m}$  dicken Siliziumwafer geätzt (Bild 2). Aus Bild 2 kann entnommen werden, dass das erzeugte Düsenprofil nicht gleichmäßig ist und der innere Durchmesser auf Kosten der äußeren Kanäle zum Düsenende hin zunimmt. Dies resultiert aus dem nicht optimierten Ätzprozess, beeinträchtigt die Funktion aber nicht.

Auf Testwafern wurden zwanzig unterschiedliche Parametervarianten der Düse entsprechend Bild 1 realisiert. Daraus wurden zwei Varianten ausgewählt mit denen verschiedene Experimente durchgeführt wurden (SJet2, SJet14). In Tabelle 1 sind die Parameter dieser Varianten aufgeführt. Das Profil von Variante SJet14 hat den doppelten inneren Durchmesser  $d$  verglichen mit Variante SJet2 bei gleicher Anzahl von äußeren Kanälen.

**Tabelle1:** Parameter der untersuchten StarJet Düsen

	SJet2	SJet14	Simulation
$N$	12	12	8
$a [\mu\text{m}]$	20	40	76
$c [\mu\text{m}]$	35	50	87
$d [\mu\text{m}]$	94	188	100
$p_{cap} [\text{hPa}]$	197	99	100

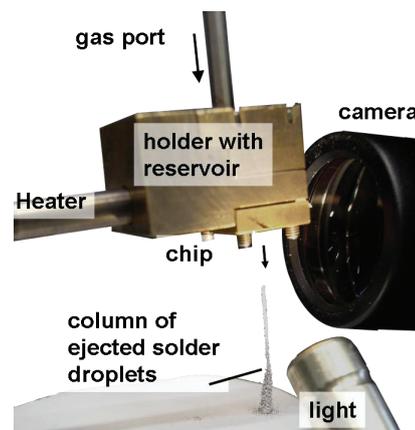
Der Wert  $p_{cap}$  ist eine Abschätzung des Kapillardrucks der Flüssigkeitssäulen, basierend auf dem inneren Durchmessers  $d$ .

### 5.2 Experimenteller Aufbau

Zum Test der Chips wurde eine Halterung (Druckkopf) für die sternförmige Düse durch Fräsen in Messing hergestellt (vgl. Bild 6). Der Druckkopf wird mit einem temperaturstabilisierten LötKolben geheizt und enthält das Zinnreservoir und die Gasführung für die pneumatische Aktuation. Ein Bohrloch ( $\text{Ø} 400 \mu\text{m}$ ) im Flüssigkeitsreservoir erlaubt den Übertritt der Flüssigkeit in den Düsenchip welcher mechanisch ohne Dichtung unter das Loch geklemmt wird.

Mittels eines externen Zweiwegeventils wird am Gaseinlass zwischen zwei Druckniveaus geschaltet - einem niedrigen zum konstanten Spülen der Düse mit Lötzinn und einem höheren Druckniveau zur Tropfenerzeugung. Die Beobachtung der Tropfen erfolgte mittels einer Stroboskopkamera wie in Bild 6 gezeigt. Ein Kapselmikrofon am Gaszufluss dient zur Detektion der durch einen Tropfenabriss induzierten Druckschwankungen. Daraus kann die Abrissfrequenz der Tropfen ermittelt werden.

In den Experimenten wurde Lötzinn des Typs Sn60Pb verwendet ( $\rho = 860 \text{ kgm}^{-3}$ ;  $\sigma = 460 \text{ Nm}^{-1}$ ;  $\eta = 2 \text{ Pas}$  bei  $255^\circ\text{C}$ ;  $T_{melt} \sim 190^\circ\text{C}$ ).

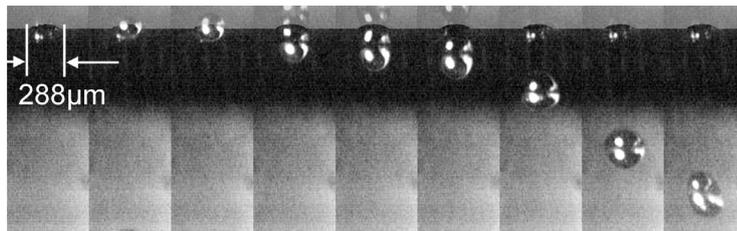


**Bild 6:** Experimenteller Aufbau.

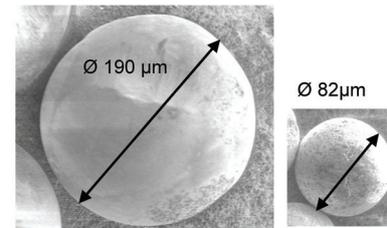
## 6 Ergebnisse und Diskussion

Mit den Chipvarianten SJet2 und SJet14 wurden Experimente durchgeführt, um das Funktionsprinzip zu überprüfen. Als minimaler Aktuationsdruck  $\Delta p_{min}$  wurde für SJet14 150 hPa und für SJet2 300 hPa bei  $T = 255^\circ\text{C}$  experimentell ermittelt.

Bei Aktuation mit konstantem Druck stellt sich wie erwartet ein periodischer Tropfenabriss ein. In Bild 7 sind Stroboskopaufnahmen des Tropfenabrisses gezeigt. Aus den Aufnahmen kann geschlossen werden, dass die Zinntropfen die Düse bereits als ausgeformte Kugeln verlassen und der Abriss nicht erst ausserhalb der Düse erfolgt, wie dies beispielsweise bei anderen Verfahren der Fall ist. Für beide Chip Varianten wurde bei  $T = 255^\circ\text{C}$  eine Abrissfre-



**Bild 7:** Stroboskopaufnahmen des Tropfenausstoßes aus einer StarJet Düse.



**Bild 8:** Elektronenmikroskopien erstarrender Lötzinntropfen

quenzen um 95 Hz mit einer Streuung von  $\pm 15$  Hz akustisch ermittelt. Für Chips vom Typ SJet14 wurde eine stabile periodische Tropfengenerierung bis 300 hPa festgestellt. Bei einer weiteren Steigerung des Aktuationsdrucks ändert sich das Verhalten des Systems grundsätzlich. Die hohe Gasflussrate führt in der Düse zu einem Venturieffekt der die Flüssigkeit aus dem Reservoir in feinen Tröpfchen herausreißt. Solch ein Vernebeln nach dem Airbrush-Prinzip tritt für SJet14 ab ca. 1500 hPa; SJet2 ab ca. 2000 hPa auf.

Mit sinkender Temperatur sinkt auch die Eigenfrequenz des Systems aufgrund der steigenden Viskosität des flüssigen Metalls. Bei  $T = 200^\circ\text{C}$  wurden mit SJet14 Eigenfrequenzen um 30 Hz  $\pm 6$  Hz gemessen.

Bei kurzzeitiger Aktuation im Bereich der Eigenfrequenz werden einzelne Tropfen erzeugt und das System arbeitet im Drop-on-Demand Modus. Der Modus wurde für SJet14 bei  $T = 255^\circ\text{C}$  bei Aktuationszeiten von 6 ms und bei  $T = 200$  bei Aktuationszeiten von 30 ms nachgewiesen.

Tropfengrößen wurden mittels elektronenmikroskopischer Aufnahmen (Bild 8) bestimmt. Um möglichst sphärische Tropfen zu erhalten und ein Abflachen beim Aufschlag zu verhindern wurde aus einer Entfernung von 30 cm in Seifenlösung dispensiert. Die ermittelten Tropfengrößen korrespondieren gut mit den Düsendurchmessern (Bild 8). Es wurden Tropfenvolumina zwischen 120 pl für SJet2 (Tropfendurchmesser  $61\mu\text{m}$ , ohne Abbildung) und 3,6 nl für SJet14 (Tropfendurchmesser  $190\mu\text{m}$ ) realisiert.

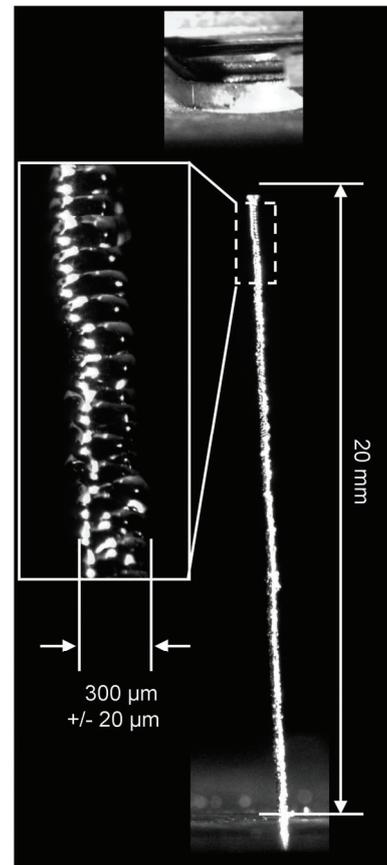
Bei mehrfachem Dispensieren auf ein Substrat, verschmelzen die Tropfen und bilden Säulen (Bild 9). Das System hat eine gute Richtungsstabilität, was durch das hohe Aspektverhältnis der in Bild 9 dargestellten Säule verdeutlicht wird (Düse: SJet2).

## 7 Schlussfolgerung und Ausblick

Der einfache Aufbau des StarJet Dispensers passt ideal zu den Anforderungen für die Dosierung flüssiger Metalle. Die Grundfunktionalitäten des StarJet Dispensers konnten in dieser Arbeit erfolgreich experimentell nachgewiesen werden.

Die kontrollierte Einzeltropfenerzeugung macht das System für verschiedenste Anwendungen wie das Setzen von Bondpads oder das Rapid Prototyping einsetzbar.

Der StarJet Dispenser kann auch für wässrige Lösungen eingesetzt werden wenn Materialien gewählt werden die die Bedingung für das Zentrieren der Tropfen (Gl. 1, Bild 4) gewährleisten.



**Bild 9:** Säule aus über 450 Zinntropfen (Breite  $300\mu\text{m}$ ; Höhe 20 mm) erzeugt im Drop-on-Demand Modus.

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung der hier vorgestellten Arbeiten unter dem Förderkennzeichen ZE 527/3.

## 8 Literatur

- [1] J. Heinzl and C. H. Hertz, *Adv. Imag. Elec. Phy.*, vol. 65, pp. 91-171, 1985
- [2] B. de Heij et al., *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 378, no. 1, pp. 119-122, Jan.2004
- [3] M. Ession, et al., CA000002373149A1, 2000
- [4] W. Wehl et al., Proc. IMAPS 2003
- [5] D. Schuhmacher et al. *Proc. IEEE MEMS 2007*, pp. 357-360
- [6] P. Sen and C. J. Kim, *Proc. IEEE MEMS 2007*, pp. 767-770
- [7] T. Metz, et al. *Langmuir*, pp. 9204-9206, 2008
- [8] ESI-Group, "CFD-ACE+ 2007," 2006