

Ein akustisches Antriebssystem für einen Drop-on-Demand-Druckkopf

MICHAEL KÜBLER, BJÖRN LEMMERMEYER, WOLFGANG WEHL, JÖRG WILD, Institut für Mechatronik an der Hochschule Heilbronn (www.mm.hs-heilbronn.de/imh.htm)

Einleitung

Am Institut für Mechatronik Heilbronn (IMH) wird seit Jahren ein Verfahren entwickelt, um sehr heiße, flüssige Metalle wie Tintentropfen in einem Tintendrucker verspritzen zu können [5]. Der neu entwickelte Druckkopf verspritzt einzelne Tropfen auf Abruf, d. h. nach dem Drop-on-Demand-Prinzip (kurz DoD). Zum Abschluss des ersten vom BMBF geförderten Teilprojektes konnte das Funktionsprinzip bereits erfolgreich nachgewiesen werden [5]. Allerdings entstehen während der Aufheiz- und Abkühlphasen dieses Prinzipmusters konstruktionsbedingt große thermisch induzierte mechanische Spannungen, welche sich nachteilig auf die Funktion, sowie die Lebensdauer des Druckkopfes auswirken.

Im folgenden Beitrag wird gezeigt, wie sich diese Spannungen mit Hilfe der inzwischen patentierten Idee [7, 6] eines *akustischen Antriebs* vollständig vermeiden lassen.

Um das Antriebssystem so auslegen zu können, dass sich mit Schallwellen einzelne Tröpfchen erzeugen lassen, wurde eine Modellierung mit finiten Elementen vorgenommen.

1 Der (Lot-)Druckkopf

Das Herzstück des Druckkopfes besteht aus einem recht einfachen, mikrotechnisch gefertigten Druckchip aus Silizium mit zehn Düsen [8]. Die Außenabmessungen des Druckchips betragen $33,8 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$. An den Chip wird ein Tragkörper aus Zirkonoxid (ZrO_2) befestigt, in dem sich wiederum – wie Bild 1 zeigt – für jede Düse ein lamellenförmiger piezoelektrischer Aktor befindet.

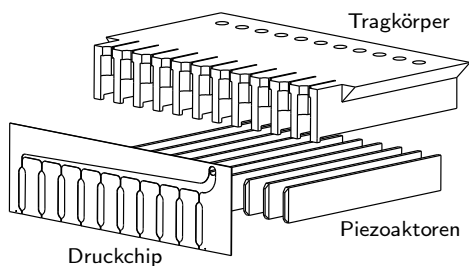


Bild 1: Explosionsdarstellung eines Druckkopfes

In Bild 2 ist der Aufbau einer nach dem Drop-on-Demand-Prinzip arbeitenden Einzeldüse dargestellt.

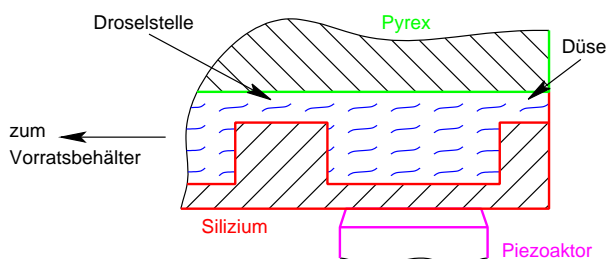


Bild 2: Querschnitt einer Druckkammer (prinzipielle Darstellung)



Dipl.-Ing. (FH) Michael Kübler studierte von 2002 bis 2005 an der Hochschule Heilbronn im Studiengang Mechatronik und Mikrosystemtechnik und ist seit 2005 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Polymer-Institut Kunststofftechnik Heilbronn tätig.
E-Mail: kuebler@hs-heilbronn.de



Dipl.-Ing. (FH) Björn Lemmermeyer studierte von 1996 bis 2000 an der Hochschule Heilbronn im Studiengang Mechatronik und Mikrosystemtechnik und ist seit 2001 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechatronik Heilbronn tätig.
E-Mail: lemmermeyer@hs-heilbronn.de



Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wehl ist Leiter des Instituts für Mechatronik Heilbronn an der Hochschule Heilbronn. Seine Forschungsschwerpunkte sind Tintendrucktechnologie, Mikrodosierung, Aufbau- und Verbindungstechnik und Mikromontage.
E-Mail: wehl@hs-heilbronn.de



Prof. Dr.-Ing. Jörg Wild ist Leiter des Studiengangs Mechatronik- und Mikrosystemtechnik der Hochschule Heilbronn und Mitglied des Instituts für Mechatronik Heilbronn. Fachlich ist er für CAD, Systeme der Feinwerktechnik und Mechatronik sowie Getriebetechnik zuständig.
E-Mail: wild@hs-heilbronn.de

Das zu verdruckende Fluid fließt von einem Vorratsbehälter über eine Drossel in eine Druckkammer. Große Kapillarkräfte in der Düse sorgen dafür, dass im Ruhezustand keine Flüssigkeit aus dem Druckkopf austreten kann.

Die Siliziumwandung jeder Druckkammer ist in Form einer Membran ausgeführt. Diese lässt sich mit einem Piezoaktor minimal durchbiegen. Dies bewirkt eine Verkleinerung des mit Flüssigkeit gefüllten Kammervolumens. Das verdrängte Flüssigkeitsvolumen verlässt den Druckkopf bei richtiger Auslegung von Drossel und Düse als schnell fliegender Tropfen. Die Größe der Tropfen sowie deren Fluggeschwindigkeit sind in starkem Maße von den rheologischen Eigenschaften des Fluids, der Düsen- und Drosselgeometrie sowie den Ansteuerparametern der Piezoaktoren abhängig.

Da das primäre Einsatzgebiet des am Institut für Mechatronik entwickelten Druckkopfes das Verdrucken von flüssigen Metallen (hauptsächlich Weichlote) ist, ist es unumgänglich eine Temperierung des zu verdruckenden Mediums auf eine Temperatur von bis zu 300 °C vorzusehen. Diese wird mit Hilfe einer Vorratsbehälterheizung sowie einer Druckchipheizung vorgenommen (Bild 3).

Bedingt durch diese hohen Temperaturen ist eine thermisch entkoppelte Anbindung der Piezoaktoren an den Druckchip unumgänglich, da die Dauereinsatztemperatur von PZT-Piezokeramiken (Blei-Zirkonat-Titanat) nicht mehr als etwa

180 °C betragen darf. Andernfalls kommt es zu einer Depolarisation des piezoelektrischen Effekts.

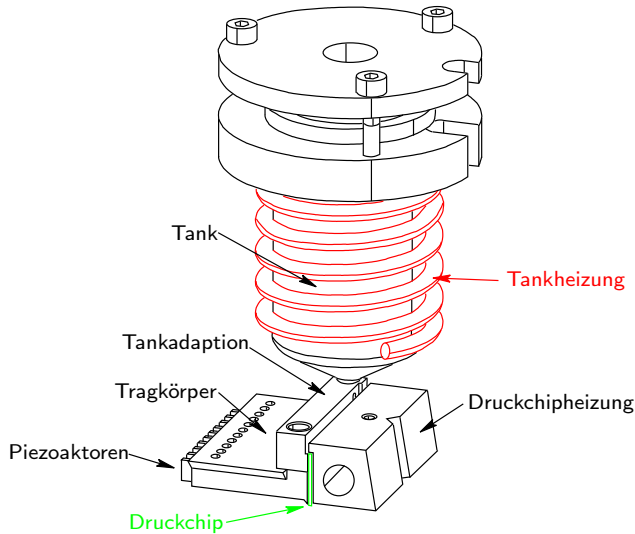


Bild 3: Druckkopf mit Tank (vergleiche Bild 1)

Der thermisch entkoppelten Anbindung der Piezoaktoren an den Druckchip kommt die mit $\lambda_{PZT} \approx 1,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ vergleichsweise niedrige spezifische Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Piezokeramik entgegen. Durch die Minimierung der Kontaktfläche zwischen den Druckchipmembranen und den auf diesen aufstehenden Piezoaktoren, sowie der Möglichkeit die Piezoaktoren durch Zwangskonvektion mittels einer Gasspülung zu kühlen, kann sichergestellt werden, dass die Temperatur der piezoelektrisch aktiven Aktorbereiche die Maximaltemperatur nicht übersteigt [8].

1.1 Das bisherige, statisch geschlossene Antriebssystem

Die membranförmig ausgeführte Bodensektion der einzelnen Druckkammern (Bild 4) wird durch die Längenänderung des jeweiligen Piezoaktors ausgelenkt [8, 9].

In bisher aufgebauten Funktionsmustern wurden die an einem Ende auf dem Druckchip aufstehenden Piezoaktoren an deren anderem Ende durch den Tragkörper abgestützt.

Der Tragkörper ist wiederum stoffschlüssig mit dem Druckchip verbunden. Aufgrund des dadurch resultierenden geschlossenen Kraftflusses führt eine Längenänderung eines Piezoaktors zu einer Auslenkung der Druckchipmembran.

Allerdings kann es durch diesen geschlossenen Kraftfluss auch zu einer statischen Membrandeformation aufgrund von thermisch induzierten mechanischen Spannungen des Aufbaus kommen. Diese werden durch die unterschiedliche temperaturabhängige Längenänderung von Tragkörper und Piezoaktor

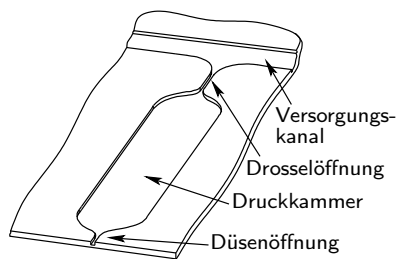


Bild 4: Druckkammer

verursacht. Grund hierfür ist vorrangig das unterschiedliche Wärmeausdehnungsverhalten von Druckchip-, Tragkörper- und Piezoaktormaterial (Tabelle 1).

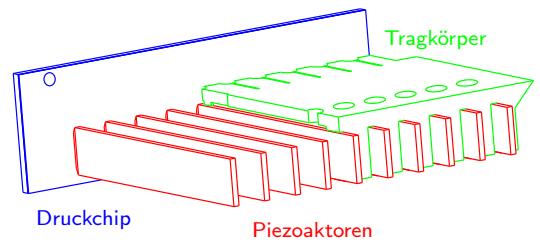
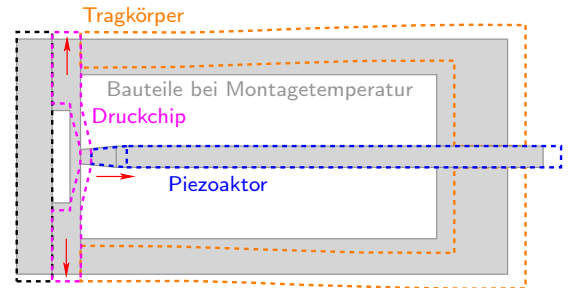


Bild 5: Druckkopf (der Tragkörper ist nur teilweise dargestellt)



→ : an Druckchip wirkende Kräfte aufgrund von Thermospannungen ... die aufgrund einer Erwärmung deformierten Bauteile sind strichliert dargestellt

Bild 6: Deformation des Druckchips aufgrund von Thermospannungen (Prinzipische geschnittene Draufsicht einer Druckkammer mit Piezoaktor und Tragkörper)

In Bild 6 ist prinzipiell dargestellt, wie sich der Druckkopf bei einer Temperaturerhöhung verhält, wenn die Piezoaktoren sowohl mit dem Druckchip als auch mit dem Tragkörper stoffschlüssig verbunden sind.

Tabelle 1: thermische Längenausdehnungskoeffizienten α

Bezeichnung	Material	α in 10^{-6} K^{-1}
Druckchip	Silizium, Pyrex	2,6
Aktor	Blei-Zirkonat-Titanat	6,5
Tragkörper	Zirkonoxid (ZrO_2)	10,0

Die durch die unumgänglichen Unterschiede zwischen Montage-, Stillstands- und Arbeitstemperatur verursachten thermischen Spannungen können von Brüchen der stoffschlüssigen Verbindungsstellen der einzelnen Bauteile bis hin zu Membran- und / oder Aktorbrüchen führen.

2 Überarbeitetes Antriebssystem

Sobald man den geschlossenen Kraftfluss der bisherigen Konstruktion öffnet – z. B. indem man wie in Bild 7 schematisch dargestellt, den Tragkörper entfernt – entstehen keine thermisch induzierten mechanischen Spannungen mehr [7, 6]. Doch wie kann mit Hilfe der jetzt frei schwingenden Piezoaktoren eine definierte Bewegung in die Druckchipmembranen eingekoppelt werden?

Statische Auslenkungen der Druckchipmembranen sind mit der in Bild 7 dargestellten Anordnung natürlich nicht mehr möglich. Dies ist indes unproblematisch, da zum Ausstoßen von

Tropfen nur kurz andauernde, dynamische Bewegungen erforderlich sind.



Bild 7: Antriebssystem mit in Membranauslenkungsrichtung frei schwingendem Aktor (Prinzipische Skizze; vergleiche Bild 6)

2.1 Funktionsprinzip

Wie schon beim bisherigen Aufbau des Druckkopfes lassen sich für den akustischen Antrieb lamellenförmige Piezoaktoren verwenden. Allerdings dürfen sich die für die Energieeinkopplung notwendigen Elektroden – wie später gezeigt wird – nur noch in einem genau definierten Bereich (Bild 8, Abschnitt a_2) befinden. Legt man an diese Elektroden eine elektrische Spannung U an, so verkürzt sich aufgrund des piezoelektrischen Quereffekts (Koeffizient $k_{31} < 0$) die Länge a_2 der Piezoaktoren nach Gleichung 1 um Δa_2 [3]. Nach dem Ausgleichen der auf den Elektroden getrennten elektrischen Ladung stellt sich wieder die Ausgangslänge a_2 ein.

$$\Delta a_2 \sim k_{31} \cdot a_2 \cdot U \quad (1)$$

Die spannungsinduzierten Längenänderungen können sich nicht schlagartig auf den restlichen Aktor und die angekoppelte Membran des Druckchips übertragen, sondern erzeugen zunächst mechanische Zug- und Druckspannungen. Diese breiten sich mit der material- sowie geometriespezifischen Schallgeschwindigkeit – formal korrekt „Phasenausbreitungsgeschwindigkeit“ c_{PZT} genannt – nach akustischen Gesetzmäßigkeiten innerhalb der Piezoaktoren aus. Treffen die Schallwellen auf Grenzflächen mit anderer mechanischer Impedanz – z. B. am hinteren, frei schwingenden (offenen) Ende der Aktoren – so werden diese mehr oder weniger vollständig und phasenverschoben reflektiert.

Dies bedeutet, dass die mechanischen Impedanzen der Piezoaktoren und die der Druckchipmembranen so aneinander angepasst sein sollten, dass das Maximum der innerhalb der Piezoaktoren erzeugten Schallenergie in die Druckchipmembranen eingekoppelt werden kann. Durch die Einkopplung innerhalb der Piezoaktoren erzeugter Unter- und Überdruckwellen (Bild 8) in die Druckkammern, kann ein definierter Tropfen ausstoß erzeugt werden.

Bild 8 zeigt den angestrebten Verlauf der Wellenfronten innerhalb des lediglich teilweise piezoelektrisch aktiven Aktors.

Um den in Bild 8 idealisiert dargestellten Verlauf der Wellenfronten innerhalb der Piezoaktoren zu erzeugen, kann wie folgt vorgegangen werden:

- Die Elektroden des mit a_2 gekennzeichneten und schraffierten Aktorabschnitts werden zum Zeitpunkt t_0 mit einer elektrischen Spannung beaufschlagt. Dies führt – wie bereits erläutert – aufgrund des piezoelektrischen Quereffekts zu einer Kontraktion dieses Aktorbereiches.

- Die Verkürzung verursacht Zugspannungen in diesem Bereich, welche sich in Form von zwei Unterdruckwellen¹, welche in entgegengesetzten Richtungen die Aktorabschnitte a_1 und a_3 mit der Phasenausbreitungsgeschwindigkeit c_{PZT} durchlaufen.
- Die Unterdruckwelle, welche Aktorabschnitt a_1 durchläuft, wird bei Erreichen des nicht fixierten² und somit offenen Aktorendes gegenphasig reflektiert.
- Die durch die gegenphasige Reflexion entstandene Überdruckwelle³ durchläuft wiederum Aktorabschnitt a_1 und erreicht zum Zeitpunkt t_1 das in Bild 8 rechtsseitige Ende des piezoelektrisch aktiven Aktorabschnitts a_2 .
- Zum Zeitpunkt t_1 wird die Ansteuerspannung abgeschaltet und die Elektroden des piezoelektrisch aktiven Aktorbereiches a_2 kurzgeschlossen. Dies führt zu einer Relaxation des zuvor um Δa_2 kontrahierten Aktorabschnitts a_2 .
- Es entstehen wiederum zwei sich in entgegengesetzte Richtungen durch die Aktorabschnitte a_1 und a_3 ausbreitende Überdruckwellen. Innerhalb des Aktorabschnittes a_3 kommt es zu einer Überlagerung der aufgrund des Abschaltens der Ansteuerspannung entstehenden, sowie der zuvor durch Reflexion entstandenen Überdruckwellen (siehe „fett“ gezeichnete grüne Linie in Bild 8).
- Durch diese Überlagerung weist die durch Aktorabschnitt a_3 laufende Überdruckwelle eine höhere Amplitude auf und löst den Tropfen ausstoß aus.

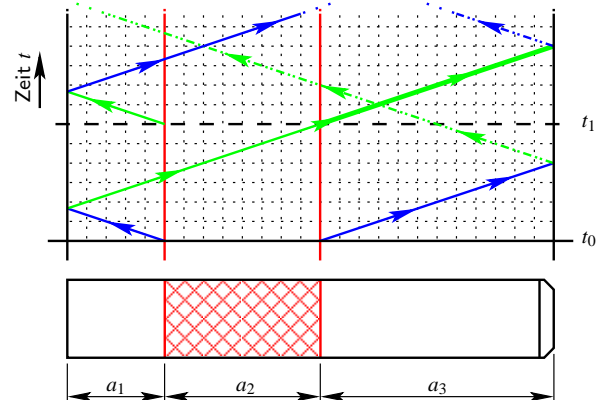


Bild 8: Verlauf der Druck- beziehungsweise Dichtewellenfronten

Ein akustisches Antriebsverfahren wurde im ersten kommerziell eingesetzten Drop-on-Demand-Tintendruckkopf bereits 1977 bei Siemens eingesetzt [1, 4]. Anstatt eines Festkörpers, benutzt der Druckkopf von Siemens allerdings Tinte für den akustischen Energie- und Massentransport.

2.2 Simulationsergebnisse

Neben dem in 2.1 beschriebenen und in Bild 8 prinzipiell dargestellten eindimensionalen Modell der Wellenausbreitung innerhalb des Piezoaktors, wurden in einer Diplomarbeit am Institut für Mechatronik Heilbronn weiterführende Modelle des

¹ ... Unterdruckwellen sind in Bild 8 durch blaue Linien angedeutet

² ... in Bild 8 linksseitiges Aktorende

³ ... Überdruckwellen sind in Bild 8 durch grüne Linien angedeutet

mechanischen Verhaltens des Antriebssystems mit frei schwingendem Aktor erstellt [2].

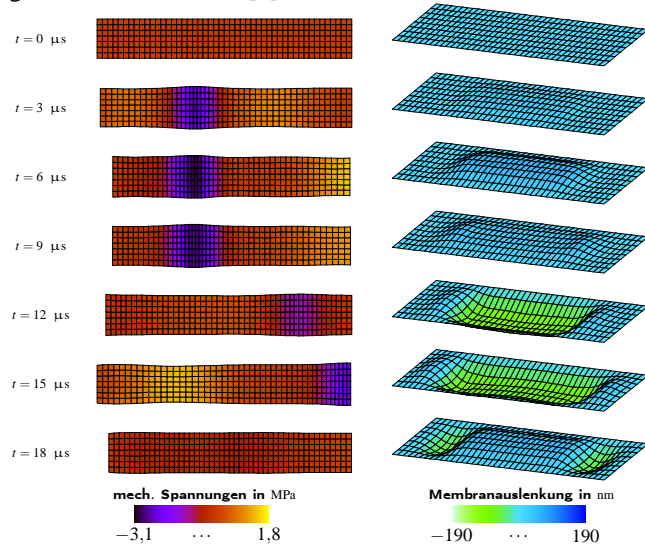


Bild 9: Ergebnisse einer FEM-Simulation der Aktor- und Membrandeformation (Abbildung nicht maßstäblich; Deformation stark überhöht dargestellt)

Die in Bild 9 dargestellten Ergebnisse wurden mit Hilfe eines gekoppelten Aktor- und Membranmodells (Bild 10) berechnet.

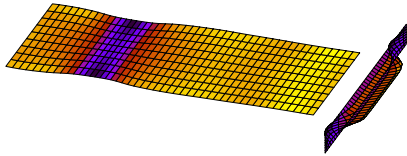


Bild 10: gekoppeltes Aktor-Membranmodell

Dieses Modell wurde mit Hilfe von isoparametrischen finiten Elementen erster Ordnung mit jeweils vier Eckknoten erstellt. Mittels dieses Modells kann unter Annahme einer jeweils konstanten spezifischen Steifigkeit, Dämpfung und Masse des Aktor- beziehungsweise Membranmaterials ein lineares Differentialgleichungssystem zweiter Ordnung formuliert werden. Dieses kann ohne Einschränkung der Allgemeinheit durch eine einfache Substitution in ein Differentialgleichungssystem erster Ordnung mit der doppelten Anzahl von Gleichungen umgeschrieben werden. Für die Lösung dieser Art von Differentialgleichungssystemen wurde ein so genannter ODE⁴-Solver des Softwarepaketes MATLAB[®]⁵ verwendet.

Die sich in der Druckkammer befindliche Flüssigkeit wurde näherungsweise in Form der durch diese auf die Membran ausgeübte Rückwirkung innerhalb des Membranmodells berücksichtigt. Eine mehrdimensionale Modellierung der fluidodynamischen Vorgänge innerhalb der Druckkammer wurde noch nicht vorgenommen.

In Bild 11 ist der berechnete zeitliche Verlauf der über den Aktorquerschnitt gemittelten mechanischen Spannungen über der Länge des Piezoaktors dargestellt. In diesem Diagramm ist der zeitliche Verlauf der Druckwellenfronten in Aktorlängsrichtung (Bild 8) zu erkennen. Es wird deutlich, dass es (noch) nicht gelingt, die gesamte, durch die Kontraktion des Piezoaktors erzeugte Bewegungsenergie in den Druckchip einzukop-

peln. Vielmehr ist, nachdem der eigentliche Tropfenausstoß erfolgt ist – das heißt die zweite Zugwellenfront an der Membran angekommen ist (siehe 2.1) – weiterhin innerhalb des Aktors oszillierende Bewegungsenergie in Form von Druck- und Zugwellenfronten erkennbar.

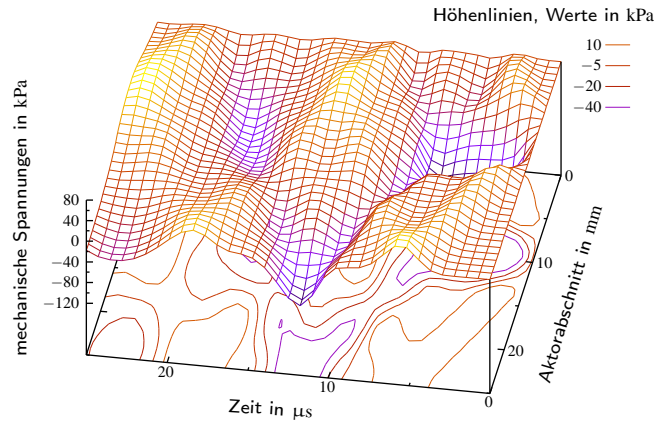


Bild 11: Zeitlicher und örtlicher Verlauf der mechanischen Spannungen innerhalb des Piezoaktors nach Bild 9

Da die Änderung des Kammervolumens in erster Näherung linear von der Ansteuerungsspannung der Piezoaktoren abhängig ist, wird die berechnete Änderung des Druckkammervolumens während eines Druckvorgangs in Bild 12 in auf die Ansteuerungsspannung normierter Form angegeben. Um die Anschaulichkeit zu steigern, wird in Bild 12 zusätzlich die Änderung des Druckkammervolumens in der Anzahl von Tropfen mit einem Durchmesser von 70 μm bei einer Ansteuerungsspannung der Piezoaktoren von 100 V dargestellt.

In Bild 12 ist deutlich zu erkennen, dass es zunächst zu einer Vergrößerung des Druckkammervolumens kommt. Dies ist auch aus den in Bild 9 dargestellten Ergebnissen ersichtlicher.

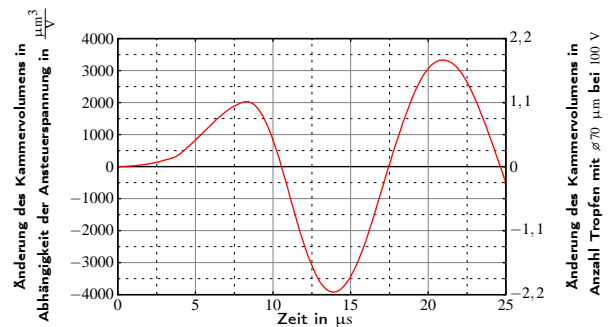


Bild 12: Verlauf der Änderung des Druckkammervolumens (vergleiche Bild 9)

Die Verkleinerung des Druckkammervolumens führt zur Bildung eines schnell fliegenden Tropfens an der Düse. Das Ablösen dieses Tropfens von der Düse und der Übergang in die Flugphase wird durch die erneute Vergrößerung des Druckkammervolumens, welche ein Zurückziehen und Abreißen des Fluids an der Düse bewirkt, begünstigt.

3 Zusammenfassung

Der Nachweis, dass das in diesem Artikel vorgestellte Antriebskonzept funktioniert, wurde durch den Aufbau erster Funkti-

⁴Ordinary-Differential-Equation

⁵© The MathWorks, Inc. (<http://www.mathworks.com>)

onsmuster im Labor für Mikrotechnik des IMHs erbracht. Prinzipbedingt entstehen durch den akustischen Antrieb keine Wärmespannungen mehr, so dass eine Weiterentwicklung des Druckkopfes zu noch höheren Betriebstemperaturen kaum noch etwas entgegensteht.

3.1 Einsatzgebiete des „akustischen“ Lot-Druckkopfes

Der Lotdruck stellt vor allem eine wirtschaftliche Alternative für die in der Halbleiterindustrie bisher eingesetzten Bumping-technologien dar. Dies gilt insbesondere für die Fertigung von kleinen Losgrößen elektronischer Bauteile, da der Fixkostenanteil für das Waferbumping mittels Lotdruck durch keinerlei bauteilspezifische Individualisierungen bestimmt wird. Für andere Bumpingtechnologien hingegen, wie zum Beispiel dem Schablonendruck oder der galvanischen Abscheidung werden bauteilspezifische Masken benötigt. Die Herstellung dieser Masken ist mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden, welcher für den Prototypenbau häufig gänzlich inakzeptabel hoch ist (vergleiche [8]).

Weiterhin besteht eine große Nachfrage nach Mikrodosiersystemen, welche in der Lage sind auch hochviskosere⁶ Medien in kleinen bis kleinsten⁷ Mengen mit hoher Genauigkeit und Geschwindigkeit zu dosieren. Auf diesem Gebiet stellt der Druckkopf des IMH eine interessante Alternative zu bereits am Markt etablierten Verfahren dar (siehe [9]).

Ein wesentlicher Vorteil dieses Druckkopfes besteht in der Möglichkeit, die zu verdruckenden Stoffe bei Temperaturen von derzeit bis zu 300 °C verarbeiten zu können. Dies ermöglicht es, die rheologischen Eigenschaften vieler Stoffe gezielt zu beeinflussen und auf diese Weise ein Verdrucken überhaupt erst möglich zu machen.

Nachwort

Die Diplomarbeit des Autors Michael Kübler [2] wurde mit dem Heinz-Dieter Schunk Innovationspreis für Mechatronik 2005 ausgezeichnet.

Literatur

- [1] HEINZL, J.: *Piezoelektrisches Antriebslement für Schreibdüsen*. Deutsches Patent 25 37 767 B1, 1975.
- [2] KÜBLER, M.: *Modellierung eines piezoelektrischen Drop-On-Demand-(Lot-)Druckkopfes*. Diplomarbeit, Hochschule Heilbronn, 2005.
- [3] TICHÝ, J. und G. H. GAUTSCHI: *Piezoelektrische Messtechnik*. Springer, Heidelberg, erste Auflage, 1980.
- [4] WEHL, W.: *Akustik und Fluidmechanik in Kanälen und Düsen von Tintenschreibwerken*. Doktorarbeit, Technische

Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Feingerätebau und Getriebelehre, 1984.

- [5] WEHL, W., J. KLOESER, P. KRAUSE, S. KROTZ, B. LEMMERMEYER, J. SCHMIDT und J. WILD: *Lotdruck-Verfahren zur Herstellung von Bumps – "JET"*. In: *Ergebnisbericht des Verbundprojektes*, 2003.
- [6] WEHL, W. und J. WILD: *Druckkopf zum Ausspritzen eines heißen flüssigen Mediums*. Europäisches Patent 1 200 224 B1, 1999.
- [7] WEHL, W. und J. WILD: *Fluidausgabevorrichtung*. Deutsches Patent 103 32 760 B3, 2003.
- [8] WEHL, W., J. WILD und B. LEMMERMEYER: *Tintendruck – Allein zum Drucken viel zu schade. Ein Drop-on-Demand-Metal-Jet-Druckkopf für das Wafer-Bumping*. Horizonte, Nummer 23: Seiten 8 bis 12, 2003.
- [9] WEHL, W., J. WILD, B. LEMMERMEYER und M. KÜBLER: *A Drop-on-Demand Printhead Suitable for Hot and Relatively Viscous Liquids*. In: *2nd International Workshop on Ink-Jet Printing of Functional Polymers and Materials*, Eindhoven, The Netherlands, June, 29-30th 2005. [CombiMat](http://www.combimat.org) (Combinatorial Materials-Research, <http://www.combimat.org>).

⁶... derzeit ist Glycerin (93 %) mit einer dynamischen Viskosität von $\eta \approx 400 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ bei 20 °C der zähflüssigste, mit dem (Lot-)Druckkopf des IMH verdruckte Stoff

⁷... im Nano- bis Pikoliterbereich