

Tintendrucktechnologie Paradigma und Motor der Mikrosystemtechnik

F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik Messtechnik

Teil1: Jahrgang 103 (1995) Heft 6, Seite 318 - 324

Teil 1: Stand der Tintendrucktechnologie - Zwang zur Mikrosystemtechnik

Abstract

"Wo gibt es sie denn schon, die kommerziell erfolgreichen Produkte der Mikrosystemtechnik?" Eine Frage, die einem bisweilen selbst von Experten noch gestellt wird. Dabei hat sich diese Zukunftstechnologie ohne viel Aufhebens längst in der Welt des Tintendrucks etabliert. Design und Herstellung käuflicher Tintendruck-Mikrosysteme sind jedoch in vielen Details nicht konsistent. Der erste Teil dieses Beitrages erläutert den Stand der Tintendrucktechnologie und zeigt warum auf diesem Gebiet zukünftig kein Weg an der Mikrosystemtechnik vorbeiführt.

Inkjet technology: Paradigm and driving force of micro system technology.

"Where are the commercial successful products of the micro system technique?" A question, which is even asked by experts. As well this future technology has already established in the world of inkjet without making a fuss. However design and production of available inkjet micro systems are inconsistent in many details. The first part of this paper illustrates the state of inkjet technology and points out, why in future micro system technology is cogent necessary in this field.

Deutschland - Pionierland !

Nachdem sie jahrelang ein Schattendasein neben den dominierenden Nadel- und Laserdruckern führten, von vielen wegen ihrer Unzuverlässigkeit und Empfindlichkeiten gar nicht ernst genommen wurden, haben sie inzwischen die gesamte Konkurrenz überrollt: die "Tintendruker" (Wohlgemerkt nicht Tintenstrahlruker, wie immer noch einige diese Drucker nennen. Denn: Tintenstrahlruker arbeiten nach dem Continuous-Jet-Verfahren und werden vornehmlich zum Markieren und Kodieren eingesetzt [1,10].).

Der Markterfolg der Tintendruker kommt nicht von ungefähr: Haben sie doch längst ihre Kinderkrankheiten überwunden und können heute Ihre Vorteile ausspielen: Sehr gute Druckqualität, preiswert, geräuscharm, portabel, kein Ozonausstoss, wenig Energiebedarf und deshalb sehr umweltfreundlich. Und wer miterlebt hat, wie sich Farbe schon bei Fotografie, Fernsehen und am PC-Monitor durchgesetzt hat, und weiß, dass sich nur mit Tinte gut und preiswert farbig drucken lässt [9], wird erst recht nicht an der Zukunft dieser Technik zweifeln.

Das Geschäft mit Tintendruckern boomt seit ein paar Jahren, gleichwohl inzwischen leider ohne deutsche Beteiligung! Dabei haben Deutsche, wie nicht nur bei Fotografie, Fax und Computer, hier die Pionierleistung vollbracht. Es war das Haus Siemens mit einer Gruppe um Prof. Heinzl (heute Technische Universität München) dem es erstmals gelang, ein "Drop-on-Demand-Prinzip", damals noch mit piezoelektrischen Aktoren [8], marktreif zu entwickeln [2] (Bild 1 und 2). So wurde mit dem PT 80i schon 1977 der erste Tintendruker vorgestellt. Selbst für Insider war er eine Revolution, schaffte er es doch mit "nur" zwölf Düsen, immerhin 270 Zeichen in der Sekunde nahezu geräuschlos zu drucken.

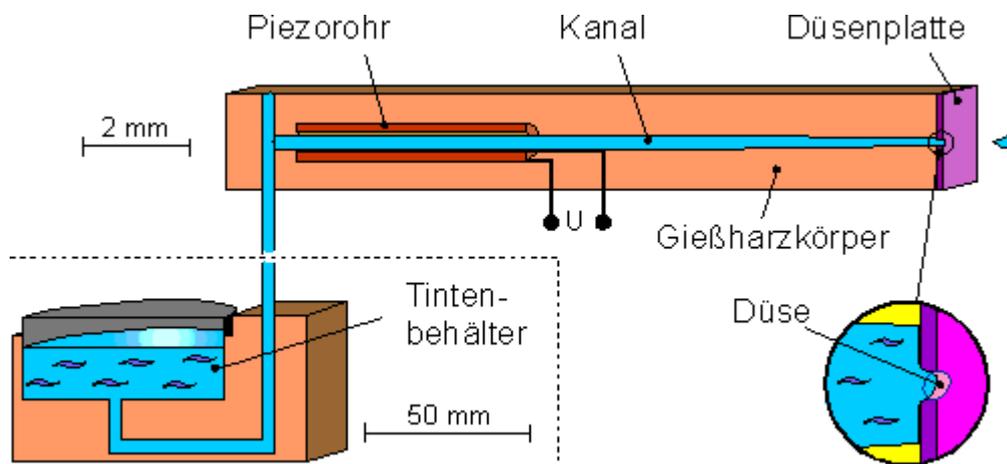


Bild 1: Wegbereiter des Tintendrucks: Das Drop-on-Demand-System mit Piezoröhrchen von Siemens

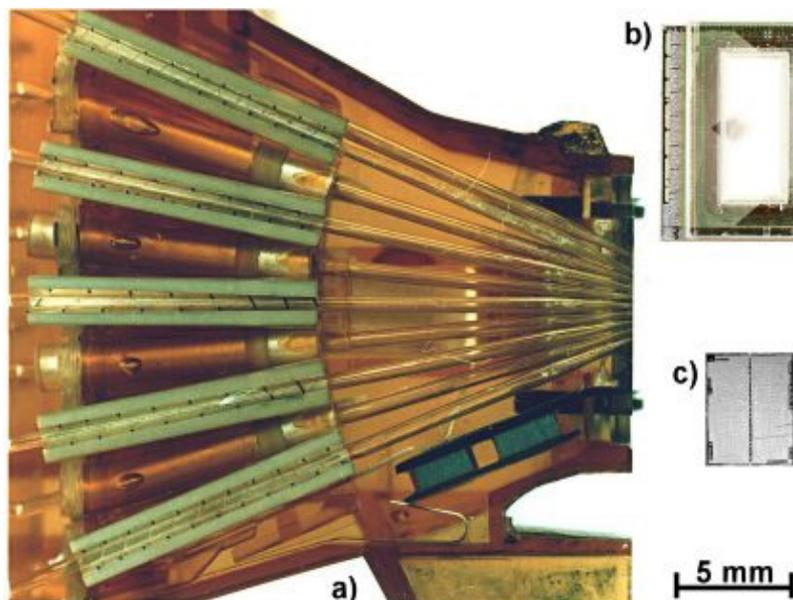


Bild 2: Filigran, dennoch für heutige Verhältnisse recht voluminös; ein Querschliff durch den PT88S-Druckkopf mit neun Piezoröhrchen, Nachfolger des legendären PT80i von Siemens. Oben rechts zum Vergleich der DPH50-Chip (vg. Bild 5) und Mitte rechts der Mikrosystem-Chip (vgl. Bild 2 im 2. Teil)

Der PT 80i war jedoch schon der Anfang vom Ende in Deutschland. Die Leidensgeschichte des deutschen Tintendrucks dauerte freilich noch 16 Jahre. Gerade weil man in der Pionierzeit noch ohne ernsthafte Konkurrenz war, ansehnliche Stückzahlen herstellte und gute Preise erzielte, glaubte man im oberen Siemens-Management lange Jahre nicht an die Zukunft des Tintendrucks. Als dann ab 1984 Tintendrucker zunächst von Epson (SQ-2000 ebenfalls mit piezoelektrischen Aktoren) und kurz darauf von Hewlett Packard (ThinkJet) und Canon (BJ-80) mit der bahnbrechenden "Bubble-Jet-Technologie" auf den Markt kamen, schaffte man es hier nicht mehr, den Anschluss zu finden, war man doch mit der eigenen "Piezoröhrchen-Technik" zehn Jahre lang keinen Schritt weitergekommen.

Trotz eines (restriktiven) Lizenzvertrages mit Canon scheiterten zunächst Siemens und nach Betriebsübergängen des Druckerwerkes auch Mannesmann und Kodak, in Deutschland erfolgreich Tintendrucker zu produzieren. Ende 1993 schließlich schloss die Eastman Kodak Company, Rochester die Inkjet Systems GmbH & Co.KG, die als Rest der ehemals führenden deutschen Tintendrucktechnologie übriggeblieben war. Parallele Versuche in Deutschland von Philips und Olympia, auf diesem Gebiet Fuß zu fassen, misslangen ebenfalls.



Thermoelektrische Tintendruckwerke (Bubble-Jet)

Wie [Bild 3](#) zeigt, hat die Tintendrucktechnologie in ihrer fünfzigjährigen Geschichte eine Menge verschiedener Prinzipien hervorgebracht. Wieso haben sich gerade die Druckwerke mit thermoelektrischen Wandlern (gemeinhin Bubble-Jet genannt) durchgesetzt? Hatte anfangs noch mancher Entwickler von Piezodruckwerken geschmunzelt, als ihm ab 1977 die ersten Bubble-Jet-Patente aus Japan auf den Tisch kamen, sollte ihnen jetzt das Lachen vergehen, denn Tintendrucker mit Bubble-Jet-Druckköpfen eroberten in wenigen Jahren die Verkaufshitparaden. Warum aber war dieses Verfahren so genial und revolutionär? Nun, wie eigentlich immer in solchen Fällen, lag es vor allem an den Herstellkosten... Mussten die Piezodruckwerke, in Design und Herstellung nicht konsistent, mehr oder weniger mühsam aus vielen Einzelteilen zusammengebaut werden, so werden die Bubble-Jet-Tintendruckköpfe als Chips auf Siliziumwafern zu Hunderten in Dünnschichttechnik hergestellt [\[4,5\]](#).

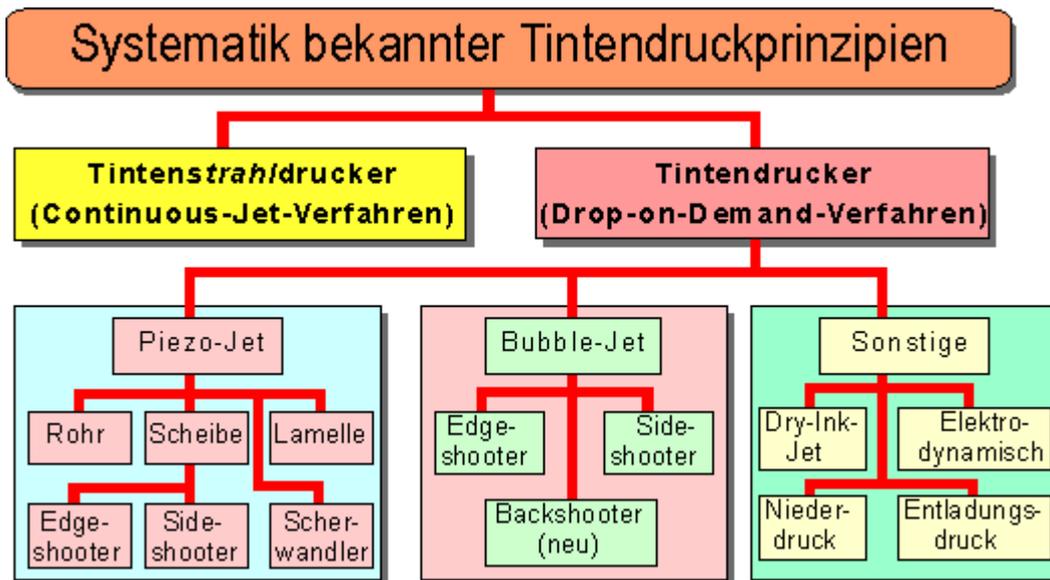


Bild 3: Die Tintendrucktechnologie hat sehr viele Varianten hervorgebracht. Für Bürodrucker nutzt man heute nur noch Piezo- und Bubble-Jet-Verfahren

Herstellung

Die Herstellprozesse der Dünnschichttechnik [\[3\]](#) überschneiden sich weitgehend mit denen der Halbleitertechnik. Tintenkanäle, Düsen, Aktoren und elektrischen Leitungen entstehen, indem man wechselweise auf den Wafern Schichten aufbringt (z. B. durch Sputtern oder CVD-Prozesse) und diese Schichten anschließend strukturiert. Dazu wird zunächst auf die Wafer ein lichtempfindlicher Lack aufgeschleudert und über eine Maske örtlich belichtet. An den belichteten Stellen lässt sich der Lack (Positivresist) partiell entfernen. Durch den Lack nicht mehr geschützt, lassen sich dort danach neue Schichten aufbauen oder die darunterliegende(n) Schicht(en) wegätzen.

Auf diese Weise entstehen nach insgesamt weit mehr als hundert solcher Fertigungsschritte auf einem Wafer gleichzeitig viele Bubble-Jet-Chips ([Bild 4](#), [5](#) und [6](#)). Alle Strukturen müssen auf den tausendstel Millimeter in sich und relativ zueinander genau sein. Jede kleinste Verunreinigung bei der Herstellung führt zum Ausfall, weshalb man Bubble-Jet-Chips in vergleichbaren Reinräumen und mit den gleichen Maschinen herstellen muss, wie sie in der Halbleiterfertigung üblich sind.

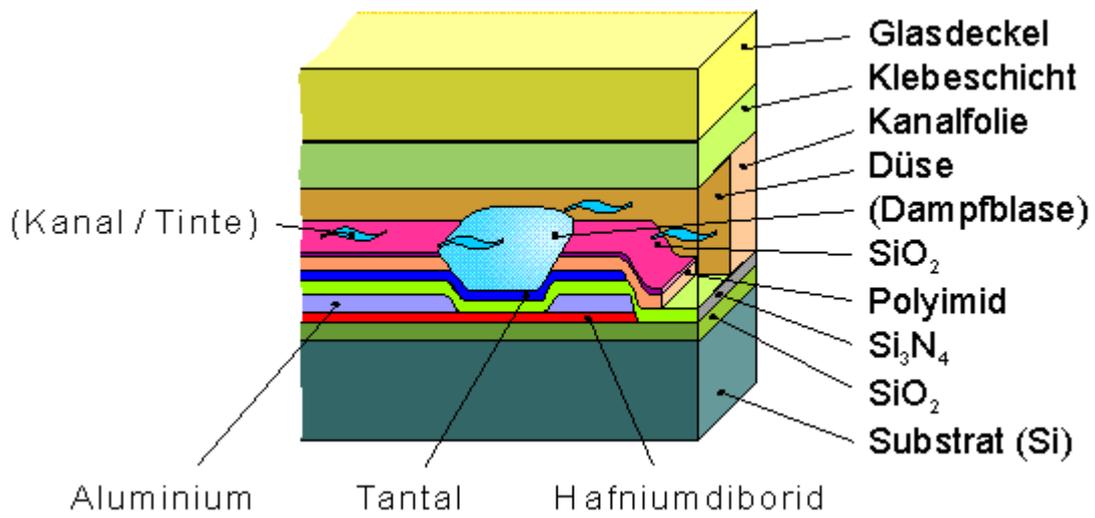


Bild 4: Schichtaufbau eines Bubble-Jet-Systems (nicht maßstäblich)

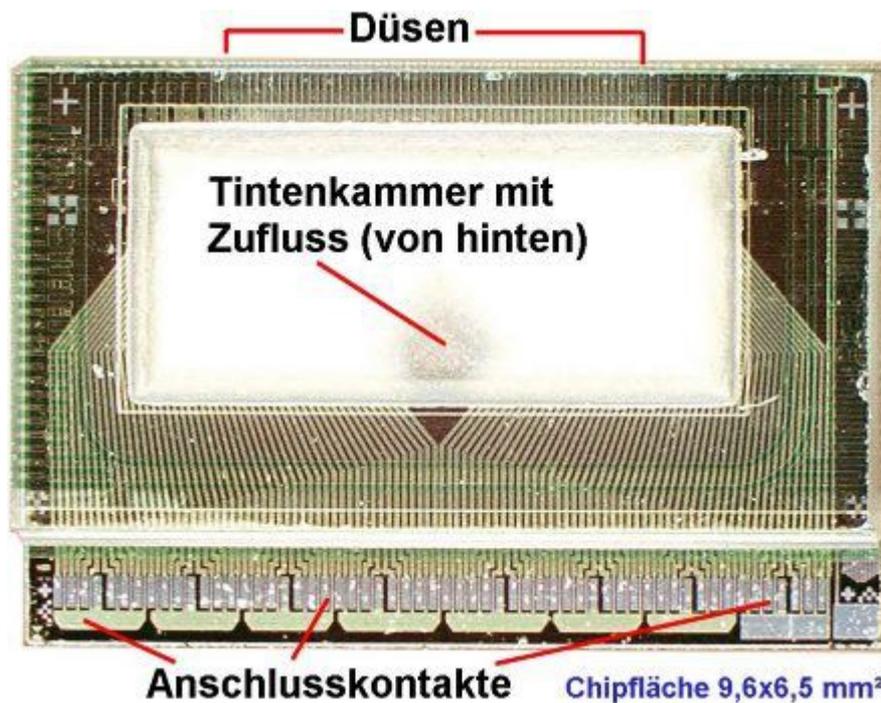


Bild 5: Der 50düsiges Bubble-Jet-Chip (Edgeshooter-Typ) des Kodak Diconix 701 von Inkjet Systems, Berlin

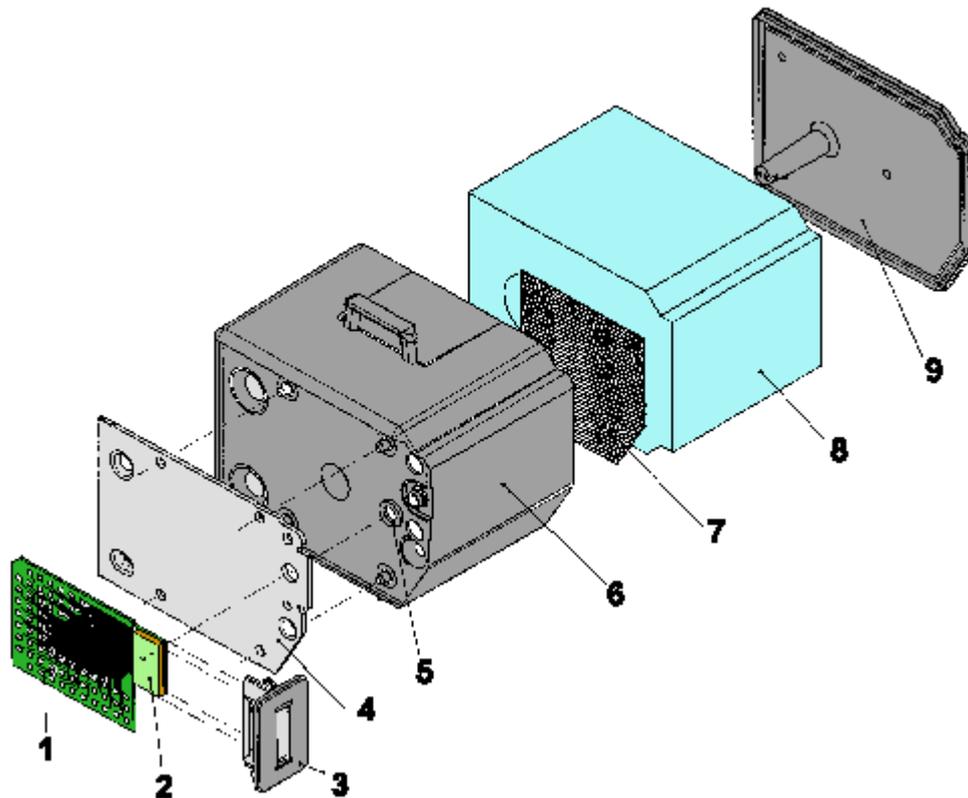


Bild 6: Da Bubble-Jet-Tintendruckköpfe nicht die (fast) unbegrenzte Lebensdauer der Piezotintendruckköpfe erreichen, sind alle Bubble-Jet-Hersteller dazu übergegangen, austauschbare Tintendruckköpfe, bei denen mit der Tinte auch der Siliziumchip ausgetauscht wird, anzubieten.

1: Kontaktplatte, 2: Bubble-Jet-Chip, 3: Kappe, 4: Alu-Trägerplatte, 5: Tintenzufuhrloch, 6: Gehäuse, 7: Filter, 8: Schwamm, 9: Deckel

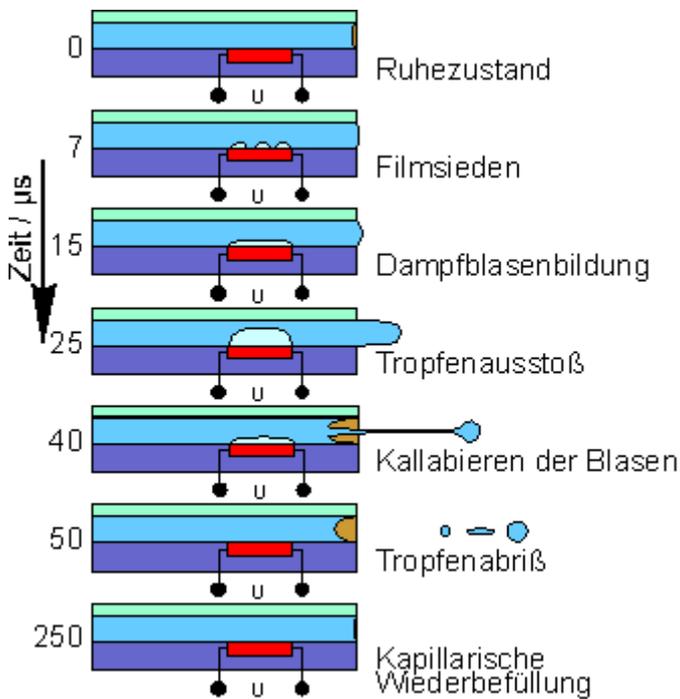
Es liegt auf der Hand, dass sich durch die gleichzeitige, teilweise automatische Bearbeitung vieler miniaturisierter Chips auf einem Wafer die Herstellkosten trotz hoher Investitions- und Entwicklungskosten¹ für Reinräume und Maschinen drastisch reduzieren lassen. Nur noch die Chipfläche, die Zahl und Art der Prozesse, die Stückzahl und Fertigungsausbeute, hingegen jedoch nicht die Düsenzah und Druckauflösung des Bubble-Jet-Chips, bestimmen seine Kosten. So kostet ein moderner 300 dpi-Druckkopf mit mehr als hundert Düsen heute weniger als ein Zehntel eines früheren mit nur zwölf Piezoröhrchen.

Da Bubble-Jet-Druckköpfe, wie beschrieben, in vielen Schritten auf die gleiche Weise wie Integrierte Schaltungen hergestellt werden, ist es naheliegend, letztere gleich mit in den Chip zu integrieren, den Chip also zum Mikrosystem zu machen. Canon ging hier mit einer integrierten Diodenmatrix in den Druckköpfen des BJ-10e und CLC-10 den ersten Schritt. Xerox folgte 1993 mit einem komplett integrierten Serien-Parallelwandler und Leistungsverstärkern in seinem Druckkopf mit 128 Düsen. Es ist anders auch kaum vorstellbar, wie die vielen Aktoren des Xerox-Druckkopfes alle einzeln elektrisch angeschlossen werden sollten.



Funktion

Die [Bildsequenz 7](#) zeigt schematisch wie eine Bubble-Jet-Düse schnell fliegende Tropfen erzeugt. Zunächst wird das winzige Heizelement, von dem fast 50 Tausend auf einem Pfennigstück Platz fänden, wenige Mikrosekunden bestromt, wodurch es sich augenblicklich auf etwa 500 °C (!) erhitzt. An der Grenzfläche zur Tinte werden dabei immerhin noch über 300 °C erreicht [6,7]. Somit übertrifft ein Bubble-Jet-Heizelement die Flächenheizleistung der Sonnenoberfläche um das zwanzigfache, weshalb ein nur wenige Mikrosekunden zu langer Impuls das Heizelement sofort zerstören würde.



Hier können Sie mit freundlicher Genehmigung des **Lehrstuhls für Feingerätebau und Mikrotechnik** an der Technischen Universität München zwei Videosequenzen laden:

1. Dampfblasenbildung auf dem Heizelement bei 300 °C (175kB)

2. Tropfenausstoß ($v_T = 8$ m/s) aus einem Bubble-Jet-Tintendruckkopf (204kB)

Bild 7: Tropfenerzeugung mit einem Bubble-Jet-System (=> [Animation](#))

Schlagartig beginnt die Tinte über dem Heizelement in einem feinen Film zu siedeln, woraus sich nach 15 μ s eine geschlossene Dampfblase bildet. Dadurch, dass mit der Blasenbildung der Wärmestrom vom Heizelement zur Tinte fast vollständig unterbrochen wird, hat das Bubble-Jet-System selbstregelnde Eigenschaften - ein wichtiger Vorteil dieses Prinzips. Die Dampfblase treibt mit hohem Druck (bis 10 bar) einen Tintentropfen aus der Düse, wobei Fluggeschwindigkeiten von 10 m/s und darüber die Regel sind ([Bild 8](#)). Nach maximal 40 μ s ist die Blase wieder in sich zusammengefallen (kollabiert), doch dauert es fast 200 μ s, bis neue Tinte durch Kapillarkräfte nachgesaugt worden ist.

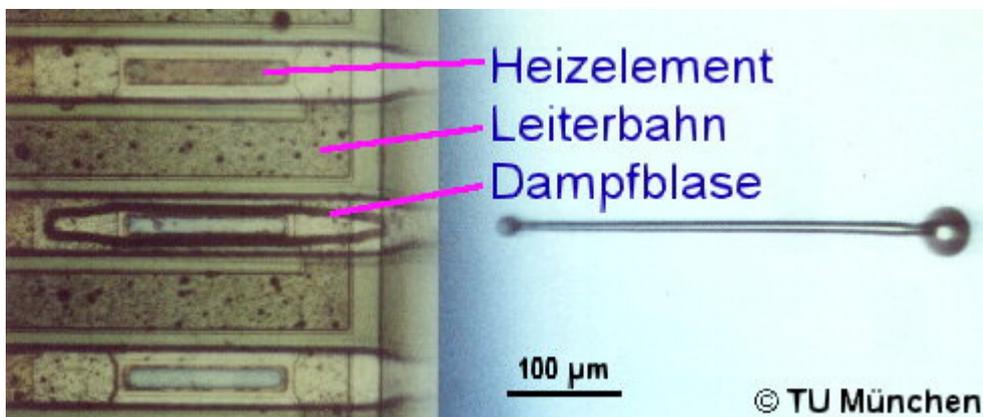


Bild 8: 10 m/s und mehr Fluggeschwindigkeit erreichen die Bubble-Jet-Tropfen in wenigen Mikrosekunden

Edge- und Sideshooter

[Bild 9](#) stellt die zwei Bubble-Jet-Varianten dar, die es von Beginn an gab. Der Systemerfinder Canon entschied sich wie Xerox für den Edgeshooter. Fast zeitgleich entwickelte Hewlett-Packard den Sideshooter [4,5], den baugleich derzeit auch Olivetti herstellt. Tabelle 1 listet einige aktuelle Druckköpfe dieser vier Hersteller auf:

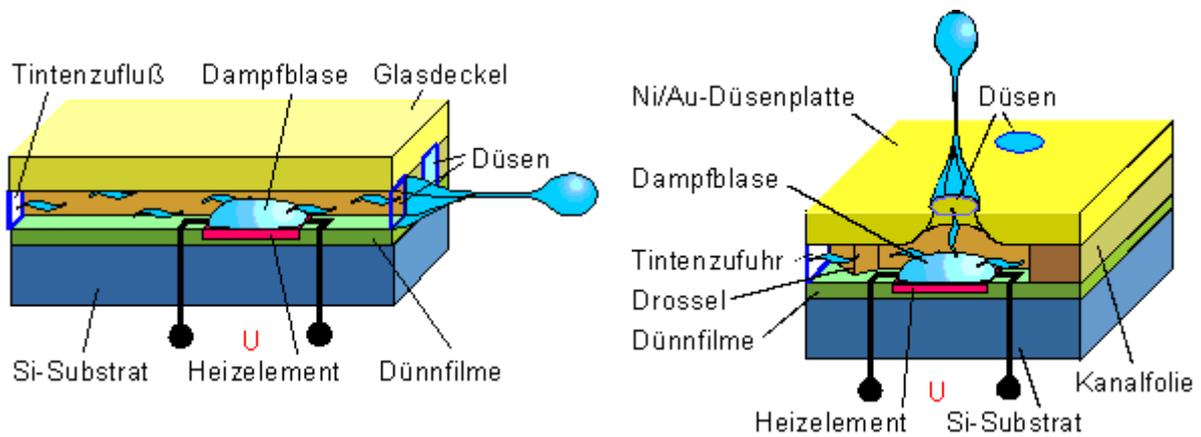


Bild 9: Die zwei bekannten Varianten des Bubble-Jet-Prinzips: Links der Edgeshooter (heute nur noch von Canon hergestellt) und rechts der Sideshooter (hergestellt von Hewlett Packard, Lexmark, Olivetti und Xerox)

Hersteller / Typen ¹	Farbe	Düsen	Auflösung ²
Edgeshooter			
Canon: BJ-200	mono	64	360 dpi
Canon: BJ-600	color	64	360 dpi
Canon: CLC-10	color	128	400 dpi
Canon: BJ-A1	color	256	400 dpi
Xerox:	mono	128	300 dpi
Sideshooter			
HP: DeskJet 520	mono	50	300 dpi
HP: DeskJet 560 C	color	48	300 dpi
HP: DeskJet 1200 C	color	104	300 dpi
Olivetti: JP-350	mono	50	300 dpi

Tabella 1: Bubble-Jet-Tintendruckwerke ¹⁾ Fast alle hier aufgeführten Druckwerke, bzw. Drucker tauchen überdies unter anderer Bezeichnung als Fremdprodukte bei anderen Herstellern auf. ²⁾ Die hier angegebene Auflösung lässt sich in einem Druckdurchlauf erzielen.



Der Edgeshooter spritzt seine Tropfen, wie der Name schon ausdrückt, um die Ecke, also senkrecht zur Entstehungsrichtung der Blasen aus. Beim Sideshooter, bei dem sich über den Heizelementen und Tintenkanälen eine Düsenplatte befindet, bewegen sich Blase und Tropfen gleichgerichtet. Durch die homogene Düsenplatte gelingt es beim Sideshooter viel einfacher und sicherer als beim Edgeshooter, definierte Benetzungsverhältnisse an den Düsenlöchern herzustellen. Beim Edgeshooter dagegen bestehen die Düsenränder aus den unterschiedlichsten Materialien, die sich auch erst nach dem Heraussägen aus dem Wafer entzweigend beschichten lassen.

Auf der anderen Seite benötigt der Sideshooter mehr Düsenfläche, was insbesondere bei zukünftigen Violdüsen-Systemen mit höheren Auflösungen zu Problemen führen könnte. Außerdem prallt die Tinte nach dem Kollabieren der Dampfblase mit voller Wucht auf die Oberfläche des Heizelements, weshalb die Lebensdauer der Sideshooter-Druckköpfe im allgemeinen geringer ist als die der Edgeshooter. Für alle Bubble-Jet-Systeme gleichermaßen gelten sehr hohe Anforderungen an die Tinten - viel höhere als bei Piezosystemen. Wegen der hohen Temperaturen und des

Funktionsprinzips werden bisher fast nur auf Wasserbasis gemischte Lösemitteltinten eingesetzt.

Vergleich Piezo-Jet - Bubble-Jet

Selbst wenn man nur eine einfache Klasseneinteilung der einigermaßen erfolgreichen Tintendruckverfahren vornimmt, lassen sich fünf unterschiedliche Systeme mit piezoelektrischen Wandlern und zwei mit thermischen Wandlern aufzählen (Bild 3). Tabelle 2 vergleicht sie in ihren wesentlichen Merkmalen.

Parameter:	Spritzfrequenz(1)	Auflösung	Systemlänge(2)	Aktorlänge	Düsenabstand	Spannung	Energie / Tropfen	Herstellkosten	Leistung
Verfahren	kHz	dpi	mm	mm	µm	V	µJ	.	.
Piezoröhrchen	10	240	30	13	353	120	9	sehr hoch	++
Piezoplanar Edgeshooter	4	360	40	2,8	282	150	12	hoch	++
Piezoplanar Sideshooter	20	360	2	1,0	282	80	5	hoch	++
Piezolamellenwandler	6	300	30	ca. 5	282	25	5	hoch	++
Piezoscherwandler	5	150	5	5	169	50	.	mittel	++
Bubble-Jet-Edgeshooter	5	400	0,5	0,15	64	30	30	niedrig	+
Bubble-Jet-Sideshooter	4	300	0,5	0,1	169	30	30	niedrig	o

Tabelle 2: Vergleich der Tintendruckprinzipien (1) teilweise Laborwerte (2) Gesamtlänge aus Düse, Kanal und Aktor

Die Werte in den Spalten Aktorgröße und Düsenabstand machen deutlich, dass es nur beim Bubble-Jet-Design gelingt, Wandler und Düsen in gleicher Größenordnung herzustellen. Bild 10 veranschaulicht auf andere Weise eindrucksvoll, welche Welten zwischen den Wandlerabmessungen von Piezo- und Bubble-Jet-Prinzipien liegen. Bubble-Jet-Heizelemente sind dabei nicht größer als die Tropfen und Punkte, die sie erzeugen und mit bloßem Auge gar nicht sichtbar.

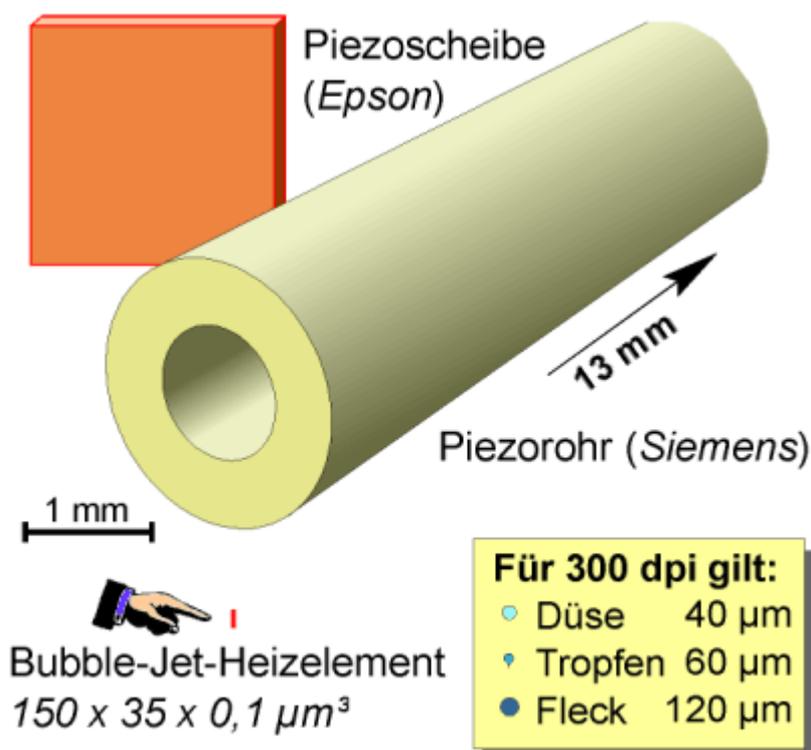


Bild 10: *Noch zum Anfassen geeignet, die Piezowandler - mikroskopisch klein dagegen und etwa genauso groß wie die Punkte am Papier - die Bubble-Jet-Heizelemente*

Der scheinbare Piezovorteil, lange Lebensdauer zu versprechen, ist trügerisch. Im rauen Alltagsbetrieb kann ein Druckkopf schon einmal beispielsweise durch Papierstau oder Umwelteinflüsse so beschädigt werden, dass ein Austausch nötig wird. Ein Ersatzpiezodruckkopf kostet jedoch beinahe soviel wie der ganze Drucker, also zehnmal soviel wie die der Bubble-Jet-Konkurrenz.



Optimierung der Tintendrucktechnik

Fragt man Kunden und Hersteller, was sie von der zukünftigen Entwicklung des Tintendrucks erwarten, so erhält man ganz unterschiedliche Antworten:

Kunden interessieren sich für:

- bessere (Druck)qualität
- bessere Leistungsmerkmale (z. B. Farbe)
- höhere Druckgeschwindigkeit
- niedrige Preise

Die Hersteller wollen dagegen:

- niedrige Herstellkosten
- Nutzung eigener Schutzrechte und Know-hows
- eigene Produkt- und Technologiekontinuität
- Verfügbarkeit und Sicherheit der Herstellprozesse
- minimale externe Abhängigkeit

Außerdem ist es "Öffentliches Interesse":

- Know-how in Deutschland bzw. Europa aufzubauen und zu halten,
- technologisch Spitze zu sein,
- hohe Wertschöpfung,
- beschäftigungswirksame Produktionen und
- umweltverträgliche Produkte und Produktionsprozesse zu haben.

Heute bekannte Tintendrucktechnologien erfüllen viele dieser Forderungen nur unzureichend. Wo heute mit 50 Düsen und 300 dpi in schwarzweiß noch leidlich schnell gedruckt werden kann, sollen morgen in der gleichen Zeit bei farbigen 600 dpi 16-mal (!) so viele Punkte gedruckt werden können. 1000 Düsen (Aktoren) in einem Tintendrucker müssen in wenigen Jahren dann eher die Regel als die Ausnahme sein.

Klar, dass das weder mit konservativer Bubble-Jet- und schon gar nicht mit der Piezotechnik herstell- und vor allem bezahlbar bleibt.

Konsistenz in Design und Herstellung

Es ist deshalb schon in der Entwurfsphase eines neuen Tintendruckkopfes auf seine Konsistenz in Design und Herstellung zu achten, d. h., dass sowohl seine Konstruktionselemente als auch die dazu notwendigen Herstellprozesse zu den geforderten Leistungsmerkmalen passen.

Beim Design ist deshalb folgendes anzustreben:

- subminiaturisierte Konstruktionselemente
- (sehr) wenige teure Teile
- enge Toleranzen nur in einem Teil
- integrierte Ansteuerung
- integrierte Selbstüberwachung
- geringe Anzahl von Anschlusskontakten
- umweltfreundliche Materialien

Für die Herstellung ist gefordert:

- mikromechanische Fertigungsprozesse
- planare Herstellprozesse
- (chemo)physikalische Verbindungstechniken
- möglichst kein Kleben
- keine spanende Bearbeitung
- weitgehende Fertigung im Nutzen (z. B. auf Wafern)
- automatische Fertigung

Tabelle 3 zeigt jedoch, dass es mit der Konsistenz bei den zur Zeit verfügbaren Tintendruckköpfen nicht weit her ist. Dadurch wird die Fertigung fehleranfällig, was die Ausbeute senkt und die Kosten nach oben treibt. Mit den konservativen Techniken wäre es auch viel zu riskant, Druckauflösung und Düsenzahl noch deutlich weiter zu steigern. Den einzig denkbaren Weg aus diesem Dilemma bietet die Mikrosystemtechnik.

Druckkopftyp:	BJ-Side-shooter (DeskJet-1200)	BJ-Edge-shooter (BJ-10)	BJ-ES + Ansteuerung. (Xerox)	Piezosystem (Epson Stylus)	[Backshooter Prototyp (neu¹)]
Design					
Subminiaturisierte Konstruktionselemente	+	+	++	-	++
Wenig teure Teile	+	+	0	-	++
Enge Toleranzen nur in einem Teil	--	--	--	--	+
Integrierte Ansteuerung und Selbstüberwachung	-	0	++	--	++
Geringe Anzahl von Anschlusskontakten	0	0	++	--	++
Herstellung					
Mikromechanische Fertigungsprozesse	-	-	+	--	++
Planare Herstellprozesse	++	++	++	--	++
Vermeidung von Klebungen	0	0	0	0	+
Vermeidung spanender Bearbeitung	++	+	--	+	++
Anteil der Fertigung im	0	-	-	--	++

Nutzen					
--------	--	--	--	--	--

Tabelle 3: Herstell- und Designkonsistenz von Tintendruckköpfen (Erfüllungsgrad: ++ sehr gut, + gut, o zufriedenstellend, - weniger gut, - - mangelhaft (¹ siehe Teil 2))



Zwang zur Mikrosystemtechnik

Mikrosystemtechnik beim Tintendruck bedeutet, die schon heute bei Bubble-Jet-Chips übliche Fertigung in Dünnschichttechnik durch mikromechanische Fertigungsschritte [3], wie z. B. das anisotrope Siliziumätzen, und die Integration von elektrischen Schaltungen zu ergänzen.

Durch die Mikromechanik gelingt es, besser als allein durch Dünnschichttechnik, räumliche Strukturen (Düsen, Kanäle) herzustellen. Mit der Integration von elektronischen Leistungsschaltern, Serien-Parallel-Wandlern und Sensoren lässt sich zunächst die Zahl der Anschlusskontakte und damit der Flächenbedarf enorm reduzieren, und dennoch gleichzeitig die Funktionalität erhöhen. So sind beim Xerox-Kopf, dem weltweit ersten Mikrosystem-Tintendruckchip mit seinen 128 Düsen statt der sonst nötigen 140 Kontakte nur noch zehn (!) notwendig.

Kontakte und Leiterbahnen in Bubble-Jet-Tintendruckköpfen beanspruchen wegen der notwendigen Stromtragfähigkeit von etwa 200 mA viel Platz. Der Größenvergleich verschiedener Bubble-Jet-Chips in Tabelle 4 zeigt eindrucksvoll, wie sich durch die Mikrosystemtechnik der Flächenbedarf je Düse und damit die Herstellkosten reduzieren lassen.

Hersteller - Typ	Düsen- zahl	Siliziumfläche / mm ²	Mikrosystem- technik	Siliziumfläche je Düse / mm ²	rel. Vergleich DeskJet
Hewlett Packard DeskJet	50	39	keine	0,78	100%
Inkjet Systems MT98	50	61	keine	1,22	158%
Canon BJ-10	64	32	Diodenmatrix	0,50	63%
Xerox 128 Düsenkopf	128	2 x 27 ¹	CMOS	0,42	54%
[Backshooter- Prototyp ²]	(50)	20	CMOS	0,36	46%

Tabelle 4: Durch Mikrosystemtechnik lässt sich die je Düse nötige Chipfläche enorm reduzieren (¹ Beim Xerox-Chip besteht auch die Deckplatte mit den anisotrop geätzten Kanälen aus Silizium, ² siehe Teil 2)).

Im zweiten Teil dieses Beitrages wird ein in Deutschland entwickelter Mikrosystem-Tintendruckchip vorgestellt, der keinen der Nachteile bekannter Bubble-Jet Systeme mehr aufweist.



[Zum zweiten Teil](#)

Literatur

1. Heinzl, J.; Hertz, C. H.: Inkjet printing. Advances in electronics and electron physics, Academic Press, New York, Vol. 65, S.91-171 (1985)
2. Heinzl, J.; Rosenstock, G.: Lautloser Tintendruck für Schreibstationen. Siemens-Zeitung 51

- (1977) S.219-221
3. Heuberger, A. (Hrsg): Mikromechanik. Springer Verlag, Berlin 1991
 4. Hewlett-Packard (Hrsg): Diverse Beiträge zum Bubble-Jet-Verfahren. Hewlett-Packard Journal, Bd.36, No. 5, 1985
 5. Hewlett-Packard (Hrsg): Diverse Beiträge zum Bubble-Jet-Verfahren. Hewlett-Packard Journal, August 1988
 6. Pöppel, J.: Sensor- und Aktoreigenschaften von Bubble-Jet-Heizelementen in Tintenschreibwerken. Dissertation Technische Universität München (1991)
 7. Runge, W.: Berechnungsmodell thermischer Tintenschreibwerke. Dissertation Technische Universität München, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Nr. 219 (1993)
 8. Wehl, W.: Akustik und Fluidmechanik in Kanälen und Düsen von Tintenschreibwerken. Dissertation Technische Universität München (1984) ([Download als PDF-Datei](#)  1,1 MB)
 9. Wehl, W.: Farbe macht das Drucken schön. DOS International. 1991, 3, S.120-127
 10. Wehl, W.; Bader, G.: **Nur nicht kleckern** (Tintendrucker: Von der Fontäne zur Mikrodüse). CHIP 1994, 8, S.104-112

Quellennachweis

Bild 2, 8: Lehrstuhl für Feingerätebau, Technische Universität München
restliche Bilder: Autor

Tintendrucktechnologie Paradigma und Motor der Mikrosystemtechnik

F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik Messtechnik

Teil2: Jahrgang 103 (1995) Heft 9, Seite 486 - 491

Teil 2: Entwicklung eines Mikrosystem-Tintendruckkopfes in Deutschland

Abstract

Beim Tintendruck führt zukünftig kein Weg mehr an der Mikrosystemtechnik vorbei. Eine richtungweisende Idee aus Deutschland, alle Systemelemente, wie Düsen, Kanäle, Aktoren einschließlich einer CMOS-Ansteuerung in einem einzigen Siliziumchip unterzubringen, könnte die Welt der Tintendrucker revolutionieren. Die Chancen für die deutsche Industrie damit verlorene Marktanteile zurückzugewinnen stehen jedoch schlecht, denn die Rechte wurden den Erfindern genommen und liegen heute in den USA auf Eis...

Inkjet technology: Paradigm and driving force of micro system technology.

In future micro system technology is cogent necessary in the field of inkjet printing. A pioneering idea coming from Germany combines all system elements like nozzles, channels, actuators including a CMOS-driver in a single silicon chip and might revolutionize the world of inkjet technology. Yet the chances for the German industry to get back lost market shares are bad, because the property rights were taken from the inventors and put on ice in the USA today...

Entwicklung eines Mikrosystem- Tintendruckkopfes in Deutschland

Wissend um die design- und herstellbedingten Schwächen bekannter Tintendruckköpfe, die im ersten Teil dieses Beitrages ausführlich erläutert wurden, ersann man unter Federführung von Siemens 1990 einen völlig neuen Chipaufbau [4,6,9]. Dieser sollte zwar ebenfalls nach dem Bubble-Jet-Prinzip arbeiten, Bild 1 zeigt jedoch, dass alle Funktionselemente, d. h. die Heizelemente, die Kanäle und die Düsen in nur einem Siliziumchip untergebracht sind (vgl. Teil 1, Bild 9).

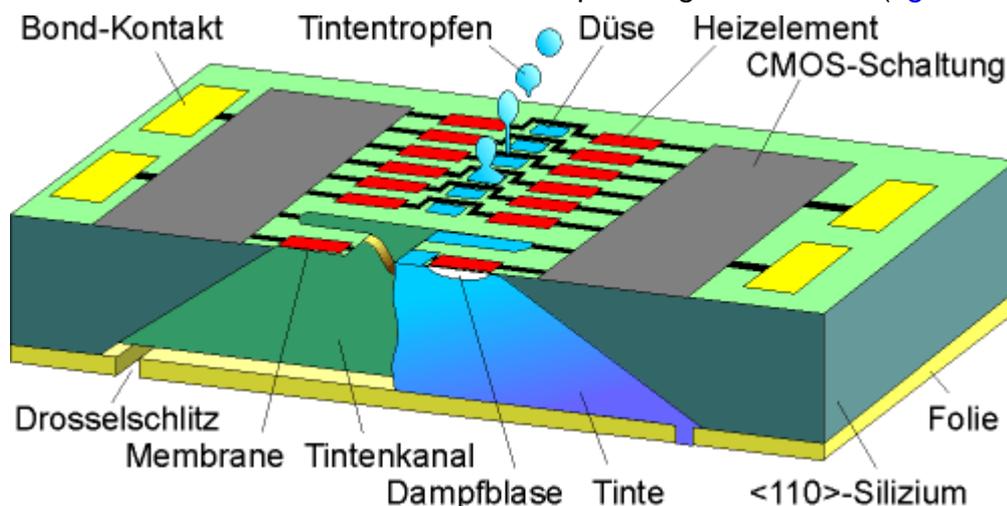


Bild 1: Schematische Zeichnung des Backshooter-Mikrosystems (halb mit Tinte gefüllt)

Zudem lässt sich auf dem selben Chip noch eine 60-V-CMOS-Ansteuerung mit Serien-Parallel-Wandler, Leistungsverstärkern und einem Temperatursensor integrieren. Das veredelt den Druckkopf zum mustergültigen Mikrosystem (Mikromechanik und Mikroelektronik werden in nur einem Teil hergestellt) (Bild 2). Tintendruckköpfe müssen, da stets im direkten Kontakt mit der Umwelt agierend, schon vielen Ansprüchen gerecht werden. Die mikromechanische Herstellung und Integration einer CMOS-Schaltung treibt die Anforderungen, von den die wichtigsten in Tabelle 1 zusammengefasst sind, jedoch nochmals weiter in die Höhe.

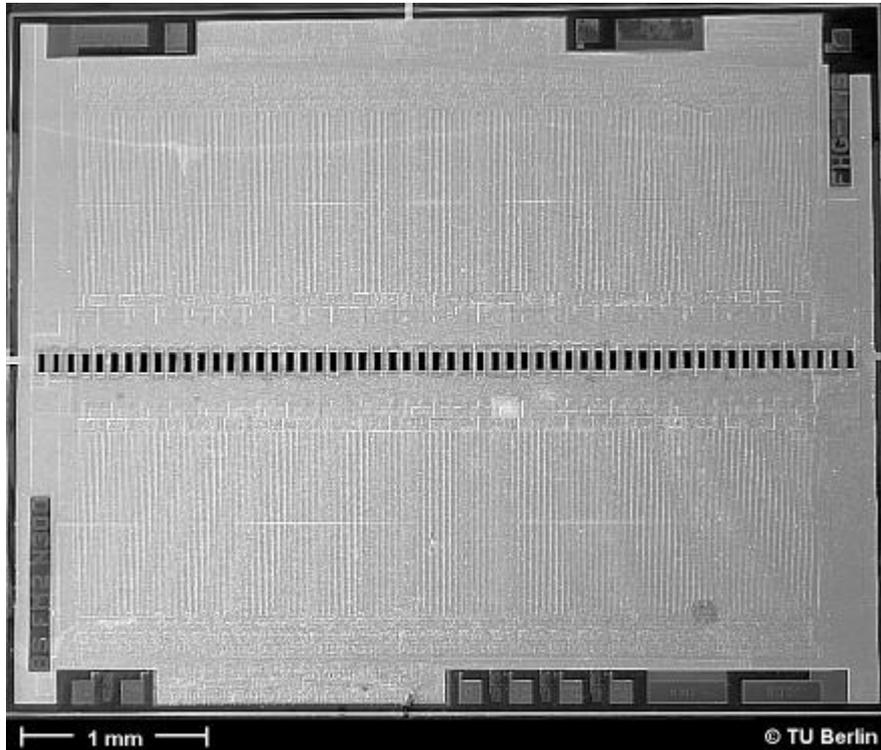


Bild 2: Eine REM-Aufnahme des 300 dpi Mikrosystem-Tintendruckkopfes mit 50 Düsen. Die Außenabmessungen betragen nur 4,9 x 4,0 mm².

<p>mechanisch / thermisch</p> <ul style="list-style-type: none"> • berührungsunempfindlich • klebedicht und -beständig • isoliert • Wärmeabfuhr • stabil • automatisch reinigbar • lagegenau 	<p>funktionell</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tropfen- <ul style="list-style-type: none"> ○ Frequenz 10.000 Tropfen/s ○ Geschwindigkeit 10 m/s ○ Masse 100 ng (variierbar) • kein Übersprechen • 600 dpi = 42 µm Punktabst. • Selbstüberwachung • einfach befüllbar
<p>elektrisch</p> <ul style="list-style-type: none"> • spannungsfest 60 V • Spitzenstrom 5 A • EMV-beständig • Datenmenge 4 MBit/s • Kontakte elektrostatisch geschützt 	<p>fertigungstechnisch</p> <ul style="list-style-type: none"> • CMOS-kompatibel • Anisotropes Ätzen • Spezielles Silizium • TAB / Bonden • Kleben • Galvanik • Kunststofftechnik
<p>umweltspezifisch</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatur <ul style="list-style-type: none"> ○ Lagerung -25 °C - +70 °C ○ Betrieb 0 °C - +35 °C • Tinte, Tau, Korrosion • Staub, Papier • Luft, Rauch • Erschütterungen 	<p>kommerziell</p> <ul style="list-style-type: none"> • Marktentwicklung • Technologieentwicklung • Produktpalette • Infrastruktur • Investitionen • Räume • Personal

Tabelle 1: Anforderungen an ein Tintendruck-Mikrosystem

Die neue Idee erschien von Anfang an so vielversprechend, dass sich Siemens zusammen mit dem Lehrstuhl für Feingerätebau (TU München), dem Institut Technologien der Mikroperipherik (TU Berlin) und dem Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (FhG-IMS Duisburg) an ihre technische Umsetzung machte.

Der "Backshooter" schießt zurück

Je zwei symmetrische Aktoren pro Düse heizen die Tinte durch eine hauchdünne Membran im Inneren des Siliziumchips. Dadurch entstehen Dampfblasen, die ihrerseits mit großer Gewalt einen Tropfen aus der Düse treiben [12]. Getauft wurde dieser Aufbau Backshooter, da sich hier im Unterschied zu Side- und Edgeshooter Blasen und Tropfen entgegengesetzt bewegen.

Wie Bild 3 veranschaulicht, verfügt das klassische Bubble-Jet-System mit Aktor und Düse nur über zwei Funktionsblöcke (gestrichelt umrandet). Durch die integrierte Ansteuerung erweitert sich die Struktur auf acht Blöcke. Die CMOS-Integration spart wertvolle Siliziumfläche und reduziert die Zahl der elektrischen Verbindungen enorm. Dadurch steigt zugleich Ausbeute und Zuverlässigkeit des Backshooters. Die Mikrosystemtechnik erlaubt es, sowohl alle digitalen Schaltungsteile als auch analoge Größen, wie z. B. die Chiptemperatur zu überwachen. Die Druckersteuerung kann diese Informationen regelmäßig über die bidirektionale Datenleitung abfragen und auswerten [13].

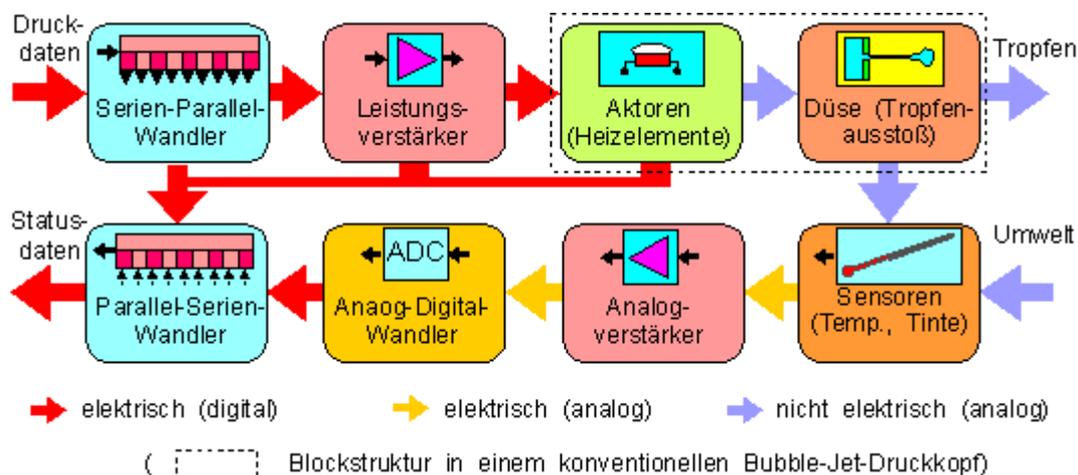
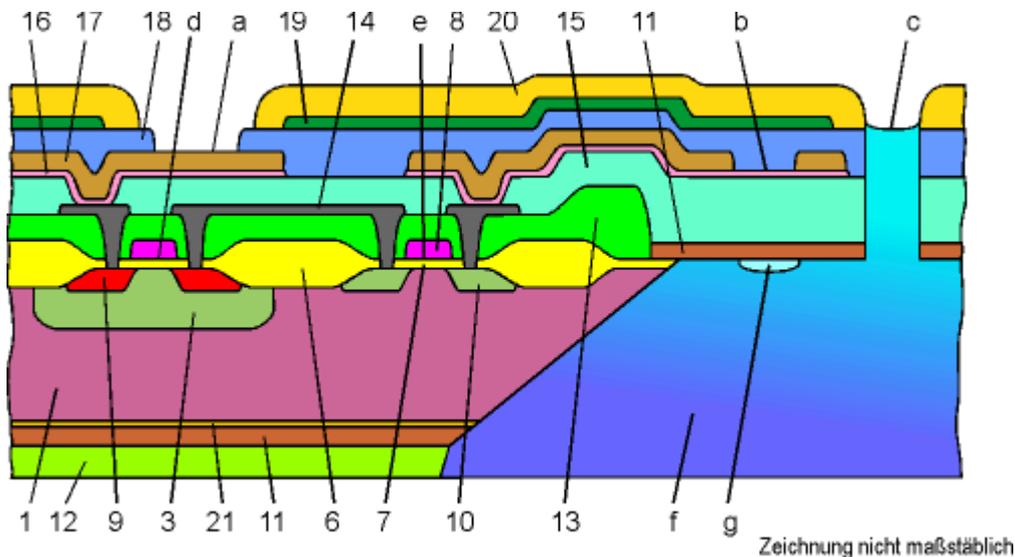


Bild 3: Stoff- und Signalfluss im Backshooter-Mikrosystem-Tintendruckkopf (gestrichelt umrandet die Blockstruktur konventioneller Bubble-Jet-Druckwerke)



CMOS-Herstellung immer zuerst

Durch die integrierte CMOS-Schaltung erhöht sich die Zahl der einzelnen Herstellprozesse und abgeschiedenen Schichten enorm. Da viele Mikromechanikprozesse und deren Hinterlassenschaften (z. B. Kaliumionen) "CMOS-feindlich" sind, d. h. CMOS-Prozessanlagen nachhaltig verunreinigen können, ist es unumgänglich, zuerst die Halbleiterschaltung zu fertigen. Der (nicht maßstäbliche) Schnitt durch den Chip in Bild 4 zeigt, dass die in einem 2 µm-N-Wannen-Prozess hergestellten Halbleiterstrukturen direkt mit den Bubble-Jet-Dünnschichten kombiniert werden. Über den Kanälen bilden die Schichten mit den Heizelementen "Membranbrücken", die ohne Siliziumbasis förmlich in der Luft, bzw. Tinte hängen.



Schichten: [1] Substrat (*p*-dotiert, $\langle 110 \rangle$ -Silizium); [3] N-Wanne (P^+ Implantation + Diffusion); [4] Padoxid (thermisches SiO_2); [5] Maske für Nr. 6 (LPCVD- Si_3N_4); [6] Feldoxid (thermisches SiO_2); [7] Gateoxid (thermisches SiO_2); [8] Transistorschicht (Polysilizium); [9] PMOS Drain-Source-Gebiet (B^+ Implantation + Diffusion); [10] NMOS Drain-Source-Gebiet (As^+ Implantation + Diffusion); [11] Ätzstoppschicht (LPCVD- Si_3N_4); [12] Rückseitenschutz (PECVD- SiO_2); [13] Dotiertes Silikatglas (BPSG, CVD SiO_2); [14] 1. Metallisierungsschicht (Al); [15] Planarisierendes Oxid (USG, CVD SiO_2); [16] Widerstandsschicht (HfB_2); [17] 2. Metallisierungsschicht (Al); [18] Thermische Drosselschicht (PECVD- Si_3N_4); [19] Galvanikbasisschichten (Ti / Cu); [20] Trägerschicht (Ni / Au); [21] Polyoxidation (thermisches SiO_2).

Elemente: [a] Bondpad (Al); [b] Heizelement (HfB_2); [c] Düse/Tinte; [d] PMOS-Transistor; [e] NMOS-Transistor; [f] Tintenkanmer / Tinte; [g] Dampfblase

Hergestellt werden diese Brücken mit den "Vergrabenen Heizelementen" [1] indem man auf der Oberseite des Wafers zuerst alle Schichten abscheidet und strukturiert. Dort wo später die Tintenkanäle liegen, deckt eine dünne LPCVD-Siliziumnitridschicht das Silizium ab (Kurze Erklärung zur Fachterminologie am Ende). Über der USG-Schicht (Siliziumdioxid) folgt Hafniumdiborid als Widerstandsmaterial und Aluminium (Metal 2) für die Leiterbahnen. Darüber liegt eine mit $1,5 \mu m$ relativ dicke Lage PECVD-Siliziumnitrid, die ihrerseits von einer $3 \mu m$ dicken Nickel- und einer $1 \mu m$ dicken Gold-Galvanikschicht überzogen ist.

Senkrechte Kanalwände im Silizium durch anisotropes Ätzen

Im Anschluss an die Bearbeitung der Oberseite wird eine auf der Rückseite aufgebraute LPCVD-Siliziumnitridschicht für das anisotrope Ätzen der Kanäle lokal geöffnet. Um die gewünschte Kanalform zu erhalten benötigt man für den Backshooter sogenannte $\langle 110 \rangle$ -Wafer, bei denen der Siliziumeinkristall also nicht in der sonst üblichen $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung gezogen wurde [5]. Die Wafer werden in einem doppelwandigen Gefäß (Bild 5) bei etwa $80 \text{ }^\circ C$ in einer 40%igen Kalilauge (KOH) geätzt [9]. Obwohl der Ätzprozess quer durch den ganzen Wafer mehr als vier Stunden dauern kann, ist er sehr präzise und auch preiswert, lassen sich doch in einem Bad gleichzeitig 25 Wafer ätzen [8]. Da, wie erwähnt, die unterste Schicht der Oberseite ebenfalls aus LPCVD-Siliziumnitrid, das inert gegen Kalilauge ist, besteht, kommt der Ätzvorgang hier automatisch zum Stehen.

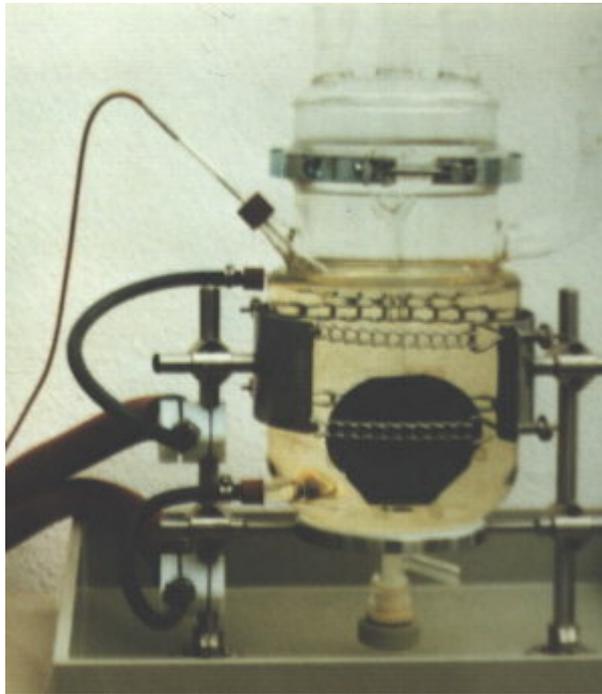


Bild 5: Ein einfaches doppelwandiges Gefäß genügt, um gleichzeitig bis zu 25 Wafer anisotrop in 40prozentiger KOH (Kaliumhydroxid) zu ätzen. Das Bad wird von außen mit Öl auf 80 °C erhitzt.

Bei $\langle 110 \rangle$ -Silizium erreicht man ein Ätzratenverhältnis von mehr als 100:1 (Bild 6a und b). Das bedeutet, dass bei einem 400 μm dicken Wafer die Öffnungen an der Nitridmaske um weniger als 4 μm seitlich unterätzt werden. Voraussetzung ist allerdings eine auf mindestens 0,3 Grad exakte Ausrichtung der Ätzmaske zu einer $\langle 111 \rangle$ -Kristallebene. Neben der geringen Winkeltoleranz in horizontaler Richtung, müssen die nahezu ätzbeständigen $\langle 111 \rangle$ -Kristallebenen zugleich genau senkrecht zur Oberfläche stehen. Schon ein Fehler von nur 0,1 Grad führt an den Düsen zu einem seitlichen Kanalversatz von 700 nm, bei absoluten Kanalbreiten von nur 15 μm (600 dpi) gerade noch tolerierbar.

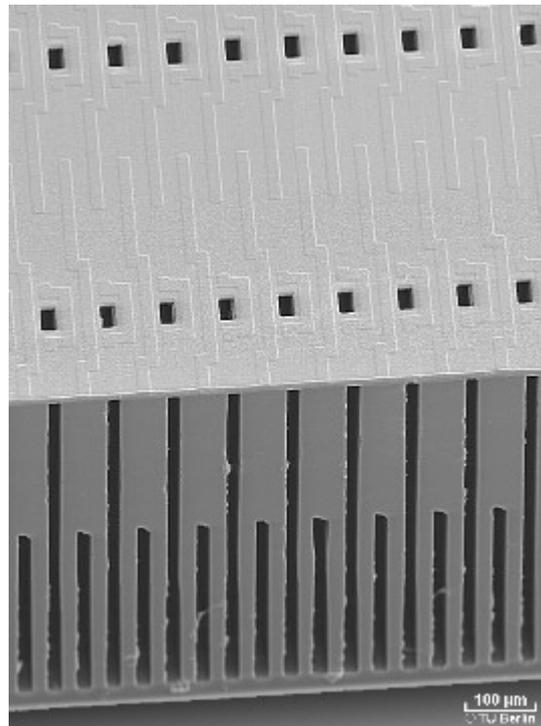
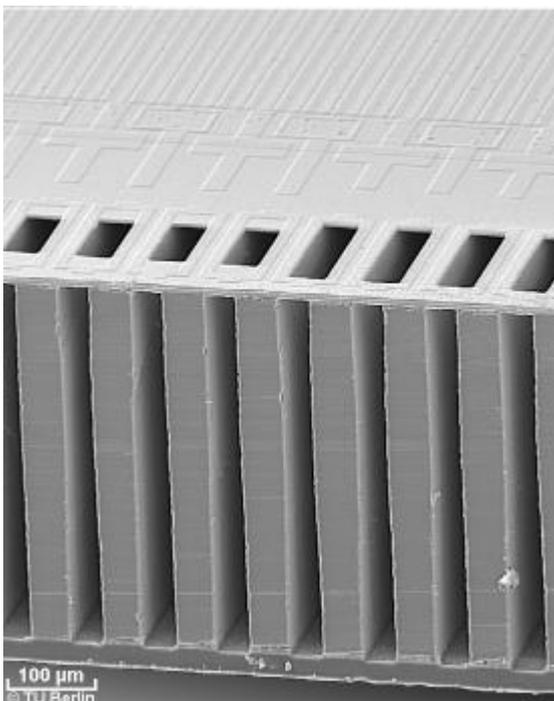


Bild 6a,b,c: Beeindruckend zeigen die REM-Aufnahmen, in welcher Präzision sich die Kanäle, Düsen und anderen Funktionselemente in $\langle 110 \rangle$ -Silizium

herstellen lassen

links: aufgesägter 300 dpi-Backshooter-Chip (Variante mit verschiedenen Düsenabmessungen)

rechts: 600 dpi-Backshooter-Chip (zur Erzielung einer besseren Druckqualität werden direkt benachbarte Kanäle etwas seitlich gegeneinander versetzt)

In Konsequenz der einzig mit <110>-Silizium möglichen Herstellung von vertikalen Kanalwänden entstehen zugleich seitliche Kanalschrägen von genau 30 Grad. Deshalb müssen die Kanalöffnungen auf der Unterseite um die vierfache Waferdicke ($2 / \sin 30^\circ$) länger sein als die gewünschte Membranlänge für die zwei Heizelemente und die Düse. 400 µm dicke Wafer sind insofern ein vertretbarer Kompromiss zwischen ätzbedingter Größe der Tintenkammer und ausreichender Bruchfestigkeit in der Fertigung.

Galvanik, Rückfolie und CMOS-Prozess

Die galvanische Deckschicht erfüllt viele Forderungen an den Backshooter-Chip auf einmal. Zunächst liefert sie die nötige Steifigkeit und Festigkeit für die Membran über den Tintenkanälen. Weiter schützt sie die darunter liegenden Schichten und dort insbesondere die CMOS-Schaltung vor mechanischer, chemischer und elektrischer Beschädigung (z. B. Kratzer, Korrosion, Kurzschlüsse und EMV). Überdies wird ein Großteil der unvermeidlichen Überschusswärme über das Metall an die Umgebung abgeleitet. Da das Gold zugleich ein exzellentes Maskenmaterial für das Trockenätzen der Düsen ist, erhält man ohne Zusatzaufwand optimal zentrierte Düsenlöcher ([Bild 4](#) und [6c](#))

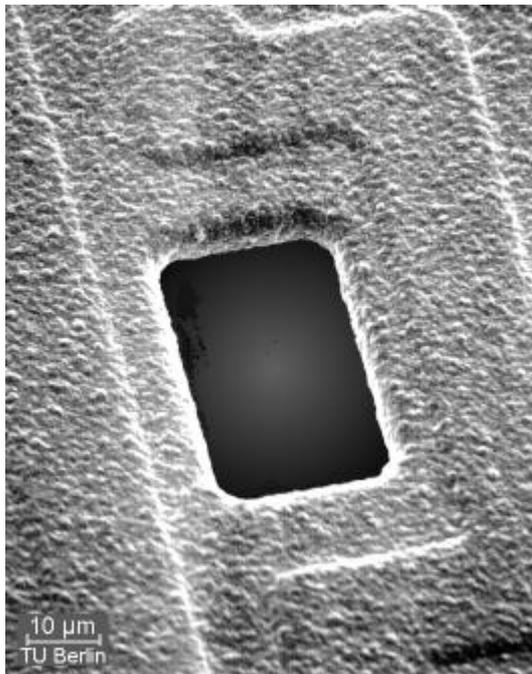


Bild 6c: 600 dpi-Düse (Die um die Düse laufenden Erhebungen entstehen durch tiefer liegende Aluminium-Leiterbahnen)

Um die Tintenammern nach hinten definiert abzuschließen, wird rückseitig eine 20 µm dicke Kunststoffolie auflaminiert. In dieser Folie werden mit einem Excimer-Laser schmale, in der Toleranzlage hingegen unkritische, Schlitze "geschnitten". Die Schlitze wirken als Drosseln und sind so ausgelegt, dass die Tinte einerseits genügend schnell nachfließen kann, andererseits jedoch nicht zuviel Energie aus der Tintenkammer verloren geht. Damit verhindern die Drosseln zugleich unerwünschtes Übersprechen auf benachbarte Düsen.

Da sich das beim Backshooter notwendige <110>-Silizium vom <100>-Standardmaterial der Halbleitertechnik unterscheidet, musste das FhG-IMS den CMOS-Prozess geringfügig anpassen. Die schwächere Elektronenbeweglichkeit auf <110>-Ebenen, wichtig für die Schaltgeschwindigkeit der Transistoren, ließ sich so fast vollständig kompensieren. Der Flächenwiderstand durchgeschalteter Transistoren bleibt jedoch etwas höher als gewohnt.

Die Festlegung der Schichtzahl und -dicke, die Auswahl der Materialien und Fertigungsverfahren verlangt umfassendes Know-how. Da die Verbesserung eines Parameters (z. B. der Spritzfrequenz) oft andere verschlechtert, lässt sich ein Optimum nur über aufwendige Modelle, Simulationen und Prinzipversuche ermitteln [3,6,12].



"Backshooter"-Ergebnisse

Seit der Erfindung des Backshooters 1990 wurden diverse Prinzip- und Funktionsmuster fertiggestellt und untersucht. Deshalb lässt sich schon viel über seine Funktionswerte und die verbleibenden Risiken aussagen. Da es sich beim Backshooter ja ebenfalls um einen Bubble-Jet-Druckkopf handelt, weist er im Vergleich zu piezoelektrischen Tintendruckverfahren prinzipiell die schon im ersten Teil beschriebenen gleichen Funktionsvor- und -nachteile auf [11].

So ist im Gegensatz zur "akustischen" Wiederbefüllung der Piezokonkurrenz [10] ein Bubble-Jet-System darauf angewiesen, dass ausgespritzte Tinte kapillarisch aus dem Vorratsbehälter nachgesaugt wird. Dennoch kann der Backshooter schon bis zu 6000 Tropfen pro Sekunde (300 dpi) "auf Abruf" ausspritzen. Mit etwa 30 μJ benötigt der Bubble-Jet-Tropfenausstoß mindestens dreimal mehr Energie als ein "Piezotropfen" (aber nur 6- der Energie eines mit Nadeldruck erzeugten Punktes). Ein mit 50 Düsen "schwarze Tapete" druckender Kopf verbraucht so 9 W, von denen nur etwa ein Drittel den Chip in Form von erwärmter Tinte verlässt. Der Rest muss über Gehäuse und Anschlussleitungen abgeführt werden.

Bedenken, durch die ultrakurze, wenige Mikrometer kurze Düse würden die Tropfen nicht ausreichend geradeaus fliegen, ließen sich durch Spritztests und Berechnungen ausräumen. Wenn jedoch nur eines der beiden in Serie geschalteten Heizelemente Dampfblasen erzeugen würde, würden die Tropfen schief aus der Düse fliegen. Ansonsten zeigen Simulationsrechnungen [11], dass vor allem ungleichmäßige Oberflächenkräfte an der Düse zum Schiefspritzen führen würden. Die scharf begrenzte Backshooter-Düse hat jedoch herstellbedingt eine sehr homogene, entnetzende Oberfläche (Bild 6c).

Halbtondruck mit dem Backshooter

Zum Druck fotorealistischer Halbtonbilder muss entweder die Auflösung weit über die heute üblichen 300 dpi nach oben getrieben werden oder / und die Punktgröße variiert werden können [7]. Prinzipversuche und Berechnungen zeigen indes, dass sich mit dem Backshooter-Design die Tropfenmasse besser als mit anderen bekannten Bubble-Jet-Systemen gezielt verändern lässt, ohne dass Fluggeschwindigkeit und die maximale Spritzfrequenz darunter leiden.

Dies lässt sich wie folgt begründen: Beim Backshooter sind Aktoren und Düse durch die vergleichsweise große Tintenkommer strömungsmechanisch gut entkoppelt. Das große Tintenvolumen führt zu sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten in der Kammer. Da kinetische Energie vor allem in der Geschwindigkeit steckt ($\sim mv^2$), geht hier kaum Energie verloren.

Vorteilhaft wirkt sich ebenfalls die kurze Düse aus, da nur dort der Druck der Dampfblasen in schnelle Strömung umgesetzt werden muss und die bewegte Tinte fast vollständig ausgestoßen wird. Solange jedoch wenig Energie in unnütze Kanalströmung umgesetzt wird, resultiert die Fluggeschwindigkeit im Wesentlichen aus dem Druck der "explodierenden" Dampfblasen, die Tropfenmasse aus der Blasengröße. Letztere lässt sich allerdings recht einfach durch die Art der elektrischen Ansteuerung (z. B. durch Pulslänge, -zahl oder Vorheizung) steuern. Weiter könnte man auch (zusätzlich) die Heizelemente teilen und so mehrere, unterschiedlich große Blasen entstehen lassen.

Noch gibt es Risiken

Bislang traten bei Herstellung und Betrieb des Backshooter-Tintendruckkopfes nur wenig ernsthafte

Probleme auf. Jedoch wurden einige Anforderungen bis heute noch gar nicht nachgewiesen und sind somit ebenfalls als Risiken anzusehen. Unbekannt, weil nicht durch einen Großversuch belegt, ist die Lebensdauer und Stabilität der Heizelemente und der Membran. Da die Tintenströmung über den Heizelementen recht gering ist, könnte es beim Backshooter verstärkt zu Ablagerungen kommen. Schließlich wird die Tinte mit ihren vielen, auch organischen Bestandteilen bei jedem Tropfenausstoß lokal über den Heizelementen auf über 300 °C erhitzt.

Wegen der besonderen, unabänderlichen Geometrie der anisotrop geätzten Tintenkammern gelang es bisweilen nicht kleine Luftblasen, die im Strömungsschatten der Tintenzufuhrschlitze beim (Wiederbe-) Füllen des Chips haften bleiben, wieder zu entfernen. Deshalb muss die Benetzbarkeit der Kanalstege aus Silizium, die Geometrie der Zufuhrschlitze und die Füllmethode noch verbessert werden.

Das außergewöhnliche Siliziummaterial und die kombinierte Herstellung einer CMOS-Schaltung mit mikromechanischen Strukturen verursachen weitere Schwierigkeiten. Zum einen sind Waferhersteller erst bei größeren Bestellungen bereit, Siliziumstäbe in <110>-Richtung zu ziehen (technisch ist das problemlos möglich). Zum anderen sind die Wafer wegen ihrer geringeren Dicke und der anderen Kristallorientierung deutlich bruchempfindlicher als <100>-Standardmaterial.

Obwohl zwar die Wafer mit einem standardisierten 2-µm-CMOS-Prozess zugeliefert werden können, ist zur Herstellung von Mikrosystemchips eine viel engere, vertrauensvollere Beziehung zwischen Zulieferer und weiterverarbeitendem Kunden unerlässlich. Zunächst muss die CMOS-Fertigung auf das andere Material Rücksicht nehmen, es vorsichtiger behandeln und auch einige Prozesse geringfügig ändern. Insbesondere darf beim Backshooter auch die Rückseite der Wafer nicht durch Kratzer beschädigt werden. Ansonsten wären hier später Ätzhfehler unvermeidbar. Weiter kann der CMOS-Hersteller die Qualität seiner Arbeit zunächst nur unvollständig prüfen, da die Schaltung erst durch die tintendruckspezifischen Zusatzschichten und Strukturen (z. B. Heizwiderstände) funktionsfähig wird.



Backshooter-Status: "Apokalypse now?"

Seit der Erfindung des Backshooters sind inzwischen fünf Jahre vergangen. Bis Ende 1992 wurde intensiv an der Entwicklung dieses Mikrosystems gearbeitet. Durch die Übernahme und alsbaldige Betriebsschließung von Inkjet Systems durch die Eastman Kodak Company, Rochester (USA) wurde die Entwicklung jedoch mitten in der Prototypenphase jäh unterbrochen. In diesen Prototypen sollte erstmals Mikromechanik und Mikroelektronik in nur einem Teil integriert werden. Die Prototypen ([Bild 2](#)) sind nahezu fertiggestellt, ein Test steht dagegen noch aus.

Für jede Phase, wie z. B. für das Funktionsmuster benötigte das Entwicklungsteam, was viele immer wieder erstaunte, etwa ein Jahr. [Bild 7](#) zeigt jedoch, dass insbesondere Design und Simulation jeder Technologieentwicklungsphase viel Zeit kosten. Dieser Aufwand ist jedoch unumgänglich, denn es lässt sich gar nicht genug Sorgfalt darauf verwenden, das Layout und den elektrischen Schaltungsentwurf durch Kontrollen und Simulationsrechnungen vor Fertigungsbeginn auf Fehlerfreiheit zu prüfen. Selbst der kleinste Schaltungsfehler könnte ja zum Totalausfall führen, ließe sich jedoch frühestens nach einem Jahr am fertigen Chip feststellen - mit der Folge, dass dieses Jahr verloren wäre.

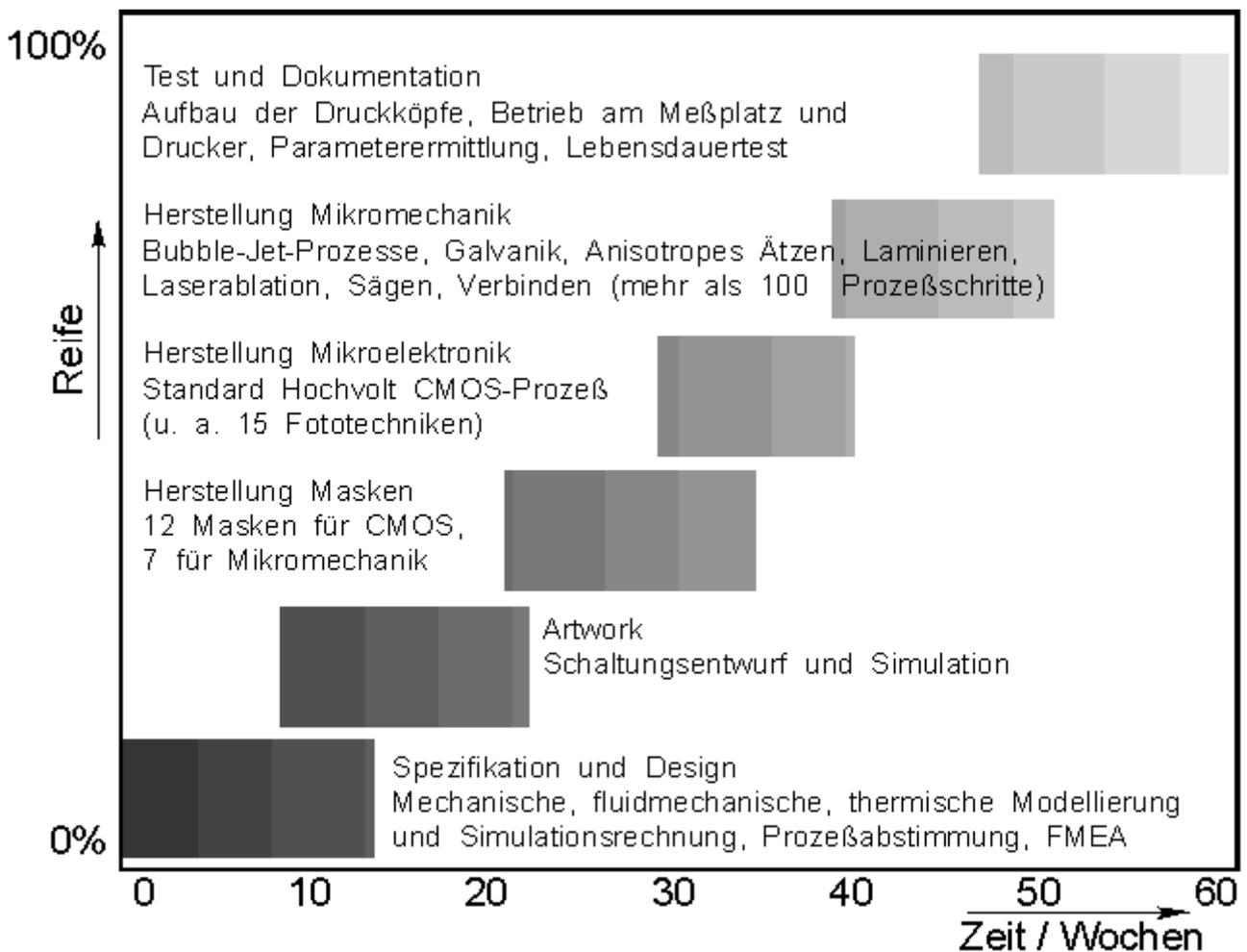


Bild 7: Zeitaufwand für eine Entwicklungsphase des Mikrosystems

Später, nach der langen Entwicklungszeit kann sich, im Gegensatz zu den Produkten selbst, eine in sich konsistente Technologie viele Jahre am Markt behaupten. Zum Beweis, mit dem Zeitaufwand trotzdem international konkurrenzfähig zu sein, sei nur daran erinnert, dass auch Canon von der Erfindung des Bubble-Jet-Prinzips 1977 [2] bis zur Markteinführung 1985 ganze acht Jahre benötigte.

Durch diverse Betriebsübergänge gingen auch die Backshooter-Schutzrechte von Siemens auf Inkjet Systems über. Nach der Schließung 1993 hat die Muttergesellschaft Eastman Kodak Company, obwohl selbst nicht mehr im Tintendruckgeschäft aktiv, die Rechte in die USA geholt, wo sie bis heute auf Eis liegen.

Aufgrund der vielversprechenden Eigenschaften des Backshooter-Designs interessier(t)en sich eine ganze Reihe von namhaften Firmen dafür, diesen Tintendruckkopf fertig zu entwickeln und später zu produzieren. Als Paradigma der Mikrosystemtechnik schlechthin wäre die Entwicklung außerdem großzügig durch öffentliche Forschungsmittel unterstützt worden. Aus der Antwort Kodaks nur für Millionenbeträge eine dann nicht einmal exklusive Lizenz zu gewähren, ist jedoch zu vermuten, dass man in den USA den Backshooter absichtlich verhindern will. Schade, wird doch wieder einmal mehr Patentrecht als Innovationsbremse missbraucht. Somit stehen die Chancen heute schlechter denn je, dass es jemals einen Backshooter-Tintendruckkopf zu kaufen gibt.

Schluss Hinweis und Danksagung:

Dieser Beitrag entstand aus einem Vortrag, der u. a. in den VDI/VDE Arbeitskreisen Mikrosystemtechnik / Mikroelektronik in Berlin und München und beim Leitseminar des Instituts für Management und Technologie in Berlin gehalten wurde.

Ich danke an dieser Stelle meinem Mentor, Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Heinzl (TU München), und den Professoren Dr.-Ing. E. Obermeier (TU Berlin) und Dr.-Ing. H.-L. Fiedler (FhG-IMS, Duisburg) und deren Mitarbeitern für ihre Kreativität, die gedeihliche Zusammenarbeit im Backshooter-Projekt und

Ihren vielen verbessernden Hinweisen für diesen Beitrag.

Im Zeitschriftendruck gestrichener Schlussteil

Chancen und Visionen für die Mikrosystemtechnik

Nach jahrelanger Entwicklung am Backshooter lassen sich eine ganze Reihe Erkenntnisse zur Mikrosystemtechnik allgemein zusammenfassen. Zwar nutzt man zur Fertigung eines Mikrosystems meist nur gut bekannte Prozesse, der Teufel steckt jedoch im Detail und ihrer Kombination. Dies macht die Entwicklung und spätere Fertigung so komplex und zeitaufwendig. Dennoch, der Aufwand lohnt sich!

Obgleich die Reinräume und Fertigungsanlagen für Mikromechanik und Mikroelektronik äußerst teuer sind, lassen sich dennoch mit der Mikrosystemtechnik unter dem Strich beträchtliche Kosten einsparen. Die wichtigsten Gründe dafür sind:

- weniger Chipflächenbedarf des Mikrosystems
- weniger und einfachere elektrische Verbindungen
- weniger externe Bauelemente
- weniger mechanische und manuelle Bearbeitung
- besser automatisierbare Fertigung
- weitgehende Fertigung im Nutzen möglich
- wenig Spezialequipment erforderlich
- höhere Gesamtausbeute und Lebensdauer
- einfache, preiswerte Variantenbildung ohne Zusatzinvestitionen

Außerdem können Mikrosysteme wegen der niedrigeren direkten Chipkosten preiswerter angeboten werden. Das erhöht andererseits die Nachfrage am Markt, wodurch sich wegen der höheren Stückzahlen die Kosten weiter senken lassen. Mikrosystemtechnik wird sich deshalb zunächst dort etablieren, wo große Stückzahlen benötigt werden. Beispiele dafür sind Tintendruckköpfe, Einmalsysteme der Medizintechnik und Sensoren für die Kraftfahrzeugtechnik.

Trotz niedriger Kosten liegt das Hauptaugenmerk der Kunden jedoch zu Recht auf der höheren Funktionalität und Zuverlässigkeit der Mikrosysteme. Sehr vorteilhaft ist es beispielsweise, wenn sich der Chip selbst überwachen kann. Durch integrierte Sensoren lassen sich jederzeit Umweltbedingungen messen und die Ansteuerparameter entsprechend optimieren. In Systemen, bei denen die Messgröße in Relation zu Störgrößen sehr klein ist, gelingt die elektrische Auswertung oft erst, wenn Sensor und Verstärker durch die Integration der Schaltung direkt beieinander liegen.

Deutsche Forschungseinrichtungen haben schon in den vergangenen Jahren bewiesen, dass sie sehr viel Mikrosystemtechnik-Know-how aufgebaut haben. Die Industrie hat davon jedoch bis heute noch kaum etwas kommerziell umgesetzt. Keine Firma hat bei uns das Wissen und die Fertigungseinrichtungen, Mikrosysteme alleine zu entwickeln und zu produzieren. Die mittelständischen Betriebe in Deutschland, denen man mit der Mikrosystemtechnik große Chancen vorhersagt, müssen deshalb sehr eng kooperieren, wenn sie Erfolg haben wollen.

Aufgrund der langen Entwicklungszeiten für Mikrosysteme sind deshalb jetzt Unternehmer mit Visionen gesucht, die weit über den Tellerrand ihrer aktuellen Produktspezifikationen hinausblicken können.



[Zurück zum ersten Teil](#)

Literatur

1. Berghof, W.; Hagemeyer, F.; Neubauer, L; Wehl, W.: Membranaufbau mit vergrabenen Heizelementen für Tintendruckköpfe nach dem Backshooter-Prinzip. Deutsches Patent

- 42 14 554 C2 (1992)
2. Endo, I.; Sato, Y.; Saito, S.; Nakagiri, T.: Verfahren und Vorrichtung zur Flüssigkeitsstrahl-Aufzeichnung. Deutsches Patent Deutsche Patentanmeldung 28 43 064 (Priorität Japan Okt. 1977)
 3. Fähndrich, M.; Hochwind, B.; Zollner, A.: Fluid dynamics in micro dosing actuators. Proceedings Transducers'95 Stockholm, 1995, Vol. 2, S. 295-298 (306 - PB 7)
 4. Heinzl, J.; Hochwind, B.; Pötzlberger, H; Schlaak, H; Steckenborn, A.: Nach dem Thermalwandlerprinzip arbeitender, mikromechanisch hergestellter Tintendruckkopf. Europäische Patentanmeldung 0 530 209 (Priorität Deutschland 1990).
 5. Heuberger, A. (Hrsg): Mikromechanik. Springer Verlag, Berlin 1991
 6. Hochwind, B.: Design of micromechanical bubble-jet devices. Proceedings (Society for Imaging Science and Technology). 9th Int. Congress on Advances in Non-Impact Printing Technologies, Yokohama, 1993
 7. Koch, K.: Untersuchung der Wahrnehmbarkeit von Rasterungen bei digitaler Wiedergabe von Halbtonbildern. Dissertation Technische Universität München (1984)
 8. Krause, P; Obermeier, E.: Etch rate and surface roughness of deep narrow U-grooves in (110)-oriented silicon. J. Micromech. Microeng. 5 (1995) 1-3
 9. Krause, P.; Obermeier, E.; Wehl, W.: Backshooter - a new smart micromachined single-chip inkjet printhead. Proceedings Transducers'95 Stockholm, 1995, Vol. 2, S. 325-328 (314 - B 8)
 10. Wehl, W.: Akustik und Fluidmechanik in Kanälen und Düsen von Tintenschreibwerken. Dissertation Technische Universität München (1984) ([Download als PDF-Datei](#)  1,1 MB)
 11. [Wehl, W.; Bader, G.: Nur nicht kleckern \(Tintendrucker: Von der Fontäne zur Mikrodüse\). CHIP 1994, 8, S.104-112](#)
 12. Zollner, A.; Hochwind, B.; Fähndrich, M.: Thermodynamic and Fluid Dynamic Simulation of micromechanical manufactured bubble-jet printheads. Proceedings Micro Systems '94, Berlin, S.909-918, 1994
 13. Zollner, A.: Design aspects for a smart thermal inkjet printhead. Proceedings IS&T '95 (im Druck)

Fachterminologie [5]

CVD = chemical vapour deposition (chemische Gasphasenabscheidung)

LP~ = low pressure (Niedrigdruck~)

PE~ = plasma enhanced (Plasma verstärkte ~)

USG = undoped silicate glass (Undotiertes SiO₂)

Metal 2 = Zweite Metallisierungsschicht einer Mehrlagen-CMOS-Schaltung

Quellennachweis Bild 2, 5, 6: Technologien der Mikroperipherik, Technische Universität Berlin

Bild 4: Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Duisburg

restliche Bilder: Autor