

## Ergebnisse und Leistungen 2002

Titelbild:

μECM-Technologie vom Entwurf bis  
zum fertigen Bauteil

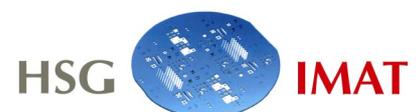
## Inhaltsverzeichnis

Organisationsstruktur	2
Vorwort	3
Siliziumresonatoren in Oberflächenmikromechanik	4
Konzeption eines elektrostatischen Miniaturventils in MID-Technik	6
Technologische Testbauteile für die AHMID-Fertigungslinie	8
Neue Verbindungstechniken für miniaturisierte Mikrofluidiksysteme aus Kunststoff	10
Laserstrukturierung von MID-Bauteilen	12
Laserstrukturiertes MID als Sensoraufnahme für eine intrakardiale Pumpe	14
Simulationstechniken in der Mikrosystemtechnik	16
Tooling und Verfahrensstrategien beim elektrochemischen Fräsen mit ultrakurzen Spannungsimpulsen ( $\mu$ ECM)	18
Anlagen - Geräte - Verfahren	21
HSG-IMAT in Zahlen	22
Publikationen	23
Messebeteiligungen, Mitarbeit in Gremien	24
Lehrveranstaltungen, Studien- und Diplomarbeiten, Promotionen	25
Organe der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.	26
Nachruf für Herrn Dipl.-Ing. Fritz Dürr	28
Anfahrtsplan	29

Universität Stuttgart  
Institut für Zeitmeßtechnik, Fein- und Mikrotechnik  
Lehrstuhl Mikro-, Miniatur- und Zeitmeßtechnik  
Breitscheidstr. 2 b · D-70174 Stuttgart  
Telefon: ++49(711)121-3711 · Telefax: ++49(711)121-3705  
E-mail: [izfm@izfm.uni-stuttgart.de](mailto:izfm@izfm.uni-stuttgart.de)  
WWW: <http://www.uni-stuttgart.de/izfm>

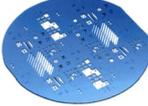


Hahn-Schickard-Gesellschaft  
Institut für Mikroaufbautechnik  
Breitscheidstr. 2 b · D-70174 Stuttgart  
Telefon: ++49(711)121-3712 · Telefax: ++49(711)121-3705  
E-mail: [hsg-imat@izfm.uni-stuttgart.de](mailto:hsg-imat@izfm.uni-stuttgart.de)  
WWW: <http://www.uni-stuttgart.de/hsg-imat>



Leitung: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück

# Organisationsstruktur

	 <p>Lehrstuhl Mikro-, Miniatur- und Zeitmeßtechnik</p> <p>Leiter: Prof. Kück</p>	 <p>Hahn-Schickard-Institut für Mikroaufbautechnik</p> <p>Leiter: Prof. Kück</p>
<p>Abteilung Technologie</p> <p>Leiter: Dr. W. Eberhardt</p>	<p>Fr. Fasterding</p> <p>Fr. Flechtner</p> <p>Hr. Schulz</p> <p>Hr. Spitznagel</p>	<p>Hr. Ahrendt</p> <p>Fr. Gehrlach</p> <p>Hr. Münch</p> <p>Hr. Pein</p> <p>Hr. Schlag</p> <p>Fr. Scholz</p> <p>Hr. Spritzendorfer</p> <p>Fr. Dr. Wang</p>
<p>CAD/CAM-Techniken</p> <p>Leiter: Prof. Kück</p>	<p>Hr. Gmelin</p> <p>Mechanische Werkstatt</p> <p><u>Hr. Eylandt</u></p> <p>Hr. Lechler</p>	<p><u>Hr. Seifert</u></p> <p>Hr. Grabein</p> <p>Hr. Dr. Oprea</p> <p>Hr. Schilling</p>
	<p>Hr. Skibowski</p>	<p><u>Hr. Dr. Schubert</u></p> <p>Hr. Allgeier</p> <p>Hr. Vogel</p>
<p>Bauelemente</p> <p>Leiter: Prof. Kück</p>	<p><u>Hr. Warkentin</u></p> <p>Hr. Benz</p>	<p>Hr. Arnold</p> <p>Fr. Liu</p>
	<p>Hr. Mohr</p>	
<p>Administrative Dienste</p>	<p>Hr. Bärlin</p> <p>Fr. Hoffmann</p>	<p>Fr. Ihle</p> <p>Fr. Bellezer</p> <p>Fr. Hummel</p>

# Vorwort

## Sehr geehrte Damen und Herren,

im Jahr 2002 wurden wichtige Weichen gestellt, um unser Know-how-Angebot in der Gehäuse- und Verbindungstechnik weiter zu entwickeln. Mit der Installation einer leistungsfähigen Laserbelichtungsanlage ist uns ein rascher Einstieg in die Laserstrukturierung von MID-Bausteinen gelungen, wobei wir auf unseren breiten Erfahrungen in der Metallisierung von Polymerwerkstoffen aufbauen konnten. Dabei werden sowohl subtraktive Verfahren, z. B. bei metallisierten LCP-Bauteilen, als auch das voll additive Laser Direkt Strukturierungsverfahren von LPKF eingesetzt. Neben der hohen Strukturfeinheit zeichnet sich die Laserstrukturierung insbesondere durch eine große Flexibilität und Redesignfreundlichkeit bei der Leiterbildgestaltung aus.

Die hohe Leiterbahndichte der Laserstrukturierung ist eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz der Flip-Chip-Technik auf MID-Bausteinen. So eröffnet sich ein großes Potenzial für den effizienten Aufbau höchst miniaturisierter Sensoren und Aktoren. In Verbindung mit Klebetechniken mit geringer thermischer Belastung der Polymerwerkstoffe bietet sich eine interessante Alternative zum Löten mit bleifreien Loten. Deshalb haben wir im vergangenen Jahr mit umfangreichen Arbeiten zur Flip-Chip-Montage auf MIDs begonnen.

Mit dem erfolgreichen Abschluss des AHMID-Verbundvorhabens im Juli letzten Jahres wurde die Heißpräge-MID-Technik durch die Bereitstellung geeigneter Fertigungsanlagen um einen wesentlichen Schritt im Hinblick auf die indus-

trielle Umsetzung weiter gebracht. Das hat dazu geführt, dass bei der Heißprägetechnik im HSG-IMAT nun die Entwicklung von Prototypen im Vordergrund steht.

Die Mikrospritzgießtechnik spielt bei unseren Arbeiten eine immer wichtigere Rolle. Das betrifft insbesondere die mikromechanischen Sensor- und Aktorbaulemente, die wir auf der Basis selektiv metallisierter Polymere entwickeln. Darüber hinaus konnten wir im vergangenen Jahr auch erste vielversprechende Ergebnisse zu spritzgegossenen Bauteilen für die Mikrofluidik erzielen, die mit Hilfe geeigneter Verbindungstechniken zu kompletten mikrofluidischen Systemen gefügt werden. Die kostengünstige Herstellung ist eine Voraussetzung, mikrofluidische Systeme in großen Stückzahlen als Einwegbauelemente einzusetzen, z. B. in den Life Sciences.

Allerdings zeigen sich bei der Mikrospritzgießtechnik deutlich die derzeitigen Probleme bei der Herstellung der Formeinsätze für dreidimensionale Strukturen mit Abmessungen im Mikrometerbereich und Submikrometergenauigkeiten. Mit spanender Bearbeitung und Mikroerodieretechnik kann die gewünschte Genauigkeit und Oberflächenqualität nicht immer erreicht werden. Hier bietet das neue Verfahren des elektrochemischen Fräsens mit ultrakurzen Spannungsimpulsen völlig neue Möglichkeiten, da Arbeitsspalte bis in den 100 nm-Bereich eingestellt werden können und die Bearbeitungswerkzeuge praktisch keinen Verschleiß erleiden. Unsere ersten Arbeiten zei-

gen, dass feinste Strukturdetails in Formeinsätzen aus Edelstahl oder feinste Bohrungen für Düsenstrukturen hergestellt werden können, weshalb wir uns künftig verstärkt mit dem elektrochemischen Fräsen mit ultrakurzen Impulsen befassen werden. Dabei werden Fragestellungen zu spezifischen Anwendungen im Vordergrund stehen, während sich unsere Kollegen im Fritz-Haber-Institut, wo das Verfahren erfunden wurde, an der Erweiterung der theoretischen Grundlagen arbeiten.

Die Weiterentwicklung unserer Arbeitsgebiete geht Hand in Hand mit einem kontinuierlichen Wachstum unserer Institute. Die Nachfrage nach unseren F+E-Leistungen seitens der Industrie entwickelte sich mit einem Erlösanteil von über 40% sehr positiv. Die Neuprofilierung unserer Institute trägt also Früchte. Dafür ist es entscheidend, dass wir uns im HSG-IMAT auf industrierelevante Themen konzentrieren und am IZFM spannende Grundlagenprojekte angehen. In diesem Sinne empfehlen wir uns auch für eine künftige Partnerschaft mit Ihnen.

Ihr

Heinz Kück

# Siliziumresonatoren in Oberflächenmikromechanik

M. Giousouf\*, H. Kück

In der Silizium-Mikromechanik kommen zwei wesentliche Herstellungsverfahren, nämlich die Volumen-Mikromechanik und die Oberflächen-Mikromechanik zur Anwendung. In der Volumen-Mikromechanik wird ein Siliziumwafer in seiner Gesamtdicke bearbeitet. Dagegen wird bei der Oberflächen-Mikromechanik im Vergleich zur Waferdicke eine dünne Siliziumschicht eingesetzt. Dabei kann diese Schicht aus mono- oder polykristallinem Silizium sein.

Bei unseren bisherigen Arbeiten, die in den Jahresberichten 1998 und 1999 beschrieben sind, wurden Siliziumresonatoren für Anwendungen in der Uhrentechnik mit Volumen-Mikromechanik hergestellt. In diesem Bericht werden Resonatoren mit Oberflächen-Mikromechanik vorgestellt, die gegenüber den zuvor genannten den Vorteil von geringeren Baugrößen und einer grundsätzlich CMOS-kompatiblen Herstellung aufweisen. Dabei wird sowohl von der Silicon-On-Insulator (SOI)-Technologie als auch von der Polysilizium-Technologie Gebrauch gemacht.

## Herstellungsverfahren

In Bild 1 ist ein Schnitt durch die Resonator-Bauelemente skizziert. Bei der SOI-Technologie wurden SIMOX-Wafer mit einer ca. 30 µm dicken monokristallinen Siliziumschicht für die Resonatoren verwendet. Diese Schicht wird von einer ca. 300 nm dicken Oxidschicht vom Substrat getrennt und wird mittels eines Trockenätzprozesses strukturiert. Das Freilegen der Resonatorstruktur geschieht am Ende

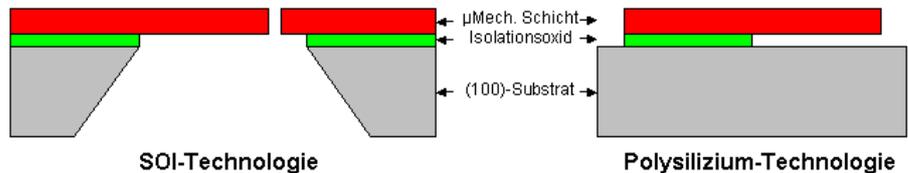


Bild 1: Schematischer Schnitt durch Silizium-Resonatoren mit SOI- und Polysilizium-Technologie.

der Prozesskette durch Ätzen des Substrates von der Unterseite her. Die Bauelemente wurden entsprechend unserem Design im FhG-IMS in Dresden hergestellt.

Die Bauelemente in Polysilizium-Technologie wurden bei der Fa. Bosch in Reutlingen hergestellt. Dabei wird auf einem oxidierten Silizium-Substrat eine ca. 10 µm dicke Polysiliziumschicht abgeschieden. Diese wird ebenfalls durch Trockenätzen strukturiert. Schließlich wird die mikromechanische Struktur durch das selektive Ätzen des Opferoxids freigelegt. Vorteilhaft hierbei ist die geringe Bauhöhe des Bauelementes, da es im Gegensatz zur SOI-Variante nicht zusätzlich von unten verkappt werden muss.

In Bild 2 ist ein Stimmgabelresonator in SOI-Technologie gezeigt. Entsprechende Stimmgabelresonatoren wurden auch mit der Polysilizium-Technologie realisiert. Um Resonatoren hoher Schwingungsgüte zu entwickeln, wurde ausgehend von Überlegungen zur Auswirkung der Materialdämpfung ein Ringresonator entwickelt, der in Bild 3 gezeigt ist. Diese Resonatoren werden elektrostatisch zu resonanten Schwingungen angeregt.

Die Detektion der Schwingung erfolgt kapazitiv. Dabei wurden bei verschiedenen Resonatorvarianten die Elektroden entweder planparallel oder kammförmig ausgeführt.

Typische Abmessungen der Stimmgabelresonatoren liegen bei den SOI-Varianten um  $900 \times 50 \mu\text{m}^2$  und bei den Polysilizium-Varianten um  $300 \times 15 \mu\text{m}^2$ . Der Ringresonator hat einen Durchmesser von ca. 1 mm.

## Ergebnisse

Bei den experimentellen Untersuchungen werden alle Resonatoren im Hochvakuum, d. h. bei Drücken kleiner als  $10^{-3}$  mbar betrieben.

Die Resonatoren wurden hinsichtlich ihres elektromechanischen Verhaltens untersucht, d. h. die Frequenzen und Güten, sowie die Abhängigkeiten der Frequenzen von den Antriebsspannungen und der Betriebstemperatur. Weiterhin wurde die Leistungsaufnahme von verschiedenen Resonatorvarianten bestimmt.

Im Gegensatz zu den früheren Stimmgabeln in Volumen-Mikromechanik konnten bei den hier vorgestellten Schwingern die Frequen-

\* seit 03/2001 bei Festo AG & Co., 73734 Esslingen

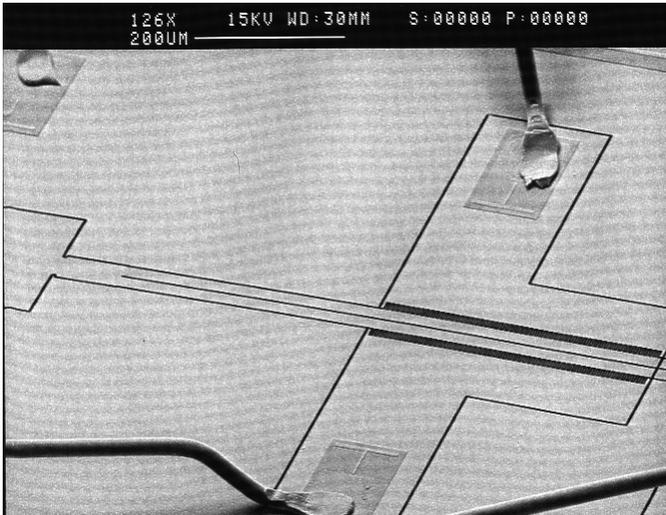


Bild 2: REM-Aufnahme eines Stimmgabelresonators, der in SOI-Technologie hergestellt ist.

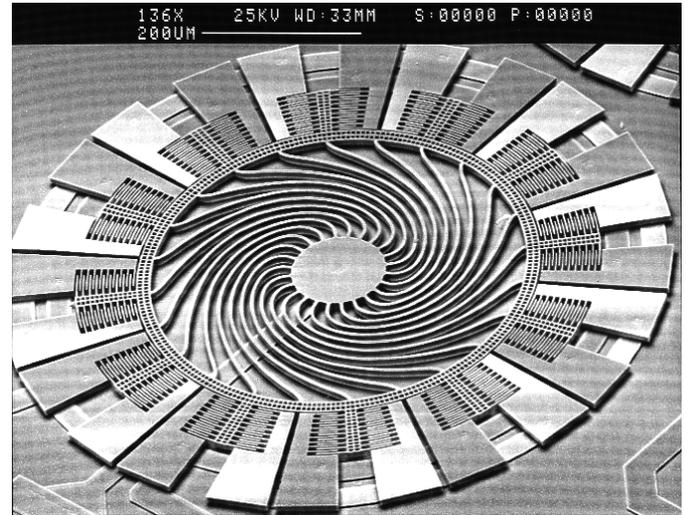


Bild 3: REM-Aufnahme des Ringresonators, der mit Hilfe der Polysilizium-Technologie gefertigt wurde.

zen über genügend hohe Kapazitätsänderungen gemessen werden. Hierzu wurden eine Messverstärkerschaltung und ein Netzwerkanalysator eingesetzt.

Typische Resonanzfrequenzen der Stimmgabeln liegen um 30 und 60 kHz. Dabei weisen die Stimmgabeln zwei nahe beieinander liegende Schwingungsmoden auf, weil die Zinken in Phase oder gegenphasig schwingen können. Die Frequenz des Ringresonators lag bei 45 kHz. Der Ringresonator hat im Frequenzbereich der Drehmode keine weitere Schwingungsmode.

Der Ringresonator erreicht Güten bis zu 170.000 im Hochvakuum, wogegen die Güten der Polysilizium-Stimmgabeln um 100.000 und die der SOI-Varianten um 45.000 liegen.

Ein wesentliches Merkmal der Stimmgabeln ist die stärkere Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz von der Betriebsspannung. Da die elektrostatische Kraft pro-

portional zum Quadrat der Spannung ist, muss die Kraft für eine harmonische Krafterregung linearisiert werden, was durch Überlagerung einer Gleich- oder Polarisierungsspannung mit der Wechselspannung möglich ist. Dabei ist die Amplitude der Wechselspannung deutlich geringer als die Polarisationsspannung. Bei Kammelektroden ist die Abhängigkeit der Frequenz von der Polarisierungsspannung geringer ausgeprägt. Der Ringresonator hat Kammelektroden, die für die Drehschwingung optimiert sind, so dass hier keine Abhängigkeit der Frequenz von der Spannung messbar war.

Die Temperaturabhängigkeit der Frequenz von SOI-Stimmgabeln liegt bei ca.  $-26 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  und bei den Polysilizium-Schwingern im Mittel bei ca.  $-28 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Diese im Vergleich zum Quarz hohen Temperaturkoeffizienten, können im gemessenen Temperaturbereich von  $10 \dots 60^\circ\text{C}$  als linear betrachtet werden (vgl. Jahresbericht 1999). Die Temperaturabhängigkeit kann

durch Messung der Chip-Temperatur kompensiert werden. Bei einer Temperaturauflösung von  $0,03^\circ\text{C}$  und anschließender elektronischer Frequenzkorrektur ergibt sich eine Ganggenauigkeit der Siliziumuhr im Bereich typischer low cost Quarzuhren.

Wesentlich günstiger ist die Leistungsaufnahme elektrostatisch betriebener Resonatoren, die im Falle von Stimmgabeln um  $0,01 \text{ nW}$  und damit um eine Größenordnung geringer ist als bei Quarzstimmgabeln.

---

Kontaktperson:  
 Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück  
 Tel. ++49(711)121-3710  
 E-mail heinz.kueck@izfm.uni-stuttgart.de

---

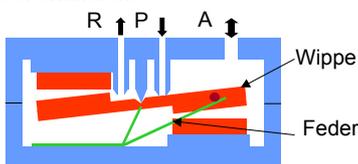
# Konzeption eines elektrostatischen Miniaturventils in MID-Technik

M. Arnold, D. Warkentin, M. Oprea

## Einleitung

In zahlreichen Anwendungen wie z. B. in der Automatisierung und Medizintechnik werden Miniaturventile benötigt. Die Miniaturisierung der Ventile erfordert neben neuen Herstellungstechnologien auch den Einsatz neuer Wandlerprinzipien. Die MID-Technologie bietet in Verbindung mit dem Mikropräzisions-spritzguss die Möglichkeit, elektrostatisch angetriebene Ventile aufzubauen. Das Potenzial dieser Ventile liegt im einfachen Herstellungs- und Montageprozess, dem kostengünstig aufgebauten Aktor sowie der geringen Leistungsaufnahme. Das Funktionsprinzip eines normal geschlossenen 3/2 Ventils ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

### Seitenansicht



### Vorderansicht

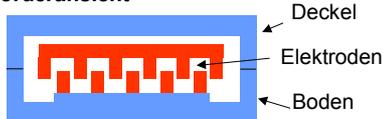


Bild 1: Schematische Seitenansicht und Vorderansicht eines elektrostatischen Ventils in MID-Technik

Das Ventil besteht aus einem Gehäuse und einer beweglich gelagerten Wippe. Im unbetätigten Zustand wird die Wippe durch eine Rückstellfeder entgegen dem Uhrzeigersinn gedreht, so dass der Druckanschluss (P-Düse) geschlossen wird. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung an die Kammelektroden entsteht eine elektrostatische Kraft und somit ein Drehmoment, das die Wippe um die zentrale Lagerung dreht, den Abluftanschluss (R-Düse) schließt und

die P-Düse öffnet. Gleichzeitig wird die Rückstellfeder weiter gespannt. Beim Abschalten der elektrischen Spannung wird die Wippe wieder durch die Federkraft in die Grundstellung bewegt. Über die jederzeit geöffnete A-Düse können pneumatische Funktionselemente angesteuert werden.

## Elektrostatische Kräfteerzeugung

Die elektrostatische Kraft wirkt zwischen zwei unterschiedlich geladenen Körpern anziehend. Bestimmend für die Größe der entstehenden Kraft ist die Höhe der angelegten elektrischen Spannung, die quadratisch eingeht, sowie die Kapazität, die sich über die Geometrie ergibt. Bei den gewählten Kammantrieben sind vor allem der Luftspalt zwischen den einzelnen Elektroden, die Länge der Kammelektroden und die Anzahl der Elektrodenpaare maßgebend.

## Demonstrator

Aufbauend auf diesem Funktionsprinzip wurde ein Demonstrator aus Messing angefertigt, der über einen Kammantrieb mit 33 Einzelelektroden verfügt. Die Abmessungen des Demonstrators ( $l \times b \times h$ ) sind 24 mm x 20 mm x 5 mm.



Bild 2: Kammelektrode des Demonstrators

Anhand dieses Demonstrators wurde die grundsätzliche Funktionsweise eines elektrostatisch arbeitenden Ventils nachgewiesen. Mit dem Demonstrator können Drücke von bis zu 10 bar geschaltet werden.

## Schematischer Aufbau des MID-Ventils

Das Ventil in MID-Ausführung besteht aus drei Kunststoffteilen sowie zwei Dichtungen und einem Feder-element. In Bild 3 ist eine Explosionszeichnung des Ventils dargestellt. Der Gehäusedeckel, Gehäuseboden und die Wippe werden aus LCP (Vectra E 820i Pd, Firma Ticona) im Spritzguss hergestellt und anschließend mit einer dünnen Kupfer-Nickel-Gold-Schicht außenstromlos chemisch metallisiert.

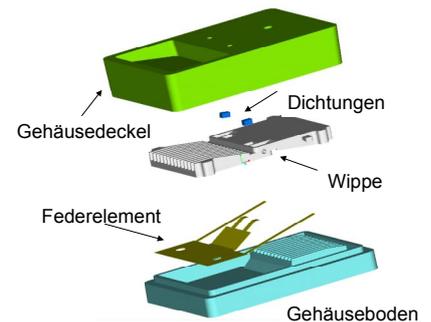


Bild 3: Explosionszeichnung des MID-Ventils

Nach dem Metallisieren erfolgt eine Strukturierung der Metallschicht durch Laserablatieren. Dadurch wird die metallisierte Oberfläche der Bauteile in mehrere leitende Bereiche unterteilt, die für die elektrische Beschaltung und Funktion notwendig sind. Die Dichtungen bestehen aus NBR und das Federelement aus Stahlblech. Die Abmessungen des Ventils ( $l \times b \times h$ ) sind 19,2 mm x 14,7 mm x 6 mm.

## Bauteile

Im Bild 4 ist der Gehäuseboden gezeigt. Zwei Zapfen im Boden dienen zur Zentrierung und Befestigung der Feder. Ein Durchbruch im Boden dient der Spannungszuführung für das Federelement, das den Kontakt zur Wippe herstellt. Im

Weiteren ist ein am Rand umlaufender Absatz zu sehen, welcher die Zentrierung der beiden Gehäuseteile bei der Montage gewährleistet. Als weiteres Funktionselement ist ein Teil der Kammelektrode im Gehäuseboden angeordnet.

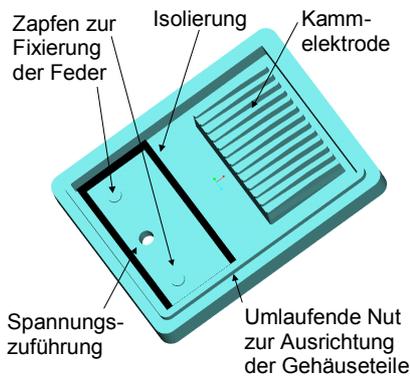


Bild 4: Gehäuseboden

In Bild 5 ist der Gehäusedeckel gezeigt. Im Deckel sind die Lagerstellen für die Wippe sowie die Düsen angeordnet. Ebenfalls ist ein Teil der Kammelektrode im Gehäusedeckel platziert.

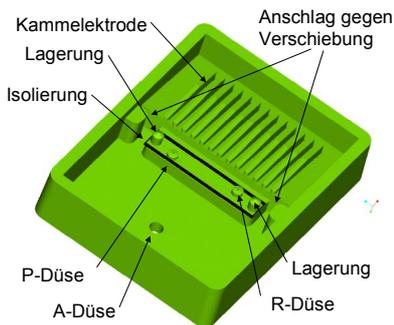


Bild 5: Gehäusedeckel

Im Bereich der P- und R-Düse sowie der Lagerstellen ist eine Isolation der Metallschicht durch Laserablation vorgesehen, um die geladene Wippe gegenüber dem Gehäuse zu isolieren.

In Bild 6 ist die Wippe gezeigt. Sie besitzt neben den Lagerstellen und

den Dichtungssitzen für die P- und R-Düse auf beiden Seiten jeweils Kammelektroden. Seitlich sind die Anschläge für die Rückstellfeder angebracht. Die Ausbuchtungen an den Ecken sind zum Entformen des Spritzlings aus dem Werkzeug erforderlich.

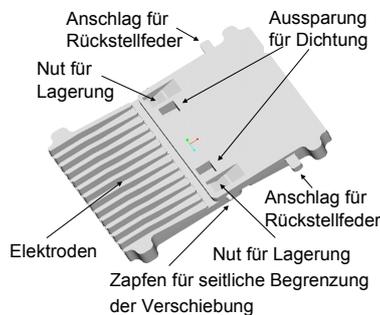


Bild 6: Wippenansicht der dem Gehäusedeckel zugewandten Seite

Das in Bild 7 gezeigte Federelement übernimmt sowohl mechanische wie auch elektrische Funktionen. Die Stützfeder halten die Wippe in den Lagerstellen.

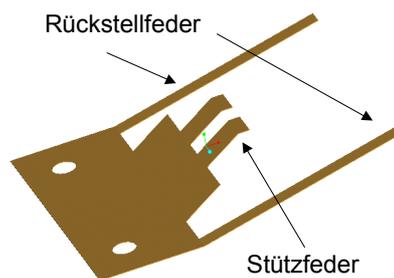


Bild 7: Federelement

Die Rückstellung der Wippe in die Ausgangsposition nach Abschalten der Spannung wird durch die Rückstellfedern gewährleistet. Die elektrische Spannungsversorgung der Wippe wird durch die vier vorhandenen Kontaktpunkte übernommen.

Neben analytischen Rechnungen wurde die Konstruktion und Auslegung der Bauteile auch durch FEM-Simulationen unterstützt. Bild 8 zeigt z. B. Untersuchungen der

auftretenden Durchbiegungen am Gehäuse unter Druckbelastung.

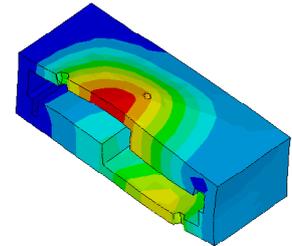


Bild 8: Simulation der Verformung des Gehäuses unter Druckbelastung (Schnitt)

Zum Spritzgießen der Kunststoffteile wurden Dreiplattenwerkzeuge aufgebaut. Die spritzgegossenen Teile sind in Bild 9 zu sehen.

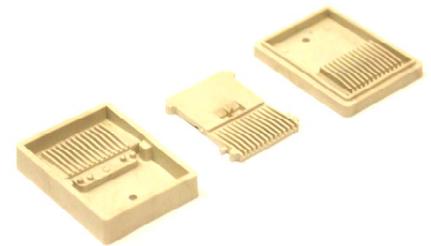


Bild 9: Kunststoffbauteile: v. l. Gehäusedeckel, Wippe und Gehäuseboden.

Nach der Metallisierung und Strukturierung der Kunststoffteile erfolgen der Zusammenbau und die Inbetriebnahme des Ventils.

Dieses Forschungsvorhaben wird im Rahmen des Verbundprojekts "IMSIP" bearbeitet, das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über das VDI/VDE-IT gefördert wird.

Kontaktperson:  
Dipl.-Ing. Daniel Warkentin  
Tel. ++49(711)121-3708  
E-mail daniel.warkentin@izfm.uni-stuttgart.de

# Technologische Testbauteile für die AHMID-Fertigungslinie

H. Seifert, C. Pein

Im Frühsommer 2002 wurde die Fertigungslinie des vom BMBF über den Projektträger PFT geförderten Verbundvorhabens AHMID\* (Bild 1) erfolgreich in Betrieb genommen. Dafür wurden am HSG-IMAT technologische Untersuchungen zum Heißprägen und Aufbau von MID-Baugruppen durchgeführt.

de Haftfestigkeit der Leiterbahnen und für die Prägewulsthöhen müssen an den entsprechenden Kunststoffen effizient bestimmt werden. Die Höhe der Prägewülste beeinflusst den nachfolgenden Bestückungs- und Lötprozess mit SMD-Bauteilen. Für diese Untersuchungen wurde das Testbauteil I (Bild 2)

lingbereich und den zu prüfenden Leiterbahnen. Die Leiterbahnbreiten betragen 0,24, 0,54, 0,74 und 1,04 mm.

Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse wurden mit der „Ivo-tape“ Folie der Fa. Bolta mit einer Dicke von 35  $\mu\text{m}$  und einem

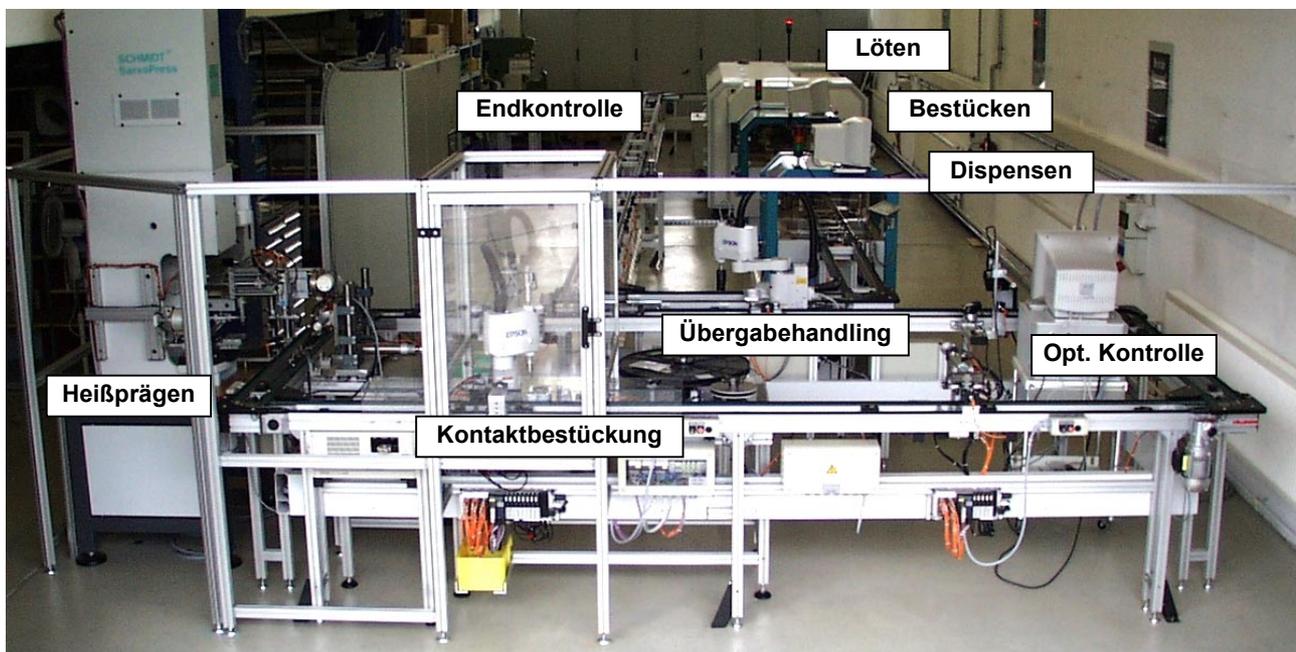


Bild 1: AHMID-Fertigungslinie für Heißpräge-MID-Baugruppen

## Optimierung der Haftfestigkeit und Prägewulsthöhen

Die Anforderungen an die MID-Baugruppen werden u. a. hinsichtlich des Einsatztemperaturbereichs immer höher. Dazu wird der Einsatz von entsprechend angepassten neuen Hochleistungskunststoffen erforderlich. Deshalb haben die verfügbaren Prozessparameter insbesondere zur Haftfestigkeit und zur Prägewulstausbildung nur eine bedingte Aussagekraft. Die Heißprägeparameter für die ausreichenden

mit dem dazugehörigen Spritzgusswerkzeug und den Prüfvorrichtungen entwickelt. Die Teststrukturen bestehen aus einem einheitlichen Einspann- und Hand-

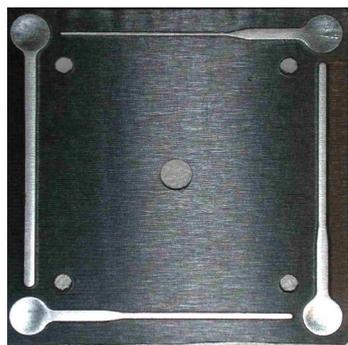


Bild 2: Testbauteil I mit vier Teststrukturen

Schichtaufbau von Cu/Sn gewonnen. Die Definition der Prägewulsthöhe ist aus Bild 3 zu ersehen. Darin sind das Maß „A“ die Prägewulsthöhe, „B“ die Höhe des verdrängten Thermoplasten, und „C“ die Einprägtiefe der Leiterbahn in den Thermoplast. Die Haftung ist

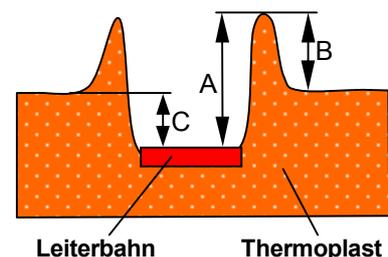


Bild 3: Definition der Prägewulsthöhe

\* Automatisierte Fertigungslinie für Heißpräge-MID-Baugruppen

bei drei von vier untersuchten Leiterbahnbreiten annähernd gleich groß. Nur die Leiterbahn mit 0,24 mm Breite hat eine etwas höhere Haftung, wie aus Bild 4 ersichtlich ist. Dies ist auf den bei schmalen Leiterbahnen größeren Einfluss der Verkrallungseffekte im Randbereich aufgrund der Prägewulstausbildung zurückzuführen.

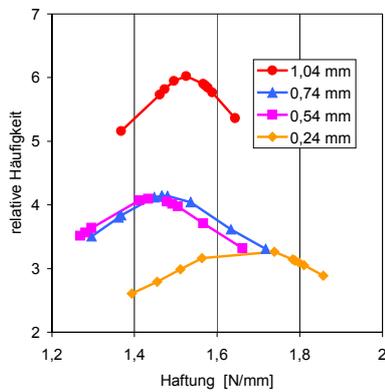


Bild 4: Abhängigkeit der Haftung von der Leiterbahnbreite (PA 6/6T Ultramid TKR 4355 G5)

Der Heißprägeprozess wird über die Prägekraft, die Haltezeit und die Prägetemperatur definiert. In Bild 5 – 7 ist der Einfluss dieser Parameter auf die Haftung und Prägewulsthöhe für den Kunststoff PA 6T/66 Grivory HT2V-3H dargestellt.

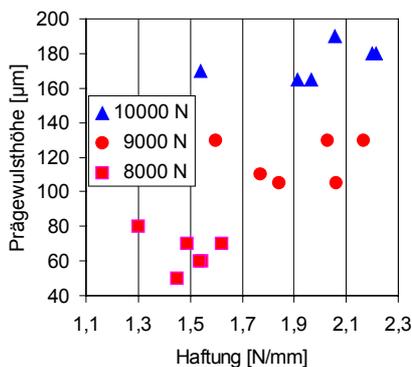


Bild 5: Einfluss der Prägekraft auf die Haftung und Prägewulsthöhe

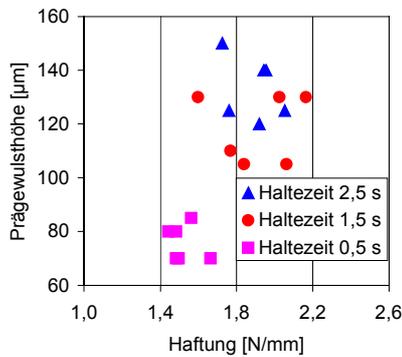


Bild 6: Einfluss der Haltezeit auf die Haftung und Prägewulsthöhe

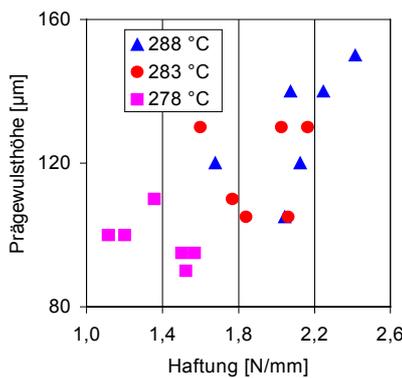


Bild 7: Einfluss der Prägetemperatur auf die Haftung und Prägewulsthöhe

Die Ergebnisse für eine Leiterbahnbreite von 0,54 mm sind in Tabelle 1 für unterschiedliche Kunststoffe zusammengefasst.

Thermoplast	Haftung [N/mm]	Prägewulsthöhe [µm]
LCP/PPS Vectra V 140	0,75	80
PPS Fortron1140 L4	1,7	30
PA 6T/66 Grivory HT2V-3H	1,5	50
PA 6/6T Ultramid TKR 4355 G5	1,5	90
PBT Ultradur B 4300 K6	0,95	250

Tabelle 1: Haftfestigkeit und Prägewulsthöhen

### Testbauteil II

Das zweite Bauteil wurde entwickelt, um Erkenntnisse zu Bauele-

menten zu gewinnen, bei denen sich das Leiterbild auf zwei oder mehreren gegeneinander geneigten Ebenen befindet. Solche Bauteile sind u. a. vorteilhaft, wenn Kontaktstifte senkrecht zur Normalen auf die Bestückungsebene eingepresst werden. Gleichzeitig sollte geklärt werden, ob zwischen den Kontaktstiften eine Leiterbahnführung auf die 2. Bestückungsebene für ein SMD-Bauteil der Größe 0603 realisierbar ist (Bild 8). Diese Anordnung erleichtert das Entflechten des Leiterbildes wesentlich. Das gesamte

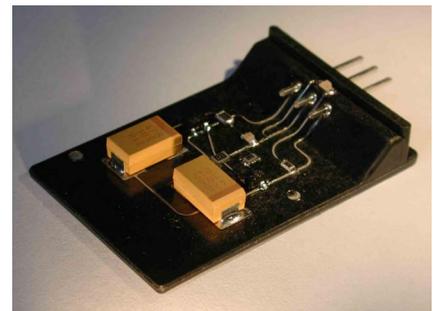


Bild 8: Testbauteil II

Leiterbild wurde mit der Leiterbahnbreite von 0,2 mm ausgeführt. Als Testschaltung wurde eine Blinkschaltung mit zwei LEDs entworfen. Die Schaltung wurde so dimensioniert, dass auf der Hauptbestückungsebene SMD-Bauteile der Größe SOT23, 2917, 0805 und 0603 bestückt werden. Mit den entsprechenden Optimierungen beim Heißprägeprozess sowie beim Dispensieren, Bestücken und Dampfphasenlöten der Bauteile konnte die Baugruppe problemlos und mit hoher Ausbeute gefertigt werden.

Kontaktperson:

Ing. grad. Hansjörg Seifert

Tel. ++49(711)121-3716

E-mail hansjoerg.seifert@izfm.uni-stuttgart.de

# Neue Verbindungstechniken für miniaturisierte Mikrofluidiksysteme aus Kunststoff

M. Münch, W. Eberhardt, M. Spritzendorfer

## Einleitung

Durch mikrostrukturierte fluidische Elemente wie z. B. Kanäle und Düsen können kleinste Volumina mit hohem Integrations- und Miniaturisierungsgrad bei geringstem Energieverbrauch und mit hoher Präzision gehandhabt werden. Typische Anwendungen im Bereich der Life Sciences sind Dosierung von Medikamenten, Pipettieren in der medizinischen Diagnostik und parallele Dosierung einer Vielzahl verschiedener Reagenzien für Screening-Analysen (HTS). Dabei können die fluidischen Bauteile meist nur einmal verwendet werden. Eine Reinigung ist meist technisch unmöglich oder zu teuer. Dies macht eine kostengünstige Produktion in hohen Stückzahlen erforderlich. Somit bietet der Einsatz von Kunststoffen gegenüber der Siliziumtechnologie entscheidende Vorteile. In diesem von der AiF geförderten Vorhaben wird die Herstellung von Mikrofluidikbauelementen aus Kunststoffen durch Präzisions-spritzgießen sowie verschiedene Füge-technologien zur Erzeugung geschlossener Mikrostrukturen erarbeitet. Das Vorhaben wird gemeinsam mit dem HSG-IMIT bearbeitet, wo der Entwurf und Test der Strukturen durchgeführt wird. Im HSG-IMAT werden die technologischen Arbeiten durchgeführt, insbesondere zu Bauteil-konstruktion, Werkzeugherstellung, Mikrospritzgießen und Füge-technik.

## Fluidische Geometrien

Als Teststruktur wurden zwei Bauteile mit in der Mikrofluidik typischen Geometrien und Strukturen entworfen. Zum einen wurde eine mikrofluidische Kanalstruktur realisiert, die einen rechteckigen Kanalquerschnitt von  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  bei einer Kanallänge von etwa 300 mm

aufweist („Racecourse“). Solche fluidischen Elemente können beispielsweise als Drossel, bei der Stoffcharakterisierung oder zum Transport von Fluiden durch kapillare Kräfte eingesetzt werden. Die Mikrokanäle weisen an ihren Enden große Öffnungen zum Befüllen bzw. zum Abströmen des Fluids auf. Bild 1 zeigt die Geometrie Racecourse mit vier Zentriersacklöchern zur Justierung eines Deckels sowie seitlichen Justierhilfen.

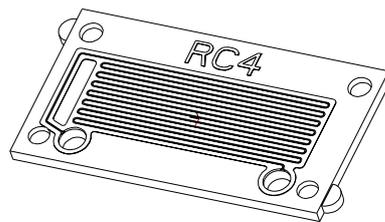


Bild 1: Schema Racecourse

Ein weiteres Beispiel ist ein Mikrodosiersystem für kleinste Flüssigkeitsmengen („Nanojet“). Hier fließt das eingebrachte Fluid aufgrund kapillarer Kräfte in das Flüssigkeitsreservoir der Struktur. Durch einen Kraftstoß auf den Deckel wird ein definiertes Flüssigkeitsvolumen aus der Düse abgegeben. Die kapillaren Widerstände sind dabei so bemessen, dass eine Rückströmung weitgehend vermieden wird. Sowohl der Bereich zwischen Öffnung und Reservoir als auch die Düse weisen einen Kanalquerschnitt von  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  auf. Bild 2 zeigt die Geometrie Nanojet mit zwei spiegelbildlichen Mikrodosiersystemen und vier Zentriersacklöchern.

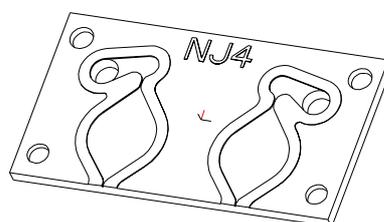


Bild 2: Schema Nanojet

Der für die strukturierten Mikrofluidiksysteme entworfene Deckel wird mit vier Zentrierdomen zentriert.

## Werkstoffe

Die wichtigsten Anforderungen an Kunststoffe für mikrofluidische Anwendungen sind gute Chemikalienbeständigkeit und optimales Abformverhalten. Eine ausreichende optische Transparenz ist für die fluidische Prüfung von Bedeutung. Interessante Werkstoffe sind somit ABS bzw. MABS, PC und PEEK. Dabei stellt ABS / MABS eine kostengünstige Variante dar, während der Hochleistungswerkstoff PEEK eine hohe mechanische Festigkeit und Temperaturbeständigkeit sowie eine sehr gute Chemikalienbeständigkeit aufweist.

## Werkzeugbau und Spritzgießen

Die Fertigung der Spritzgießwerkzeuge für Mikrofluidiksysteme stellt eine Herausforderung an den Werkzeugbau dar. Auswechselbare Einsätze wurden vollständig durch HSC-Fräsen hergestellt. Hierbei ist die Oberflächenqualität von entscheidender Bedeutung. Durch Optimierung der Frässtrategie konnten Oberflächen mit einer hohen Güte hergestellt werden, so dass die entsprechenden Spritzteile für den nachfolgenden Fügeprozess eine ausreichende Genauigkeit aufweisen.



Bild 3: Düsenbereich Nanojet (ABS)

Weiterhin muss gewährleistet sein, dass der Verzug der Spritzlinge minimal ist, d. h. der Spritzgießprozess muss entsprechend optimiert werden. Bild 3 zeigt die genaue Ausbildung des Düsenbereichs beim Nanojet.

### Fügeverfahren

Die Herstellung von geschlossenen mikrofluidischen Strukturen kann mit Klebe- und Schweißverfahren erfolgen. Beim Klebstoff-Transfer-Verfahren wird auf einem Wafer eine sehr dünne Klebstoffschicht durch Aufschleudern erzeugt. Die mikrostrukturierte Kanalplatte wird nun auf den beschichteten Wafer gestempelt (Bild 4) und anschließend mit dem Deckel gefügt. Danach wird der Klebstoff ausgehärtet.



Bild 4: Prinzip des Klebstoff-Transfer-Verfahrens

Dabei werden je nach Kunststoff UV-, licht- oder temperaturohärtende Klebstoffe eingesetzt. Bei optimaler Schichtdicke des Klebstofffilms können geschlossene Mikrostrukturen mit hoher Genauigkeit hergestellt werden (Bild 5).



Bild 5: Querschnitt eines geschlossenen Mikrokanals aus PEEK

In Zusammenarbeit mit der Firma Leister wurde als weiteres Verfahren das Laserdurchstrahlschweißen mit Hilfe einer geeigneten Maske durchgeführt (Bild 6).

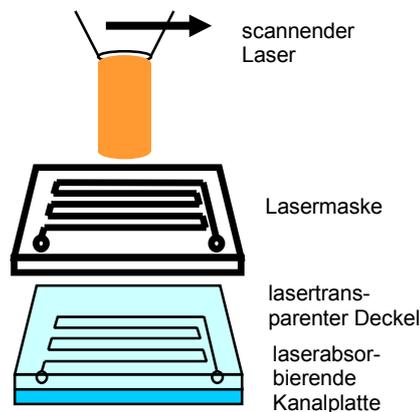


Bild 6: Prinzip des Lasermaskenschweißens

Hierbei besteht das mikrostrukturierte Bauteil aus einem bei der eingesetzten Laserwellenlänge ( $\lambda = 940 \text{ nm}$ ) absorbierenden Thermoplast. Der Deckel ist aus einem transparenten Kunststoff hergestellt. Zur Erzielung einer optimalen Verschweißung beider Komponenten ist eine präzise Anpassung der Maske an die Strukturen notwendig (Bild 7).

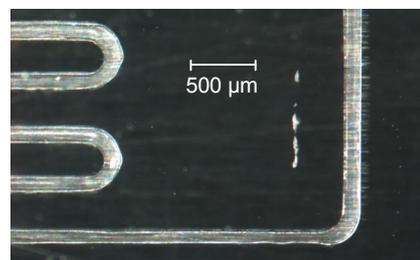


Bild 7: Durch Maskenlaserschweißen mit Deckel versehene Mikrokanäle aus ABS (Draufsicht)

Alternativ zu einem spritzgegossenen Deckel lassen sich zur Herstellung von geschlossenen Kanalstrukturen auch Folien einsetzen, welche mit Druck und Temperaturstoffschlüssig mit den strukturierten

Spritzlingen verbunden werden. Hierbei spielt die Werkstoffkompatibilität von Folie und Spritzling eine wesentliche Rolle. Als Folien eignen sich beispielsweise Zweischichtfolien bzw. siegelfähige Folien. Füge-temperaturen und -drücke müssen so gewählt werden, dass die filigranen Strukturen durch den Fügeprozess nicht zerstört werden. Bild 8 zeigt einen geschlossenen Mikrokanal hergestellt aus einem PE-Spritzling und einer PE-Folie mit Heißsiegelschicht.

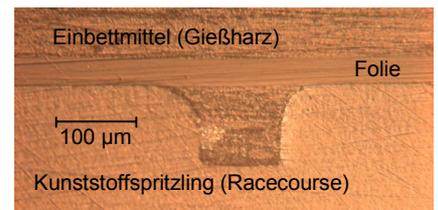


Bild 8: Querschnitt durch einen mit Folie abgedeckten Kanal der Geometrie Racecourse aus PE

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Spritzlingen mit hoher Oberflächen-güte geschlossene Mikrokanalstrukturen von hoher Qualität hergestellt werden können. Die Anpassung von Fügeverfahren und Kunststoff eröffnet somit neue Möglichkeiten zur Realisierung von kostengünstigen Mikrofluidikbauteilen.

Dieses Forschungsvorhaben (AiF-Vorhaben-Nr. 45 ZN) wird aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert.

Kontaktperson:  
Dipl.-Ing. Markus Münch  
Tel. ++49(711)121-3715  
E-mail markus.muench@izfm.uni-stuttgart.de

# Laserstrukturierung von MID-Bauteilen

D. Ahrendt, W. Eberhardt

## Einleitung

Im Gegensatz zu anderen Verfahren der MID-Technologie ermöglicht die Strukturierung von MID-Bauteilen mittels Laserstrahlung geringste Strukturbreiten bei maximaler Flexibilität. Bei der Laserstrukturierung wird kein bauteilspezifisches Werkzeug benötigt, das Layout lässt sich schnell durch Änderung des Belichtungsprogramms anpassen. Die berührungslose und nahezu kraftfreie Bearbeitung gestattet eine Strukturierung auch feinsten Bauteile bei einfachem Handling.

## Die Anlage

Seit Mai 2002 verfügt das HSG-IMAT mit der Microline3D der Fa. LPKF über eine Anlage zur 3D-Mikrostrukturierung von MID-Bauteilen. Eine X-, Y- und Z-Achse sowie je eine Dreh- und Kippachse ermöglichen eine fast beliebige und hochgenaue Positionierung der Bauteile auf dem Bearbeitungstisch (Bild 1).

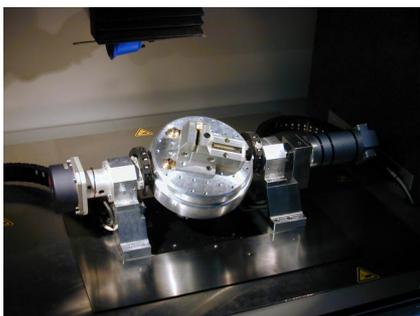


Bild 1: Bearbeitungstisch der Anlage

Weiterhin wird über ein Scannersystem der Strahlfokus innerhalb eines Scanvolumens von  $200 \times 200 \times 50 \text{ mm}^3$  hochdynamisch über die Bauteiloberfläche geführt. Die damit insgesamt 8 Achsen erlauben so auch eine „über Eck“-Strukturierung von Bauteilen nahezu beliebiger Geometrie (Bild 2). Durch den Einsatz eines Scanners sind,

abhängig vom eingesetzten Verfahren, Strukturierungsgeschwindigkeiten von über  $1000 \text{ mm/s}$  möglich. Auf Grund des besseren Absorptionsverhaltens vieler Metalle erfolgt die Strukturierung von Metallschichten mittels Laserstrahlung im UV-Bereich. Dazu wird die infrarote Strahlung eines Nd:YAG-Lasers mittels spezieller nichtlinearer Kristalle in Strahlung mit einer Wellenlänge von  $355 \text{ nm}$  konvertiert. Der Fokussdurchmesser liegt im Bereich von  $40 - 50 \mu\text{m}$ .

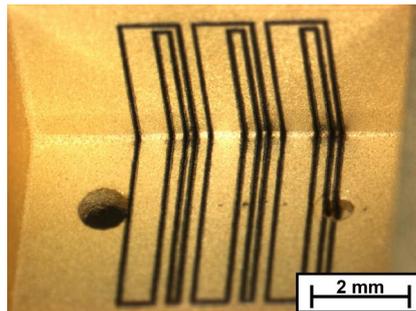


Bild 2: Strukturierung auf der Innenseite eines „Kastens“

Momentan werden im HSG-IMAT zwei prinzipiell verschiedene Strukturierungsverfahren untersucht.

## Laserablation

Bei der Strukturierung durch Laserablation wird die Metallschicht von ganzflächig metallisierten Oberflächen selektiv durch den Laserstrahl entfernt. Die so erzeugten Gräben umranden elektrische Strukturen, d. h. Leiterbahnen oder Pads, und isolieren diese voneinander.

Die Metallisierung der Substrate erfolgt vor allem durch außenstromlose chemische Abscheidung des Schichtsystems Kupfer, Nickel und Gold. Bei der Ablation dicker Metallschichten kann es zur Ausbildung eines Schmelzewulstes kommen (Bild 3). Die Wulsthöhe skaliert

dabei mit der Dicke der zu ablatierenden Metallschicht.

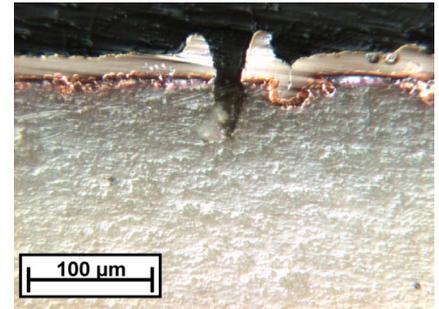


Bild 3: Querschliff einer strukturierten Metallschicht (Cu/Ni/Au auf LCP)

Somit eignet sich dieses Verfahren vorzüglich zur Strukturierung von dünnen Metallschichten für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik. Alternativ können dünne Startschichten laserstrukturiert und anschließend durch außenstromlose chemische Abscheidung von Nickel und Tauchgold verstärkt werden (Bild 4).

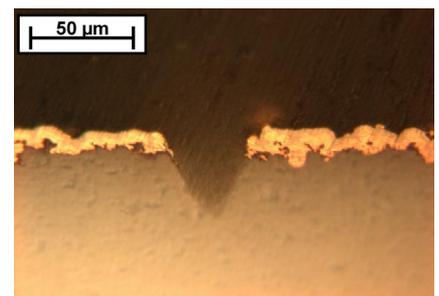


Bild 4: Querschliff einer strukturierten Kupferstartschicht nach Abscheidung von chemisch Nickel und Tauchgold

Momentan lässt sich mit diesem Verfahren ein Pitch (Abstand der Mitten zweier Leiterbahnen) von unter  $100 \mu\text{m}$  realisieren. Feinere Strukturbreiten erfordern eine Reduzierung des Laserstrahl-Fokussdurchmessers.

Mit einem kleineren Fokussdurchmesser von ca.  $25 \mu\text{m}$  und der damit einhergehenden höheren Inten-

sität im Fokus können künftig noch feinere Strukturen in Metallschichten bei minimalem Wulst erzeugt werden (Bild 5).

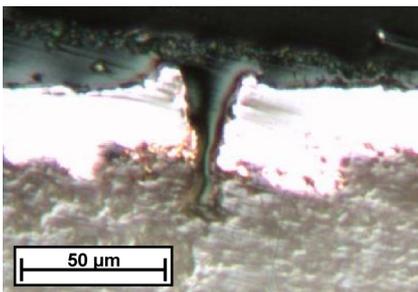


Bild 5: Querschliff einer strukturierten Metallschicht (Cu/Ni/Au auf LCP, mit feinerem Fokussdurchmesser)

### Laserdirektstrukturierung und additive Metallisierung

Bei der Laserdirektstrukturierung wird die Oberfläche spezieller Kunststoffe mittels Laserstrahlung aktiviert, so dass bei einer nachfolgenden außenstromlosen chemischen Metallisierung auf den belichteten Bereichen selektiv Metall abgeschieden wird.

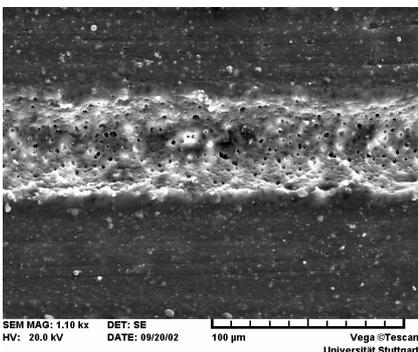


Bild 6: Laseraktivierung von PBT-MID  
Die Laseraktivierung führt zu einer Aufrauung der Oberfläche, welche auch für eine gute Haftung der Metallschicht notwendig ist (Bild 6). Um Fremdabscheidung zu vermeiden ist anschließend eine Reinigung notwendig. Der Metallisierungspro-

zess beginnt mit der Abscheidung von chemisch Kupfer (Bild 7). Auf diese Kupferschicht lässt sich anschließend außenstromlos chemisch Nickel sowie Tauchgold abscheiden.

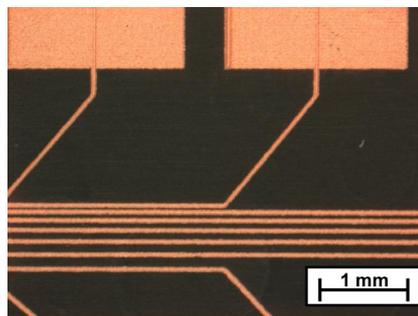


Bild 7: Laserdirektstrukturierte Leiterbahnen und Pads auf PBT-MID nach chemisch Kupfer

Derzeit stehen als laseraktivierbare Kunststoffe PP-MID, PBT-MID und PA6/6T-MID zur Verfügung. Aufgrund der Anforderungen einer Vielzahl von Anwendungen im Hinblick auf Temperaturbeständigkeit sind vor allem PBT-MID und PA6/6T-MID sehr vielversprechende Werkstoffe. Weitere laseraktivierbare Werkstoffe befinden sich bei LPKF derzeit in der Entwicklung.

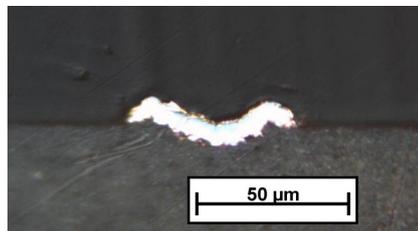


Bild 8: Querschliff einer Leiterbahn auf PBT-MID

PBT-MID und PA6/6T-MID unterscheiden sich stark im Hinblick auf ihre Eignung für feinste Strukturbreiten. PBT-MID lässt sich mit etwa 50 µm Leiterbahnbreite wesentlich feiner strukturieren als PA6/6T-MID (Bild 8), wo die minimale Breite von Leiterbahnen etwa 100 µm bei ei-

nem minimalen Pitch von 200 µm beträgt.

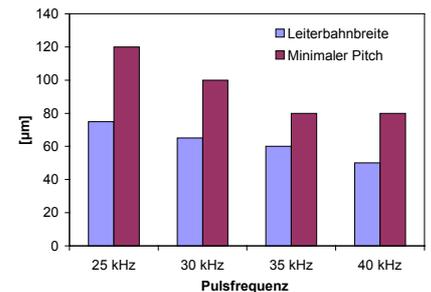


Bild 9: Leiterbahnen auf PBT-MID

Bild 9 zeigt den Einfluss der Laserparameter auf die erzielbaren Strukturbreiten von PBT-MID am Beispiel der Pulsfrequenz. Grundsätzlich ist das Prozessfenster für die optimale Strukturierung und Metallisierung bei PBT-MID größer als bei PA6/6T-MID.

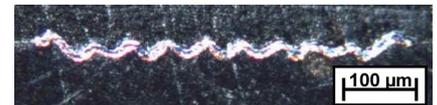


Bild 10: Querschliff eines Pads auf PA6/6T-MID



Bild 11: Querschliff eines Pads auf PBT-MID

Flächige Metallisierungen z. B. für Pads erhält man durch zeilenförmiges Abrastern der Fläche. Auch dabei unterscheiden sich beide Materialien stark. Die Rauheit von metallisierten Flächen auf PBT-MID ist deutlich geringer als auf PA6/6T-MID (Bild 10, 11).

Kontaktperson:  
Dipl.-Ing. Dirk Ahrendt  
Tel. ++49 (711)121-3729  
E-mail ahrendt@izfm.uni-stuttgart.de

# Laserstrukturiertes MID als Sensoraufnahme für eine intrakardiale Pumpe

W. Eberhardt, D. Ahrendt, M. Oprea

## Einleitung

Im Falle eines akuten Herzinfarkts oder nach erfolgter Operation am geöffneten Thorax kann die Herzfunktion vorübergehend so stark eingeschränkt sein, dass eine mechanische Unterstützung der Pumpfunktion des Herzens für eine gewisse Zeit notwendig ist. Hierfür wird derzeit von Impella ein intrakardiales Pumpsystem mit hoher Leistungsfähigkeit und minimal invasiver Platzierbarkeit angeboten (Bild 1).

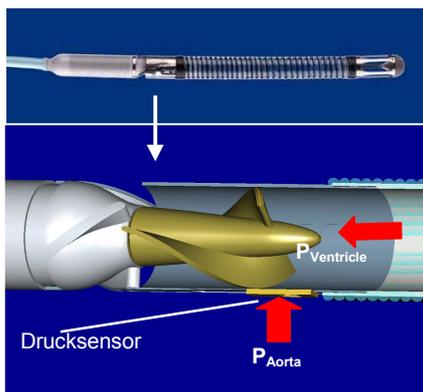


Bild 1: Intrakardiale Pumpe (Impella)

Mit Hilfe eines Drucksensors ist eine kontinuierliche Überwachung der Pumpfunktion möglich. Derzeit wird die Sensorik manuell aufgebaut. Die elektrische Verbindung des Drucksensorchips erfolgt mit Mikrodrähten. Mit dieser Technik ist die Grenze der Miniaturisierung erreicht und es müssen neue Wege beschritten werden. Weiterhin darf bei größeren Stückzahlen die wirtschaftliche Fertigbarkeit nicht außer Acht gelassen werden. Somit erscheint die MID-Technik für die Realisierung neuer Konzepte sehr vielversprechend. Insbesondere die Verbindung von Mikrospritzguss und Laserstrukturierung eröffnen neue Wege im Hinblick auf höchste Präzision von strukturierten Kunststoffteilen. Im Rahmen eines vom

BMBF geförderten Verbundprojekts wird im HSG-IMAT gemeinsam mit den Partnern Impella, Buss Werkstofftechnik und des IWE der RWTH Aachen eine MID-Sensoraufnahme für das Pumpengehäuse erarbeitet.

## Sensoraufnahme in MID-Technik

Die Funktion der Sensoraufnahme ist primär die Fixierung und Positionierung des Drucksensorchips auf dem Pumpengehäuse, wobei die Beeinträchtigung des Blutstroms im Hinblick auf die Pumpleistung minimiert werden muss. Weiterhin dient die Sensoraufnahme als Träger für die elektrische Verdrahtung des Sensorchips. Der empfindliche Sensorchip muss dabei so aufgebaut werden, dass durch die Montage keine mechanischen Spannungen im Chip entstehen. Weiterhin muss der Chip vor Einflüssen der Umgebung geschützt sein. Die dreidimensionalen Gestaltungsmöglichkeiten des Kunststoffspritzgießens erlauben hierbei eine optimale Formanpassung der MID-Sensoraufnahme an das komplette Blutpumpensystem. Bild 2 zeigt hierzu eine Modellansicht.

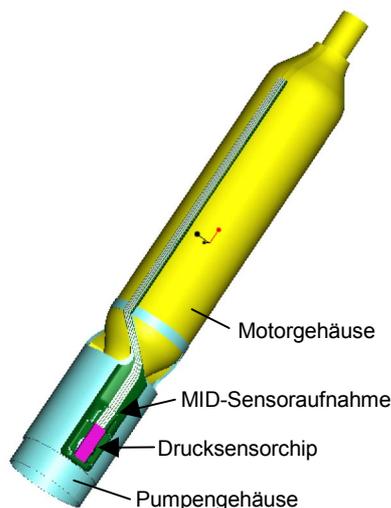


Bild 2: Modellansicht der intrakardialen Pumpe mit MID-Sensoraufnahme

Eine Detailansicht ist in Bild 3 gezeigt. Der Drucksensorchip befindet sich in einer Vertiefung der MID-Sensoraufnahme. Die elektrische Kontaktierung des Chips sowie die mechanische Befestigung kann durch spezielle Klebetechniken erfolgen. Die elektrische Signalableitung erfolgt über vier Leiterbahnen, welche über den Steg des Pumpengehäuses und anschließend über das Motorgehäuse führen. Die Sensoraufnahme wurde im HSG-IMAT konstruiert und bei Buss Werkstofftechnik spritzgießtechnisch hergestellt. Die anschließende Metallisierung und Laserstrukturierung erfolgte im HSG-IMAT.

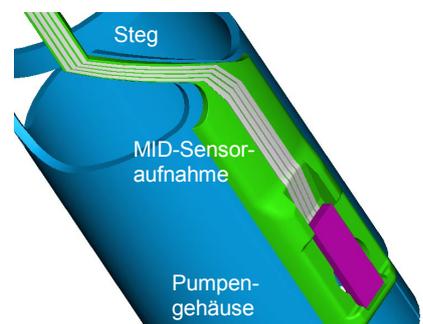


Bild 3: MID-Sensoraufnahme auf Pumpengehäuse

## Werkstoffe

Aufgrund der sehr filigranen Abmessungen des MID-Teils werden sehr hohe Ansprüche an das Eigenschaftsprofil des Kunststoffs gestellt. Neben sehr guter Fließfähigkeit im Spritzgießprozess muss der Kunststoff metallisierbar sowie temperaturstabil sein und darf keine toxischen Bestandteile enthalten. Somit eignet sich für diese Anwendung insbesondere LCP oder PEEK, wobei LCP das bessere Formfüllverhalten hat.

Die mechanischen Eigenschaften spielen auch bei der Entformung der filigranen Teile beim Spritzgießprozess eine große Rolle. Beim Vergleich von verschiedenen LCP-Typen hat sich der Typ Vectra E 530i als am geeignetsten erwiesen (Bild 4).



Bild 4: MID-Sensoraufnahme aus LCP

### Metallisierung und Strukturierung

Vor der außenstromlosen Metallisierung von LCP erfolgt der Aufschluss durch alkalische Vorbehandlung. Die Oberfläche wird hierbei aufgeraut, um eine gute Haftfestigkeit zu erzielen. Beim eingesetzten LCP Vectra E530i erfolgt danach eine kolloidale Palladiumaktivierung. Nach weiteren Zwischenschritten erfolgt die Abscheidung von chemisch Kupfer. Die etwa 4 µm dicke Kupferschicht wird anschließend mit einem frequenzverdreifachten Nd:YAG-Laser (Wellenlänge 355 nm) durch Ablation strukturiert. Nach der Strukturierung erfolgt der weitere Schichtaufbau mit chemisch Nickel und abschließend Tauchgold.

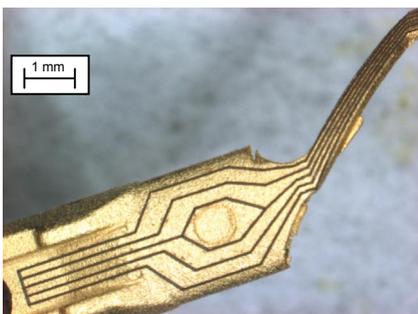


Bild 5: Metallisierte und strukturierte MID-Sensoraufnahme (LCP)

Die hohe dreidimensionale Komplexität des MID erfordert hierbei eine

Laserbearbeitungsanlage mit hoher Positioniergenauigkeit im Dreidimensionalen sowie einer Laserquelle mit geringem Fokussdurchmesser.

An der engsten Stelle im Bereich des Steges über das Pumpengehäuse laufen hierbei vier Leiterbahnen über eine Gesamtbreite von etwa 0,5 Millimetern, d. h. der Pitch beträgt etwa 100 Mikrometer (Bild 5 und 6).

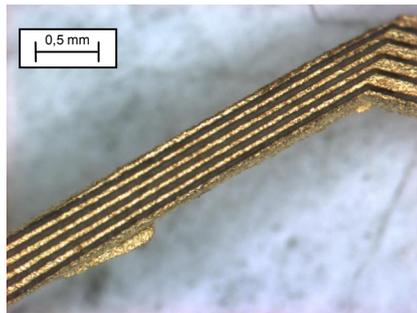


Bild 6: MID-Sensoraufnahme im Bereich des Steges über das Pumpengehäuse

Neben LCP ist PEEK für Anwendungen im medizinischen Bereich vor allem wegen seiner hervorragenden Biokompatibilität ein sehr interessanter Werkstoff. Für die Metallisierung von PEEK kann die Metallabscheidung durch Sputtern (PVD) erfolgen. Für eine gute Haftfestigkeit ist hierbei eine Plasmabehandlung vor der Metallabscheidung notwendig. Ein anderes Metallisierungsverfahren für PEEK beginnt mit der Konditionierung mittels gasförmigem SO<sub>3</sub> nach einem von der Fa. Schlötter entwickelten Verfahren. Darauf erfolgt die Abscheidung von chemisch Nickel-Bor. Diese Schicht wird nun laserstrukturiert und abschließend tauchvergoldet. Grundsätzlich ist auch eine Strukturierung der kompletten Schichtfolge Nickel-Bor/Gold möglich. Die erforderlichen Schichtdicken sind aufgrund der minimalen

Strombelastung gering. Die Rauheit des mittels PVD oder nach dem Verfahren von Schlötter metallisierten PEEK ist im Gegensatz zu außenstromlos metallisiertem LCP relativ gering, was für die Aufbau- und Verbindungstechnik des Sensorchips sehr vorteilhaft ist. Bild 7 zeigt eine Teststruktur auf unverstärktem PEEK, welches nach dem Verfahren von Schlötter metallisiert wurde.

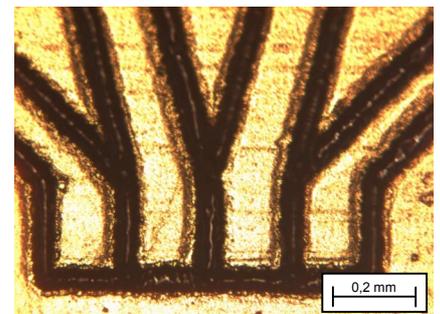


Bild 7: Teststruktur auf metallisiertem PEEK

### Ausblick

Eine Herausforderung vor allem an Werkzeugbau und Spritzgießtechnik ist die Realisierung des kompletten Pumpengehäuses aus Kunststoff. FEM-Simulationen hierzu haben gezeigt, dass bei geeigneter Auslegung eine ausreichende mechanische Stabilität eines Pumpengehäuses aus metallisiertem Kunststoff gegeben sein sollte. Insbesondere für die angestrebte Verkleinerung des Pumpengehäuses erscheint es notwendig, die Sensoraufnahme im Pumpengehäuse zu integrieren.

Kontaktperson:

Dr. Wolfgang Eberhardt

Tel. ++49 (711)121-3717

E-mail eberhardt@izfm.uni-stuttgart.de

# Simulationstechniken in der Mikrosystemtechnik

R. Mohr, D. Warkentin

## Einleitung

Simulation ist die Methode, beliebige reale Vorgänge unter Zuhilfenahme von Computern nachzuahmen. Als erstes benötigt man ein mathematisches Modell mit dem die wesentlichen Veränderungen bei einem Vorgang beschrieben werden können. Die Systemtheorie stellt dafür verschiedene Werkzeuge bereit, mit denen globale Eigenschaften der Modelle sowie qualitative Aussagen über ihr Verhalten gemacht werden können.

Die Simulation gliedert sich im wesentlichen in folgende vier Phasen:

- Modellbildung
- Parameterbestimmung
- Untersuchung
- Auswertung

## Modellbildung

Als Modell eines Prozesses eignet sich grundsätzlich jedes System, bei dem sichergestellt ist, dass es die als wesentlich erachteten Zusammenhänge und Vorgänge richtig wiedergibt.

## Mathematische Beschreibung mit Hilfe von Differenzialgleichungen

Reale Vorgänge werden mathematisch durch Differenzialgleichungen beschrieben. Die Lösung übernimmt der Computer. In dem Fall, wenn die Differenzialgleichungen nur von der Zeit abhängen, kann mit Hilfe von Computeralgebraprogrammen wie z. B. MAPLE, MATLAB oder MATHEMATICA eine Lösung gefunden werden. Wenn die Differenzialgleichungen zeit- und ortsabhängig sind, müssen andere numerische Lösungsverfahren verwendet werden, nämlich Differenzenverfahren und vor allem die Methode der Finiten Elemente.

Damit lassen sich Feldprobleme allgemeiner Art lösen. Im Gegensatz zur rein mathematischen Beschreibung wird die reale Geometrie und das Material des zu untersuchenden Bauteils verwendet und in kleine Teilgebiete, die finiten Elemente, zerlegt. Für jedes dieser Elemente wird eine Lösung der gewünschten Größe berechnet. Es gibt zahlreiche kommerzielle Programme zur Finite Elemente Analyse.

## ANSYS von Swanson

ANSYS ist ein sogenanntes general purpose FE-Programm. Es bietet folgende Analysemöglichkeiten: Strukturmechanik, thermische und fluidische Probleme, Elektromechanische Probleme.

Die Stärke von ANSYS liegt eindeutig bei der Strukturmechanik. Der Grund hierfür liegt in der Vielzahl der Elemente mit denen das Grundgebiet vernetzt werden kann. Beispielsweise wurde im IZFM die Spannungsverteilung bei einem mikromechanischen Beschleunigungssensor berechnet.

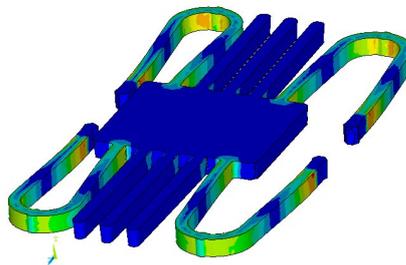


Bild 1: Mechanische Spannungen bei einem mikromechanischen Beschleunigungssensor mit ANSYS berechnet.

## MAXWELL von Ansoft

Dieses Finite-Elemente-Programm ist eine Software für dreidimensionale elektromagnetische, elektromechanische und thermische Analysen im 2D- und im 3D-Bereich.

Im 2D-Bereich: Elektrostatik und Magnetostatik, Wirbelstromprobleme, Gleich- und Wechselstromprobleme (z. B. Widerstandsverhalten), thermische Probleme (z. B. Erwärmung eines Leiters infolge von Strom) und transiente Berechnungen, d. h. Änderung des Feldes bei Bewegung von Leitern u. a.

Im 3D-Bereich: Elektrostatik und Magnetostatik, Wirbelströme und thermische Problemstellungen sowie ebenfalls transiente Berechnungen.

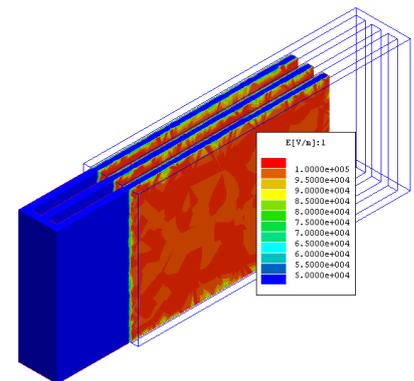


Bild 2: Elektrisches Feld einer mikromechanischen Kammerstruktur mit MAXWELL berechnet

## FIDAP von Fluent

FIDAP ist ein Finite-Elemente-Programm zur Simulation fluidischer Probleme. In der Mikrosystemtechnik wird damit z. B. das Füllverhalten kleiner Kanäle untersucht.

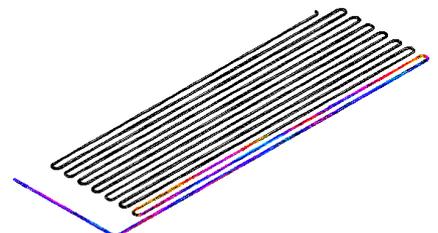


Bild 3: Simulation der Befüllung kleiner Kanäle mit FIDAP. Die verschiedenen Farben zeigen den Grad der Befüllung.

## Analogien

Eine häufig verwendete Methode zur Modellbildung ist die Aufstellung von Analogien physikalischer Größen mit elektrischen Netzwerken. Beispielsweise werden Feder-Masse-Systeme mit Hilfe von Kondensatoren und Spulen nachgebildet. Damit lassen sich mechanische Systeme mit Hilfe von elektrischen Systemen beschreiben und untersuchen. Beispielsweise wird das elektromechanische System "Schwingquarz" durch das folgende elektrische Ersatzschaltbild beschrieben.

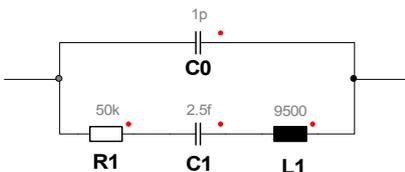


Bild 4: Elektrische Analogie eines Schwingquarzes.

Mit Hilfe dieses Ersatzschaltbildes kann z. B. das Verhalten in der Nähe der Resonanzfrequenz beschrieben werden. Die Analyse wird mit einem elektrischen Netzwerkanalyseprogramm durchgeführt. Hierfür stehen am Institut PSpice von MicroSim und SIMPLORER von Ansoft zur Verfügung.

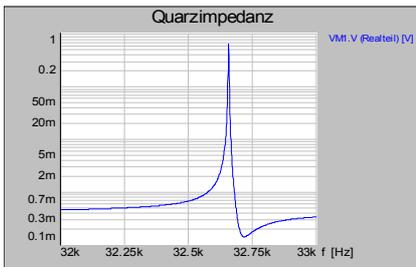


Bild 5: Impedanz des Schwingquarzes in der Nähe der Resonanzfrequenz

## Grafische Modelle

Die meisten Softwarepakete zur Simulation dynamischer Systeme

verwenden mittlerweile grafische Darstellungen, die man als daten- oder signalflussorientierte Modellbildung interpretieren kann.

Man unterscheidet zeitkontinuierliche, zeitdiskrete Modelle und sogenannte Zustandsmodelle. Ein Beispiel hierfür sind PETRI-Netze. Zeitkontinuierliche Modelle, wie sie in der Analogrechenstechnik verwendet wurden, sind heute nicht mehr üblich. Zeitdiskrete Modelle sind für die Verarbeitung im Digitalrechner geeignet. Mit den Methoden der digitalen Signalverarbeitung und der digitalen Regelung lassen sich viele Systeme sehr gut beschreiben und mit dem Computer simulieren.

Verwendete Programme sind das mit MATLAB kombinierte SIMULINK und SIMPLORER.

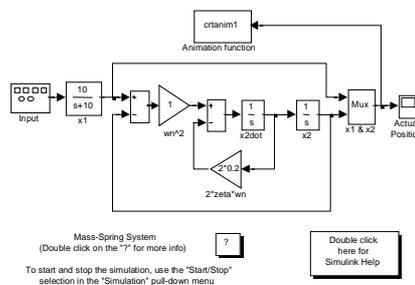


Bild 6: Modell eines Feder-Masse-Systems mit SIMULINK

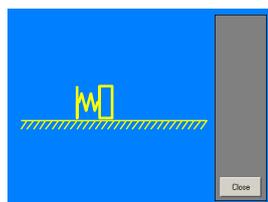


Bild 7: Grafische Animation des Feder-Masse-Systems aus Bild 6.

## Zustandsmodelle

Die Beschreibung von Prozessen erfolgt mit Hilfe von Zustandsgraphen (state graph analysis). Es gibt

endlich viele Zustände, in denen sich das zu simulierende System befindet und die entsprechenden Übergangsbedingungen (Transition).

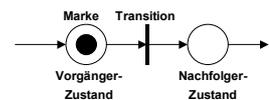


Bild 8: Grafische Elemente beim PETRI-Netz-Zustandsmodell

Mit Hilfe von Petri-Netzen kann man qualitative Aussagen über das Verhalten sehr komplexer konkurrierender Prozesse treffen.

Die Zustandsanalyse ist mit den Programmen MATLAB/SIMULINK und mit SIMPLORER möglich.

## Zusammenfassung

Die Simulation spielt in der Mikrosystemtechnik eine zunehmend wichtige Rolle. Es müssen schon Aussagen über das reale System gemacht werden bevor es gefertigt ist. Simulation in der Mikrosystemtechnik erfordert sehr komplexe Modelle und die Berücksichtigung vieler parasitärer Effekte. Die dafür erforderliche hohe Rechnerleistung, schnelle Prozessoren und viel Speicherplatz, sind inzwischen vorhanden.

Trotzdem benötigen Simulationsrechnungen Zeiten im Bereich von 20 Minuten bis zu mehreren Stunden. Vor allem Rechnungen zu fluidischen Problemen sind in dieser Hinsicht sehr aufwändig.

Kontaktpersonen:  
Dipl.-Ing. Rainer Mohr  
Tel. ++49(711)121-3713  
E-mail rainer.mohr@izfm.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. Daniel Warkentin  
Tel. ++49(711)121-3708  
E-mail daniel.warkentin@izfm.uni-stuttgart.de

# Tooling und Verfahrensstrategien beim elektrochemischen Fräsen mit ultrakurzen Spannungsimpulsen ( $\mu$ ECM)

W. T. Gmelin

Anfang 2000 wurde erstmals das elektrochemische Mikrofräsen mit ultrakurzen Spannungsimpulsen vorgestellt [1]. Die prinzipbedingt hohe Präzision des Verfahrens durch den auf wenige  $\mu\text{m}$  lokal begrenzten anodischen Abtrag sowie das berührungslose und werkzeugverschleißfreie Arbeitsprinzip erlauben die ultrapräzise Strukturierung von harten Werkstoffen und Konstruktionswerkstoffen im Subminiaturmaßstab. Kaum ein anderes Verfahren hat ein vergleichbares Potenzial beispielsweise die Fertigungsprobleme bei der Herstellung von Spritzgussformen für die Mikrotechnik oder aber auch einzelner funktioneller Konstruktionselemente wie feinste Kanäle oder Verdüsungselemente zu lösen. In Kooperation mit dem FHI in Berlin wurde daher am IZFM ein Demonstrator aufgebaut mit dem Ziel, diese neue Technologie umzusetzen und zur Herstellung von Mikrospritzgusswerkzeugen und feinsten Konstruktionselementen zu nutzen. Dabei standen erste Untersuchungen der Prozessführung, Prozesssicherheit als auch die Fertigung von geeigneten Werkzeugen im Vordergrund, deren Ergebnisse hier zusammengefasst dargestellt werden.

## Verfügbare Werkzeugtypen

Analog zum Fräsen erfolgt die Bearbeitung komplexer Bauelemente durch definierte Werkzeugbewegungen geometrisch definierter Werkzeuge. Dies setzt die Verfügbarkeit geeigneter standardisierter und in ihren Dimensionen skalierbarer Werkzeuge voraus, deren geometrische Genauigkeit durch die werkzeugverschleißfreie Bearbeitung mit  $\mu$ ECM erhalten bleibt. Dadurch - und wegen der hohen Abbildungstreue des Verfahrens - gewinnt neben kleinsten erreichba-

ren Durchmessern insbesondere die Spitzenform des Werkzeuges an Bedeutung, welche der zu strukturierenden Geometrie angepasst werden kann. Gräben mit geforderten, scharfkantigen Wand-Boden-Übergängen beispielsweise erfordern zylinderförmige Werkzeuge mit minimalsten Flächenübergangsradien. Wannenförmige Strukturelemente mit größeren Übergangsradien oder Freiformflächen sind besser mit Werkzeugen herzustellen, deren Spitze über einen Radius verfügt. Um weitestgehend alle Bearbeitungsfälle abzudecken sind im wesentlichen vier Werkzeugtypen erforderlich; Zylinder- oder Schaftfräser, Radienfräser, Kugelfräser und Gravierstichel (Spitze). Diese stehen jetzt auch für das elektrochemische Mikrofräsen mit ultrakurzen Spannungsimpulsen zur Verfügung (Bild 1) und erweitern somit die Einsatzfähigkeit des Verfahrens erheblich.

## Herstellung standardisierter Werkzeuge

Die Werkzeugherstellung erfolgt im Wesentlichen in drei Schritten:

1. Kontaktieren des Rohmaterials an einem Werkstückträger.
2. Verjüngung des Schaftdurchmessers durch elektrochemisches Ätzen auf Sollmaß.
3. Bearbeiten des Drahtendes gemäß dem gewünschten Werkzeugtyp.

Als Rohmaterial wird wegen seiner hohen Festigkeit ein Wolframdraht mit einem Durchmesser von  $50\ \mu\text{m}$  eingesetzt. Zur einfachen Handhabung wird der zunächst grob abgelängte Draht durch Widerstandsschweißen an einen Stahlstift gefügt, welcher Bestandteil des Werkzeugträgers ist. Danach erst wird

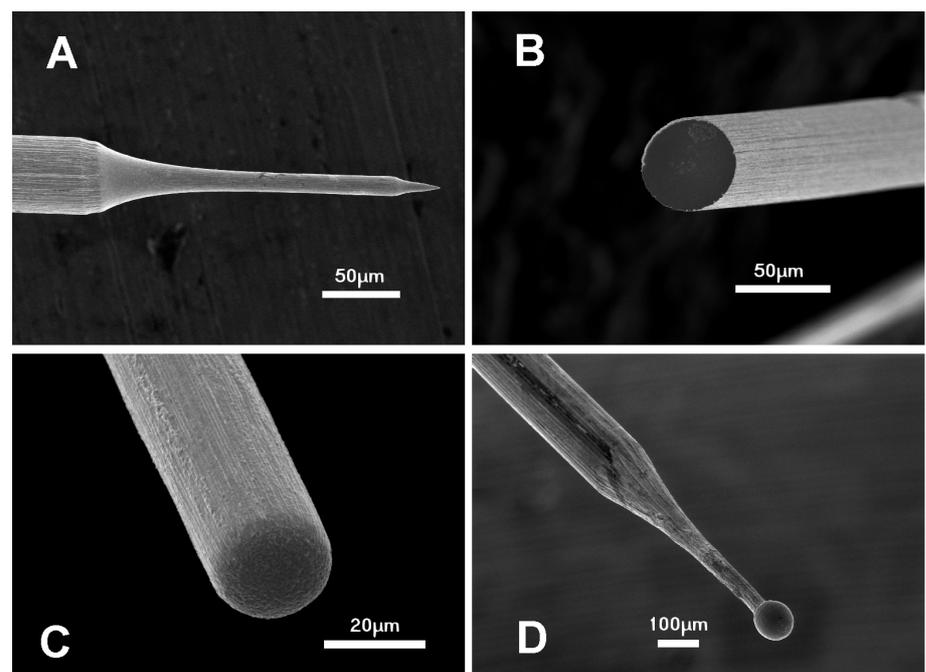


Bild 1: Am IZFM hergestellte Werkzeugtypen aus Wolfram: Gravierstichel A, Schaftfräser B, Radienfräser C, Kugelfräser D.

der Drahtdurchmesser elektrochemisch in NaOH-Lösung mit einem Platindraht als Gegenelektrode auf wenige  $\mu\text{m}$  Durchmesser reduziert. Prozesskenngrößen hierbei sind im Wesentlichen die Größe der angelegten Gleichspannung sowie die Anzahl der durch das System geflossenen Ladungsträger. Die verwertbare Werkzeuglänge variiert dabei nur mit der Eintauchtiefe des Rohdrahtes in den Elektrolyten, wodurch Aspektverhältnisse größer 200 realisierbar sind. Auch Mehrfachverjüngungen über die Gesamtlänge des Werkzeuges sind technisch problemlos möglich und spielen bei der Herstellung von Bohrungen mit einem kombinierten Schrupp-Schlicht-Gang eine wichtige Rolle. Bild 2 zeigt eine REM-Aufnahme eines Werkzeuges mit einem Aspektverhältnis um 40 bei einem Durchmesser von ca.  $25 \mu\text{m}$ .

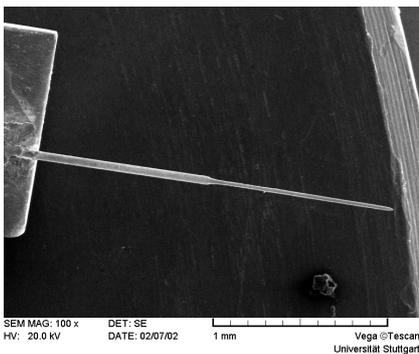


Bild 2: REM Aufnahme eines Werkzeuges. Zu sehen ist ein Teil des Werkzeugträgers (links), die Schweißnaht sowie das verjüngte Werkzeug.

Am IZFM konnten Schaftdurchmesser bis  $5 \mu\text{m}$  bei Werkzeuglängen größer  $1000 \mu\text{m}$  realisiert werden. Für die reproduzierbare Herstellung kleinerer Durchmesser ist eine automatisierte Vorrichtung erforderlich, die sich momentan im Aufbau befindet.

Der gezielten Durchmesserreduzie-

rung der Werkzeuge folgt die Spitzenausformung je nach gewünschtem Werkzeugtyp (vgl. Bild 1). Dabei werden folgende Technologien eingesetzt:

1. Elektrochemisches Ätzen mit niederfrequenter Spannung oder Gleichspannung für die Herstellung der Spitzenform des Gravierstichels.
2. Elektrochemisches Ätzen mit ultrakurzen Spannungsimpulsen für die Herstellung der scharfkantigen, zylinderförmigen Werkzeuge. Mit dieser Methode können auch nahezu beliebige Querschnittsgeometrien hergestellt werden.
3. Laserbearbeitung zur Herstellung der Kugel. Dabei wird Wolfram aufgeschmolzen und formt aufgrund der Oberflächenspannung im flüssigen Zustand eine Kugel, deren Größe in Abhängigkeit der Pulsleistung variiert.

Damit stehen Grundlagen für reproduzierbar herstellbare, hochfeste Werkzeuge bereit, deren Dimensionen sich mit hohen Aspektverhältnissen bis in den Submikrometerbereich skalieren lassen. Der Bereitstellung der Werkzeuge folgten Untersuchungen der Werkzeugweg- und Bearbeitungsstrategien des neuen Verfahrens.

### Werkzeugwegstrategien bei der $\mu\text{ECM}$ -Bearbeitung

Aufgrund der ähnlichen Werkzeugführung des  $\mu\text{ECM}$ -Verfahrens gegenüber dem konventionellen Fräsen kann ein standardisiertes CAD/CAM-Programm für die Datenbereitstellung eingesetzt werden. Aus Bauteildaten werden hierbei unter Berücksichtigung der Pro-

zess- und Werkzeugdaten die Werkzeugbahnen und Vorschubgeschwindigkeiten ausgegeben (NC-Satz). Wichtige Prozessinformationen für das  $\mu\text{ECM}$ -Verfahren fehlen allerdings gänzlich. Mit dem Ziel des Erreichens einer hohen Prozesssicherheit müssen daher den NC-Sätzen folgende Werkzeugwegstrategien überlagert werden.

- Ausweichstrategien bei Werkzeug-Werkstückkontakt
- Geschwindigkeitsanpassung bei zu vielen Kontakten
- Additive Z-Zustellungen oder künstliche seitliche Bahnbreitenaufweitung (Bild 3)
- Plausibilitätstests zur Detektion von Verunreinigungen, die zwischen Werkzeug und Werkstück als Isolator wirken, wodurch das Werkzeug mangels Kontaktdektion verbogen werden kann.

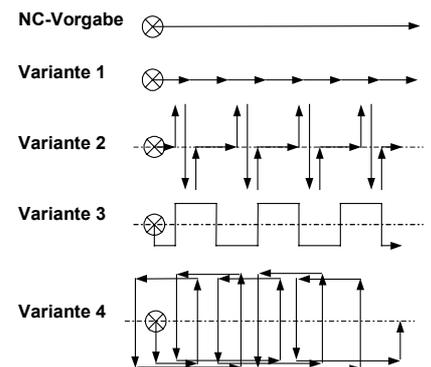
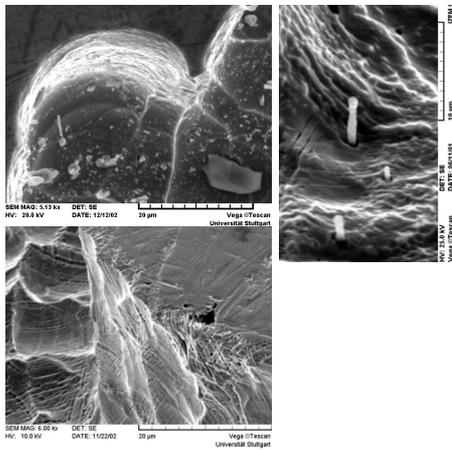


Bild 3: Verschiedene Varianten der Werkzeugwegstrategie, die dem NC-Positioniersatz überlagert werden.

Dabei spielen neben den Prozessparametern nicht nur Gefügestruktur, Korngrößen, Inhomogenitäten oder Fremdeinschlüsse des Werkstoffes (Bild 4) sowie Verunreinigungen des Elektrolyten eine wichtige Rolle, sondern auch mechanische und steuerungstechnische Defizite, denen bei der Wahl der

Strategie Rechnung getragen werden muss. Am IZFM durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass hier nicht eine einzelne Strategie zum Ziel führt, sondern eine anforderungsbezogene automatisierte Auswahl verschiedener Verfahrensstrategien durchgeführt werden muss.



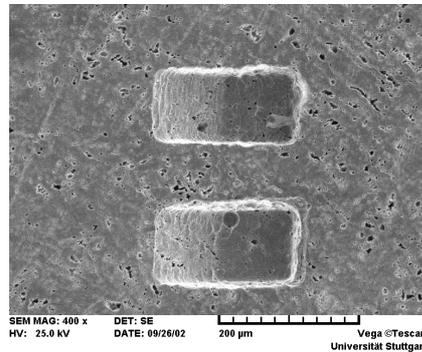
**Bild4: Links oben und unten:** Wandstrukturen in verschiedenen Edelstahl Chargen (1.4301), die mit gleichen Bearbeitungsparametern bearbeitet wurden. Gut sichtbar die weitaus größeren Unregelmäßigkeiten bei der unteren Struktur aufgrund unterschiedlicher Korngrößen. **Rechts:** Freigeätzte Legierungselemente, hier höchstwahrscheinlich Mangansulfide.

Zwar erhöht sich dabei die Bearbeitungszeit, der Prozess verläuft jedoch sicher und passt sich den Gegebenheiten bestmöglich an.

### Bearbeitungsstrategien

Gegenüber den Verfahrenstrategien werden Bearbeitungsstrategien während der Modellierung der NC-Daten am CAM-Arbeitsplatz festgelegt. Hierbei bietet sich an, entsprechende für das HSC-Fräsen entwickelte Prozeduren durch geeignete Parametrisierung auf das  $\mu$ ECM-Verfahren zu übertragen. Abweichungen ergeben sich aus

den grundsätzlich verschiedenen Arbeitsweisen. Während beim HSC-Fräsen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten ein schneller Vorschub bei geringer Zustellung für Abtrag sorgt, kann beim  $\mu$ ECM-Verfahren nur langsam, dafür aber die gesamte Tiefe ohne Zwischenzustellung bearbeitet werden. Auf die Verfügbarkeit der Bearbeitungszyklen hat dies keinen Einfluss. Vom spiralförmigen Eintauchen bis zum Tiefbohrzyklus können alle Bearbeitungszyklen angewandt werden. Durch Variation der Prozessparameter ist auch eine Schrupp- und Schlichtbearbeitung möglich, wobei die Bearbeitungszeit deutlich reduziert wird (Bild 5).

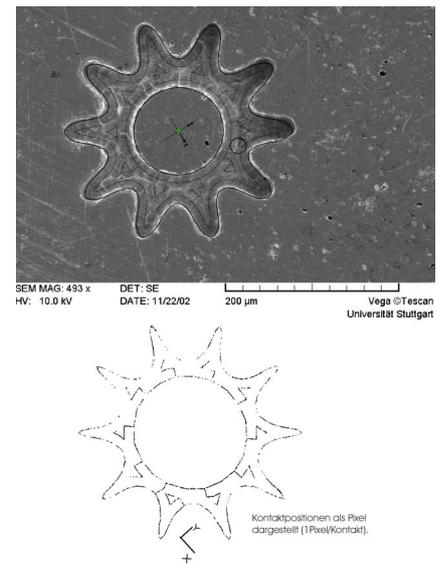


**Bild 5:** Die obere Struktur wurde nur geschlichtet, die untere Struktur zuerst geschruppt, danach geschlichtet. Zeiterparnis: 64%

### Ausblick

Bisherige Untersuchungen führten am IZFM zu einer Anlagentechnik, mit der reproduzierbar kleine Strukturen hergestellt werden können und mit der weitere wichtige Fragestellungen beispielsweise der Werkstoffhomogenität und Legierung bearbeitet werden können. Bisher gewonnene Erkenntnisse fließen dabei direkt in die Entwicklung einer neuen Laboranlage ein, die sich momentan im Aufbau befindet. Darüber hinaus sind auch

Arbeiten fortgeschritten, die sich mit dem Aufbau von neuen, leistungsfähigen und schnelleren Pulstreibern beschäftigen.



**Bild 6: Oben:** Strukturierung eines Mikrozahnrades ( $\varnothing$  270  $\mu$ m) in 1.4301 Edelstahl durch ein Wolframwerkzeug ( $\varnothing$  10  $\mu$ m). Der REM-Aufnahme wurden Werkzeugwegbahn und Konturverlauf überlagert. **Unten:** Von der Steuerung ausgegebene Kontaktpositionen zur Verifikation des Prozessablaufes.

Das Ziel der Herstellung komplexerer Strukturen (Bild 6) wie Formeinsätze für den Mikrospritzguss ist ein gutes Stück näher gerückt.

[1] Schuster, R.; Kirchner, V.; Allongue, P.; Ertl, G.: Electrochemical micromachining, Science 2000, 289, 98-101.

Kontaktpersonen:  
Dipl.-Ing. Thomas Gmelin  
Tel. ++49(711)121-3714  
E-mail thomas.gmelin@izfm.uni-stuttgart.de  
Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück  
Tel. ++49(711)121-3710  
E-mail heinz.kueck@izfm.uni-stuttgart.de

# Anlagen - Geräte - Verfahren

## Software-Tools

Mechanische Konstruktion:  
Pro/ENGINEER,  
AutoCAD

Elektromechanisches Design:  
ZUKEN EM Designer

CAD-CAM-Prozessoren:  
Cimatron,  
Intercim

Spritzgießsimulation:  
Moldflow Plastics Insight mit  
3D-Tool

FEM-Analyse:  
ANSYS, MAXWELL, FIDAP

Leiterplattenentwurf:  
EAGLE

Schaltungsanalyseprogramme:  
MicroSim Pspice, SIMPLORER

Computeralgebraprogramme:  
MAPLE, MATLAB/SIMULINK

DOE:  
Echip

Messdatenerfassung:  
TestPoint

## HSC-Frästechnik

5-Achsen-Präzisionsfräsmaschine:  
Fehlmann Picomax 60 M

3-Achsen-Hochpräzisions-  
fräsmaschine:  
PRIMACON PFM 24

## Spritzgießtechnik

Zweikomponenten-  
Spritzgießmaschine:  
Arburg 320S 500 – 60/60

Mikrospritzgießmaschine:  
Battenfeld Microsystem 50

## Laserbearbeitung

KrF-Excimer-Lasersystem:  
Exitech LPX220i  
Diodengepumpter Nd:YAG-Laser:  
Datronik IL00-08-QA1

3-D-UV-Laserbearbeitungsanlage:  
LPKF Microline3D

## Metallisierung

Selektive außenstromlose Metalli-  
sierung von Kunststoffen

Sputteranlage:  
Leybold-Heraeus Z400

## Aufbau- und Verbindungstechnik

Automatischer SMD-Bestücker:  
Fritsch Place All PA 908.580

Vollautomatisches 3-Achsen Dis-  
penssystem:  
I&J Fisnar 500 LN

Dampfphasenlötanlage:  
IBL SLC-500

Vollautomatischer Ultraschall-  
Drahtbonder:  
Hesse & Knipps Bond Jet 710

Manueller Flipchip-Bonder:  
Finetech Fineplacer 145

Halbautomatischer Bondtester:  
Dage Serie 4000

Heißprägepresse:  
Schmidt ServoPress 450 LV

## Physikalische und chemische Analysetechnik

Rasterelektronenmikroskop:  
EOL TESCAN 5130

Energiedispersive Röntgenmikro-  
analyse (EDX):  
Oxford Instruments INCA –  
System 200

Röntgenfluoreszenz-Schicht-  
dickenmessgerät und Material-  
analysator:  
Roentgenanalytik Xray  
ComPact

Differential Scanning Calorimetry  
(DSC):  
Netzsch DSC 204 Phoenix

Infrarotspektrometer:  
Bruker Vector 22  
mit ATR-Einheit:  
Golden Gate (Diamant)

Optisches Längen- und Profil-  
messsystem:  
UBM Optischer Taster UBF 60

3-D Tastschnitt-Profilometer:  
ATOS Surfscan 3CS

3-D Multisensor Koordinaten-  
messmaschine:  
Werth VideoCheck-IP  
400x400x200

Mikrohärteprüfgerät:  
Fischer Fischerscope H 100

Rotationsmikrotom mit motori-  
schem Antrieb:  
Microm HM 355S

## Umweltsimulation

Temperaturschockschrank:  
CTS TSS-70/130

Klimaprüfschrank:  
CTS CV-70/350

Vibrationsprüfung (Shaker):  
LDS V780 /HPA-K

## Mess- und Prüftechnik

Elektronische, mechanische und  
optische Messplätze

# HSG-IMAT in Zahlen

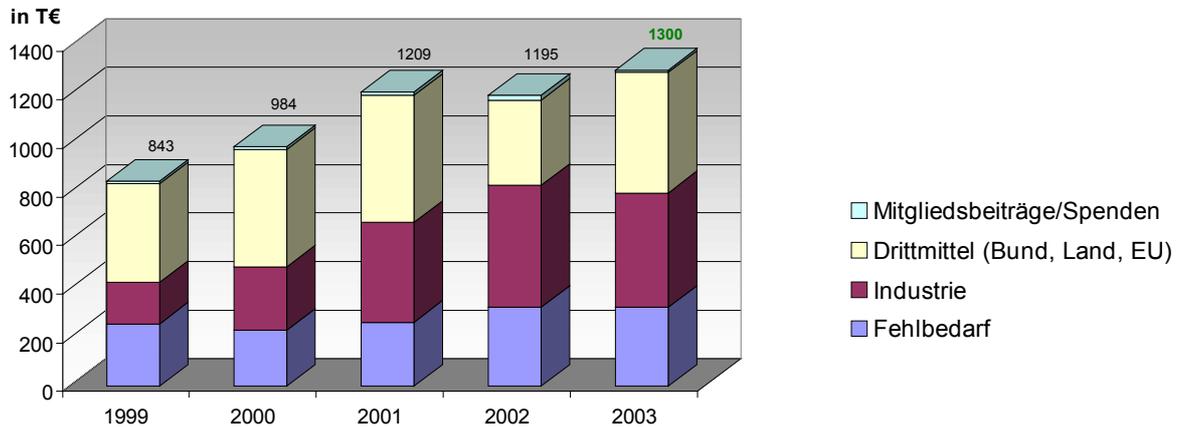


Bild 1: Entwicklung des Haushalts mit Planzahlen für 2003

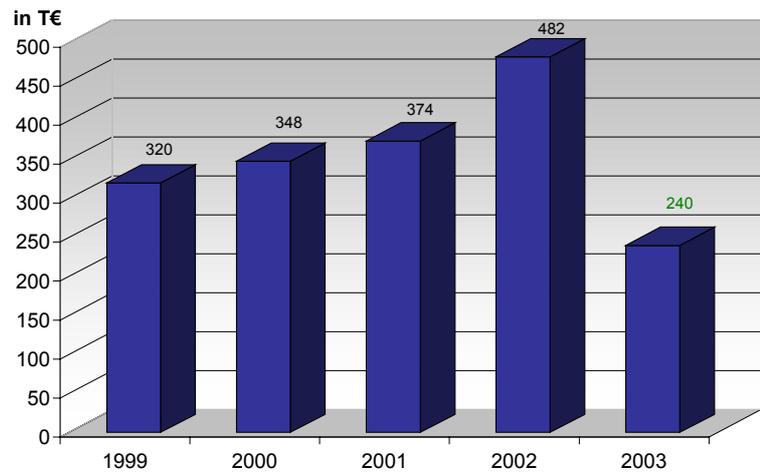


Bild 2: Gesamt-Investitionen mit Planzahl für 2003

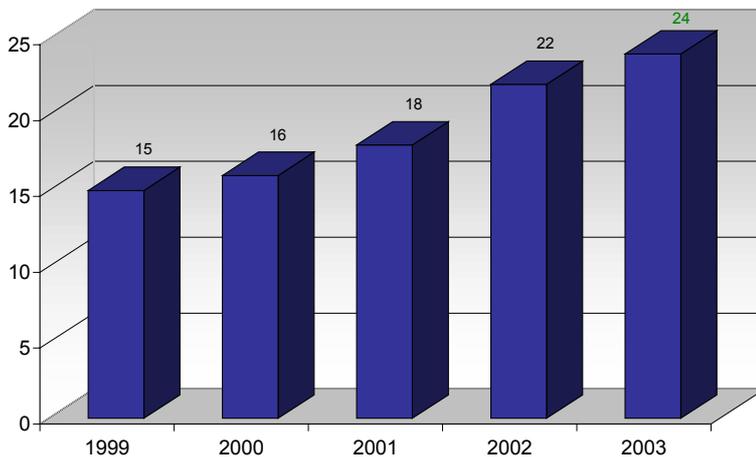


Bild 3: Entwicklung der Mitarbeiterzahl mit Planzahl für 2003

# Publikationen

## Vorträge und Veröffentlichungen

M. Arnold,  
"Elektrostatisches Miniaturventil in MID-Technik",  
2. Öffentliches Statusseminar IMSIP: Integrationsfähiges Mikroventilsystem für die Industriepneumatik, HSG-IMAT, Stuttgart, 15.11.2002

L. Cagnon, V. Kirchner, M. Kock, R. Schuster, W. T. Gmelin, H. Kück et al.,  
"Electrochemical micromachining of stainless steel by ultrashort voltage pulses",  
angenommen für Z. Phys. Chem. (2003)

W. Eberhardt, Th. Gerhäußer, M. Giousouf, H. Kück, R. Mohr, D. Warkentin,  
"Innovative Concept for the Fabrication of Micromechanical Sensor and Actuator Devices Using Selectively Metallized Polymers",  
Sensors and Actuators A 97-98 (2002) 473-477

W. Eberhardt,  
"Metallisierung und Strukturierung der MID-Sensoraufnahme",  
1. Öffentliches Statusseminar HIM2: Herzunterstützungssystem mit integrierter Mikrosensorik, BMT 2002, Karlsruhe, 27.09.2002

W. Eberhardt,  
"Modulares Werkzeug für Durchflusssensoren",  
PLUS 9/2002, E. G. Leuze Verlag

W. T. Gmelin, H. Kück,  
"Anlage zum elektrochemischen Mikrofräsen mit gepulster Spannung",  
Galvanotechnik 9/2002; E. G. Leuze Verlag

H. Kück, W. T. Gmelin,  
"Elektrochemisches Fräsen als Urformverfahren für Mikrostrukturen",  
Informationsforum ECM-Bearbeitung, IMTEK, Freiburg, 09.04.2002

H. Kück,  
"MID: Molded Interconnect Devices",  
1<sup>st</sup> European Summer School on Precision Assembly, Esslingen, 08.-12.07.2002

H. Kück et al.,  
"Mikrofluidikelemente in Low-Cost-Spritzgießtechnik für Life Sciences",  
Vortrag auf der 75. Sitzung des Wissenschaftlichen Rats der AIF, Magdeburg, 29.11.2002

F. Legewie, C. Nix, V. Zippmann, G. Spanier, W. Eberhardt, M. Oprea,  
"Herzunterstützungssystem mit integrierter Mikrosensorik (HIM2)",  
36. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biomedizinische Technik (DGBMT) im VDE, Universität Karlsruhe, 25.-27.09.2002

G. Munz et al.,  
"Integrated Piezoelectric Microvalves with MID Technology for Industrial Automation",  
5. International Congress MID 2002, Erlangen, 25.-26.09.2002

M. Oprea,  
"Konstruktive Lösung einer Mikro-Sensoraufnahme",  
1. Öffentliches Statusseminar HIM2: Herzunterstützungssystem mit integrierter Mikrosensorik, BMT 2002, Karlsruhe, 27.09.2002

C. Pein,  
"Heißspräge-MID-Baugruppe für den Einsatz in der Industriepneumatik",  
2. Öffentliches Statusseminar IMSIP: Integrationsfähiges Mikroventilsystem für die Industriepneumatik, HSG-IMAT, Stuttgart, 15.11.2002

F. Pöhlau, Th. Gerhäußer, W. Eberhardt,  
"Two-Schot MID with Microstructures as Substrate for Wire Bonding",  
5. International Congress MID 2002, Erlangen, 25.-26.09.2002

U. Scholz,  
"Ultraschall-Drahtbondtechnik zur Kontaktierung in miniaturisierten MID-Gehäusen",  
PLUS 9/2002, E. G. Leuze Verlag

U. Scholz et al.,  
"Ultrasonic Wire Bonding on Electroless Plated MIDs",  
5. International Congress MID 2002, Erlangen, 25.-26.09.2002

D. Warkentin et al.,  
"Miniature Flow Sensor Systems and Accelerometers Based on MID",  
5. International Congress MID 2002, Erlangen, 25.-26.09.2002

D. Warkentin,  
"Sensor und Aktuatorssysteme mit kapazitiver Auslesung",  
Elektronik Automotive, WEKA Fachzeitschriften-Verlag GmbH, Juni 2002

## Patente

H. Kück, W. Eberhardt, A. Schumacher,  
"Schaltelement und Verfahren zur Herstellung desselben",  
DE 100 61 217 A 1,  
Offenlegungstag: 27.06.2002

# Messebeteiligungen, Mitarbeit in Gremien

## Messebeteiligungen

Innovationsbörse  
"Mikrosystemtechnik – Erfolgsfaktor  
für die Miniaturisierung",  
Haus der Wirtschaft, Stuttgart,  
05.02.2002

Hannover-Messe Industrie,  
Stand des Landes Baden-  
Württemberg, 15.-20.04.2002

SMT, Systemintegration in der Mik-  
roelektronik,  
Nürnberg, 18.-20.06.2002

Tag der offenen Tür,  
Stand im Pfaffenwaldring 9,  
Universität Stuttgart,  
22.06.2002

Tag der offenen Tür  
im Wirtschaftsministerium  
Baden-Württemberg,  
Stuttgart, 28.06.2002

## Mitarbeit in Gremien

H. Kück:

Mitglied im Fachausschuss 4.1  
"Grundsatzfragen der Mikrosys-  
temtechnik" der GMM

Leiter des Fachausschuss 4.8  
"Mikrofertigung" der GMM

Mitglied im Wissenschaftlichen Rat  
der AiF

Mitglied im Fachbeirat des "Kom-  
petenznetz MAHREG Automotive"

W. Scheerer:

Mitglied im DIN (Deutsches Institut  
für Normung e.V.) Normenaus-  
schuss Gleitlager

U. Scholz:

Arbeitsgruppe AG A2.4 "Bonden"  
des DVS

# Lehrveranstaltungen, Studien- und Diplomarbeiten, Promotionen

## Vorlesungen

H. Kück:  
Grundlagen der Mikrotechnik I mit  
Übungen

H. Kück:  
Grundlagen der Mikrotechnik II mit  
Übungen

H. Kück:  
Miniaturtechnik I mit Übungen

H. Kück:  
Miniaturtechnik II mit Übungen

H. Kück, R. E. Müller:  
Zeitmeßtechnik

B. Martin:  
Ausgewählte Meßverfahren der  
Fein- und Mikrotechnik

R. Mohr:  
Elektronik für Mikrosystemtechniker

R. Mohr:  
Elektronische Bauelemente in der  
Mikrosystemtechnik

H. Sandmaier, T. Strobel:  
Bauelemente der  
Mikrosystemtechnik

H. Sandmaier, T. Strobel:  
Technologien der  
Mikrosystemtechnik

B. Bertsche, E. Göde, H. Kück,  
E. Laurien, H. Seeger,  
E. Westkämper:  
Einführung in den Maschinenbau

## Praktika

Hauptfachpraktikum in Miniatur- und  
Mikrotechnik

Allgemeines Praktikum des  
Maschinenbaus

Elektronik-Praktikum für  
Feinwerktechniker

## Seminare

25.04.2002

cand. mach. M. Trost  
Flüssigkeitsbasierter Neigungssen-  
sor in MID-Technik

31.10.2002

cand. mach. G. Nicolin  
Laserstrukturierung durch selektive  
Ablation von ganzflächig metalli-  
sierten Thermoplasten für die MID-  
Technik

21.11.2002

cand. mach. J. Hutzschenreuther  
Charakterisierung eines Drucksens-  
sors

## Exkursionen

Fa. Marquardt, Rietheim-Weilheim,  
14.05.2002,  
Teilnehmer: ca. 20 Studenten

Fa. Bosch, Reutlingen,  
29.01.2002,  
Teilnehmer: ca. 30 Studenten

## Abgeschlossene Studienarbeiten

Berger, Reinhard  
Miniaturisierung eines Beschleuni-  
gungssensors in MID-Technik  
Betreuer: Dipl.-Ing. D. Warkentin

Hutzschenreuter, Jens  
Charakterisierung eines Drucksens-  
sors  
Betreuer: Dipl.-Ing. D. Warkentin

Kapfer, André  
Berechnung des mechanischen  
Schwingverhaltens von Miniaturver-  
bindungen mit Hilfe der FE-Methode  
Betreuer: Dipl.-Ing. T. Laufer

Nicolin, Gisa  
Laserstrukturierung durch selektive  
Ablation von ganzflächig metalli-  
sierten Thermoplasten für die MID-  
Technik  
Betreuer: Dipl.-Ing. D. Ahrendt

Trost, Monika  
Flüssigkeitsbasierter Neigungssen-  
sor in MID-Technik  
Betreuer: Dipl.-Ing. D. Benz

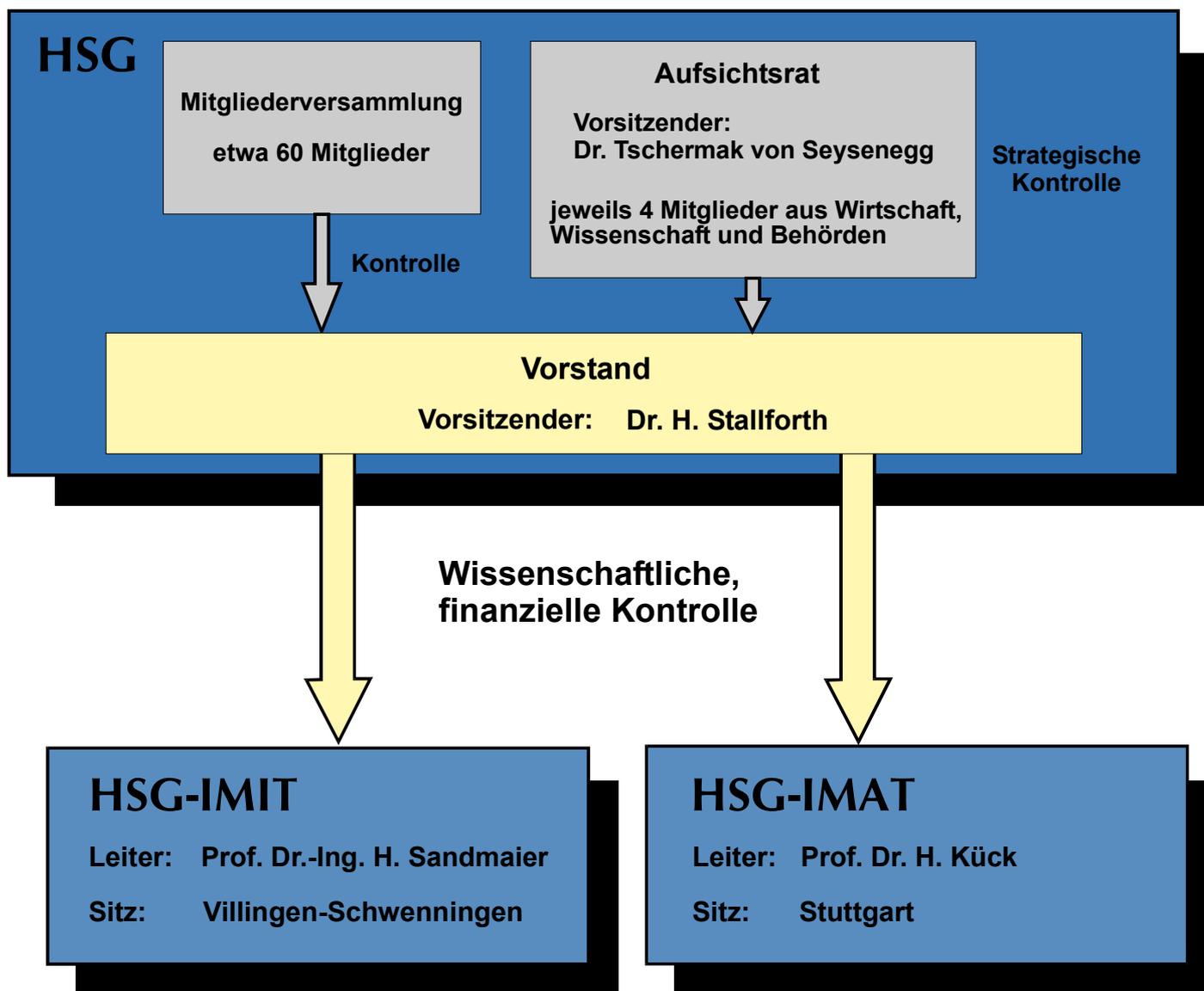
## Abgeschlossene Diplomarbeiten

Arnold, Markus  
Auslegung und Konstruktion eines  
Ventils in MID-Technik unter Be-  
rücksichtigung der Bewegungser-  
zeugung durch elektrostatische  
Kräfte  
Betreuer: Dipl.-Ing. D. Warkentin

Rentz, Robert  
Untersuchungen zu einem neuarti-  
gen Aktuator für Mikroventile auf  
Basis von elektrostatischen Kräften  
auf Fluide  
Betreuer: Dipl.-Ing. M. Giousouf

## Promotionen

M. Giousouf: Untersuchungen zu  
Siliziumresonatoren für die Uhren-  
technik (20.11.2002)



## Aufsichtsrat

MinDirig  
Dr. Tschermak von Seysenegg  
Wirtschaftsministerium  
Baden-Württemberg

Professor Dr. rer. nat.  
Dr. h.c. Franz Effenberger  
Institut für organische Chemie  
und Isotopenforschung  
Universität Stuttgart

Dr. Peter Fritz  
Forschungszentrum Karlsruhe  
(FZK)

Dipl.-Ing. (FH)  
Wolfgang Kammerlander  
Hirschmann Electronics  
GmbH & Co. KG

Oberbürgermeister  
Dr. Rupert Kubon  
Große Kreisstadt Villingen-  
Schwenningen

Professor Dr. Johann Löhn  
Regierungsbeauftragter für  
Technologietransfer Baden-  
Württemberg

Professor Dr. Wolfgang Menz  
Albert-Ludwigs-Universität  
Institut für Mikrosystemtechnik

RDir Dr. Thomas Pflüger  
Ministerium für Wissenschaft,  
Forschung und Kunst Baden-  
Württemberg

Professor Dr. Rainer Scheithauer  
Rektor der Fachhochschule  
Furtwangen

Senator e.h. Hans Schmidt  
Geschäftsführender Gesellschafter  
der Fa. Schmidt Feintechnik  
GmbH

Dr. Hans-Peter Trah  
Robert Bosch GmbH

Professor Dr. Dr. Michael  
Ungethüm  
AESCULAP AG & CO. KG

Regierungsdirektor  
Dr. Herbert Zeisel  
Bundesministerium für Bildung und  
Forschung

## Vorstand

### Vorsitzender:

Dr. Harald Stallforth  
AESCULAP AG & CO. KG

### Stellvertr. Vorsitzende:

Dr. Peter Jung  
Marquardt GmbH

Dipl.-Ing. Uwe Remer  
2E mechatronic GmbH & Co. KG

Dipl.-Ing. Hans Weiss  
GMS Gesellschaft für Mikro-  
elektronik und Sensorik mbH

### Schatzmeister:

Dipl.-Ing. Hermann Würthner  
ISGUS J. Schlenker-Grusen  
GmbH

### Ehrevorsitzender:

Dr.-Ing. Wolfgang Berger

## Wir sind Mitglied der

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen  
"Otto von Guericke" e.V. (AiF)



## Hauptgeschäftsstelle

Bayenthalgürtel 23  
50968 Köln  
Telefon: (02 21) 3 76 80-0  
Telefax: (02 21) 3 76 80-27  
E-Mail: info@aif.de  
Internet: www.aif.de

## Geschäftsstelle Berlin

Tschaikowskistraße 49  
13156 Berlin  
Telefon: (0 30) 4 81 63-3  
Telefax: (0 30) 4 81 63-4 01  
E-Mail: gsb@aif.de

## Nachruf für Herrn Dipl.-Ing. Fritz Dürr

Für viele Angehörige der Universität und insbesondere des früheren Uhreninstitutes war die Nachricht, dass unser früherer Mitarbeiter Fritz Dürr am 10.09.02 verstorben ist, überraschend und mit großem Bedauern verbunden.

Herr Dürr war der Sohn eines Uhrmachermeisters aus Lomersheim bei Mühlacker, geb. am 14.02.1935. Es war daher verständlich, dass er nach Abschluss der Volksschulausbildung zunächst eine Lehre als Uhrmacher absolvierte, dann aber eine Ausbildung in einem Konstruktionsbüro und eine Vorbereitung zur Reifeprüfung.

Hernach studierte er Maschinenbau, Feinwerktechnik und Uhrentechnik in Stuttgart. So wurde er einer meiner ersten Schüler. Er interessierte sich besonders für die Tribologie mit dem alten und wichtigen Problem von Reibung, Verschleiß und Schmierung bei Uhren. Dies war auch das Thema seiner Diplomarbeit im Jahr 1966. Von da an diente er insbesondere der Tribologie als hervorragender Fachmann bis zu seinem Ausscheiden aus dem Uhreninstitut im Jahr 1998.

Er leitete die Arbeitsgruppe "Tribologie" mit den Gebieten: Prüfgeräte für Uhrenöle, deren Alterung und Verschleißprüfung, Verwendung bei Kunststoffen, Entwicklung neuer Schmiermittel und deren praktische Anwendung, Epilamisierung, Einfluss der Rauigkeit, Einfluss der Drehzahl und anderes mehr.

Dabei entstanden über 80 Veröffentlichungen in den Fachzeitschriften der Uhrentechnik und Feinmechanik, des VDI und der

Kunststoffe. Auf Vorträgen im In- und Ausland teilte er seine Kenntnisse mit. In verschiedenen Arbeitskreisen mit Angehörigen der Industrie vermittelte er seine Forschungsergebnisse und erhielt dabei auch wertvolle Anregungen.

Herr Dürr war ein allseitig beliebter Fachmann. Er blieb aber stets bescheiden, lehnte daher auch eine eigene Dissertation ab. Persönlich war er stets gefällig und ein guter Familienvater.

Wir trauern um einen lieben Mitarbeiter und Freund.

G. Glaser

Stuttgart, im September 2002

# Anfahrtsplan

## Bei Anreise mit PKW

Aus nördlicher Richtung (z. B. von Heilbronn über Ausfahrt Zuffenhausen B10):

→ B10/B27 → B27 → Heilbronner Str. → Friedrichstr.  
→ Schellingstr. → Kienestr. → Institutsparkplatz

Aus östlicher Richtung (z. B. über B10):

→ B10 → Richtung Stadtzentrum, B14  
→ Hauptbahnhof, Arnulf-Klett-Platz → Friedrichstr.  
→ Schellingstr. → Kienestr. → Institutsparkplatz

Aus südlicher Richtung (z. B. über B27):

→ B27, Unterführung (links Abbiegen) → Schloßstr.  
→ Kienestr. → Institutsparkplatz

Aus westlicher Richtung (z. B. von Vaihingen (Stgt.), Autobahnkreuz Stuttgart):

→ B14 → Richtung Stadtzentrum → Rotebühlplatz  
→ Fritz-Elsas-Str. → Schloßstr. → Holzgartenstr.  
→ Breitscheidstr. → Institutsparkplatz

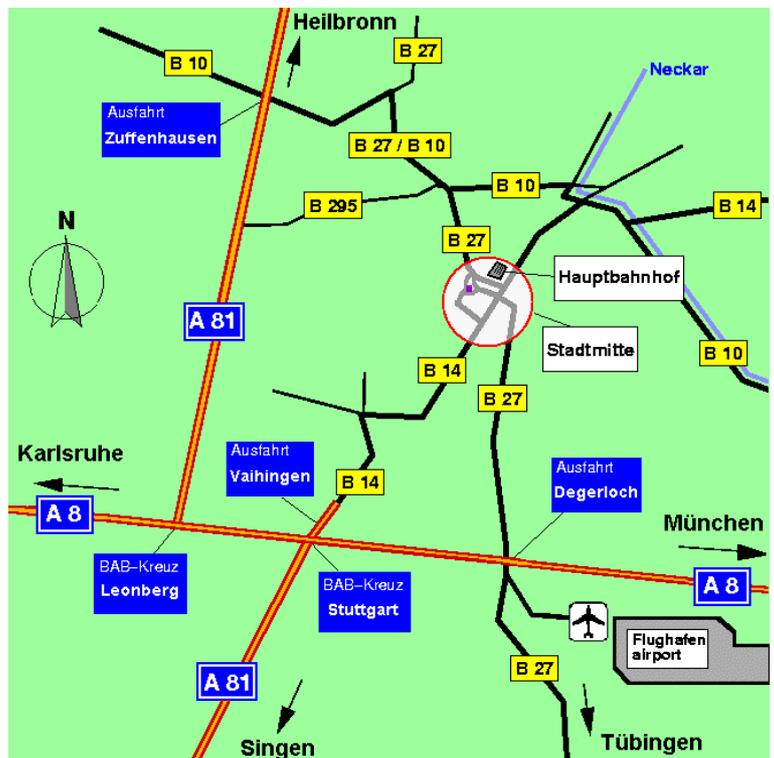
## Bei Anreise mit Zug / S-Bahn

Vom Hauptbahnhof sind es ca. 10 min. bis zum Institut. Weg: Friedrichstr. → Schellingstr. → Willi-Bleicher-Str.

Von der S-Bahn-Station "Stadtmitte" sind es ca. 5 min. bis zum Institut. Weg: Ausgang Büchsenstr. → Büchsenstr., Richtung Liederhalle → Schloßstraße überqueren → rechts einbiegen in die Breitscheidstr. → Institutsparkplatz → Institut

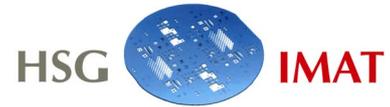
## Bei Anreise mit Flugzeug

Ab Flughafen mit S-Bahnlinie S2 nach Schorndorf → S-Bahnstation "Stadtmitte" aussteigen → Ausgang Büchsenstr. → Büchsenstr., Richtung Liederhalle → Schloßstraße überqueren → rechts einbiegen in die Breitscheidstr. → Institutsparkplatz → Institut



Hinweise für PKW-Fahrer:

- P** Öffentliche Parkplätze befinden sich am Katharinenhospital und in der Kienestr.
- P** Parkplatz des Institutes: Bitte rechts vor der Schranke parken, im Institut anmelden und dann nach Öffnen der Schranke durch einen Institutsmitarbeiter auf dem Parkplatz einparken.
- T** Die Breitscheidstraße ist in Höhe des Kongresszentrums für den Kfz-Verkehr gesperrt.



Universität Stuttgart

Institut für Zeitmeßtechnik, Fein- und Mikrotechnik

Lehrstuhl Mikro-, Miniatur- und Zeitmeßtechnik

Breitscheidstr. 2 b

D-70174 Stuttgart

Telefon: ++49(711)121-3711

Telefax: ++49(711)121-3705

E-mail: [izfm@izfm.uni-stuttgart.de](mailto:izfm@izfm.uni-stuttgart.de)

WWW: <http://www.uni-stuttgart.de/izfm>

Hahn-Schickard-Gesellschaft

Institut für Mikroaufbautechnik

Breitscheidstr. 2 b

D-70174 Stuttgart

Telefon: ++49(711)121-3712

Telefax: ++49(711)121-3705

E-mail: [hsg-imat@izfm.uni-stuttgart.de](mailto:hsg-imat@izfm.uni-stuttgart.de)

WWW: <http://www.uni-stuttgart.de/hsg-imat>

#### **Redaktion**

Ulrich Allgeier

#### **Gestaltung**

Ulrich Allgeier

#### **Druck**

E. Kurz & Co.  
70182 Stuttgart

© HSG-IMAT 2003