

## Ergebnisse und Leistungen 2001

Titelbild:

Durchfluss-Sensorsystem mit  
thermischem Strömungssensor in  
2K-MID-Technik

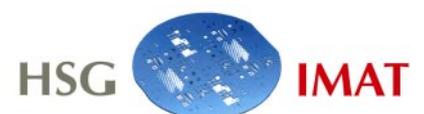
## Inhaltsverzeichnis

Organisationsstruktur	2
Vorwort	3
Modulares MID-Gehäuse für ein Durchfluss-Sensorsystem	4
Beschleunigungsaufnehmer als Kunststoff-Metall-Verbundsystem	6
Drahtbonden auf außenstromlos metallisierten Thermoplasten in der MID-Technik	8
Automatisierte Fertigungslinie für Heißpräge-MID-Baugruppen "AHMID"	10
3D-Design elektro-mechanischer Baugruppen als Heißpräge-MID	12
Anlage zum elektrochemischen Mikrofräsen mit gepulster Spannung	14
Einfluss der Plattenvorbehandlung auf das tribologische Verhalten von gleitlackbeschichteten Gleitpaarungen	16
Anlagen - Geräte - Verfahren	18
HSG-IMAT in Zahlen	19
Publikationen, Mitarbeit in Gremien	20
Lehrveranstaltungen, Studien- und Diplomarbeiten	21
Organe der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.	22
Anfahrtsplan	24

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>

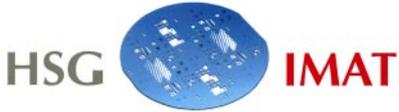


Hahn-Schickard-Gesellschaft  
Institut für Mikroaufbautechnik  
Breitscheidstr. 2 b · D-70174 Stuttgart  
Telefon: ++49(711)121-3712 · Telefax: ++49(711)121-3705  
E-mail: [hsg-imat@izfm.uni-stuttgart.de](mailto:hsg-imat@izfm.uni-stuttgart.de)  
WWW: <http://www.uni-stuttgart.de/hsg-imat>



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 Mikroufbautechnik</p> <p>Leiter: Prof. Kück</p>
<p>Abteilung Technologie Leiter: Dr. W. Eberhardt</p>	<p>Fr. Fasterding Fr. Flechtner Hr. Gerhäußer (bis 30.9.2001) Hr. Spitznagel</p>	<p><u>Dr. Eberhardt</u> Hr. Arnold (ab 1.9.2001) Hr. Frech (bis 30.9.2001) Hr. Giousouf (bis 28.2.2001) Hr. Münch Hr. Pein Hr. Schilling Fr. Scholz Hr. Spritzendorfer</p>
<p>Abteilung Miniaturtechnik Leiter: Prof. Kück</p>	<p>Hr. Skibowski</p>	<p><u>Hr. Seifert</u> Hr. Allgeier Hr. Grabein Dr. Schubert Hr. Vogel</p>
	<p>Hr. Schulz</p>	<p><u>Hr. Scheerer</u> Fr. Gehrlach</p>
<p>Bauelemente Leiter: Prof. Kück</p>	<p>Hr. Bärnin Hr. Benz (ab 15.11.2001) Hr. Gmelin Hr. Mohr Hr. Warkentin</p>	<p>Fr. Liu (ab 1.11.2001) Dr. Oprea</p>
<p>Mechanische Bearbeitung</p>	<p><u>Hr. Eylandt</u> Hr. Lechler</p>	
<p>Verwaltung</p>	<p>Fr. Mohr Fr. Hoffmann (ab 1.12.2001)</p>	<p>Fr. Ihle</p>

# Vorwort

## Sehr geehrte Damen und Herren,

wie Sie an diesem Jahresbericht für 2001 erkennen können, haben sich unsere Arbeiten praktisch ausschließlich auf die Gehäuse- und Verbindungstechnik für Mikrosysteme und miniaturisierte Systeme auf der Basis von mikrostrukturierter Kunststoff-Bauelementen und Molded Interconnect Devices konzentriert. Dieser Entwicklung tragen wir jetzt auch mit dem neuen Namen Hahn-Schickard-Institut für Mikroaufbautechnik (HSG-IMAT) Rechnung, den wir schon in diesem Bericht verwenden.

Wesentlich für den weiteren Aufbau des Instituts und unseres Know-hows ist die Mikrospritzgießtechnik, für die wir nun eine spezielle Anlage zur Verfügung haben. Neben ersten Mustern von mikrofluidischen Kanälen, die wir gemeinsam mit dem HSG-IMIT untersuchen, konnte mit der Mikrospritzgießtechnik u. a. ein erster Demonstrator eines Beschleunigungssensors aus metallisierten Kunststoff-Mikrostrukturen erfolgreich hergestellt und getestet werden. Dabei war es wichtig, dass Umweltprüfungen nach Automobilstandards nun in unserem Institut durchgeführt werden können. Um den Herausforderungen der Mikrospritzgießtechnik an die Herstellung geeigneter Abformwerkzeuge aus hochfesten Werkstoffen zu begegnen, haben wir in einer Kooperation mit dem Fritz-Haber-Institut Berlin begonnen, das elektrochemische Fräsen mit kurzen Pulsen für die Urformung einzusetzen, was bereits zu ersten vielversprechenden Ergebnissen führte.

Unser Beschleunigungssensor zeigt auch eindrucksvoll, wie mit MID-

Techniken der Sensorbaustein und das Sensorgehäuse mit derselben Technologie hergestellt werden können. Darin liegt nach unserer Einschätzung ein sehr großes Potenzial, künftige Mikrosysteme sehr kostengünstig aufzubauen. Deshalb haben wir begonnen zu untersuchen, wie weitere Sensor- und Aktorsysteme mit diesem Ansatz umgesetzt werden können, z. B. Drucksensoren, Neigungssensoren und Ventile.

Bei unserer Projektarbeit im letzten Jahr nahm die Heißspräge-MID-Technik einen breiten Raum ein. Für den Entwurf elektro-mechanischer Baugruppen mit der Software von Zuken wurden erste Technologiebibliotheken und Designregeln erarbeitet. Die F+E-Abläufe vom Spritzling bis zur heißgeprägten MID-Baugruppe wurden durch Nutzung der 3D-Koordinatenmesstechnik wesentlich verbessert, so dass erstmalig in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner ein zweiseitig beprägtes MID mit Freiformflächen und zuverlässigen niederohmigen Durchkontaktierungen entwickelt werden konnte.

Im Rahmen des vom BMBF über den Projektträger PFT Karlsruhe geförderten Verbundvorhabens AHMID wurde mit Unterstützung durch das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg von unserem Institut der Workshop "Innovative Anwendungen der MID-Technik" durchgeführt, an dem über 130 Fachleute überwiegend aus der Industrie teilnahmen. Wegen der außerordentlich großen Resonanz wollen wir diesen Workshop in

Stuttgart künftig alle 2 Jahre abhalten.

Unsere Arbeit in der Lehre an der Universität Stuttgart beginnt auch Früchte zu tragen. Die neue Studienrichtung Mikrosystem- und Feinwerktechnik im Studiengang Maschinenwesen und das Hauptfach Mikrosystemtechnik, für das wir zusammen mit Herrn Kollegen Sandmaier verantwortlich sind, erfreuen sich zunehmender Beliebtheit bei den Studierenden. So konnten wir im letzten Jahr beispielsweise 15 abgeschlossene bzw. begonnene Studienarbeiten verzeichnen.

In unserem Bericht für 2001 dürfen wir wieder auf ein erfolgreiches Jahr zurückblicken, in dem unsere Ausrichtungen und unser Know-how wesentlich erweitert wurden. Wir konnten die Quote der Industrieaufträge auf über 34% steigern. Daher empfehlen wir uns auch gerne, zu Ihren Problemlösungen beizutragen.

Ihr



Heinz Kück

# Modulares MID-Gehäuse für ein Durchfluss-Sensorsystem

W. Eberhardt, M. Münch, P. Schilling

## Einleitung

Durchfluss-Sensorsysteme kommen immer dann zum Einsatz, wenn Volumenströme von Gasen oder Flüssigkeiten präzise bestimmt, dosiert und geregelt werden müssen. Mögliche Einsatzbereiche solcher Systeme sind beispielsweise Labor- und Chemieanlagen, Medizintechnik, Umweltanalytik, Biotechnologie als auch Anwendungen in der Fahrzeugtechnik.

Im Rahmen eines von der AiF geförderten Vorhabens wurde zusammen mit dem HSG-IMIT ein Durchfluss-Sensorsystem mit einem thermischen Strömungssensor und einem MID-Gehäuse realisiert. Durch die MID-Technik war es möglich, elektrische, fluidische und Gehäusefunktion in einem mikrosystemtechnischen Bauteil zu integrieren. Dieser Ansatz ermöglicht weiterhin die kostengünstige Herstellung von mikrosystemtechnischen Produkten in großen Stückzahlen.

## Thermischer Strömungssensor

Der am HSG-IMIT entwickelte thermische Strömungssensorchip besteht aus einem Heizelement und zwei Temperatursensoren. Das Funktionsprinzip des Sensors basiert auf einem Wärmeimpulsverfahren. Über die Messung der Laufzeit einer thermischen Wolke vom Heizelement zum Temperatursensor kann die Strömungsgeschwindigkeit eines Mediums bestimmt werden. Das Heizelement und die Temperatursensoren befinden sich auf einer sehr dünnen Siliziumnitridmembran auf einem Siliziumchip (Bild 1). Diese Anordnung ermöglicht eine gute thermische Isolation und eine geringe Wärmekapazität des Sensors. Aufgrund des sehr

geringen Energiebedarfs entwickelt der Sensor auch im Dauerbetrieb keine störende Eigenerwärmung.

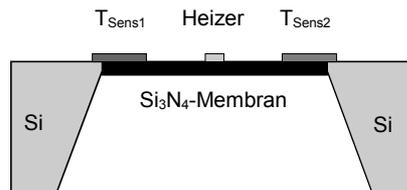


Bild 1: Schematische Darstellung des thermischen Strömungssensorchips

## Aufbau in MID-Technik

Zum Aufbau eines kompletten Durchfluss-Sensorsystems muss der Strömungssensorchip in einem geeigneten Gehäuse aufgebaut werden. Ziel des AiF-Vorhabens war der Aufbau von MID-Gehäusen für Durchfluss-Sensorsysteme für verschiedene Anwendungsbereiche. Durch ein modulares Konzept sollten verschiedene Gehäusetyper auf möglichst einfache Weise realisiert werden können.

Im Gehäuse müssen neben den elektrischen Funktionen auch fluidische Funktionen wie beispielsweise der Anströmkanal des Mediums integriert sein. Weiterhin muss ein Druckausgleich gewährleistet sein. Über einen Stecker wird die elektrische Verbindung zur Außenwelt realisiert. Das Durchfluss-Sensorsystem wird aus einem 2K-MID und einem 1K-Deckel aufgebaut. Auf dem 2K-MID befinden sich der Strömungssensorchip, die elektronische Schaltung und die elektrische Verbindung zur Außenwelt über einen angespritzten Stecker (Bild 2). Der Strömungssensorchip wird in eine entsprechende Vertiefung eingeklebt, die elektrische Verbindung erfolgt durch Drahtbonden. Die komplette Elektronik befindet sich auf einer eingeklebten Platine. Somit kann die elektronische

Schaltung ohne Umbau des Spritzgießwerkzeugs leicht geändert werden. Des Weiteren ist mit dieser Lösung ein kostengünstigeres 2K-Spritzgießwerkzeug möglich. Die elektrische Verbindung von der Platine zu den angespritzten Steckern erfolgt ebenfalls durch Drahtbonden. Bei großen Stückzahlen kann die Elektronik komplett in das MID integriert werden, eine zusätzliche Platine ist dann nicht mehr notwendig.



Bild 2: 2K-MID für Durchfluss-Sensorsystem

Beim 2K-MID wurden zwei unterschiedliche Varianten realisiert. Durch einen integrierten Hinterlüftungskanal (Bild 2) kann auch bei hohen Drücken gemessen werden, ohne die empfindliche Membran des Strömungssensors zu beschädigen.

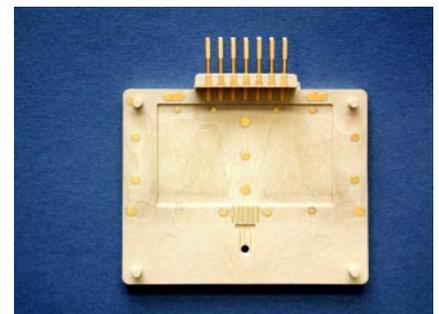


Bild 3: 2K-MID mit Verbindung zur Umgebung

Damit grundsätzlich auch Volumenströme von Flüssigkeiten gemessen werden können, wurde auch eine

Variante mit einem Verbindungskanal zur Umgebung hergestellt (Bild 3). Hiermit wird eine Blasenbildung am Sensor und somit eine Beeinflussung der Messergebnisse vermieden. Beide Versionen sind in einem 2K-Spritzgießstammwerkzeug hergestellt worden, in dem zwei unterschiedliche Formeinsatzplatten verwendet wurden.

Als selektiv metallisierbarer Thermoplast wurde LCP Vectra E820iPd neben der nichtmetallisierbaren Komponente Vectra E130i verwendet. Der Deckel wurde aus Gründen der Kompatibilität ebenfalls aus LCP Vectra E130i hergestellt. Die selektive chemische Metallisierung erfolgt nach alkalischer Vorbehandlung mit dem Schichtsystem Kupfer (5 µm) - Nickel (15 µm) - Gold (0,1 µm) (Bild 4).

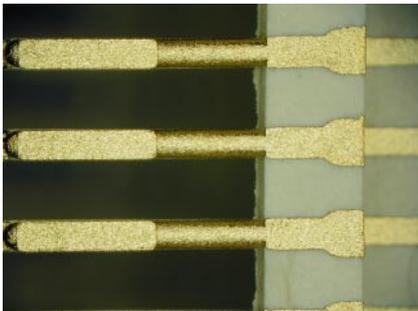


Bild 4: Leiterbahnen und Stecker auf 2K-MID

Beim Aufbau des Strömungssensorchips in die dafür vorgesehene Vertiefung im 2K-MID wird der Chip eingeklebt, eingebettet und draht-

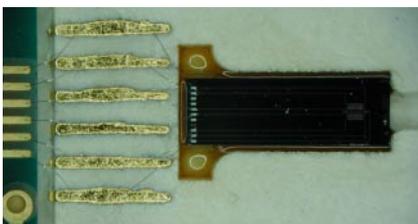


Bild 5: Strömungssensorchip auf 2K-MID

gebondet (Bild 5). Als Drahtbondverfahren wurde das US-Drahtbonden mit AlSi1-Draht (Wedge-Wedge) ausgewählt. Beim Bonden mit AlSi1-Draht erfolgt die Verbindungsbildung bei Raumtemperatur. Dieses Drahtbondverfahren zeichnet sich für Anwendungen in der MID-Technik aus, da das Substrat hierbei nicht aufgewärmt werden muss.

Eine zusätzliche Abdichtung zwischen Elektronik und Fluidik wird durch einen im Deckel vorgesehenen Dichtsteg erreicht, welcher sich nach der Endmontage über den Leiterbahnen vom Chip zur Platine befindet. Der eigentliche Strömungskanal befindet sich ebenfalls im Deckel. Durch Variation der Kanalquerschnitte im Deckel können unterschiedliche Messbereiche des Durchfluss-Sensorsystems mit einem 2K-MID realisiert werden. Der Anströmkanal muss etwa 3 - 5 mal so lang wie dessen Querschnitt sein, damit turbulente Strömung im Anströmkanal verhindert wird. Weiterhin soll das System bezüglich An- und Abströmseite symmetrisch sein. Daraus resultiert bei einem maximalen Kanalquerschnitt von  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  eine Mindestlänge des Gesamtsystems von mehr als 30 mm. Die Anschlüsse für die Medienzuführung befinden sich ebenfalls im Deckel.



Bild 6: Komplett aufgebautes Durchfluss-Sensorsystem

Die Verbindung von 2K-MID und Deckel zum kompletten Durchfluss-Sensorsystem erfolgt durch Kleben (Bild 6).

### Charakterisierung

An Durchfluss-Sensorsystemen mit Hinterlüftungskanal wurden Volumenstrommessungen mit Luft am HSG-IMIT durchgeführt. Hierbei konnten während 20 Messzyklen reproduzierbare Sensorsignale erhalten werden. Eine Abweichung einzelner Messkurven konnte nicht festgestellt werden (Bild 7). Damit ist das MID-Gehäuse für Durchfluss-Sensorsysteme für gasförmige Medien bestens geeignet. Insbesondere werden die hervorragenden Eigenschaften des Strömungssensorchips durch das MID-Gehäuse nicht verschlechtert.

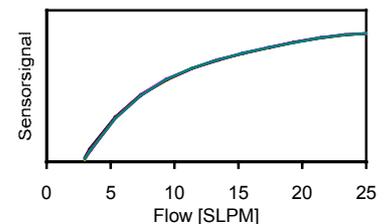


Bild 7: Kennlinien des Durchfluss-Sensorsystems mit Hinterlüftungskanal bei 20 wiederholten Messungen (Medium: Luft)

Dieses Forschungsprojekt (AiF-Vorhaben-Nr. 12416N) wird aus Haushaltsmitteln des BMWi über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert.

Kontaktperson:  
Dr. Wolfgang Eberhardt  
Tel. ++49(711)121-3717  
E-mail eberhardt@izfm.uni-stuttgart.de

# Beschleunigungsaufnehmer als Kunststoff-Metall-Verbundsystem

D. Warkentin

## Einleitung

Kunststoff-Metall-Verbundsysteme, wie sie aus der 2-K-MID-Technik bekannt sind, können für die Herstellung von miniaturisierten elektromechanischen Elementen wie Biegebalken, Membranen oder Elektroden geeignet sein. Unter Nutzung der Mikrospritzgießtechnik eröffnet sich damit die Möglichkeit, mikrosystemtechnische Sensor- und Aktuatorssysteme mit kapazitiver Auslesung oder elektrostatischem Antrieb, die bisher mit der Silizium- und Dünnschichttechnik hergestellt werden, als Kunststoff-Metall-Verbundbaustein herzustellen (Bild 1).

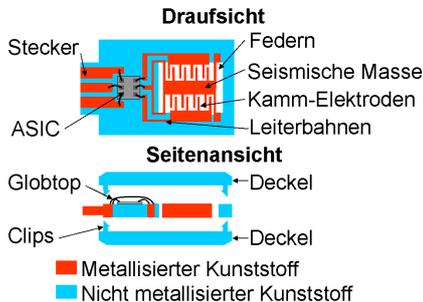


Bild 1: Schematische Draufsicht und Seitenansicht eines Beschleunigungssensors aus selektiv beschichtetem Kunststoff

Unter Einbeziehung eines elektronischen Schaltkreises in Form eines Nacktchips ist der Fertigungsprozess für das Sensorsystem und die Aufbautechnik mit wesentlich geringeren Investitionskosten, mit geringerem Materialeinsatz, mit geringeren Fertigungskosten und mit deutlich kürzeren Fertigungszeiten durchführbar. Allerdings ist derzeit über die Eignung von miniaturisierten Kunststoff-Metall-Verbundsystemen für Sensor- und Aktuatorssysteme mit beweglichen elektromechanischen Elementen sehr wenig bekannt. Daher werden in diesem Vorhaben erste Untersu-

chungen zum mechanischen und thermischen Verhalten solcher Elemente sowie zu deren Zuverlässigkeit am Beispiel der Oszillatorstruktur eines Beschleunigungsaufnehmers durchgeführt.

## Ermittlung der elastischen Konstanten

Zur Ermittlung der elastischen Konstanten mikromechanischer Kunststoff-Metall-Verbundsysteme wird ein Drei-Punkt-Biegeversuch in Anlehnung an EN ISO 178 an miniaturisierten metallbeschichteten Kunststoff-Balkenelementen durchgeführt, obwohl sie aufgrund ihrer viel geringeren Dimensionen ( $0.1 \times 0.25 \text{ mm}^2 - 0.4 \times 1 \text{ mm}^2$ ) in der Norm nicht mehr erfasst sind. Als Schichtsystem wurde eine Kupfer-Nickel-Gold-Metallisierung verwendet. Hierbei wurde eine Kupferschichtdicke von  $5 \mu\text{m}$  verwendet und eine Goldschichtdicke von  $0.1 \mu\text{m}$ . Die Nickelschichtdicke wurde in einem Bereich bis zu ca.  $35 \mu\text{m}$  variiert. Bild 2 zeigt einen vollständig metallisierten Kunststoffspritzling mit acht verschiedenen metallisierten Balkenelementen.



Bild 2: Metallisierter Spritzling mit verschiedenen Balken für Drei-Punkt-Biegeversuch

Durch die Vermessung von nackten Kunststoffbalken und Balken mit verschiedenen Schichtdicken, konnte anhand eines theoretischen Modells das Biege-E-Modul des Kunststoffs und der Schicht extrahiert werden. So ergibt sich ein mit der Temperatur abfallendes E-Modul von Vectra E 820i Pd (Fir-

ma Ticona) im Bereich von 11120 MPa bei  $23^\circ\text{C}$  bis zu 7350 MPa bei  $80^\circ\text{C}$ . Die Werte sind in guter Übereinstimmung mit den Herstellerangaben. Für das E-Modul des Schichtsystems wurde ein von der Schichtdicke abhängiges E-Modul vorgefunden, wie in Bild 3 zu sehen ist.

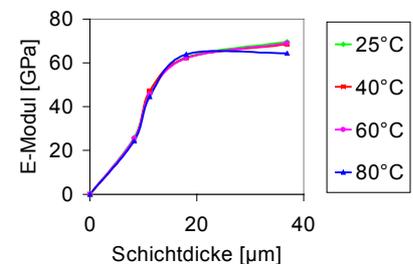


Bild 3: E-Modul über der Schichtdicke für verschiedene Temperaturen

Für Schichtdicken über ca.  $20 \mu\text{m}$  findet man ein E-Modul von ca. 70 GPa vor. Die Abnahme des E-Moduls unterhalb von  $20 \mu\text{m}$  ist auf eine verhältnismäßig hohe Rauheit des Kunststoffes zurückzuführen. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen, die innerhalb einer DMA-Untersuchung gewonnen wurden.

## Oszillatorstruktur

Aufgrund der aus dem Biegeversuch gewonnenen Ergebnisse wurde eine Oszillatorstruktur sowohl analytisch als auch mittels FEM-Analysen ausgelegt und gefertigt. Die Oszillatorstruktur besteht aus zwei Bauteilen, die nach der Metallisierung und einer anschließenden Laserstrukturierung zusammengebaut werden. Bild 4 zeigt die Konstruktion der Einzelteile und die fertig montierte Oszillatorstruktur.

Die fertig montierte Oszillatorstruktur misst  $32 \times 18 \times 2 \text{ mm}^3$ , minimale Strukturbreiten liegen bei  $300 \mu\text{m}$ .

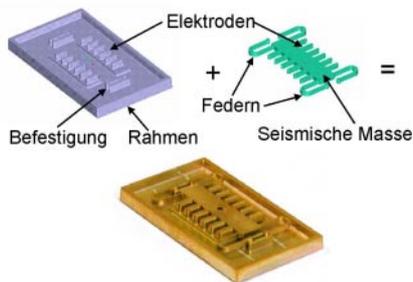


Bild 4: Bauteile und vollständig montierte Oszillatorstruktur

Die Oszillatorstruktur kann sowohl als Aktuator als auch als Sensor verwendet werden. Bild 5 zeigt eine REM-Aufnahme der Elektroden der Struktur.

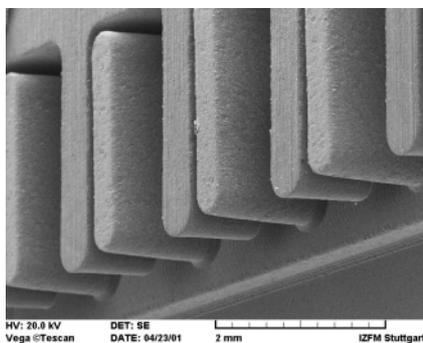


Bild 5: REM-Aufnahme der Elektroden der Oszillatorstruktur

### Aktuator

Bei der Verwendung der Oszillatorstruktur als Aktuator wurde eine der Kapazitäten mit einer Wechselspannung beaufschlagt. Die Bewegung der Masse wurde über ein Laservibrometer aufgenommen. Aufgrund der großen Plattenabstände und der daraus resultierenden geringen Kräfte musste hier mit hohen Spannungen von bis zu 150 V gearbeitet werden. Für einen Sensor mit einer 15  $\mu\text{m}$  dicken Schicht ergaben sich so Resonanzfrequenzen von 1234 Hz, was den simulierten Werten von 1286 Hz sehr gut entspricht.

### Sensor

Die Oszillatorstruktur eignet sich hervorragend zum Einsatz als Beschleunigungssensor. Hierfür wurde eine Messschaltung aufgebaut, die die Kapazitätsänderung der beiden Kondensatoren in eine elektrische Spannung wandelt. Die Sensoren wurden danach zusammen mit der Schaltung auf einem Shaker aufgebaut, wie in Bild 6 zu sehen ist.

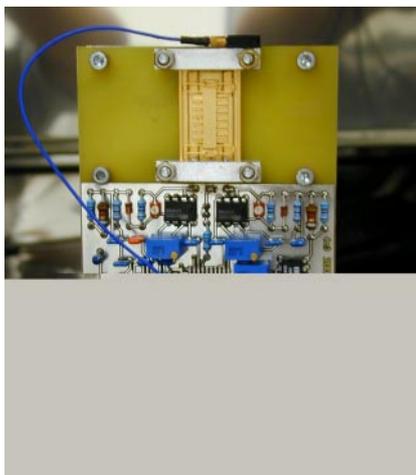


Bild 6: Beschleunigungssensor mit Messschaltung auf Shaker

### Beschleunigung

Das Antwortsignal des Sensors wurde bei verschiedenen Beschleunigungen gemessen. Bild 7 zeigt das Ausgangssignal des Sensors über der Beschleunigung.

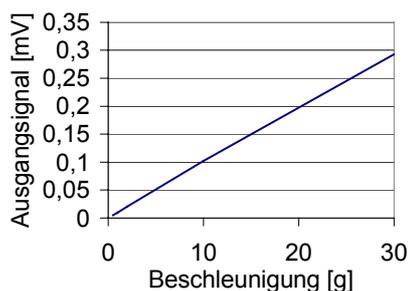


Bild 7: Ausgangssignal über der Beschleunigung des Sensors bei 50 Hz

Wie in dem Diagramm gut zu erkennen ist, konnte hier für einen Messbereich bis zu 30 g ein linearer Verlauf festgestellt werden. Neben einem linearen Ausgangssignal über der Beschleunigung selbst ist auch die Frequenzantwort des Sensors von Bedeutung. Bild 8 zeigt die Frequenzantwort des Sensors zwischen 100 und 5000 Hz für einen Sensor mit einer 15 und 30  $\mu\text{m}$  dicken Metallisierung.

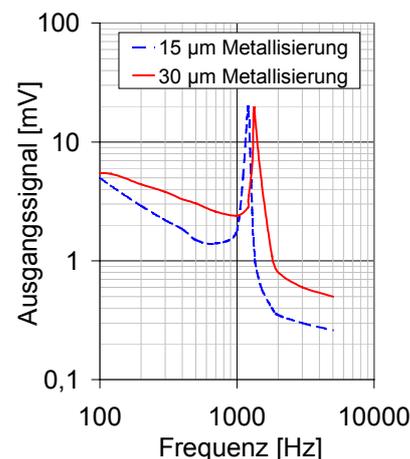


Bild 8: Ausgangssignal über der Frequenz

Wie sich gut erkennen lässt, bewirkt die dickere Metallisierung eine Versteifung der Struktur und somit eine Erhöhung der Resonanzfrequenz von 1234 Hz auf 1340 Hz. Neben einer Charakterisierung des Temperaturverhaltens laufen derzeit weitere Arbeiten insbesondere mit dem Ziel, das Sensorvolumen um den Faktor 10 zu reduzieren.

Das Forschungsprojekt wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Kontaktperson:  
Dipl.-Ing. Daniel Warkentin  
Tel. ++49(711)121-3722  
E-mail daniel.warkentin@izfm.uni-stuttgart.de

## Einleitung

In der Aufbau- und Verbindungstechnik von Mikrosystemen werden zum Kontaktieren von Nacktchips auf Leiterplatten und MCM-Modulen neben der Flipchip-Technik insbesondere Drahtbondverfahren eingesetzt. Die wesentlichen Vorteile des Drahtbondens sind die Möglichkeit, verschiedenste Substratflächen zu kontaktieren, und die hohe Flexibilität bei verschiedenen Padgeometrien. Darüber hinaus werden beim Drahtbonden keine Bumps benötigt. Daher wurde am HSG-IMAT das Ultraschall-Drahtbonden mit Aluminiumdraht als Verbindungstechnologie zum Aufbau von Nacktchips auf MID-Substraten gewählt. Es bietet gegenüber dem Thermosonic-Drahtbonden mit Golddraht den entscheidenden Vorteil, dass der Draht bei Raumtemperatur verschweißt wird. Dadurch können die verschiedensten Kunststoffe der MID-Technik als Substratmaterial verarbeitet werden.

Im Rahmen eines von der AiF geförderten Vorhabens wurde untersucht, wie das Drahtbonden mit 100 kHz Ultraschallfrequenz in der MID-Technologie zum Aufbau von Mikrosystemen zuverlässig eingesetzt werden kann. Als Substrate wurden außenstromlos metallisierte Thermoplaste eingesetzt, welche den Gegebenheiten bei 2K-MIDs oder laserstrukturierten MIDs gerecht werden.

## Anforderungen an Drahtbondverbindungen

Die Drahtbondverbindungen werden im zerstörenden Zugtest auf ihre mechanische Zuverlässigkeit untersucht. Die DVS-Norm 2811 schreibt vor, welche Kriterien erfüllt werden müssen. Als Versagensform wird

der sogenannte Heelcrack gefordert, d.h. der Draht reißt im geschwächten Übergangsbereich vom verformten zum unverformten Draht (Bild 1). Nicht zugelassen ist dagegen Lift-off, bei dem sich der Drahtbond vom Bondpad bzw. von der Leiterbahn aufgrund unzureichender Verschweißung löst. Für den Mittelwert der Zugkraft fordert die DVS-Norm mindestens 50% der Reißlast des unverformten Drahtes, wobei die Standardabweichung unter 15% des Mittelwertes liegen muss.

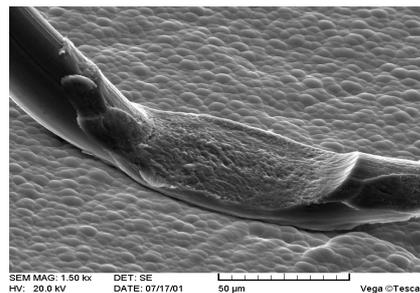


Bild 1: Erster Bond mit Heelbereich (PA6 Durethan BKV 115,  $R_a = 2 \mu\text{m}$ )

## Einfluss der MID-Substrate auf den Drahtbondprozess

Im Vergleich zu herkömmlichen FR4-Leiterplatten weisen Thermoplaste wie LCP oder PA6 einen geringeren E-Modul auf. Mit Hilfe von FEM-Simulationen wurde das statische und dynamische Verhalten von Substraten bei Einkopplung von Bondkraft und Ultraschall untersucht. Bei gleicher Bondkraft verursachen weichere Substrate höhere Spannungen in der Metallisierung, und die Gefahr wächst, dass die Ultraschallenergie in den Thermoplasten eingekoppelt wird. Dies kann durch dickere Metallschichten kompensiert werden. Anhand von Modal- und harmonischer Analyse wurden u. a. der Einfluss von Substratgeometrie, Leiterbahngeometrie und Art der Einspannung unter-

sucht. Hier zeigte sich, dass mit zunehmender Schichtdicke der Metallisierung erwartungsgemäß die statische Auslenkung der Leiterbahn abnimmt. Die Eigenfrequenz wird dabei leicht reduziert. Sie liegt bei Annahme typischer Substrat- und Leiterbahngeometrien jedoch oberhalb der kritischen Anregungsfrequenz von 100 kHz, so dass es nicht zum Resonanzfall kommt.

## Experimentelle Untersuchungen

Im ersten Schritt wurden 1K-Testsubstrate aus LCP Vectra E820i Pd und PA6 Durethan BKV 115 ganzflächig außenstromlos metallisiert, um den Einfluss der Schichtdicke und der Rauheit der Metallisierung auf den Drahtbondprozess zu ermitteln. Der Bondprozess wurde gemäß DVS 2811 optimiert. Im zweiten Schritt wurde die optimal bondbare Metallisierung auf ein 2K-MID übertragen, um den Einfluss der Leiterbahnbreite, der Schwingungsrichtung des Werkzeugs zu den Leiterbahnen, sowie der Substrathalterung zu erfassen.

Der Schichtaufbau auf LCP besteht aus Cu-NiP-Au, auf PA6 aus NiP-Au. Die Gesamtschichtdicke wurde zwischen 10 und 30  $\mu\text{m}$  variiert, wobei die Kupferschichtdicke auf LCP jeweils mit ca. 6  $\mu\text{m}$  konstant gehalten wurde. Durch geeignete Wahl der Prozessparameter bei der Vorbehandlung des Kunststoffes konnte die Rauheit von  $R_a = 2-5 \mu\text{m}$  bzw.  $R_{z,DIN} = 10-30 \mu\text{m}$  eingestellt werden. Als Bonddraht wurde AISi1-Draht mit 33  $\mu\text{m}$  Durchmesser und einer Zerreißkraft von 19 cN bei einer Dehnung von 4,7 % verwendet. Für das Bondtool wurde ein Standardwerkzeug gewählt. Die Substrate wurden mit Vakuum auf der Aufnahmeplatte des Bonders gehalten.

## Ergebnisse

Die Experimente auf den ganzflächig metallisierten Substraten zeigen, dass sowohl die Schichtdicke der Metallisierung als auch deren Rauheit den Drahtbondprozess direkt beeinflussen (Bild 2).

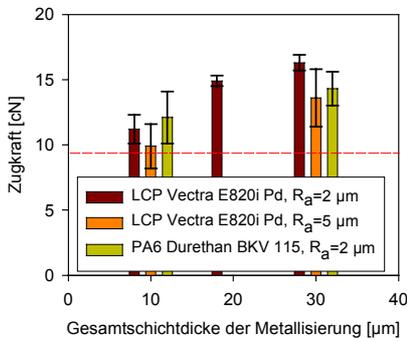


Bild 2: Vergleich der Zugkraft der optimierten Drahtbondverbindungen

Mit abnehmender Schichtdicke und zunehmender Rauheit der Metalloberfläche wird die Grenze der zuverlässigen Durchführung des Drahtbondprozesses erreicht. Betrachtet man einzelne Bonds (Bilder 1, 3, 4), so wird die Topographie der Metallisierung im Verhältnis zum Drahtdurchmesser und der Größe der Bonds deutlich.

Zum Drahtbonden auf einem 2K-MID wurde eine Teststruktur aus LCP mit den Abmessungen in Tabelle 1 verwendet. In Vorversuchen hat sich gezeigt, dass sich die Ein-

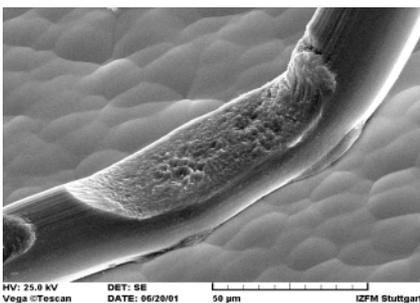


Bild 3: Erster Bond mit Heelbereich (LCP Vectra E820i Pd,  $R_a = 2 \mu\text{m}$ )

spannung durch Vakuum oder mit mechanischem Klemmen nicht erkennbar auf den Bondprozess auswirkt.

Substratdicke	2,3 mm
Leiterbahnbreite	250 $\mu\text{m}$ 700 $\mu\text{m}$
Metallschichtdicke	20 $\mu\text{m}$
Mittensrauwert $R_a$	2 $\mu\text{m}$
gem. Rautiefe $R_z$ DIN	10 $\mu\text{m}$

Tabelle 1: Daten des 2K-Test-MIDs

Auf den breiteren Leiterbahnen wird bereits bei geringerer US-Leistung zuverlässig gebondet, so dass kein Lift-off auftritt. Auf den schmalen Leiterbahnen werden bei höherer US-Leistung vergleichbare Ergebnisse erzielt. Liegt die Bondrichtung quer zur Leiterbahn, so treten auf der schmalen Leiterbahn verstärkt Lift-offs aufgrund unzureichender Verschweißung auf. Ursache dafür könnte sein, dass eine schmalere Leiterbahn stärker zu Schwingungen angeregt wird und so dem Bondprozess die erforderliche Energie zum Ausbilden des intermetallischen Verbundes entzieht. Wird dagegen weniger Energie in Form von Substratschwingungen absorbiert, so wird neben dem Verschweißen auch mehr Energie zur Drahtdeformation umgesetzt. Demzufolge nimmt der Mittelwert der Zugkraft bei Heelcrack ab.

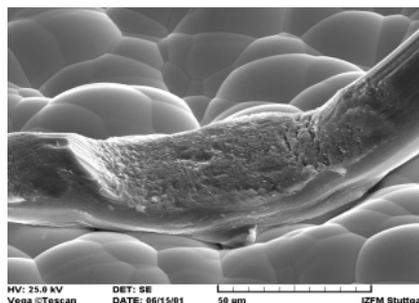


Bild 4: Erster Bond mit Heelbereich (LCP Vectra E820i Pd,  $R_a = 5 \mu\text{m}$ )

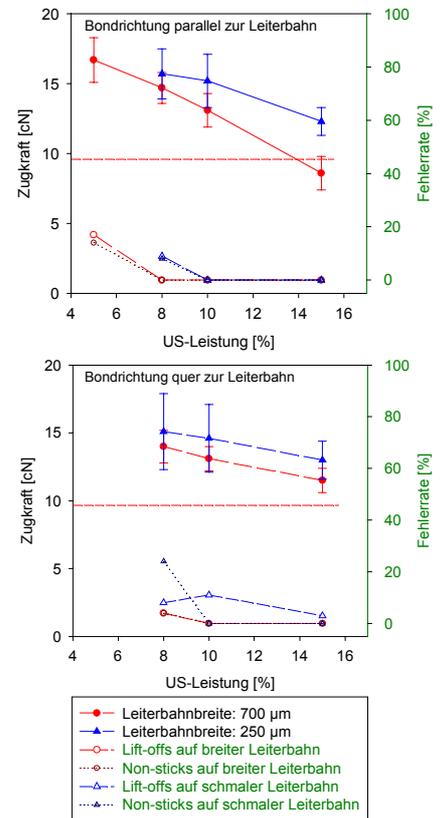


Bild 5: Prozessfenster auf Leiterbahnen eines 2K-Test-MIDs

Damit der Drahtbondprozess auf 2K-Strukturen zuverlässig durchführbar ist, muss bereits in der Konstruktion des MIDs berücksichtigt werden, dass der metallisierbare Vorspritzling im Fertigspritzling optimal durch Formschluss mechanisch verankert ist, da bei LCP kein Stoffschluss erreicht werden kann.

Dieses Forschungsprojekt (AiF-Vorhaben-Nr. 12147N) wird aus Haushaltsmitteln des BMWi über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert.

Kontaktperson:

Dipl.-Ing. Ulrike Scholz

Tel. ++49(711)121-3722

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

# Automatisierte Fertigungslinie für Heißpräge-MID-Baugruppen "AHMID"

H. Seifert, H. Kück

## Einleitung

Die Heißprägetechnik ist ein preiswertes und relativ einfaches Verfahren zur Herstellung von MID-Bauteilen mit nicht zu hohen Anforderungen an die elektrische Komplexität. Ziel des, im Rahmenkonzept "Forschung für die Produktion von morgen", durch das BMBF geförderten Verbundvorhabens AHMID ist, gemeinsam mit 6 KuM's und zwei Forschungsinstituten die Grundlagen für die Realisierung einer innovativen, automatisierten, produktspezifisch konfigurierbaren Fertigungslinie für die Serienfertigung heißgeprägter MID-Bauteile zu entwickeln.

Diese Fertigungslinie wird bei **2E Rolf Hiller GmbH** aufgebaut und unter industriellen Fertigungsbedingungen an einem konkreten Beispielprodukt seriennah erprobt. Gleichzeitig wird im **Zentrum Fertigungstechnik Stuttgart** untersucht, wie eine Piezopressentechnologie für den Heißprägeprozess eingesetzt und optimiert werden kann. Das Projekt wurde vom **HSG-IMAT** initiiert, dessen Aufgaben die Mitwirkung bei der Konzeption der Anlage, die Erarbeitung von Testbauteilen und die Durchführung von technologischen Untersuchungen zur Heißprägetechnik einschließlich der Bauteilendprüfung sind.

## Anforderungen an Fertigungslinie und MID-Baugruppen

Die Fertigungslinie ist modular aufgebaut und auf eine Taktzeit von 5 - 10 s ausgelegt. Bei optimierten Investitions- und Betriebskosten soll die Prozessfähigkeit der einzelnen Fertigungsschritte trotz der geforderten Flexibilität der Fertigungslinie gewährleistet sein.

Die Linie ist für ein breites Spektrum von Baugruppen ausgelegt, wobei der Rahmen durch die folgenden Eckspezifikationen gegeben ist:

Bauteilgröße: max. 150 x 100 x 60 mm<sup>3</sup>  
Leiterbahndicke: 12 – 100 µm  
Leiterbahnbreite: min. 0,2 mm  
Leiterbahnabstand: min. 0,25 mm  
Beprägte Fläche: 10 – 70%  
Neigung Bestückungsebenen: max. 15°  
Abstand Bestückungsebenen: ≤ 60 mm

## Aufbau der Linie

Die Fertigungslinie besteht aus zwei Produktionsabschnitten, die über ein Handlingsystem miteinander verbunden sind. Im ersten Produktionsabschnitt werden die Kunststoffspritzlinge mit dem Leiterbild beprägt, die Restfolie entfernt und die erforderlichen Kontaktstifte eingepresst. Mit einem Vision-System wird die vollständige Restfolienentfernung überwacht. Die Kontaktstift-

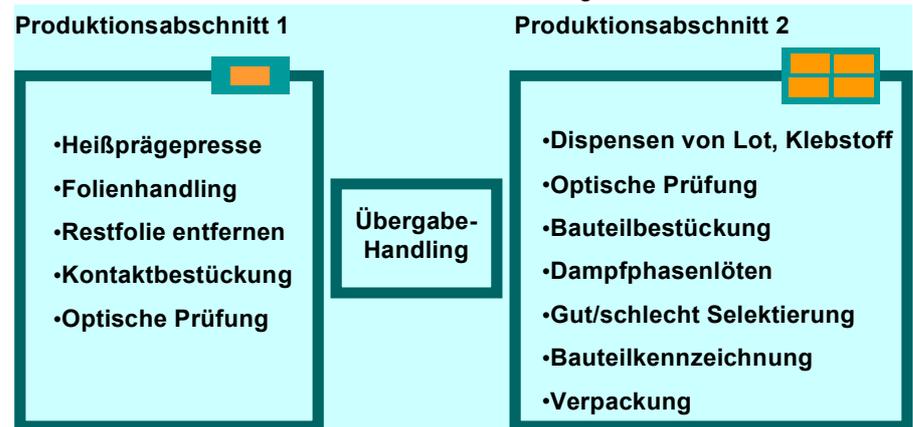


Bild 1: Schema der AHMID-Fertigungslinie

Die Linie ist für eine zweiseitige Prägung mit Durchkontaktierungen aufrüstbar. Das Bestücken mit SMD- und bedrahteten Bauteilen auf mehreren Bestückungsebenen ist möglich.

parameter wie Einpresstiefe, Geradheit und Vollständigkeit werden überprüft. Die einzelnen Fertigungsschritte sind durch ein Transportsystem miteinander verbunden.

Durch eine Übergabe-Handling-Station werden die Bauteile in den



Bild 2: Erster Produktionsabschnitt

zweiten Produktionsabschnitt umgeladen, wo mehrere Baugruppen in Werkstückträgern weiterverarbeitet werden. Im zweiten Produktionsabschnitt erfolgt die Bestückung der Baugruppen.

Die einzelnen Fertigungsstationen sind in Bild 1 dargestellt.

Die Anlagensteuerung erfolgt über den „Profibus“. Zur Qualitätssicherung werden alle für das Produkt relevanten Produktionsdaten einem Qualitätsmanagementsystem zugeführt und über Trendcharts analysiert. Zusätzlich wird eine Defektstatistik erstellt.

### Realisierung

Die Kunststoffspritzlinge werden lose an die Heißprägepresse angeliefert. Das Heißprägemodul basiert auf dem für die AHMID Linie modifizierten ServoPress Modul 450 der **SCHMIDT Feintechnik GmbH** mit folgenden Kennwerten:

Presskraft:	max. 50 kN
Kraftauflösung:	25 N
Wegauflösung:	6 µm



Bild 3: Heißprägemodul

Die Pressenkraft reicht aus, um bei einem spez. Prägedruck von 90 MPa ein Leiterbahnbild mit ca. 555 mm<sup>2</sup> Fläche zu prägen. Mit der

verwendeten IVOTAPE<sup>®</sup>-Folie der **Bolta Werke GmbH** erreicht man beispielsweise bei zahlreichen Kunststoffen Haftfestigkeiten > 1 N/mm, z. B. PA66, PA12, PBT, PPS, PC, PP.

Das Kontaktbestückungsmodul ist eine Entwicklung von **2E Rolf Hiller GmbH** und besteht aus einer Station für die Kontaktvereinzelnung und einem SCARA-Roboter zur Kontaktbestückung. Durch die Verwen-



Bild 4: Kontaktbestückungsmodul

dung eines SCARA-Roboters kann mit geringem Zeit- und Kostenaufwand auf unterschiedlichste Kontaktstifte und Kontaktabstände bei der Fertigung neuer Produkte umgestellt werden.

Das Modul von **S+S electronic GmbH & Co. KG** zur optischen Prüfung der Restfolienentfernung und der Kontaktstifte besteht aus einem Kamerasystem mit endozentrischer Optik und Infrarotbeleuchtung. Die Kamera hat eine Auflösung von 0,01 mm und ist an ein Bildverarbeitungssystem auf PC-Basis angeschlossen.

Als Dispensmodul wird der placeALL 908.510 der **Fritsch GmbH** für den Einsatz bei 3-D Geometrien weiterentwickelt. Dazu werden, um auf verschiedenen hohen



Bild 5: Optische Prüfung

Ebenen dispensen zu können, der Z-Hub auf 100 mm erweitert und eine Schwenkeinrichtung für die Baugruppe um die Längsachse von ± 15° integriert. In den Dispenser wurde ein optisches Prüfmodul zur Kontrolle der Dispenspunkte eingebaut.

In ähnlicher Weise wurde der Bestücker placeALL 908.612 der **Fritsch GmbH** ebenfalls für den Einsatz bei 3-D Heißprägebaugruppen erweitert. Dadurch kann auf unterschiedlichen Ebenen und geneigten Flächen bestückt werden.

Das Lötmodul, eine Dampfphasenlötanlage der **IBL-Löttechnik GmbH**, ist auf kurze Durchlaufzeiten optimiert worden und kann als Option für bedrahtete Bauelemente oder Steckkontakte mit einer Wellenlötstrecke nachgerüstet werden.

Das Prüfmodul für die elektrische, mechanische und elektromechanische Funktionsprüfung der Testbauteile wird vom **HSG-IMAT** entwickelt.

Kontaktperson:

Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück

Tel. ++49(711)121-3710

E-mail heinz.kueck@izfm.uni-stuttgart.de

# 3D-Design elektro-mechanischer Baugruppen als Heißpräge-MID

M. Schubert

## Die Entwurfs-Tools

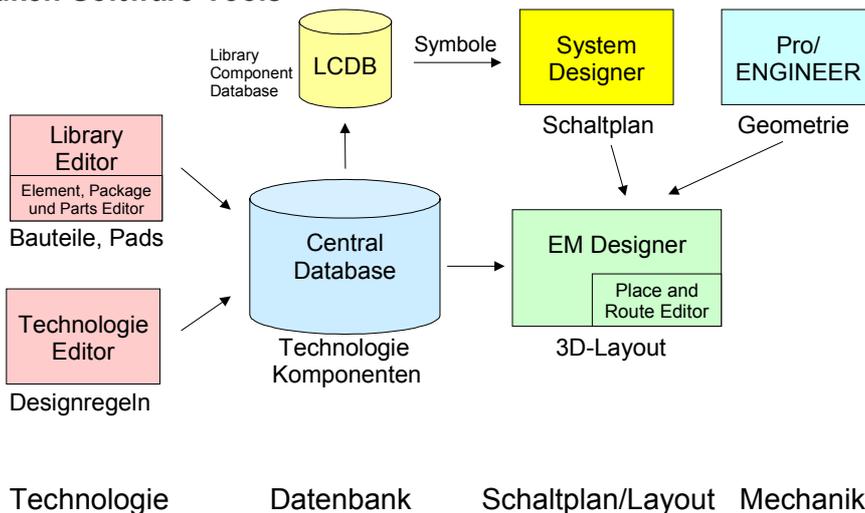
Seit Anfang des Jahres 2001 verfügt das HSG-IMAT über ein Softwarepaket der Fa. Zuken GmbH in Hallbergmoos zur Entwicklung von dreidimensionalen elektromechanischen Designs (Bild 1). Die verschiedenen Tools beziehen ihre jeweils benötigten Informationen aus den Einträgen in der CENTRAL DATABASE (CB), welche die Basis

Ein weiteres Tool ist der TECHNOLOGIE EDITOR. Damit werden die Technologien, z. B. Heißprägen, beschrieben, auf deren Grundlage die Erzeugung eines 3D-Designs basiert. Mit dem Technologie Editor werden einerseits globale Daten erzeugt, wie spezielle Padformen (USER PADS) oder Definitionen von Layern, die grundsätzlich in allen Technologien zur Verfügung stehen. Sinnvollerweise werden

weitere Vereinbarungen getroffen werden wie die Beschreibung der einzelnen Layer, verschiedene Pads oder Übergänge zwischen Pads und Leiterbahnen (sogenannte Teardrops).

Mit dem LIBRARY EDITOR werden Bauteile definiert. Dazu stehen der Element Editor zur elektrischen Beschreibung von Bauteilen, der Package Editor zur physikalischen Beschreibung von Bauteilgehäusen und der Parts Editor für die Definition der Bauteile aus Element und Package zur Verfügung.

## Zuken-Software-Tools



Im ELECTRO MECHANICAL DESIGNER laufen schließlich alle Daten zusammen, die Netzliste im RINF-Format und die Geometrie über die STEP-Schnittstelle. Im EM Designer findet auch das eigentliche 3D-Design statt, bei dem mit Hilfe des integrierten Place & Route Editors die Bauteile auf dem Träger platziert und die Leitungen verlegt werden, so dass das vollständige MID-Teil entsteht.

Bild 1: Übersicht über die Software-Tools

für die verwendeten Technologien, sämtliche Symbole und Bauteile darstellt. Die Zentrale Datenbank beinhaltet außerdem die sogenannte LIBRARY COMPONENT DATABASE (LCDB), worin die Symbole für den Schaltplaneditor gespeichert sind.

Schaltpläne werden mit dem SYSTEM DESIGNER gezeichnet, entweder als Symbolschaltpläne oder bauteilbezogene Schaltpläne, wobei alle verwendeten Symbole mit ihren Informationen aus der LCDB bezogen werden. Die Ausgabe des Schaltplans erfolgt in Form einer Netzliste im RINF-Format.

jedoch den einzelnen Technologien nur die dort verwendeten und notwendigen Layer zugeordnet. Insgesamt betrachtet, dient der Technologie Editor zur Definition von Designregeln.

Dann beschreibt der Technologie Editor die Technologien selbst, zunächst in Form einer PCB oder MCM Technologie, worin z. B. der Lagenaufbau, Mindestabstände zwischen elektrischen Objekten oder Regeln für das Routen von Leitungen definiert sind. Diesen Technologien sind dann jeweils eine Board-, Pad- und Package-Technologie zugeordnet, in denen

## Vom Entwurf zur Baugruppe

In Bild 2 ist der Entwicklungsablauf für ein neues Heißpräge-MID-Teil dargestellt. Aufgrund der Funktionalität des MID-Teils wird zum einen ein Schaltplan mit den entsprechenden Bauteilen erzeugt. Sollten notwendige Bauteile noch nicht in der Zentralen Datenbank vorhanden sein, werden sie an dieser Stelle mit dem Library Editor neu definiert und stehen damit in Zukunft zur Verfügung. Gleichzeitig wird mit einem Mechanik-CAD-Programm wie z. B. Pro/ENGINEER die entsprechende Geometrie erzeugt, die als Datensatz sowohl dem Layoutprogramm, in diesem Fall dem EM Designer, als auch dem CNC-gestützten Werkzeugbau z. B. für die HSC-

## Vom Entwurf zur Baugruppe

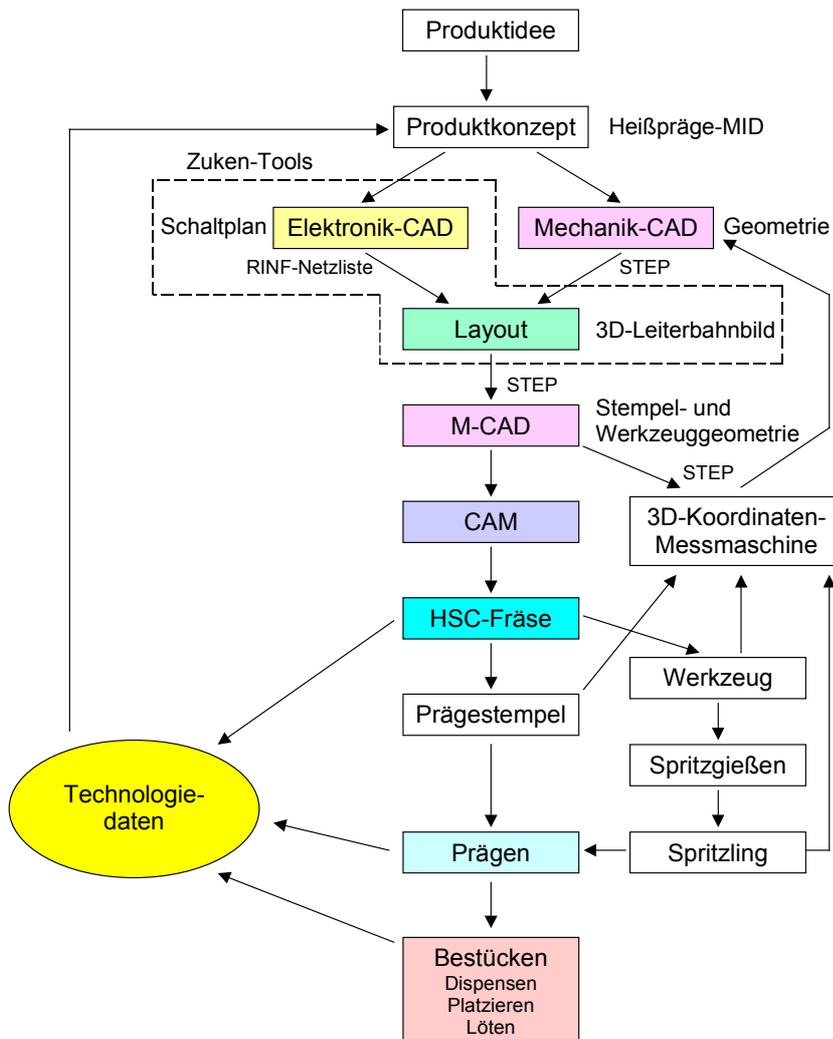


Bild 2: Ablauf vom Entwerfen bis zur fertigen Baugruppe

Frästechnik zur Herstellung des Werkzeugs für die Spritzgießmaschine zur Verfügung steht. Der Schaltplan wird als RINF-Netzliste ebenfalls dem EM Designer übergeben, so dass das 3D-Design in Form eines 3D-Leiterbahnbildes erstellt werden kann. Die Ausgabe der Daten erfolgt über die Step-Schnittstelle wieder an das Mechanik-CAD-Programm. Dort werden die Stempel- und Werkzeuggeometrien erzeugt und die CAM-Daten an die Fräsmaschine zur Herstellung

des Prägestempels bzw. Spritzgießwerkzeugs geschickt. Die Messungen der Geometrien von Prägestempel, Spritzgießwerkzeug und Spritzling werden mit einer 3D-Koordinatenmessmaschine der Fa. Werth, Gießen durchgeführt, welche sich seit Mitte Januar 2002 am HSG-IMAT befindet. Die Messdaten werden mit den CAD-Daten des Mechanik-CAD-Programms verglichen und die Geometrien entsprechend den Abweichungen von den Sollmaßen korrigiert. Der Zyklus

Messen - Korrigieren - Herstellen wird bis zum Erreichen von tolerierbaren Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Maßen durchlaufen.

Nach dem Heißprägen und Bestücken des Bauteils ist der Prototyp des geplanten Heißpräge-MID-Teils vorhanden. Die Erfahrungen, die beim Fräsen, Prägen und Bestücken gemacht werden, fließen als Technologieinformationen wieder in die Datenbank zurück.

### Möglichkeiten

Mit den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten in Bezug auf die Realisierung von MID-Teilen mit der Zuken-Software wurden bereits Designregeln aufgestellt, die sich auch kundenorientiert zur Herstellung spezifischer Layouts, Heißprägestempel und auch kompletter Baugruppen adaptieren lassen. Und mit stetiger Erweiterung der Datenbank steigt auch das Wissen und das Know-how auf dem innovativen Gebiet der MID-Technik.

### Ausblick

Die Technologie, welche derzeit hauptsächlich bearbeitet wird, ist das Heißprägen. Hier sind bisher die größten Erfahrungen am Institut vorhanden. Die Laserstrukturierung wird voraussichtlich zu Beginn des zweiten Quartals 2002 in Angriff genommen, da zu diesem Zeitpunkt eine 3D-Laserbearbeitungsanlage der Fa. LPKF am HSG-IMAT verfügbar sein wird.

Kontaktperson:  
Dr.-Ing. Manfred Schubert  
Tel. ++49 (711)121-3718  
E-mail schubert@izfm.uni-stuttgart.de

# Anlage zum elektrochemischen Mikrofräsen mit gepulster Spannung

W. T. Gmelin

Mit Kunststoffen lassen sich aufgrund der heute realisierbaren hohen Strukturauflösung bei ab- und umformenden Fertigungstechnologien wie dem Mikrospritzgießen oder Heißprägen mikrostrukturierte Bauelemente wirtschaftlich herstellen. Dies erfordert allerdings die Herstellung von Werkzeugen aus verschleißfesten Konstruktionswerkstoffen, die mit derzeit angewandten Fertigungsverfahren nur unter erheblichen Schwierigkeiten gefertigt werden können.

Berliner Forscher um Rolf Schuster und Gerhard Ertl [1] haben ein vielversprechendes, elektrochemisches Verfahren entwickelt, das zukünftig wesentlich zur Entspannung der Fertigungsprobleme beitragen kann. Im Rahmen einer Kooperation wurde auf der Grundlage dieses Verfahrens am IZFM der Demonstrator einer Anlage aufgebaut, mit deren Hilfe wichtige Erkenntnisse zum Aufbau industriell nutzbarer Anlagen gewonnen werden sollen.

## Einordnung

Bei den überwiegend zur Herstellung von Komponenten der Mikrosystemtechnik angewandten Verfahren handelt es sich hauptsächlich um lithographische Verfahren der Silizium- und Dünnschichttechnik sowie um das LIGA-Verfahren, mit denen problemlos 2½D-Strukturen im Submikrometerbereich hergestellt werden können. Die dabei typischerweise eingesetzten Werkstoffe wie Silizium oder Nickel sind allerdings für den Aufbau von Formeinsätzen nicht verwertbar, da sie insbesondere bei der Verarbeitung von Hochleistungskunststoffen mit abrasiven Füllstoffen einem viel zu hohen Verschleiß unterliegen. Wichtige, strukturierbar und wirtschaftlich verwertbare Konstruktionswerkstoffe sind dem Werkzeug-

und Formenbau der Mikrosystemtechnik mit diesen Verfahren nicht zugänglich. Daher finden zum Teil unter erheblicher Anstrengung aus der Feintechnik kommende spanabhebende und abtragende Bearbeitungsverfahren wie beispielsweise HSC-Fräsen, Schleifen, Erodieren oder abtragende Verfahren der Laserbearbeitungstechnik wie dem Ablatieren Einzug in die Mikrosystemtechnik. Allerdings werden auch hier systembedingt schnell deren Grenzen erreicht. Sei es das limitierte Aspektverhältnis beim Ablatieren oder die begrenzt kleinen Werkzeugdimensionen der spanabhebenden Verfahren wie dem HSC-Fräsen ( $\varnothing > 80 \mu\text{m}$ ), deren Bearbeitungskräfte zudem auch die Fertigung hochgenauer Strukturen erschweren. Bei abformenden Verfahren wie dem Senkerodieren ergibt sich neben der hohen thermischen Belastung der Werkstückrandzone das Problem der Strukturierung der Arbeitselektrode selbst sowie deren Verschleiß während des Erodierens.

## Das neue Verfahren

Das Verfahren selbst nutzt - wie bereits etablierte elektrochemische Verfahren - die Eigenschaft metallischer Werkstoffe, durch Anlegen einer Spannung zwischen Werkstück als Elektrode und einer Arbeitselektrode in einem geeigneten Elektrolyten in Lösung zu gehen. Der Unterschied besteht darin, die lokale elektrochemische Reaktionsrate nicht durch die Stromdichteverteilung im Elektrolyten, sondern durch Variation des Spannungsabfalls in der Doppelschicht direkt zu steuern, um damit einen lokal begrenzten Materialabtrag und somit eine hohe Auflösung zu erreichen. Die Doppelschicht bildet sich durch Ladungstrennung lösungsseitiger

Ionen und Ladungen in der Oberfläche der Metallelektroden an den Metalloberflächen aus, es entsteht ein nur wenige Wassermoleküllagen dickes Dielektrikum. Die Doppelschicht kann daher vereinfacht als ein Plattenkondensator mit einer elektrolytabhängigen Kapazität um  $10 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  aufgefasst werden, dessen Ladezeit durch das Produkt des Elektrolytwiderstandes  $R$  und der Doppelschichtkapazität  $C_{DL}$  bestimmt ist ( $\tau = R \cdot C_{DL}$ ). Während bei einer Änderung des Elektrodenabstandes die Kapazität der Doppelschicht  $C_{DL}$  konstant bleibt, ändert sich der wirksame Elektrolytwiderstand  $R$  mit der Länge des Stromlaufpfades. Mit zunehmendem Abstand der Elektroden nimmt die Ladezeit der Doppelschicht zu. Bei hinreichend schneller An- und Abschaltung der Ladespannung können gezielt nur die Elektrodenbereiche wirkungsvoll umgeladen werden, die sich nahe gegenüberstehen. Mit  $R = R_N$  gilt:  $U(R_N, t) > U_{reak}$ . Bild 1 zeigt den zeitlichen Spannungsverlauf beim Laden und Entladen der Doppelschicht mit unterschiedlichen Ladewiderständen  $R_N$  und  $R_W$ ,  $R_N \ll R_W$ .

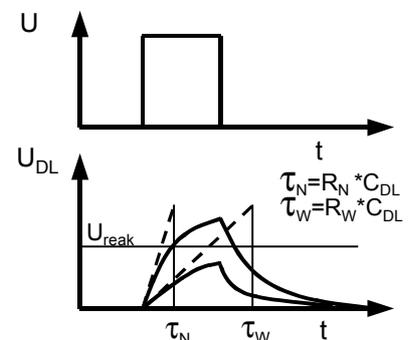


Bild 1: Spannungspuls am Werkzeug (oben); zeitlicher Spannungsverlauf der Doppelschicht bei unterschiedlichem Elektrodenabstand (unten)

Reaktionen an weiter entfernten Bereichen der Elektrode ( $R = R_W$ ) werden zudem durch die exponen-

tielle Abhängigkeit der Reaktionsrate von der Umladespannung wirkungsvoll unterdrückt.

Durch diesen lokal begrenzten Materialabtrag ist mit diesem elektrochemischen Verfahren eine systembedingte, sehr hohe Abbildungsgenauigkeit realisierbar. In bisherigen Versuchen konnten Kantenradien von Strukturen unter 100 nm nachgewiesen werden. Weiterhin können durch den berührungslosen Abtrag auch extrem klein dimensionierte Werkzeuge oder strukturierte Stempel eingesetzt werden, deren geometrische Genauigkeit durch die werkzeugverschleißfreie Bearbeitung erhalten bleibt. Gegenüber den Erodierverfahren unterliegt das Werkstück bei dem neuen Verfahren keinerlei mechanischer oder thermischer Beanspruchung. Mit feinsten Drähten, Spitzen oder bereits strukturierten Stempeln können harte Werkstoffe wie Wolfram berührungslos und hochgenau strukturiert werden.

### Aufbau eines Demonstrators

Das Verfahren soll mit dem Ziel der Herstellung hochauflöser 3D-Strukturen in robusten, harten Werkstoffen zum Aufbau von Formeinsätzen für die Mikroumformung angewandt und untersucht werden. Dabei steht nicht die Abformung durch Absenken von strukturierten Stempeln im Vordergrund, sondern vielmehr der Abtrag durch standardisierte Werkzeuggeometrien wie zylindrische Stäbe mit flachen, halbkugelförmigen oder spitzen Enden. Dazu wurde am IZFM ein Demonstrator aufgebaut, welcher über eine präzise 3-Achsen Mechanik verfügt, wobei das Werkzeug relativ zum Werkstück mit hoher Genauigkeit geführt werden kann. Werkzeug und Werkstückoberfläche

sind zueinander senkrecht angeordnet. Ein 12-fach Werkzeugwechsler ermöglicht bei Bedarf den automatischen Werkzeugwechsel, so kann mit großen Werkzeugen vorgearbeitet, mit kleineren Werkzeugen in einem Arbeitsgang Restmaterial abgetragen werden. Mittels einer speziell entwickelten, rechnergestützten Bahnsteuerung mit DIN-ISO Schnittstelle können NC-Datensätze effizient direkt aus CAD-generierten Strukturen übernommen werden. Speziell für das Verfahren entwickelte Werkzeugführungsstrategien werden den einzelnen NC-Sätzen während der Bearbeitung automatisch überlagert und brauchen daher bei der Erstellung der CAM-Daten nicht berücksichtigt zu werden, was den Einsatz

bestehende Bearbeitungslinien mit beispielsweise Fräsen und Erodieren erleichtert. Bild 2 zeigt die am IZFM praktizierte, für das HSC-Fräsen und elektrochemische Fräsen weitgehend identische Bearbeitungsstrecke. Weitere Vorrichtungen ermöglichen die Verbindungstechnik der Werkzeughalter mit den Werkzeugen und deren Weiterverarbeitung, beispielsweise der Durchmesserreduzierung durch elektrochemisches Ätzen. Damit sind auch dem Einsatz kleiner Werkzeugdurchmesser weit unter 10 µm kaum Grenzen gesetzt.

### CAD/CAM- Datenstrecke

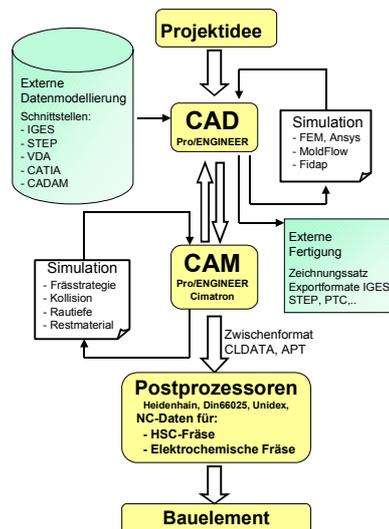


Bild 2: Die am IZFM praktizierte Bearbeitungsstrecke für herkömmliches und elektrochemisches Fräsen (ECF)

längst etablierter, standardisierter CAD/CAM-Strecken ermöglicht. Somit stehen dem neuen Verfahren bereits heute mächtige Entwicklungstools zur Verfügung, welche entscheidend dessen Integration in

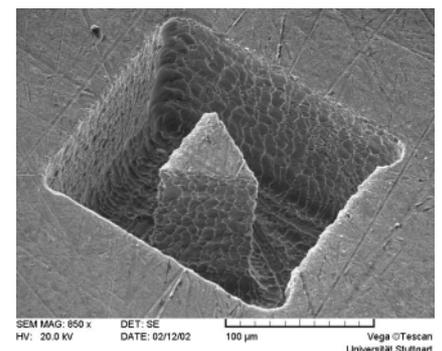


Bild 3: Bearbeitete Teststruktur in Edelstahl, Kantenlänge des Zapfens ca. 70 µm, Höhe 100 µm

Am IZFM wurden mit dem Demonstrator Teststrukturen in Edelstahl hergestellt. Dafür wurden Wolframwerkzeuge mit Durchmessern von 10 µm bis 50 µm eingesetzt. In Bild 3 ist ein dreieckiger Zapfen mit einer Seitenlänge von ca. 70 µm und einer Höhe von 100 µm dargestellt.

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

Kontaktperson:  
Dipl.-Ing. Thomas Gmelin  
Tel. ++49(711)121-3714  
E-mail thomas.gmelin@izfm.uni-stuttgart.de

# Einfluss der Plattenvorbehandlung auf das tribologische Verhalten von gleitlackbeschichteten Gleitpaarungen

W. Scheerer

## Einleitung

Für verschiedene Anwendungen - hauptsächlich in der Automobilbranche - werden die Forderungen an die Korrosionsbeständigkeit der Gleitsysteme immer höher angesetzt. Diese können mit herkömmlichen Lacksystemen ohne entsprechende Substratvorbehandlung nur noch sehr schwer erfüllt werden. Man muss vielmehr mit einer zusätzlichen Substratvorbehandlung die Korrosionsbeständigkeit des Gesamtsystems optimieren.

Aus diesem Grund sind einige Gleitlackanwender dazu übergegangen, die Gleitlacksysteme auf einer zusätzlichen Schicht aufzubringen. Diese Schicht wird mit einem kaltkathodischen Tauchverfahren (KTL) hergestellt.

In diesem Bericht wird der Einfluss verschiedener Plattenvorbehandlungen auf das Reibungs- und Verschleißverhalten bei verschiedenen Pressungen untersucht und diskutiert.

## Versuchsdurchführung

Zur Durchführung der Reibungs- und Verschleißuntersuchungen wurde das Prüfsystem Kugel/ebene Platte eingesetzt, das eine große Variation des Belastungskollektives erlaubt.

Als Prüfkörper dienten Kugeln aus dem Werkstoff 100Cr6 mit einem Durchmesser von 12,7 mm (1/2"), 6,35 mm (1/4") und 3,17 mm (1/8"), die auf die relativ zu ihr bewegte Platte gedrückt wird. Die Aufnahme der durch die oszillierende Bewegung der Platte relativ zur Kugel entstehenden Reibkräfte erfolgt durch eine Biegefederparallelführung, die direkt an die Kugeleinspannung gekoppelt ist. Bei einer Gleitgeschwindigkeit von 10 mm/s und einem Hub von 5,0 mm oszil-

liert die Platte mit einer Frequenz von etwa 1 Hz. Als Pressungsstufe lag zu Versuchsbeginn die maximale Hertzische Pressung  $p_{\max} = 740 \text{ N/mm}^2$  für den Einsatz der 1/2"-Kugeln vor. Durch Verkleinerung des Kugeldurchmessers bei gleichbleibender Auflagekraft erhöht sich nach Hertz die Pressung für die 1/4"-Kugeln auf  $1170 \text{ N/mm}^2$  und für 1/8"-Kugeln auf  $1860 \text{ N/mm}^2$ . Die Verschleißvolumina der Prüfkörper werden mit Hilfe eines Tastschnittgeräts Talysurf bestimmt.

Ein Teil der Platten wurde vor der Gleitlackbeschichtung mit einem Tauchverfahren vorbehandelt. Die entstehende Galvanikschicht ist etwa 15  $\mu\text{m}$  dick und besitzt eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit. Nach diesem Behandlungsprozess sind sie mit dem gleichen Gleitlack nach der gleichen Vorgehensweise beschichtet worden wie die sandgestrahlten Platten. Als Gleitlacksystem ist ein Gleitlack mit der Bezeichnung Xylan 1424 der Fa. Whitford eingesetzt worden. Dabei handelt es sich um ein Lacksystem mit einem wasserbasierenden Lösemittel und PTFE als Festschmierstoff. Die Stahlplatten weisen nach dem Sandstrahl-Prozess Rauheitswerte von  $R_a = 1,35 \mu\text{m}$  und  $R_z = 10,7 \mu\text{m}$  auf. Nach dem Tauchverfahren nimmt die Oberfläche entsprechende Rauheitswerte von  $R_a = 0,02 \mu\text{m}$  und  $R_z = 6,4 \mu\text{m}$  an. Die Oberflächen der galvanisch beschichteten Platten sind damit wesentlich glatter als die der sandgestrahlten.

In den folgenden Diagrammen der Bilder 1 und 2 sind die Untersuchungsergebnisse nach einer Beanspruchungsdauer von 8 Stunden nach dem obigen Belastungskollektiv dargestellt.

Die Gleitpaarungen zeigen im Ver-

gleich zu den sandgestrahlten Stahlplatten eine deutliche Reduzierung der Reibungszahlen und der Verschleißwerte für die höheren Pressungsstufen. Daraus kann eine höhere Druckaufnahmefähigkeit des Gesamtsystems mit KTL-Vorbehandlung abgeleitet werden. Einzig die Versuche der sandgestrahlten 1/8"-Gleitpaarungen zeigen nach Versuchsende ein mittleres Kugelabriebsvolumen von  $29 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ .

Aufgrund der relativ hohen Reibungszahl und stärkeren Streuung kann man davon ausgehen, dass die Gleitlackschicht durch die oszillierende Kugelbewegung bei hohen Pressungen nach einer Versuchsdauer von 8 Stunden aufgebrochen ist.

Diese Annahme wird durch die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen bestätigt.

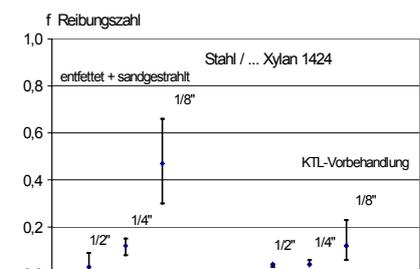


Bild 1: Reibungszahlen der verschiedenen Gleitpaarungen nach einer Versuchsdauer von 8 Stunden

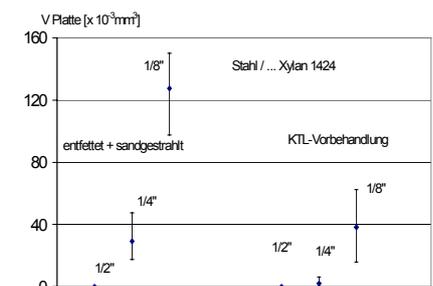


Bild 2: Plattenabriebswerte der verschiedenen Gleitpaarungen nach einer Versuchsdauer von 8 Stunden

In den folgenden Bildern 3 und 4 sind die Reibspuren der unterschiedlichen Gleitpaarungen dargestellt. Deutlich sind die unterschiedlichen Reibspuren mit ihren hellen Oberflächenbereichen ausgeprägt. Man erkennt in der Reibspur die charakteristische Grundstruktur der sandgestrahlten Stahlplatte. Die aufgetragene Lackschicht ist für die sandgestrahlte Gleitpaarung so weit abgetragen, dass nur noch einzelne

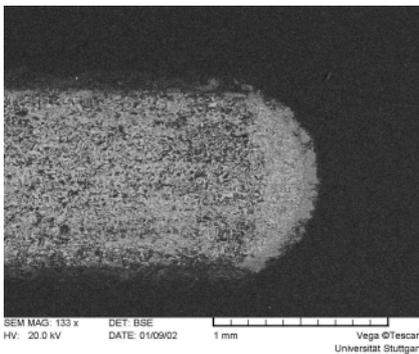


Bild 3: REM-Aufnahme einer Reibspur der Gleitpaarung 1/8"-Stahl/sandgestrahlte Stahl beschichtet mit Xylan 1424

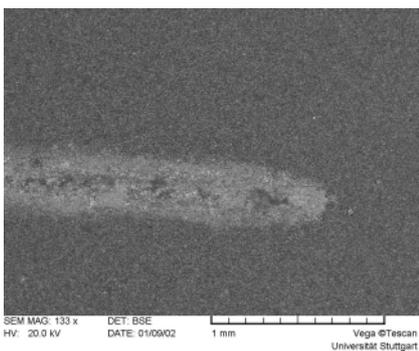


Bild 4: REM-Aufnahme einer Reibspur der Gleitpaarung 1/8"-Stahl/KTL-vorbehandelten Stahl beschichtet mit Xylan 1424

Gleitlackreservoirs in den tieferen Stahloberflächenbereichen vorkommen. Diese können jedoch den Gleitfilm nicht mehr optimal aufrechterhalten. Dadurch nehmen sowohl die Reibungswerte als auch die Verschleißwerte der Prüfkörper mit zunehmender Versuchsdauer immer höhere Werte an.

Weiterhin sind für beide Lackschichten die mechanischen Eigenschaften mit Hilfe des Mikrohärteprüfgeräts Fischerscope H 100 bestimmt worden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Härte-Messgeräten lassen sich bei diesem Gerät Normalkräfte und die dadurch verursachte Eindringtiefe der Diamantspitze definiert bestimmen. Die zusätzliche Registrierung der Eindringtiefe auch bei Krafrücknahme erlaubt einer angeschlossenen Auswerteeinheit u. a. die Berechnung des Elastizitätsmoduls, der Universalhärte und der Eindringtiefe. Um das Kriechverhalten des Werkstoffes bestimmen zu können, wurde der Eindringkörper 10 Sekunden mit konstanter Endlast beaufschlagt bei gleichzeitiger Dokumentation der Verfahrwegänderung des Eindringkörpers. Aus dem Verhältnis von Eindringtiefe zum logarithmischen Zeitintervall leitet sich das Kriechverhalten  $h_{\text{kriech}}$  ab. Die Universalhärte HU beinhaltet sowohl den elastischen als auch den plastischen Anteil des Härteeindrucks, während die plastische Härte  $H_{\text{plast}}$  ohne die elastischen Anteile berechnet wird, um eine bessere Vergleichbarkeit mit den Vickers-Härtewerten zu erhalten.

Die oberflächennahen Bereiche der Gleitlackschicht der KTL-vorbehandelten Platten zeigen höhere Werte als die der sandgestrahlten.

## Diskussion

Die zusätzliche Vorbehandlung der Stahlplatten erhöht nicht nur die Korrosionsbeständigkeit des Lacksystems um ein Vielfaches, sondern verbessert auch ihre Reibungs- und Verschleißigenschaften unter diesen tribologischen Belastungskollektiven.

Wie die Reibungsverläufe und die REM-Aufnahmen zeigen, ist die Gleitlackschicht bei einer Pressungsstufe von 1860 N/mm<sup>2</sup> für sandgestrahlte Gleitpaarungen nach einer Versuchsdauer von 8 Stunden aufgebrochen. Untersuchungen mit Hilfe des Mikrohärteprüfgeräts weisen für die KTL-vorbehandelten Lackoberflächen auf eine leichte Verbesserung der mechanischen Eigenschaften auf. Allerdings sind diese mechanischen Änderungen im Bereich von etwa 10% nicht so groß, dass ein Schichtdurchbruch dadurch erklärt werden könnte. Vielmehr können Vorhersagen über das tribologische Verhalten nicht allein mit diesen gemessenen mechanischen Eigenschaften begründet werden.

Diese Arbeiten sind im Rahmen des Arbeitskreises "Gleitlacke" am HSG-IMAT durchgeführt worden, der sich hauptsächlich mit Gleitlacken und ihrer Verträglichkeit mit verschiedenen Schmiermedien befasst.

Prüfkörper	HU [N/mm <sup>2</sup> ]	H <sub>plast</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul [GPa]	Kriechen [%]
sandgestrahlt	210	318	6,5	7,6
KTL-vorbehandelt	230	350	7,3	8,6

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften der Oberflächen

Kontaktperson:

Dipl.-Ing. Markus Münch

Tel. ++49(711)121-3715

E-mail markus.muench@izfm.uni-stuttgart.de

## 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

Leiterplattenentwurf:  
EAGLE

Schaltungsanalyseprogramm:  
MicroSim PSpice

DOE:  
Echip

Messdatenerfassung:  
TestPoint

## HSC-Frästechnik

5-Achsen-Präzisionsfräsmaschine:  
Fehlmann Picomax 60 M

3-Achsen-Hochpräzisions-  
fräsmaschine:  
PRIMACON PFM 24  
(ab 4/2002)

## 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 (ab 4/2002)

## Chemische Metallisierung

für selektive außenstromlose Me-  
tallisierung von Kunststoffen

## 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-  
Drahtbender:  
Hesse & Knipps Bond Jet 710

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

Differential Scanning Calorimetry  
(DSC):

Netzsch DSC 204 Phoenix

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

Röntgenfluoreszenz-Schicht-  
dickenmessgerät und Material-  
analysator:

Roentgenanalytik Xray  
ComPact

Optisches Längen- und Profil-  
messsystem:

UBM Optischer Taster UBF 60

Tastschnitt-Profilometer:  
Form Talysurf

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

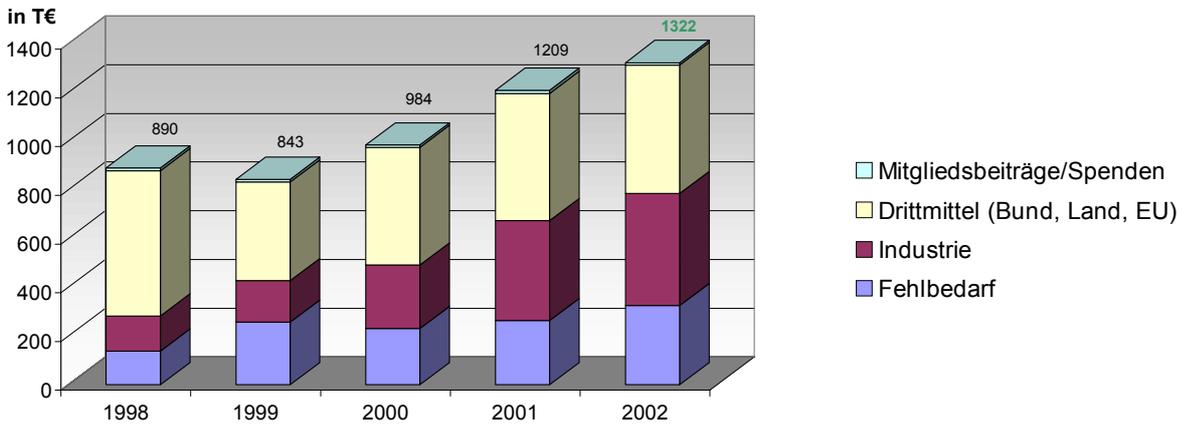


Bild 1: Entwicklung des Haushalts mit Planzahlen für 2002

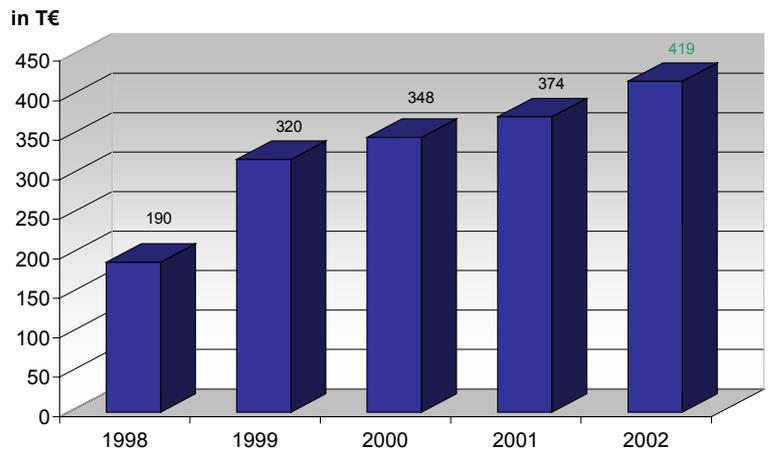


Bild 2: Gesamt-Investitionen mit Planzahl für 2002

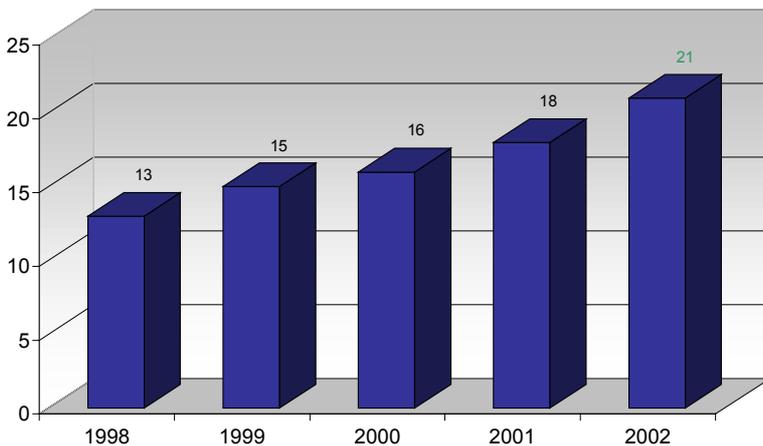


Bild 3: Entwicklung der Mitarbeiterzahl mit Planzahl für 2002

## Publikationen, Mitarbeit in Gremien

### Vorträge und Veröffentlichungen

H. Kück,  
"MID-Technik – Technischer Fortschritt oder nur Faszination?",  
Workshop Innovative Anwendungen der MID-Technik, Stuttgart, 27. September 2001

W. Eberhardt,  
"MID-Gehäuse für Durchflusssensorsystem",  
Workshop Innovative Anwendungen der MID-Technik, Stuttgart, 27. September 2001

W. Eberhardt, Th. Gerhäuser,  
M. Giousouf, H. Kück, R. Mohr,  
D. Warkentin,  
"Innovative Concept for the Fabrication of Micromechanical Sensor and Actuator Devices Using Selectively Metallized Polymers",  
Transducers'01, Springer Verlag, 2001

W. Eberhardt et al.,  
"Innovative Concept for the Fabrication of Micromechanical Sensor and Actuator Devices Using Selectively Metallized Polymers",  
angenommen bei Sensors and Actuators, June 2001

U. Scholz,  
"Drahtbonden auf MID",  
Workshop Innovative Anwendungen der MID-Technik, Stuttgart, 27. September 2001

H. Schenk et al.,  
"Design and Modelling of Large Deflection Micromechanical 1D and 2D Scanning Mirrors",  
Conference on MOEMS and Miniaturized Systems 2000, Santa Clara, Calif.

H. Seifert,  
"Konzeption der AHMID-Fertigungslinie",  
Workshop Innovative Anwendungen der MID-Technik, Stuttgart, 27. September 2001

D. Warkentin,  
"Beschleunigungssensor in MID-Technik",  
Workshop Innovative Anwendungen der MID-Technik, Stuttgart, 27. September 2001

A. Wolter et al.,  
"Fabrication of the Moving Liquid Mirror (MLM) Spatial Light Modulator in a Standard CMOS Process",  
Conference on MOEMS and Miniaturized Systems 2000, Santa Clara, Calif.

A. Wolter et al.,  
"A Spatial Light Modulator Using Moving Liquid Mirrors (MLM) on a CMOS Active Matrix",  
International Conference on New Actuators 7, 2000, Bremen, In: Actuator 2000: Conference Proceedings. Bremen: Messe Bremen GmbH, 2000, pp. 71-74

### Messebeteiligungen

8. Innovationstag  
der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) "Otto von Guericke" e.V.,  
Berlin, 31. Mai 2001

Forum Zukunftsoffensive:  
Forschung für die Wirtschaft,  
Stuttgart, 2. Februar 2001

Tag der offenen Tür,  
Universität Stuttgart,  
23. Juni 2001

### Workshop

Innovative Anwendungen der MID-Technik,  
Veranstalter: Hahn-Schickard-Gesellschaft - Institut für Feinwerk- und Zeitmeßtechnik (HSG-IFZ),  
Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Projektträger PFT Karlsruhe,  
Stuttgart, 27. September 2001

### Mitarbeit in Gremien

H. Kück:

Mitglied im Fachausschuss 4.1  
"Grundsatzfragen der Mikrosystemtechnik" der GMM

Leiter des Fachausschuss 4.8  
"Mikrofertigung" der GMM

Mitglied im Wissenschaftlichen Rat der AiF

Mitglied im Fachbeirat des "Kompetenznetz MAHREG Automotive"

W. Scheerer:

Mitglied im DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) Normenausschuss Gleitlager

U. Scholz:

Arbeitsgruppe AG A2.4 "Bonden" des DVS

# Lehrveranstaltungen, Studien- und Diplomarbeiten

## 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, M. Sesterhenn, T. Strobel: Technologien der Mikrosystemtechnik

B. Bertsche, E. Göde, H. Kück, E. Laurien, H. Seeger, E. Westkämper: Einführung in die Studienrichtungen des Maschinenwesens

## Praktika

Hauptfachpraktikum in Miniatur- und Mikrotechnik

Allgemeines Praktikum des Maschinenbaus

Elektronik-Praktikum für Feinwerktechniker

## Seminare

12.07.01

and. mach. M. Dreßler  
FEM-Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Thermoplastmembranen in Drucksensorgehäusen

24.07.01

and. mach. M. Arnold  
Untersuchung der Haftfestigkeit von Metallschichten auf Thermoplasten

11.10.01

and. mach. C. Andriot  
Untersuchung / Optimierung des Einflusses von Schichtstress auf die Eigenschaften von Polysilizium-Membranen

19.10.01

and. mach. R. Rentz  
Untersuchung der piezoresistiven Eigenschaften von außenstromlos abgeschiedenen Metallschichten auf Thermoplasten für die MID-Technologie

13.12.01

and. mach. D. Ahrendt  
Aufbau eines Messplatzes und Untersuchungen zur Dynamik eines nm-Verstellelements für Hubbewegungen

## Abgeschlossene Studienarbeiten

Arnold, Markus  
Untersuchung der Haftfestigkeit von Metallschichten auf Thermoplasten  
Betreuer: Dipl.-Ing. M. Münch

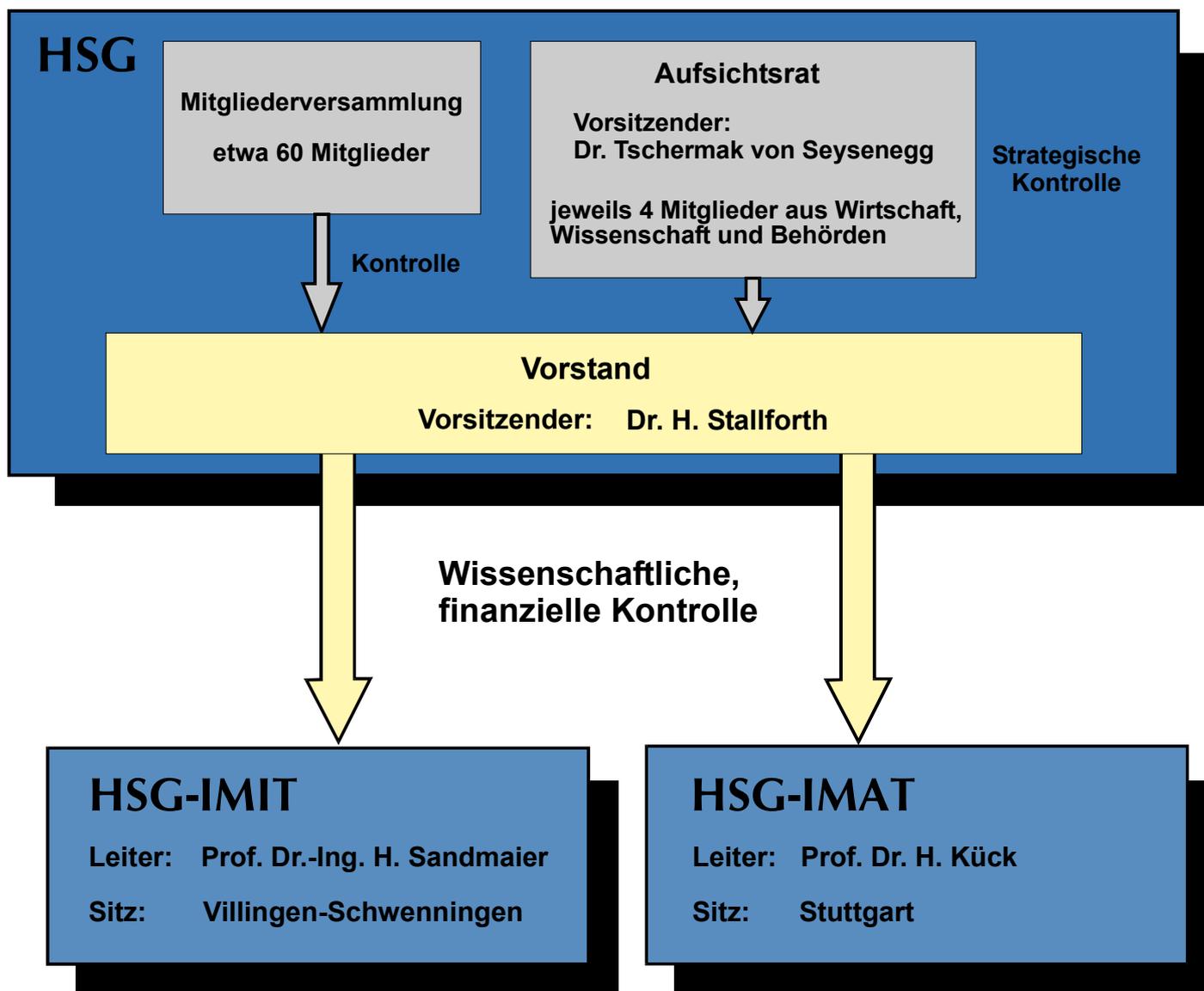
Dreßler, Marc  
FEM-Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Thermoplastmembranen in Drucksensorgehäusen  
Betreuer: Dipl.-Phys. Th. Gerhäuser

Rentz, Robert  
Untersuchung der piezoresistiven Eigenschaften von außenstromlos abgeschiedenen Metallschichten auf Thermoplasten für die MID-Technologie  
Betreuer: Dipl.-Phys. M. Giousouf, Dipl.-Ing. R. Mohr

## Abgeschlossene Diplomarbeiten

Ahrendt, Dirk  
Aufbau eines Messplatzes und Untersuchungen zur Dynamik eines nm-Verstellelements für Hubbewegungen  
Betreuer: Prof. Dr. H. Kück, Dr. A. Hof (Carl Zeiss, Oberkochen)

Andriot, Christelle  
Untersuchung / Optimierung des Einflusses von Schichtstress auf die Eigenschaften von Polysilizium-Membranen  
Betreuer: Prof. Dr. H. Kück, Dr. A. Dehé (Infineon Technologies AG, München)



## Aufsichtsrat

MinDirig  
Dr. Tschermak von Seysenegg  
Wirtschaftsministerium  
Baden-Württemberg

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

Dr. Peter Fritz  
Forschungszentrum Karlsruhe  
(FZK)

Dipl.-Ing. (FH)  
Wolfgang Kammerlander  
Conti Temic microelectronic GmbH

Professor Dr. Johann Löhn  
Regierungsbeauftragter für  
Technologietransfer Baden-  
Württemberg

Oberbürgermeister  
Dr. Manfred Matusza  
Große Kreisstadt Villingen-  
Schwenningen

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 Rolf Hiller GmbH

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

### **Schatzmeister:**

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

### **Ehrenvorsitzender:**

Dr.-Ing. Wolfgang Berger

# 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

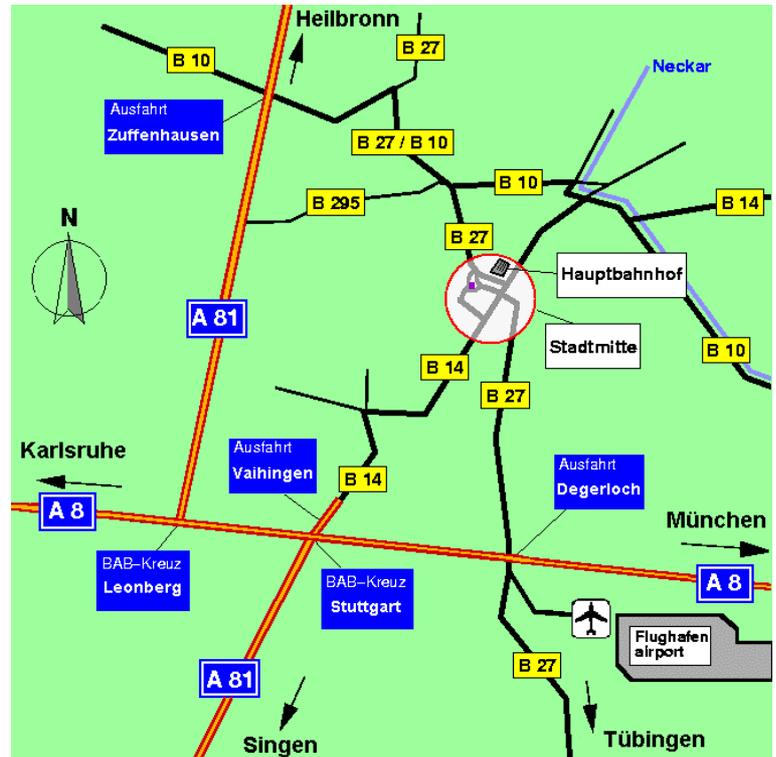
## Bei Anreise mit: Zug / S-Bahn

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

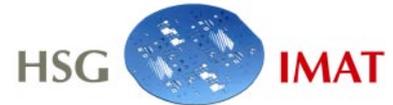


Hinweise für PKW-Fahrer:

**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 2002