

## Ergebnisse und Leistungen 1999

Titelbild:

Blick auf die Auswerferseite des geöffneten Spritzgießwerkzeugs für ein Modellgehäuse mit optischem Fenster für die Mikrosystemtechnik

## Inhaltsverzeichnis

Organisationsstruktur	2
Vorwort	3
Miniaturmotoren	4
Temperaturstabilität von Stimmgabelresonatoren aus Silizium	6
Verfahren zur zerstörungsfreien Haftfestigkeitsuntersuchung bei Miniaturverbindungen	8
Beständigkeitsprüfung von Polymerwerkstoffen	10
Mechanische Eigenschaften und Verschleißverhalten von Harzsystemen	12
Außenstromlose Metallisierung von Thermoplasten für die MID-Technologie	14
Mehrkomponenten-Spritzgießen in der Mikrosystemtechnik	17
HSG-IFZ in Zahlen	20
Publikationen	21
Diplom- und Studienarbeiten, Lehrveranstaltungen	22
Organe der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.	23
Aktuelle Partnerfirmen des HSG-IFZ	24
Anfahrtsplan	25

### Universität Stuttgart

Institut für Zeitmeßtechnik, Fein- und Mikrotechnik  
Lehrstuhl Mikro-, Miniatur- und Zeitmeßtechnik  
Breitscheidstr. 2b · 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>



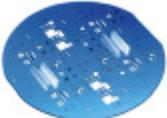
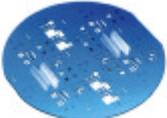
### Hahn-Schickard-Gesellschaft

Institut für Feinwerk- und Zeitmeßtechnik  
Breitscheidstr. 2b · D-70174 Stuttgart  
Telefon: ++49(711)121-3712 · Telefax: ++49(711)121-3705  
E-mail: [hsg-ifz@izfm.uni-stuttgart.de](mailto:hsg-ifz@izfm.uni-stuttgart.de)  
WWW: <http://www.uni-stuttgart.de/hsi>



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

# Organisationsstruktur

	 Lehrstuhl Mikro-, Miniatur- und Zeitmeßtechnik	 HSG  IFZ Hahn-Schickard-Institut für Feinwerk- und Zeitmeßtechnik
Leitung	Prof. Kück	Prof. Kück
Tribologie und Oberflächentechnik	Hr. Schulz	<u>Hr. Scheerer</u> Hr. Bader Fr. Gehrlach
Miniatur- und Zeitmeßtechnik		<u>Hr. Seifert</u> Hr. Allgeier Hr. Grabein Hr. Laufer Dr. Schubert Hr. Vogel
Gehäuse- und Verbindungstechnik	Hr. Gerhäuser Fr. Fasterding Fr. Flechtner	<u>Dr. Eberhardt</u> Hr. Frech Hr. Münch Hr. Schilling
Generative Verfahren / Simulation	<u>Prof. Kück</u> Hr. Bärnin Hr. Giousouf Hr. Gmelin Hr. Mohr Dr. Müller Hr. Skibowski	
Mechanische Bearbeitung	Hr. Eylandt Hr. Lechler	
Verwaltungsdienst	Fr. Mohr	Fr. Ihle

# Vorwort

## Sehr geehrte Damen und Herren,

im Mittelpunkt unserer Arbeit im Jahr 1999 stand der Aufbau der Gehäuse- und Verbindungstechnik für Mikrosysteme. Neben der detaillierten Definition der künftigen Arbeitsschwerpunkte konnten wir auch die notwendigen Investitionen an wissenschaftlichem und technischem Gerät planen und mit der Beschaffung beginnen.

Der thematische Schwerpunkt der Gehäuse- und Verbindungstechnik im HSG-IFZ liegt bei miniaturisierten Kunststoffgehäusen mit sowohl integrierten mechanischen und elektrischen Verbindungen, als auch fluidischen oder optischen Elementen, wie beispielsweise Kanälen, Dichtungen und Membranen oder Fenstern und Linsen. Diese Gehäuse eignen sich u. a. hervorragend für den Aufbau von nackten Sensor- und Aktorchips in Kombination mit gehäusten und ungehäusten elektronischen Bauelementen. Bei der Definition der Arbeitsschwerpunkte war es für uns wichtig, unser Know-How in der Gehäuse- und Verbindungstechnik konsequent einzusetzen und auszubauen. Im vergangenen Jahr wurden in insgesamt acht Projektanträgen bzw. in Projektskizzen des HSG-IFZ insbesondere die Themen aufgegriffen, die von unseren Partnern und Auftraggebern aus der Industrie angeregt bzw. nachgefragt wurden. Mit zwei dieser Projekte konnte bereits begonnen werden, und für drei weitere Projekte ist die Bewilligung schon in Sicht. Mit zwei Projektanträgen des IZFM wurde die Förderung grundlegender Fragestellungen zur Mikro- und Miniaturtechnik beantragt. Erfolgreich abgeschlossen wurde ein vom Land

Baden-Württemberg gefördertes Verbundvorhaben zum Mehrkomponenten-Spritzgießen für die Mikrosystemtechnik. In einem eigenfinanzierten Projekt konnten wichtige Verfahrensentwicklungen für die selektive außenstromlose chemische Metallisierung von Thermoplasten durchgeführt werden.

Um unsere Partner und Auftraggeber mit ganzheitlichen Systemlösungen unterstützen zu können, zielen wir im HSG-IFZ auf eine durchgängige Bearbeitung aller für Entwicklung, Fertigung und Verarbeitung der miniaturisierten Kunststoffgehäuse relevanten Fragestellungen. Dazu gehören die Auslegung, Modellierung und Konstruktion der Gehäuse genauso selbstverständlich wie die Herstellung der Spritzgießwerkzeuge, das Spritzen der Kunststoffrohlinge, die selektive Metallisierung der Spritzlinge, die Bestückung der Gehäuse mit nackten Chips oder SMD-Bauelementen, die Verkapselung sowie der abschließende Funktionstest und die Zuverlässigkeitsprüfung der aufgebauten Mikrosysteme. Daher achten wir bei unseren Investitionen darauf, für diese innovative Technologie im HSG-IFZ alle notwendigen Verfahrensschritte zur Herstellung von Demonstratoren und Prototypen bereitzustellen.

Mit dieser Ausstattung und dem entsprechenden Know-how sind wir dann darüber hinaus auch in der Lage, Aufgaben auf dem Gebiet anderer Kunststoffminiaturbauteile anzugehen, und bieten unseren Partnerfirmen auch hierzu unsere Unterstützung für ihre Problemlösung an.

In unseren beiden traditionellen Arbeitsgruppen haben wir in 1999 u. a. Fragestellungen der Haftfestigkeit von Kontakten im Miniaturbereich, der Tribologie von Gleitlacken und der Spannungsrisssbeständigkeit von Thermoplasten bearbeitet. Zur Zeit werden hier u. a. Projekte zu Mikrokontakten und zur Plasmabehandlung von tribologisch beanspruchten O-Ringen durchgeführt.

Die Entwicklung der Erlöse im HSG-IFZ stellt sich ebenfalls positiv dar. Zwar konnten die vorgesehenen Einnahmen aus öffentlich geförderten Projekten auch aufgrund der Situation bei den Zuwendungsgebern nicht ganz erreicht werden. Dafür konnten wir jedoch die geplanten Industrieerlöse um gut 65 % übertreffen. Mit der Gewinnung von drei neuen Mitarbeitern verläuft der personelle Aufbau der neuen Arbeitsgebiete auch planmäßig.

In unserem Bericht für 1999 schauen wir auf ein erfolgreiches Jahr zurück, in dem wir unsere Kompetenzen ausbauen konnten, um Sie bei Ihren künftigen Problemstellungen mit Lösungen zu unterstützen. Wir würden uns sehr freuen, wenn Sie auch künftig rege davon Gebrauch machen würden.

Ihr



Heinz Kück

# Miniatormotoren

R. Mohr

## Einleitung

Motoren in der Energietechnik müssen große mechanische Leistungen abgeben können, bei möglichst hohem Wirkungsgrad.

Bei Miniatormotoren interessiert neben Baugröße und Preis besonders das dynamische Verhalten. Miniatormotoren haben oft Sonderbauformen. Sie werden entsprechend der gewünschten Antriebsaufgabe sozusagen maßgeschneidert bzw. optimiert.

Der Entwurf, d.h. die Auslegung der Geometrie im Hinblick auf den geforderten Bauraum und den magnetischen Kreis, sowie die Optimierung, d.h. die Anpassung des Motors an den Antrieb, sind die beiden Hauptaufgaben bei der Entwicklung von Miniatormotoren.

## Entwurf

Für den Entwurf sollten Angaben zum Bauraum, zur elektrischen Energiequelle, sowie Werte für das Lastmoment und das Lastprofil vorhanden sein. Diese Daten sind für die grobe Abschätzung der Motordimensionen, der Motorart und des gesamten Antriebssystems wichtig.

Betrachtet werden hier nur elektromagneto-mechanische Wandler mit einer Zwischenspeicherung der Energie im Magnetfeld. Miniatormotoren haben grundsätzlich einen Permanentmagneten im magnetischen Kreis. Nur diese haben so hohe Energiedichten, um ein ausreichendes Drehmoment zu erhalten.

Miniatormotoren sind vom Motorprinzip entweder Gleichstrom- oder Schrittmotoren. Als Gleichstrommotoren sind sie kontinuierlich dre-

hend und sollten möglichst geringe magnetische Haltemomente aufweisen, um ein winkelunabhängiges Drehmoment zu bekommen. Beim Schrittmotor dagegen sind Haltemomente oft erwünscht, um z.B. im unbestromten Zustand eine Last halten zu können. Der Schrittmotor eignet sich als direkte Schnittstelle zur Digitaltechnik gut für Positionieraufgaben, wenn keine zu hohen Ansprüche an die Dynamik gestellt werden.

Miniatormotoren arbeiten bei niedrigen Gleichspannungen (1,5...48 V) und Leistungen von 1  $\mu$ W bis 20 W. Das Drehmoment für Miniatormotoren reicht von 1  $\mu$ Nm bis 20 mNm.

Das Drehmoment  $M$  des Gleichstrommotors ist proportional dem Ankerstrom  $i_A$  und dem magnetischen Fluss  $F$  ( $M = k \cdot F \cdot i_A$ ). Im Faktor  $k$  sind die Polpaarzahl  $p$  des Permanentmagneten, die Leiterzahl  $z$  der Wicklung und die Zahl  $2a$  der parallel geschalteten Wicklungszweige enthalten ( $k = p z / 2 p$ ). Durch eine Erhöhung des Stromes kann somit das Drehmoment vergrößert werden. Die Begrenzung liegt in der maximal zulässigen Stromdichte der Wicklung.

Beim Schrittmotor ergibt sich das Drehmoment  $M$  als Produkt aus dem Massenträgheitsmoment  $J$  und der Winkelbeschleunigung  $d\omega / dt$  ( $M = J \cdot d\omega / dt$ ). Da die Massenträgheitsmomente  $J$  sehr klein sind ( $10^{-9} \dots 10^{-8} \text{ kg m}^2$ ), muß mit hoher Winkelbeschleunigung gearbeitet werden, um ein großes Drehmoment  $M$  zu erreichen. Der Schrittmotor wird durch Spannungsimpulse angesteuert.

Der Schrittmotor ist ein schwingfähiges Feder-Masse-System. Durch die Beschleunigung des Rotorträg-

heitsmoments entsteht das Drehmoment. Besonders bei kleinen Schrittmotoren mit niedrigen Schrittfrequenzen entstehen bei jedem Schritt zusätzliche Verluste in der Wicklungsinduktivität  $L$  als Folge des Schaltvorgangs. Die Reibungsverhältnisse sind sehr kompliziert, was bei einfachen Miniaturschrittmotoren, wie z.B. beim Lavetmotor für Uhren und Anzeigeeinstrumente zu Problemen führt und den Wirkungsgrad deutlich verschlechtert.

Diese reichen bei Miniatormotoren von unter 10 % bei den einfachsten Schrittmotoren bis 90 % und höher bei elektronisch kommutierten Servomotoren.

Entscheidend ist jedoch nicht die absolute Größe der Parameter, sondern die zeitliche Abhängigkeit. Dreh- und Lastmomente und der Strombedarf ändern sich oft erheblich. Dies unterstreicht die Aussage, dass der gesamte Antrieb betrachtet werden muß und der gewünschte Bewegungsverlauf die entscheidende Fragestellung ist.

Der Entwurfsgang für Miniatormotoren unterscheidet sich prinzipiell nicht von dem allgemein für Motoren bekannten. Der Unterschied liegt in der Modellierung. Bei Miniatormotoren müssen die Verluste, wie z.B. Reibung, Streuung, Erwärmung usw. unbedingt berücksichtigt werden, da sie in die gleiche Größenordnung wie die Nutzgrößen kommen oder sogar überwiegen. Die Berücksichtigung von Verlusten führt zu komplexen Modellen und ergibt eine aufwendige Berechnung. Diese ist bei Miniatormotoren nicht mit genügender Genauigkeit von Hand durchführbar und konnte wegen fehlender Rechnerleistung lange Zeit überhaupt nicht durchgeführt werden.

Die meisten Verluste können nicht analytisch berechnet werden, so gibt es z.B. für die dynamische Reibung in Gleitlagern oder für die Eisenverluste in Miniaturmotoren keine geeigneten Berechnungsformeln.

Zum Entwurf von Miniaturmotoren stehen am Institut leistungsfähige Werkzeuge zur Verfügung:

Das 2D / 3D-Finite-Elemente Programm FLUX™ von CEDRAT Recherche und das Simulationssystem SIMPLORER™ der Firma SIMEC, das die elektrische und regelungstechnische Beschreibung des Antriebs erlaubt.

Das Feldberechnungsprogramm bestimmt aus der Geometrie und den Materialdaten die Größen Magnetfeld, Permeabilität, Verlauf der Magnetfeldlinien usw. (Bild 1).

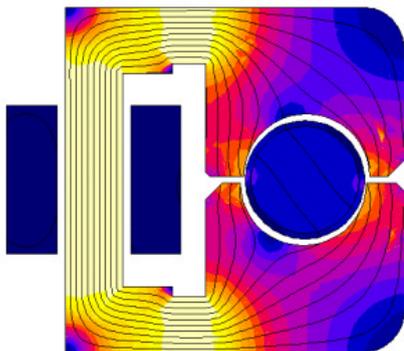


Bild 1: Feldlinienbild und magnetische Induktion als Ergebnis der Finite Elemente Analyse mit FLUX

Die elektrische Ersatzschaltung des Motors ist die Reihenschaltung eines Widerstands  $R$ , einer Spule  $L$  und der induzierten Spannung  $U_i$  (Bild 2).

Mit der Kopplung von FLUX und SIMPLORER stehen alle Systemgrößen zur Verfügung und es lassen sich die interessanten Para-

meter, z.B. die Winkelbewegung, Stromverlauf und induzierte Spannung bestimmen (Bild 3).

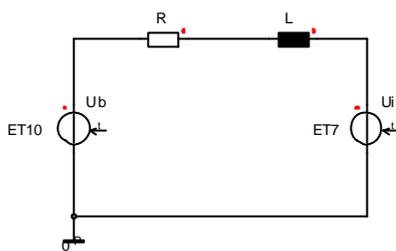


Bild 2: Elektrische Ersatzschaltung des Motors in SIMPLORER

Für die Optimierung sammelt das Programm Daten aus mehreren Simulationsläufen und bestimmt ein Optimum der eingegebenen Größen mit Hilfe einer Zielfunktion. Diese gewinnt man aus einer Wichtung der Systemparameter und der Aufstellung eines sogenannten Gütekriteriums.

SIMPLORER hat mehrere Algorithmen zur Optimumsuche vorgesehen: Monte-Carlo-Verfahren, Gauß-Seidel-Strategie und sogenannte genetische Algorithmen, bei denen,

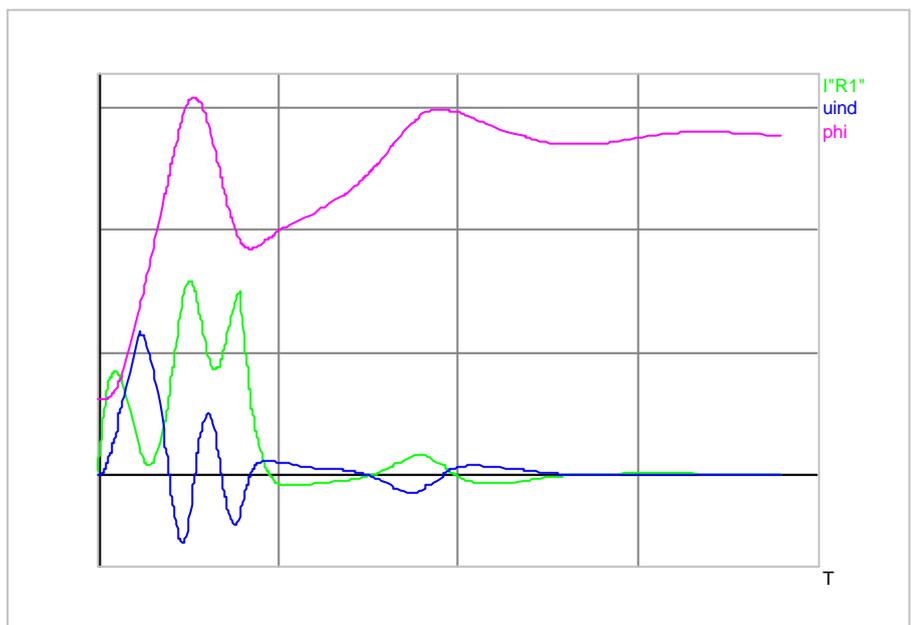


Bild 3: Winkel, Strom und induzierte Spannung als Ergebnis der dynamischen Simulation und Kopplung von FLUX und SIMPLORER

### Systemtest und Optimierung

Wenn der Entwurf beendet ist, muß das Zusammenwirken der Einzelkomponenten getestet und optimiert werden. SIMPLORER™ erlaubt die Zustandsbeschreibung und die Optimierung des Systems. Mit Hilfe dieser dynamischen Simulation können alle wichtigen Parameter überwacht und das Gesamtsystem beobachtet werden.

ähnlich wie in der Natur, mit einer Auslese einer "Generation von Ergebnissen" weiter gearbeitet wird.

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

# Temperaturstabilität von Stimmgabelresonatoren aus Silizium

M. Giousouf

In der Uhrentechnik werden Quarz-Stimmgabelschwinger als Frequenznormale für die Zeitmessung eingesetzt. Von Vorteil ist dabei, dass sich bei einer Temperaturänderung die Resonanzfrequenz des Quarzes weit unterhalb von  $1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}^2$  ändert, was zur guten Langzeitstabilität eines Quarzoszillators beiträgt. Möchte man den Quarz als frequenzbestimmendes Bauteil in einem Oszillator durch einen monolithisch integrierbaren Siliziumresonator ersetzen, so darf die Temperaturabhängigkeit des Siliziumoszillator-Systems nicht wesentlich schlechter als die des Quarzes sein. Hierbei ist es bei einem monolithisch integrierten Siliziumresonator von Vorteil, dass ein Temperatursensor ebenfalls zusammen mit der elektronischen Signalverarbeitung zur Frequenzbestimmung mit auf einen Chip aufgebaut werden kann. Aus bisherigen Untersuchungen an Siliziumschwingern kennt man die Temperaturabhängigkeit, die je nach Resonatordesign zwischen 10 und  $80 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  liegt. Allerdings gibt es bisweilen keine Temperaturuntersuchungen an Siliziumschwingern, die durch anisotrop naßchemisches Ätzen von (110)-orientierten Siliziumwafern hergestellt worden sind. Diese Schwingertypen, deren Herstellungsprozeß im Jahresbericht 1998 vorgestellt wurde, werden im IZFM gefertigt und untersucht.

## Ursache für die Temperaturabhängigkeit

Die Änderung der Resonanzfrequenz eines Siliziumresonators infolge einer Änderung der Temperatur läßt sich hauptsächlich auf zwei verschiedene Ursachen zurückführen. Eine Ursache beruht auf

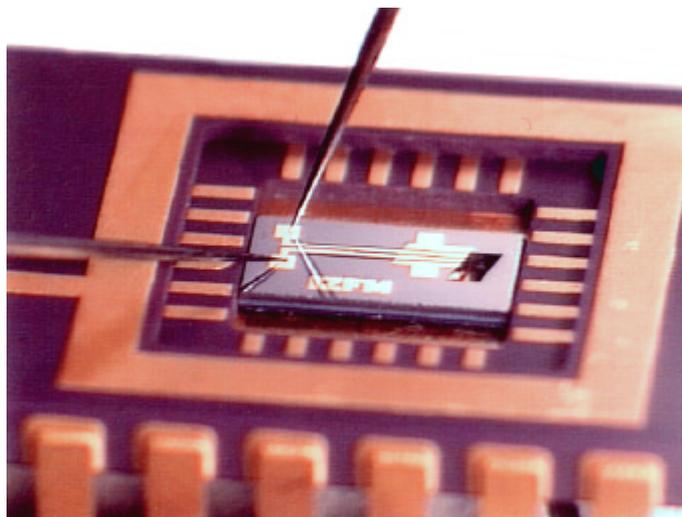


Bild 1: Im IZFM hergestellter und untersuchter Silizium-Stimmgabelresonator

der Änderung der linearen Dimensionen des Resonators aufgrund des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Silizium. Die zweite Ursache beruht auf der Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls, wobei gerade dieser Effekt den dominierenden Anteil für die Frequenzänderung darstellt. Der Temperaturkoeffizient des Elastizitätsmoduls beträgt für einkristallines Silizium ca.  $50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Für den hier untersuchten Siliziumresonator erwartet man einen Temperaturkoeffizienten für die Resonanzfrequenz von etwa  $30 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ .

## Messung der Temperaturabhängigkeit

Zur Messung der Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz von Silizium-Stimmgabeln wird eine besondere Temperiervorrichtung benötigt. Da der Resonator im Hochvakuum betrieben wird, kann die Wärmeübertragung nur durch Wärmestrahlung oder Wärmeleitung erfolgen aber nicht durch Konvekti-

on. Daher wurde im IZFM eine spezielle Temperiervorrichtung mit einem integrierten Temperatursensor zur Charakterisierung von Siliziumresonator-Chips verwirklicht. Hierbei wird das Keramikgehäuse in dem sich der Chip befindet mittels zweier Peltier-Elemente im Temperaturbereich von  $10 \dots 60^\circ\text{C}$  getempert (Bild 2).

In Bild 3 ist das Meßergebnis für eine temperaturabhängige Messung der Resonanzfrequenz und der Güte für eine Silizium-Stimmgabel gezeigt. Man erkennt deutlich den linearen Zusammenhang zwischen Frequenz und Temperatur. Die Frequenzänderung für diesen Resonatortyp beträgt  $0,92 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$  bzw.  $32,7 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Eine dramatische Änderung der Güte konnte über den gemessenen Temperaturmeßbereich nicht festgestellt werden. Der niedrige Gütewert ist durch das asymmetrische Stimmgabeldesign bedingt. Durch Abgleich der Zinkenmassen läßt sich die Güte um den Faktor von mindestens 10 erhöhen.

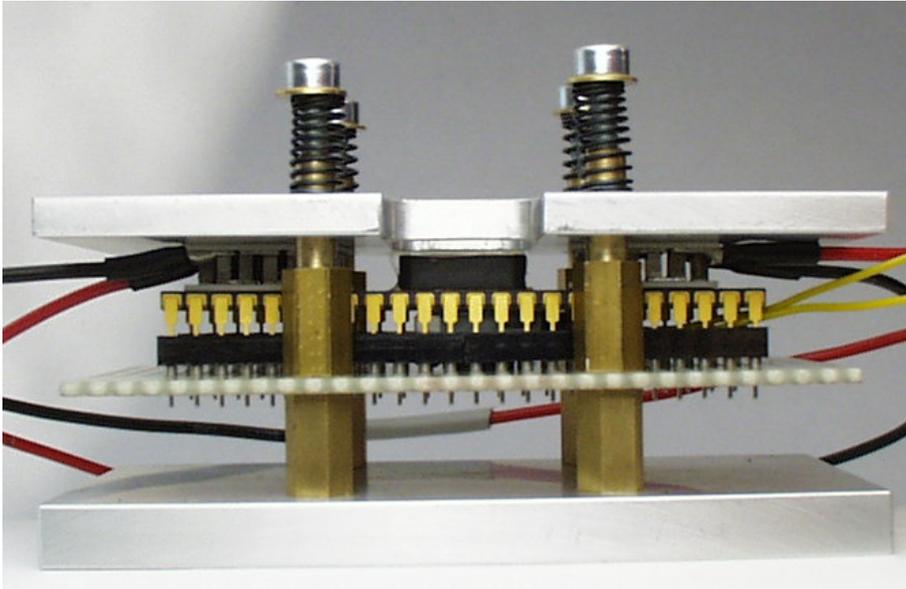


Bild 2: Vorrichtung zur Messung der Temperaturabhängigkeit von Siliziumresonatoren

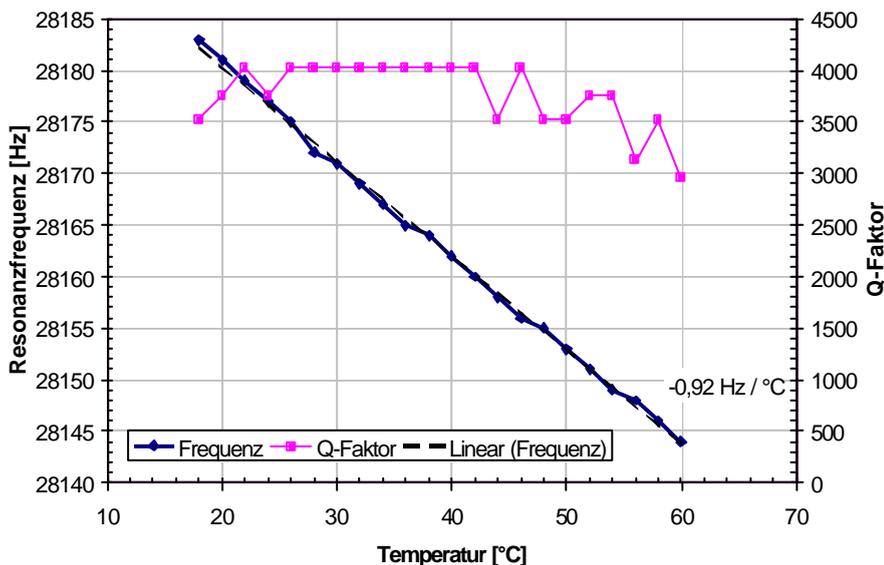


Bild 3: Gemessene Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz und Güte eines Siliziumresonators

## Temperaturkompensation

Da nun die Frequenzänderung als Funktion der Temperatur eine lineare Charakteristik aufweist, kann sie im Gegensatz zum Quarz, wo sie parabelförmig ist, durch Frequenzmessung an zwei Referenztemperaturen bestimmt werden. Alle anderen Frequenzwerte können dann aus der Messung der Temperatur ermittelt werden. Das bedeutet nun, je genauer man die Temperatur messen kann, umso genauer lässt sich die Frequenz bestimmen, und umso höher wird letztlich die Ganggenauigkeit der Uhr. Kann man beispielsweise mittels eines im Siliziumchip integrierten Temperatursensors die Chiptemperatur mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  messen, so beträgt die Frequenzabweichung des Resonators nach Korrektur  $3,27 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Das entspricht einer Ganggenauigkeit der Uhr von 0,3 s/Tag oder 100 s/Jahr. Bei Erhöhung der Temperaturmessgenauigkeit wird die Ganggenauigkeit entsprechend miterhöht. Damit könnte es möglich sein die Ganggenauigkeit einer einfachen Quarzuhr zu erreichen.

---

Kontaktperson:  
 Dipl.-Phys. Metin Giousouf  
 Tel. ++49 (711)121-3723  
 E-mail metin.giousouf@izfm.uni-stuttgart.de

---

# Verfahren zur zerstörungsfreien Haftfestigkeitsuntersuchung bei Miniaturverbindungen

T. Laufer

## Motivation

Für die Untersuchung von Miniaturverbindungen existiert derzeit kein zerstörungsfreies Prüfverfahren, das die Haftfestigkeit von Verbindungsflächen in einer Größenordnung von kleiner  $1 \text{ mm}^2$  quantitativ bestimmt. Die vorhandenen Prüfverfahren sind entweder zerstörend oder lassen sich nicht auf die hier geforderten Abmessungen herunterskalieren. Die meisten zerstörungsfreien Verfahren beruhen darauf, Inhomogenitäten (Mikrorisse, Einschlüsse, Luftblasen, Lunker, etc.) in der Verbindungszone zu detektieren, die die Haftfestigkeit der Verbindung reduzieren. Durch die begrenzte laterale Auflösung der gegenwärtigen zerstörungsfreien Verfahren wird die minimale Größe der zu detektierenden Inhomogenitäten begrenzt. Ein weiteres Problem ist die Signalein- und -auskopplung.

## Lösungsmöglichkeiten

Ein hierfür geeignetes Prüfverfahren muß die zu untersuchende Miniaturverbindung integral bestimmen, d.h., die Größe der die Verbindung schwächenden Inhomogenitäten wird dadurch unbedeutend. In diesem Vorhaben wird zunächst ein Prüfverfahren untersucht, das aus dem Übertragungsverhalten bzw. der Schwingungscharakteristik einer Miniaturverbindung eine quantitative Bewertung der Haftfestigkeit ihrer beiden Verbindungspartner liefert. Diese Verbindungspartner werden hierzu als mechanische Schwinger betrachtet, deren Schwingungsmoden zum einen durch ihre elastischen Eigenschaften und zum anderen durch die Festigkeit ihrer Verbindungszone bestimmt wird. Für die Untersuchung eines solchen Prüfverfahrens benötigt man Mi-

niaturverbindungen bekannter Haftfestigkeit bzw. Haftfestigkeitsabstufungen. Beide Verbindungspartner müssen eine "einfache" Signalein- und -auskopplung ermöglichen.

## Meßaufbau

Als Untersuchungsobjekte dienen punktgeschweißte Modellverbindungen (vergl. Bild 1).

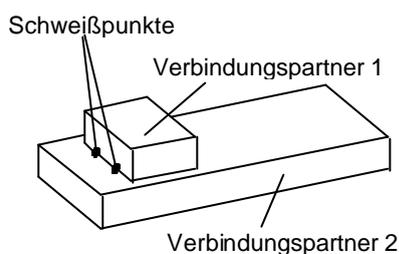


Bild 1: Modellverbindung mit Schweißpunkten

Durch die Variation der Anzahl der Schweißpunkte erhält man Modellverbindungen definierter Haftfestigkeit. Mit Hilfe eines piezomechanischen Schwingers (Aktor) wird Verbindungspartner 1 in mechanische Schwingungen versetzt. Ein zweiter piezomechanischer Schwinger gleicher Bauart (Sensor) nimmt die Schwingungen des Verbindungspartners 2 auf. Der Kraftfluss geht vom Aktor über den Verbindungspartner 1, die Verbindungszone und den Verbindungspartner 2 auf den Sensor über.

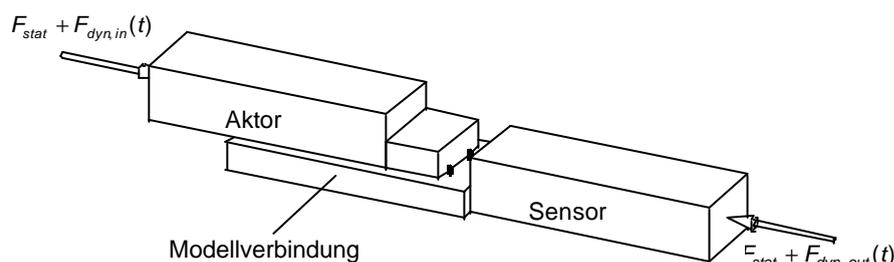


Bild 2: Anordnung von Aktor, Sensor und Modellverbindung

Zur besseren Signalein- und -auskopplung wird die gesamte Anordnung mit einer definierten Kraft  $F_{stat}$  vorgespannt. Der Aktor wird über ein elektrisches Signal unterschiedlicher Signalform, Amplitude und Frequenz in mechanische Schwingungen versetzt ( $F_{dyn}(t)$ ). Ein Spektrum-Analysator zerlegt das am Sensor ankommende Signal in die darin enthaltenen Frequenzen. Dieses Frequenzspektrum soll für die Bestimmung der Haftfestigkeit dienen.

## Messungen

Die Modellverbindung wird mit einer Frequenz bis 550 kHz in mechanische Schwingungen versetzt. Die Resonanzfrequenz der Piezostapelaktoren liegt bei 240 kHz. Zu erwarten ist, dass die Anzahl der Schweißpunkte mit der Amplitude bzw. der Frequenz der im Spektrum auftretenden Resonanzfrequenzen korreliert. Verbindungspartner 1 ist an zwei seiner Längsseiten symmetrisch mit jeweils ein bis vier Schweißpunkten mit Verbindungspartner 2 verbunden (Bezeichnung: Modellverbindung 1 1 bis 4 4). Die Darstellung der Amplitude erfolgt in dBm. Für die Beurteilung der Haftfestigkeit ist allein das Schwingverhalten der jeweiligen Modellverbindung ausschlaggebend.

Um die Einflüsse der Piezostapelaktoren zu eliminieren, wird eine Messung ohne Modellverbindung durchgeführt; hierbei liegen die Piezostapelaktoren "Stirn an Stirn". Subtrahiert man nun dieses Frequenzspektrum vom Spektrum der Messung mit Modellverbindung, so werden die Resonanzfrequenzen der Modellverbindung nicht mehr durch das Schwingverhalten der Piezostapelaktoren überdeckt. Die theoretische Verifikation der Messungen erfolgt mit Hilfe von FE-Simulationen. In Modalanalysen wird das Schwingverhalten (Resonanzfrequenz und Schwingungsform) der Modellverbindungen bestimmt. Bild 3 zeigt das Frequenzspektrum der Modellverbindung 4 4; die gestrichelten, senkrecht verlaufenden Linien stellen die aus den FE-Analysen gewonnenen Resonanzfrequenzen dar. Unterhalb einer Frequenz von 350 kHz zeigen die Messungen Maxima in der Nähe der berechneten Moden.

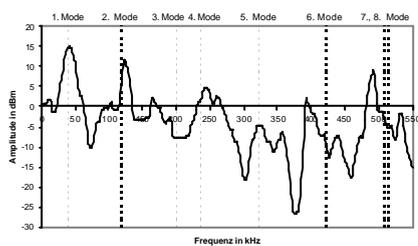


Bild 3: Frequenzspektrum der Modellverbindung 4 4

In Bild 4 sind die Frequenzspektren der Modellverbindungen 1 1 bis 4 4 dargestellt. Die Scherfestigkeit der Modellverbindung 4 4 ist etwa dreimal so groß wie bei 1 1. In der Praxis will man jedoch weitaus kleinere Haftfestigkeitsunterschiede auflösen.

Aus den Messungen und weiteren umfangreichen Untersuchungen lassen sich Tendenzen einer Kor-

relation der Haftfestigkeit mit dem Übertragungsverhalten erkennen. Der Meßeffect ist aber so gering, dass insbesondere im Zusammenhang der Reproduzierbarkeit das Verfahren in dieser Form nicht für eine sichere industrielle Gut-Schlecht-Selektion geeignet ist.

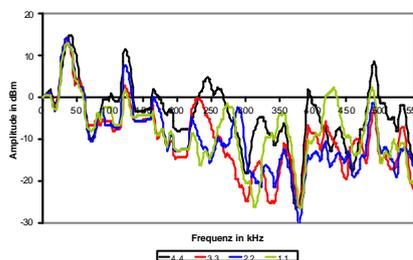


Bild 4: Frequenzspektrum der Modellverbindungen 1 1 bis 4 4

### Vier-Leiter-Widerstandsmessung

Die 4-Leiter-Widerstandsmessung stellt trotz der extrem niedrigen Widerstände ein Verfahren guter Signifikanz dar. Wie in Bild 5 dargestellt wird zwischen Verbindungspartner 1 und 2 ein Strom eingepreßt (1 A) und der Spannungsabfall zwischen diesen beiden Verbindungspartnern hochohmig gemessen.

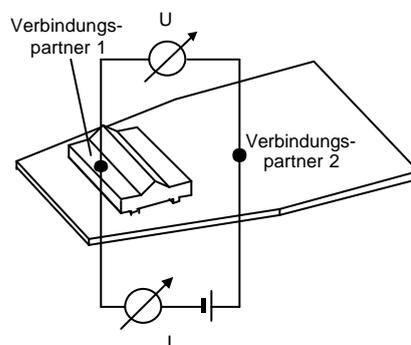


Bild 5: Meßanordnung

Dieser Spannungsabfall ist abhängig vom Übergangswiderstand der Verbindungszone und stellt somit ein Maß für die Haftfestigkeit beider

Verbindungspartner dar. Belastet man den Verbindungspartner 1 zusätzlich normal zur Verbindungsfläche, so ändert sich der Spannungsabfall insbesondere bei schlechten Verbindungen mit der aufgetragenen Last. Diese lastabhängige Spannungsdifferenz  $\Delta U$  ist ebenfalls wie die absolute Spannung im unbelasteten Zustand ein quantitatives Maß für die Güte der Verbindung. Bild 6 zeigt Messungen von jeweils 10 Verbindungen mit guter und schlechter Haftfestigkeit. Für jede Verbindung ist die Spannung  $U$  gegen die Spannungsänderung  $\Delta U$  aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die guten Verbindungen eine geringere Spannungsänderung zeigen. Sie befinden sich in einem engen Cluster bei kleinem  $\Delta U$  und einer mittleren absoluten Spannung  $U$  von 960  $\mu\text{V}$ .

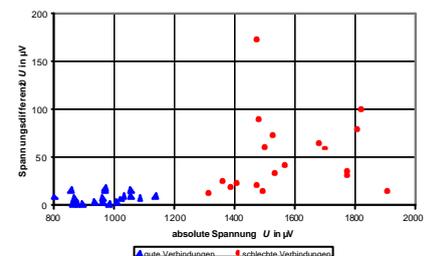


Bild 6: 4-Leiter-Messungen

Dieses Forschungsvorhaben (AiF-FV-Nr.: 11686 N) wird aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert. Der vollständige Abschlußbericht ist erhältlich über:

Kontaktperson:  
 Ing. grad. Hansjörg Seifert  
 Tel. ++49(711)121-3716  
 E-mail hansjoerg.seifert@izfm.uni-stuttgart.de

# Beständigkeitsprüfung von Polymerwerkstoffen

W. Scheerer

Spannungsrißbildung tritt in thermoelastischen Bauteilen auf, wenn durch äußere Kräfte innere und/oder äußere Spannungen hinzukommen. Dies kann auch bei Belastungen weit unter der Bruchgrenze durch Rißbildung zu einem spontanen Bruch des Werkstücks führen.

Kommen Polymerwerkstoffe mit Schmierstoffen in Berührung, kann dies Quellung, Gelierung und Zersetzung des Polymerwerkstoffs verursachen. Schmiermedien sind in der Regel sehr komplex aufgebaut und bestehen im allgemeinen aus Grundöl, Additiven, Verdicker und evtl. noch einem Festschmierstoffanteil. Jede einzelne Komponente kann mit dem Basiswerkstoff Wechselwirkungen eingehen, welche das Gesamtverhalten des Kunststoffes verändern. Ebenso können Kunststoffadditive bzw. -füllstoffe das Verhalten weiter beeinflussen.

Die Verträglichkeit der Kunststoffe mit Schmiermedien wird sehr häufig durch statische Dehnungsversuche untersucht. Die meisten Anwendungsfälle in der Praxis beinhalten jedoch die mechanisch-dynamische und/oder eine tribologische Beanspruchung des polymeren Bauteils. Mit dem am Institut vorhandenen Prüfgerät können Zugstäbe statisch oder mechanisch-dynamisch geprüft werden. Dadurch sind Aussagen über das Werkstoffverhalten bei einem dynamischen Belastungskollektiv möglich. In Bild 1 ist der Aufbau dargestellt.

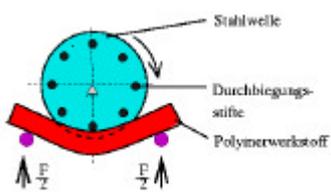


Bild 1: Prinzipskizze

Ein genormter Zugstab wird mit einer definierten variabel einstellbaren Kraft gegen eine Welle mit Durchbiegestiften gedrückt. Da die Welle sich dreht, wird der Stab oszillierend nach unten gedrückt und durchgebogen. Diese Durchbiegung wird in Abhängigkeit von der Versuchsdauer dokumentiert. Die Drehgeschwindigkeit der Stahlwelle ist 15 Umdrehungen/Minute.

Der Zugstab kann mit Hilfe dieses Prüfgeräts in Abhängigkeit vom Werkstoff, der Normalkraft, der Schmiermedien und der Versuchstemperatur geprüft werden. Für die hier vorgestellten Untersuchungsergebnisse sind Zugstäbe nach DIN 59455 Nr.3 aus Polyoxymethylen-, Polyamid 66- und Polycarbonatwerkstoffen eingesetzt worden (siehe Tabelle 1).

Nummer	Kunststoff
1	Hostaform C2521 (POM)
2	Delrin 100 (POM)
3	Zytel E101 (PA66)
4	Schulamid 66MV2 (PA66)
5	Lexan 161 (PC)
6	Ultem 1000 (PEI)

Tabelle 1: Probenbezeichnung

Die Werkstoffe unterscheiden sich u. a. auch in ihrem Kristallinitätsgrad. Der Werkstoff Polyoxymethylen (POM) weist nach Herstellerangaben einen teilkristallinen Anteil von 75 bis 80 % auf, hingegen hat Polyamid 66 (PA 66) einen geringeren kristallinen Anteil, der im Bereich von 35 - 40 % liegt. Polycarbonat (PC) bzw. Polyetherimid (PEI) sind amorph.

## Dehnungsverhalten der Stäbe

Es wurden die Prüfstäbe bei Temperaturen von 23°C und 90°C ohne zusätzliche Fettschmierung geprüft sowie bei 90°C mit Fettschmierung. Die Versuche wurden nach 100

Stunden bzw. nach starker Deformation beendet.

Bild 2 zeigt die Untersuchungsergebnisse der verschiedenen Werkstoffe bei einer Temperatur von 20°C. Bis zu einer Beanspruchungsdauer von 1 Stunde liegen die Dehnungswerte aller Zugstäbe sehr eng zusammen. In diesem Versuchszeitraum lassen sich keine Unterschiede des Werkstoffsver-

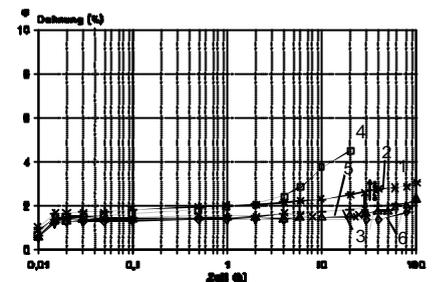


Bild 2: Zeitdehnlinien verschiedener Zugstäbe bei Raumtemperatur und 20 N/mm<sup>2</sup>

haltens erkennen. Werden die Zugstäbe weiter beansprucht, verbleiben die amorphen Stäbe bis kurz vor dem Stabbruch auf ihrem Dehnungsniveau. Die höher kristallinen Werkstoffe nehmen bei einer weiteren Beanspruchung langsam größere Dehnungswerte an. Unter diesem Belastungskollektiv gehen keine Zugstäbe zu Bruch. Es ist allerdings der Versuch mit Schulamid 66MV2 wegen zu großer Durchbiegung abgebrochen worden.

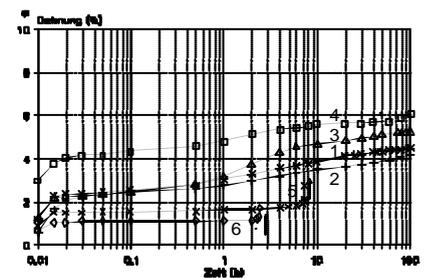


Bild 3: Zeitdehnlinien verschiedener Zugstäbe bei einer Versuchstemperatur von 90°C und 20 N/mm<sup>2</sup>

Wird die Versuchstemperatur auf 90°C erhöht, so verhalten sich die verschiedenen Werkstoffe unter diesem Belastungskollektiv deutlich unterschiedlich. In Bild 3 sind die entsprechenden Dehnungswerte in Abhängigkeit von der Versuchsdauer dargestellt.

Unter diesen Versuchsbedingungen brechen die beiden amorphen Zugstäbe nach etwa 2 bzw. 8 Stunden. Die beiden amorphen Werkstoffstäbe erhöhen jedoch erst kurz bevor sie brechen ihre Dehnungswerte, d. h. sie orientieren sich unter dieser Belastung nur in einem sehr geringen Maße. Es ist anzunehmen, dass die amorphe Molekülorientierung während der oszillierenden Belastung keine Vorzugsrichtung einnehmen kann. Brechen einzelne chemische Vernetzungspunkte im Werkstoffverbund auf, breitet sich dieser Prozeß lawinenartig aus und der Stab bricht.

Die Zugstäbe aus den POM-Werkstoffen weisen über einen längeren Zeitraum eine geringe Zunahme der Dehnungswerte auf, ähnlich wie die PA66-Werkstoffstäbe. Bedingt durch die kristalline Struktur orientieren sich die Moleküle und der Zugstab wird irreversibel deformiert.

In Bild 4 sind die Dehnungswerte der jeweiligen Zugstäbe für eine Versuchstemperatur von 90°C und zusätzlicher Fettschmierung zusammengefaßt. Als Schmiermedium ist ein naphthenbasisches Mineralfett ( $v=32$  mm/s) eingesetzt worden, welches hauptsächlich für Gleit- und Wälzlager Anwendung findet. Auch bei dieser hohen Versuchstemperatur bleiben die amorphen Zugstäbe in ihrem Dehnungsverhalten relativ konstant auf ihrem Niveau. Allerdings verkürzt sich ihre Lebensdauer etwas.

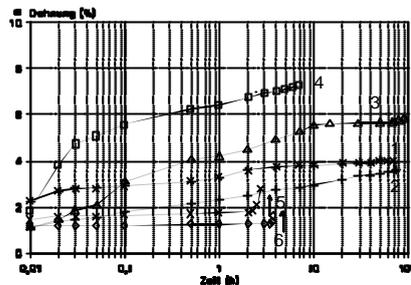


Bild 4: Zeitdehnlinien verschiedener geschmierter Zugstäbe bei einer Versuchstemperatur von 90°C und 20 N/mm<sup>2</sup>

### Ergebnisse

Werden die Ergebnisse für die drei unterschiedlichen Versuchstemperaturen für die technisch trockenen Untersuchungen verglichen, nehmen die Dehnungswerte der jeweiligen Zugstäbe erst bei einer Versuchstemperatur von 90°C größere Werte an. Dieses Verhalten läßt sich mit dem unterschiedlichen Temperaturverhalten der mechanischen Werkstoffeigenschaften erklären. In der Literatur finden sich Angaben über die Temperaturabhängigkeit des Schubmoduls. Für die amorphen Werkstoffe tritt dabei die geringste Änderung des Schubmoduls in Abhängigkeit von der Versuchstemperatur auf. Die Werkstoffe mit dem geringeren kristallinen Anteil nehmen für höhere Temperaturen einen geringeren Schubmodul an. Für ungeschmierte Prüfkörper können für Vorhersagen des Werkstoffverhaltens z. T. Angaben aus der Literatur herangezogen werden. Bei zusätzlicher Schmierung müssen jedoch weitere Einflussgrößen berücksichtigt werden, die eine Vorhersage des Verhaltens äußerst schwierig machen. Für die PA66-Materialien und einen Vertreter der POM-Gruppe erhöhen sich die Dehnungswerte im Vergleich zu den ungeschmierten Versuchen schon nach kurzer Bean-

spruchung. Ursache sind vermutlich synergetische Wechselwirkungen zwischen Fett und Kunststoff, die die chemischen und physikalischen Bindungen in der Werkstoffmatrix schwächen. Dies ist ein interessanter Aspekt, da der POM-Werkstoff als sehr resistent gegenüber Schmiermedien angesehen wird.

In Bild 5 ist ein Zugstabbereich dargestellt, welcher die größte Belastung erfahren hat und in dem deutlich die Spannungsrisse zu erkennen sind.

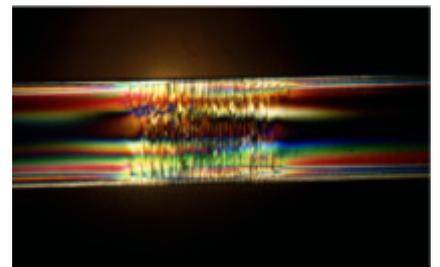


Bild 5: Zugstabmitte aus Lexan 161 nach einer Beanspruchungsdauer von 8 Stunden bei einer Pressung von 20 N/mm<sup>2</sup>

Anhand der Rissbildung steht der Zugstab kurz vor dem Stabbruch. Deutlich kann man die durch die Beanspruchung hervorgerufenen Spannungsrisse erkennen, die sich beginnend vom Stabrand ins Bauteilinnere ausbreiten.

Diese Arbeiten sind im Rahmen des Arbeitskreises "Kunststoffe" am HSG-IFZ durchgeführt worden, der sich hauptsächlich mit Kunststoffen und ihrer Verträglichkeit mit verschiedenen Schmiermedien befaßt. Der Arbeitskreis wird über die Beiträge der Mitgliedsfirmen finanziert.

Kontaktperson:

Dipl.-Phys. Werner Scheerer

Tel. ++49(711)121-3179

E-mail werner.scheerer@izfm.uni-stuttgart.de

# Mechanische Eigenschaften und Verschleißverhalten von Harzsystemen

W. Scheerer

Es gibt verschiedene Möglichkeiten tribologische Beschichtungen an Gleitkörpern aufzubringen. Zum einen können Körper durch galvanische Beschichtung oder PVD und CVD-Verfahren in ihrem tribologischen Verhalten optimiert werden. Diese Verfahren sind jedoch aufwendig und damit teuer. Relativ geringe Kosten fallen bei einer Beschichtung mit Gleitlack an. Die verwendeten Lacksysteme sind aus verschiedenen Komponenten aufgebaut. Die verschiedenen Gleitlackbestandteile liegen anteilmäßig für die Festschmierstoffe bei 3-12%, für Binder bei 10-25%, für Lösemittel bei 40-80% und für weitere Additive bei 3-20%. Als Festschmierstoffe werden häufig PTFE-, MoS<sub>2</sub>- und Graphit-Partikel eingesetzt. Die Auswahlkriterien für den Einsatz der jeweiligen Festschmierstoffe sind in erster Linie ihre Schmierwirkung bei verschiedenen Pressungen und den gewünschten Gleitpartnern. Darüber hinaus ist die Verträglichkeit mit der Einsatzumgebung und der Umwelt zu beachten. Als Bindersysteme werden verschiedene Harze eingesetzt, deren wichtigsten Eigenschaften in Tabelle 1 zusammengefaßt sind. Neben Standardharzen ist auch ein wasserlösliches Polyesterharz (WL-PU) untersucht worden. Aus Gründen des Umweltschutzes gewinnen diese Bindersysteme immer stärker an Bedeutung.

Im Rahmen des Arbeitskreises "Gleitlacke" sind zahlreiche Reibungs- und Verschleißuntersuchungen

an verschiedenen Gleitlackssystemen durchgeführt worden. Aus diesen Untersuchungsergebnissen läßt sich nicht nur der Einfluss des beigefügten Festschmierstoffs, sondern auch der des verwendeten Bindersystems ableiten. Um den Einfluss der Bindersysteme auf das Reibungs- und Verschleißverhalten genauer bestimmen zu können, sind Versuche an Harzsystemen ohne Festschmierstoffanteil durchgeführt worden. Dazu wurden verschiedene Bindersysteme auf Stahlplatten aufgebracht und mit dem unten beschriebenen Prüfprinzip tribologisch untersucht.

## Versuchsdurchführung

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

Als Prüfkörper dient eine Kugel aus dem Werkstoff 100Cr6 mit einem Durchmesser von 12,7 mm (1/2"), die auf eine relativ zu ihr bewegten Platte (USt.37-2) 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 oszilliert die Platte mit einer Frequenz von etwa 1 Hz. Als Pres-

sungsstufe lag die maximale Hertzsche Pressung  $p_{max} = 780 \text{ N/mm}^2$  zu Versuchsbeginn vor.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungsreihen sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Der Platten- und der Kugelverschleiß sind mit  $V_{Platte}$  bzw. mit  $V_{Kugel}$  abgekürzt.

## Verschleißuntersuchungen

Vergleicht man die verschiedenen Reibungszahlen nach einer Versuchsdauer von 8 Stunden, lassen sich nur geringe Unterschiede erkennen. Die mittleren Reibungswerte  $f$  liegen für alle Gleitpaarungen zwischen  $f \approx 0,65$  und  $0,76$ .

Harz	f	$V_{Platte}$ [10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> ]	$V_{Kugel}$ [10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> ]
Epoxid	0,73	0,05	-
Phenol	0,65	0,43	-
Epoxid/ Phenol	0,68	0,08	-
Imid/ Amid	0,76	0,02	38,5
Acryl	0,68	0,02	-
PU	0,63	0,14	-
WL-PU	0,62	0,08	-
Silicon	0,69	0,02	5

Tabelle 2: Ergebnisse der tribologischen Untersuchungen

Hingegen zeigen die mittleren Plattenabriebswerte der verschiedenen Gleitpaarungen deutliche Unterschiede. Werden die beiden Harze Epoxid und Phenol gemischt, liegen die Reibungszahlen und die Plattenverschleißwerte im Bereich der beiden einzelnen Harze. Vergleicht man jedoch die beiden Polyesterharze erkennt man, dass die mittlere Reibungszahl der Paarung Stahl/Stahl + WL-PU etwas geringere Werte einnimmt als die Gleitpaarung mit dem Standardpolyesterharz. Dagegen weisen die WL-PU-Probekörper wesentlich größere Plattenabriebswerte auf.

Harz	Chemikalienbeständigkeit	Verschleißfestigkeit	Temperaturbeständigkeit	Massenfertigung
Phenol	gut	sehr gut	ausreichend	geeignet
Epoxid	sehr gut	gering	gut	geeignet
Polyimidharze	sehr gut	sehr gut	sehr gut	ungeeignet
Acrylharze	besonders für Kunststoffe	sehr gut	wenig	
Polyester	gut	ausreichend	gut	

Tabelle 1: Zusammenfassung wichtiger Harzeigenschaften

Bei zwei Gleitpaarungen lassen sich auf den Stahlkugeln Verschleißskatollen dokumentieren. Für die Paarung Stahl/Stahl+Silicon liegt das mittlere Kugelabriebsvolumen bei  $5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$ . Die Kugeln der Paarung Stahl/Stahl +Imid/Amid weisen mit  $38,5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$  ein etwas höheres mittleres Abriebsverhalten auf, obwohl die Harzschicht nicht durchgebrochen ist.

## Ergebnisse

Um diese Ergebnisse eingehender diskutieren zu können, sind mit einem Mikrohärtemeßgerät die mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Harze bestimmt worden.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Härte-Meßgeräten lassen sich bei diesem Gerät Normalkräfte und die dadurch verursachte Eindringtiefe der Diamantspitze definiert bestimmen. Bei allen Messungen wurde die Last von einer Anfangslast von 0,4 mN auf eine Endlast von 20 mN erhöht, bei gleichzeitiger Bestimmung der jeweiligen Eindringtiefe. In den Bildern 1 bis 3 ist der mittlere Plattenabriebswert der jeweiligen Paarungen mit den mechanischen Parametern der entsprechenden

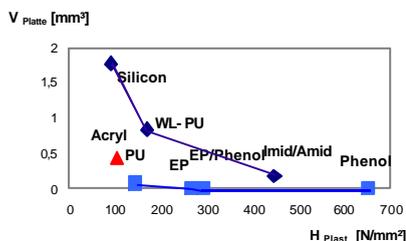


Bild 1: Vergleich der plastischen Härte- und Abriebswerte

Platten dargestellt. Die Ergebnisse der Untersuchungsreihen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Es besteht für diese Werkstoffe ein lineares Verhältnis zwischen der plastischen Härte und dem Elastizitätsmodul und ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang zwischen plastischer Härte und Kriechverhalten.

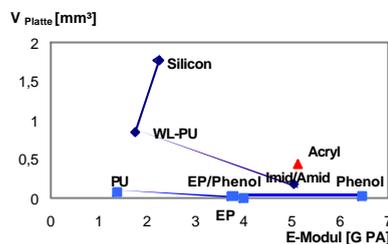


Bild 2: Vergleich der Elastizitätswerte mit entsprechenden Plattenabriebswerten

Das Reibungsverhalten der verschiedenen harzbeschichteten Platten zeigt nur geringe Unterschiede (siehe Bild1).

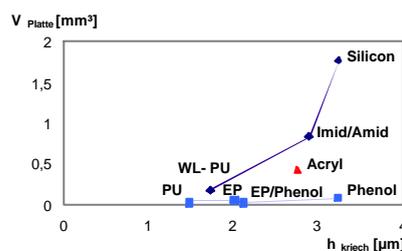


Bild 3: Vergleich des Kriechverhaltens mit entsprechenden Plattenabriebswerten

Größere Differenzen lassen sich für das jeweilige Abriebsverhalten der Platten erkennen. Daher wird das Verschleißverhalten detailliert mit den mechanischen Parametern verglichen.

Bei dem untersuchten tribologischen Belastungskollektiv weisen die Harze Polyester, Epoxid und Phenol ein sehr geringes Plattenabriebsverhalten auf. Die Mischung aus den Harzen Imid und Amid weist zwar auch ein geringes mitt-

res Plattenabriebsvolumen auf, jedoch werden die Stahlkugeln als Gegenkörper angegriffen.

Die untersuchten Harze lassen sich in zwei Gruppen einteilen.

Die erste Gruppe besteht aus den beiden Harzen Epoxid und Phenol, der Harzmischung aus beiden, sowie dem Polyesterharz. Unabhängig von den mechanischen Eigenschaften weisen die Probekörper in dieser Gruppe ein sehr geringes Abriebsverhalten auf. In dieser Gruppe variiert z. B. die plastische Härte über einen großen Bereich ohne Einfluss auf das Abriebsverhalten zu nehmen.

Die Harzmischung Imid/Amid, wasserlösliches Polyester und Silicon bilden die zweite Gruppe, bei der das Abriebsverhalten stark von der plastischen Härte und dem Elastizitätsmodul abhängt. Das Kriechverhalten zeigt für diese Gruppe einen Zusammenhang zu dem Abriebsverhalten. Vermutlich werden die entsprechenden Harzschichten durch die hohe Kugelpressung stark plastisch deformiert, so dass neben den eigentlichen Abriebsmechanismen auch noch die plastische Deformation hinzukommt.

Diese Arbeiten sind im Rahmen des Arbeitskreises "Gleitlacke" am HSG-IFZ durchgeführt worden, der sich hauptsächlich mit Gleitlacken und ihrer Verträglichkeit mit verschiedenen Schmiermedien befaßt. Der Arbeitskreis wird über die Beiträge der Mitgliedsfirmen finanziert.

Kontaktperson:

Dipl.-Phys. Werner Scheerer

Tel. ++49(711)121-3179

E-mail werner.scheerer@izfm.uni-stuttgart.de

# Außenstromlose Metallisierung von Thermoplasten für die MID-Technologie

W. Eberhardt

## Einleitung

Die Technologie der Molded Interconnect Devices (MID) bietet im Bereich elektronischer Baugruppen völlig neue Möglichkeiten gegenüber der zweidimensionalen Leiterplattentechnologie. Durch die Integration von elektronischen und mechanischen Funktionen wird auch in der dritten Dimension eine hohe Funktionalität auf engstem Raum möglich. Derzeit sind bereits erste Anwendungen in der Serienfertigung.

Aufgrund ihrer hohen Integrationsfähigkeit und Funktionalität hat die MID-Technik darüber hinaus das Potenzial, eine wichtige Technologie für die Gehäuse- sowie Aufbau- und Verbindungstechnik von Mikrosystemen zu werden. Elektrische Leiterbahnen und Steckverbindungen werden raumsparend im Gehäuse integriert. Neben der Integration mechanischer Funktionselemente bietet sich zudem die Möglichkeit, fluidische Elemente wie beispielsweise feine Kanäle und Membranen und optische Elemente wie Fenster und Linsen in ein und derselben Baugruppe zu integrieren.

Weiterhin können mit Hilfe der MID-Technik beispielsweise Biegebalcken- oder Elektrodenstrukturen in miniaturisierten Kunststoffgehäusen implementiert und gezielt metallisiert werden. Solche metallisierten Strukturen können als elektromechanische Sensor- und Aktorstrukturen mit kapazitiver Auslese dienen, womit sich völlig neue technische Lösungen bei miniaturisierten Bauteilen realisieren lassen.

Des Weiteren eröffnet die MID-Technik interessante neue Wege für den Aufbau von Mikrosystemen,

insbesondere durch die Gehäusung von Sensor- und Aktorbauerelementen, die als Nacktchip vorliegen.

## MID-Technologien

Im Gegensatz zur Leiterplattentechnologie werden bei der MID-Technologie thermoplastisch verarbeitbare Kunststoffe verwendet. Die Strukturierung des Leiterbahnbildes erfolgt bereits während des Spritzgießprozesses oder in nachträglichen Arbeitsschritten. Hierfür kommen verschiedene Herstellungsverfahren in Betracht:

- Zweikomponentenspritzgießen
- Heißprägen
- Laserdirektstrukturierung
- Maskenverfahren
- Folienhinterspritzen

Das Aufbringen der Leiterbahnstrukturen erfolgt mit Ausnahme des Heißprägens durch nasschemische Prozesse. Beim Heißprägeprozess wird das Leiterbahnbild mit einem Formstempel und einer entsprechenden Metallfolie auf das Substrat aufgeprägt. Sehr feine Leiterbahnstrukturen lassen sich derzeit durch Laserdirektstrukturierung erzeugen. Bei allen MID-Technologien mit einem nasschemischen Metallisierungsschritt ist die haftfesteste nasschemische Metallisierbarkeit von Thermoplasten eine wichtige Voraussetzung.

Die größte Bedeutung der MID-Herstellungsverfahren besitzen derzeit das Heißprägen und das Zweikomponentenspritzgießen. Das Heißprägen ist ein schneller und wirtschaftlicher Fertigungsprozess, bei dem die Gestaltungsfreiheit in der dritten Dimension jedoch verfahrensbedingt beschränkt ist. Das

Zweikomponentenspritzgießen stellt im Hinblick auf die dreidimensionale Gestaltungsfreiheit das flexibelste Verfahren dar und ermöglicht bei großen Stückzahlen eine rationelle Fertigung.

## Zweikomponentenspritzgießen (2K-MID)

Beim Zweikomponentenspritzgießen von MID (2K-MID) erfolgt die Strukturierung bereits durch den Spritzgießprozess. Das Leiterbild wird in einem nachfolgenden selektiven außenstromlosen Metallisierungsprozess erzeugt. Die 2K-MID-Technik verlangt hierfür Materialkombinationen mit unterschiedlichem Metallisierungsverhalten, das heißt, in einem außenstromlosen Metallisierungsprozess wird auf der gewünschten Kunststoffkomponente Metall haftfest abgeschieden und auf der anderen Komponente nicht. Dies kann bei gleichartigen Kunststoffen durch das Eincompoundieren von Katalysatoren in eine der beiden Komponenten erzielt werden. Bei verschiedenartigen Kunststoffen muss der Metallisierungsprozess bzw. die Vorbehandlung an die jeweilige Materialkombination angepasst sein, um eine selektive Metallisierung einer Komponente zu erreichen.

Der Verfahrensablauf eines außenstromlosen Metallisierungsprozesses besteht im wesentlichen aus einer Konditionierung und Aktivierung der Kunststoffoberfläche und einer anschließenden Beschichtung in einem chemisch-reduktiven Metallisierungsbad. Bei der Konditionierung wird die Oberfläche im Allgemeinen aufgeraut und chemisch modifiziert, um eine Haftung der abgeschiedenen Metallschicht zu gewährleisten. Die Aktivierung erfolgt meist mit Palladiumverbindungen.

gen als Katalysatoren, welche die nachfolgende chemisch-reduktive Metallabscheidung auf der Kunststoffoberfläche einleiten.

Die Vorteile dieser Metallisierungsmethode liegen in einer sehr homogenen Schichtdicke auch auf komplexen Geometrien sowie in der einfachen Möglichkeit der Metallisierung von komplizierten Strukturen, da im Gegensatz zu galvanischen Verfahren keine elektrische Kontaktierung notwendig ist. Weiterhin können auf einfache Weise auch Schichtsysteme wie z.B. Cu-Ni-Au für die entsprechende Verbindungstechnik realisiert werden.

Ein in der MID-Technologie bisher oft verwendeter Werkstoff ist Liquid Crystal Polymer (LCP), hauptsächlich wegen seiner ausgezeichneten Temperaturbeständigkeit sowie exzellenten Fließfähigkeit, was für die Herstellung von feinen Strukturen unabdingbar ist. Kommerziell ist derzeit ein spezieller LCP-Typ (Vectra E 820i Pd) mit eincompoundiertem Palladium für die außenstromlose Metallisierung erhältlich. Für die nicht metallisierbare Komponente von 2K-MID kommen verschiedene Typen in Betracht.

## Ergebnisse

Mit einem einfachen 2-Komponenten-Spritzgießteil wurden Untersuchungen zur selektiven Metallisierung von Vectra E 820i Pd in Kombination mit Vectra E 130i durchgeführt. Bild 1 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der unbehandelten Oberfläche des 2-Komponenten-Verbundes.

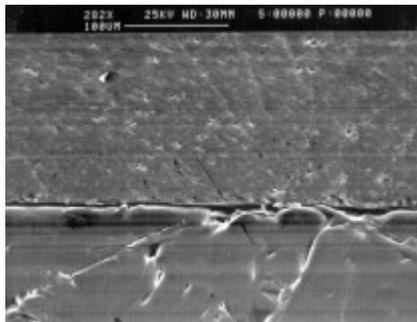


Bild 1: 2K-Verbund Vectra E820i Pd (oben) und Vectra E 130i unbehandelt

Durch eine Vorbehandlung, bestehend aus einer stark alkalischen Lösung bei erhöhter Temperatur wird eine starke Aufrauung der metallisierbaren LCP-Komponente (Vectra E 820i Pd) erzielt (Bild 2).

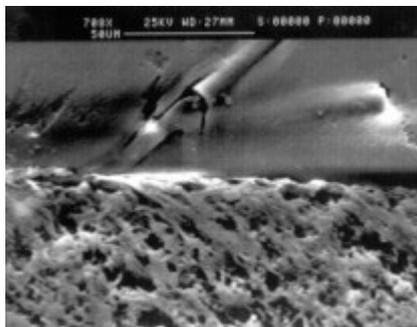


Bild 2: Vectra E820i Pd (unten) und Vectra E 130i nach alkalischer Vorbehandlung

Mit zunehmender Tauchzeit wird eine Zunahme der Rauftiefe beobachtet. Die nichtmetallisierbare Komponente (Vectra E 130i) wird durch die alkalische Vorbehandlung kaum beeinflusst.

Nach Neutralisation mit verdünnter Salzsäure folgt die selektive chemische Verkupferung mit einem kommerziell erhältlichen Kupferbad mit Formaldehyd als Reduktionsmittel. Damit die Abscheidung auf dem Substrat initiiert wird, muss die Aktivität des Elektrolyten erhöht werden, andernfalls wird das Substrat

nicht ganzflächig metallisiert. Die Anforderung nach erhöhter Aktivität des Elektrolyten ist in der geringen Palladiumkonzentration des Substrats begründet. Bild 3 zeigt die selektive Verkupferung des 2K-Spritzgießteils.

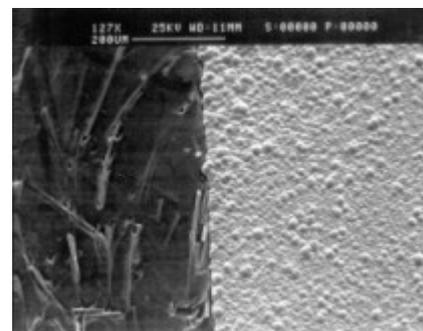


Bild 3: Vectra E820i Pd (rechts) und Vectra E 130i nach außenstromloser Kupferabscheidung

Nach Mikroätzung der Kupferschicht und anschließender Aktivierung kann dann in einem weiteren Schritt mit einem hypophosphithaltigen Vernickelungsbad eine Nickelschicht abgeschieden werden. Als Endfinish wird dann in einem weiteren Schritt eine sehr dünne Tauchgoldschicht aufgebracht, was eine optimale Löt- und Bondbarkeit gewährleistet. Bild 4 zeigt einen Querschliff einer Kupfer-Nickel-Schicht auf Vectra E820i Pd mit einer Gesamtdicke von etwa 15µm.

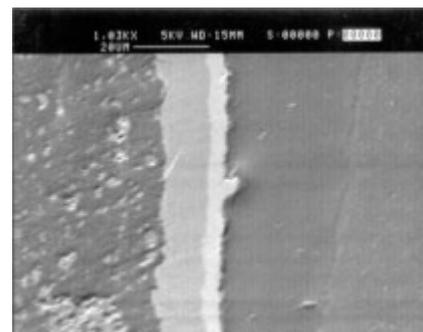


Bild 4: Querschliff: Cu / Ni auf Vectra E820i Pd (links)

Weitere in der 2K-MID-Technologie eingesetzte Materialkombinationen beinhalten eine metallisierbare Komponente aus PA6 oder PA66. Als nichtmetallisierbare Komponente kann zum Beispiel PBT, PC, PA12 oder ein teilaromatisches PA verwendet werden.

Durch einen Beizqueller auf alkoholischer Basis, welcher den Aktivator in ionischer Form enthält, wird eine selektive Modifizierung der metallisierbaren Komponente erzielt. Für eine optimale Vorbehandlung müssen die metallisierbaren Materialien eine amorphe Oberflächenstruktur aufweisen, was durch eine niedrige Werkzeugtemperatur beim Spritzgießprozess erreicht werden kann. Der durch Quellvorgänge aufgenommene Aktivator wird anschließend mit einer DMAB-haltigen Lösung reduziert, was auf den 2K-Kunststoffteilen zu einer Dunkelfärbung der metallisierbaren Komponente durch elementares Palladium führt. Mit einem kommerziell erhältlichen ammoniakalischen Nickelelektrolyten auf Hypophosphitbasis lässt sich so eine haftfeste selektive Vernickelung von z.B. PA6 (Durethan BKV 115) oder PA66 (Ultramid A3X3G5) neben z.B. PC (Lexan 121) oder PBT (Celanex 2300 GV1/20) erzielen. Aufbauend auf dieser selektiven Startschicht können dann weitere Schichten abgeschieden werden.

Bild 5 zeigt ein 2K-Teil aus PA66 und PC, selektiv mit etwa 1 µm chemisch Nickel beschichtet. Die Transparenz des amorphen PC wird durch die Oberflächenbehandlung nicht nachhaltig verändert.

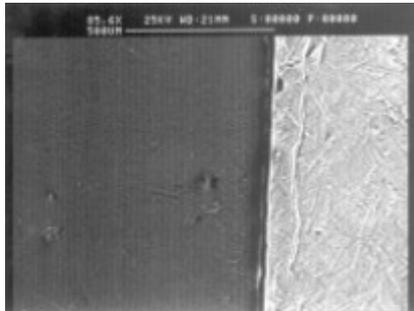


Bild 5: PA66 (Ultramid A3X3G5; rechts) und PC (Lexan 121) nach außenstromloser Nickelabscheidung

Bild 6 zeigt ein 2K-Teil aus PA6 und PBT mit selektiv vernickeltem PA6. Durch Verlängerung der Prozesszeit im chemisch-Nickel-Elektrolyten wurde die Schichtdicke auf etwa 20 µm erhöht.

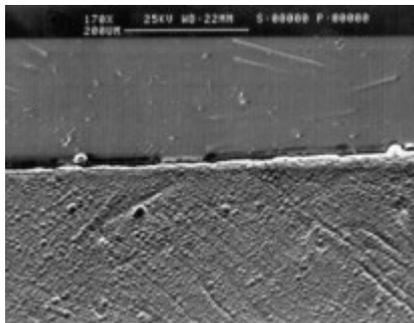


Bild 6: PA6 (Durethan BKV 115; unten) und PBT (Celanex 2300 GV1/20) nach außenstromloser Nickelabscheidung

---

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

---

# Mehrkomponenten-Spritzgießen in der Mikrosystemtechnik

H. Seifert, M. Münch

## Einleitung

In dem vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderten Verbundprojekt wurden zusammen mit neun Industriefirmen technologische Grundlagen zur Herstellung mikromechanischer Funktionsteile für die Sensor- und Aktorgehäusung durch 2-Komponenten-Spritzgießen entwickelt.

Die Gehäuse- und Verbindungstechnik für Mikrosysteme kann eine äußerst komplexe technologische Aufgabe darstellen, da häufig Sensoren und Aktoren mit ihrer Umgebung in Wechselwirkung treten. Neben den elektrischen Signalen bzw. der Energieversorgung handelt es sich unter anderem um optische, fluidische oder mechanische Energieformen, welche mit der Außenwelt kommunizieren müssen. Damit sind die Gehäuse selbst Teil der Funktion des Sensors oder Aktors. Um den Energieaustausch zu ermöglichen, benutzt man Fenster mit bestimmten optischen, elastischen oder permeablen Eigenschaften, welche in die Gehäuse eingelassen werden. Für Aktoren werden u.a. Dichtungen für dreh- und linearbewegte Wellen benötigt, die den Innen- vom Außenraum trennen.

## Modellteile

Als praxisnahe Ausführung z.B. für Mikroschaltergehäuse wurde beim ersten Modellteil "lokal temperaturfest" der Gehäuseboden als temperaturfeste Komponente aus einem Duromer gespritzt, während der Gehäuserahmen aus einem Thermoplasten besteht. Somit besteht die Möglichkeit, hier in einer spezifischen Anwendung beispielsweise Montageklipse und sonstige Funktionsteile zu integrieren, die die Elastizität des Thermoplasten benöti-

gen. Das Gehäuse hat Abmessungen von  $15 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ . Die Wandstärken am gesamten Bauteil betragen 0,8 mm.

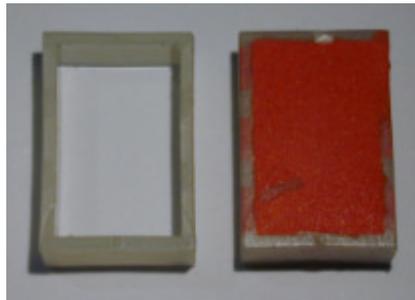


Bild 2: Modellteil "lokal temperaturfest". Links Vor-, rechts Fertigspritzling

Beim Modellteil "lokal transmissiv" wird im Gehäuseboden zur Kommunikation mit der Außenwelt ein optisches Fenster von  $10 \times 6 \text{ mm}^2$  aus einem transmissiven Thermoplasten ausgebildet. Der Anspritzpunkt der Heißkanalanbindung liegt außerhalb des Sichtbereichs des Fensters. Das Fenster wird als erste Komponente gespritzt. Über eine Kaltkanalanbindung werden die Gehäusewände und der restliche Gehäuseboden gespritzt. Die äußeren Abmessungen des Modellteils sind  $15 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ . Die Wandstärke des gesamten Modellteils beträgt 0,8 mm.

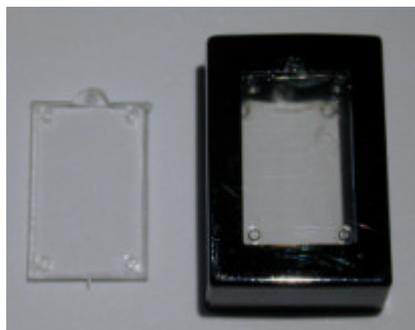


Bild 3: Modellteil "lokal transmissiv"

Das Modellteil "Kolbenstange" wird als Aktorelement ähnlich der Funktion eines Zylinders im Bereich der Pneumatik oder Fluidik ausgebildet.

Dabei wird das Verbundsystem aus einem Thermoplasten und einem thermoplastischen Elastomer (TPE) genutzt. Die Aufgabenstellung umfaßte hierbei insbesondere die Untersuchung der Verbundfestigkeit zwischen der Stange und der Dichtung aus TPE. Die Kolbenstange hat eine Gesamtlänge von 11,3 mm. Auf einer Länge von 10 mm beträgt der Durchmesser 2,0 mm. Danach kommt ein Zapfen mit 0,7 mm Durchmesser. Auf diesen Zapfen wird das Dichtelement aus TPE als zweite Komponente aufgespritzt. Beide Komponenten sind über eine Heißkanaldüse angebunden.



Bild 4: Modellteil "Kolbenstange"

## Modellwerkzeuge

Das Werkzeug für das Bauteil "lokal temperaturfest" ist als Indexplatten-Werkzeug ausgeführt. Die thermoplastische Komponente wird über eine Heißkanaldüse außermittig angespritzt und bildet den Rahmen des kastenförmigen Bauteiles. Zwei Schieber auf der düsenseitigen Werkzeughälfte sorgen dabei für die

Aussparungen, die später die form-schlüssige Verbindung des Rahmens mit dem Duromerdeckel ergeben. Der Rahmen wird beim Öffnen des Werkzeugs in der Indexplatte gehalten und vom ersten Hauptkern abgezogen. Dann dreht sich die Indexplatte um 180° und beim Schließen des Werkzeuges wird der Rahmen auf den zweiten Hauptkern aufgeschoben. Anschließend wird der Duromer über einen Kaltkanal durch eine von den Schiebern gebildete Aussparung eingespritzt. Das Werkzeug öffnet sich wieder und der Fertigspritzling wird mittels Flachauswerfer ausgestoßen. Wegen der unterschiedlichen Verarbeitungs- bzw. Aushärtemperaturen der Komponenten ist die düsenseitige Werkzeughälfte durch eine Temperierschutzplatte geteilt, wobei jede Seite ihren eigenen Kühlkreislauf hat. Des Weiteren wird der zweite Hauptkern durch eine eingeschobene Heizpatrone elektrisch beheizt, um den Duromer aushärten zu können.

Das Werkzeug für das Bauteil "lokal transmissiv" ist als Drehtellerwerkzeug konzipiert. Durch Schieber auf der Auswerferseite wird die Verbundfläche des Vorspritzlings definiert und der restliche Teil der Kavität abgetrennt. Beim Öffnen des Werkzeuges wird der Vorspritzling mit vier Stiften auf dem Hauptkern gehalten und dann mit der beweglichen Werkzeughälfte in die andere Position um 180° gedreht. Nach dem Einspritzen der zweiten Komponente und erneutem Öffnen wird der Fertigspritzling mit zwei Flachauswerfern entformt. Die Temperierung ist in beiden Werkzeughälften in zwei Kreisläufe getrennt.

Das Werkzeug für das Bauteil "Kolbenstange" ist ebenfalls ein Drehtellerwerkzeug. Die erste Kompo-

nente wird zentral auf die Mitte des Zapfens in der düsenseitigen Werkzeughälfte gespritzt. Das Werkzeug öffnet sich und der Vorspritzling wird durch eine 180°-Drehung der beweglichen Werkzeughälfte in die zweite Position gebracht. Nach dem Schließen des Werkzeuges ragt der Zapfen in die Düsenseite und wird an seiner Spitze in der Gegenkavität geführt. Nun wird die zweite Komponente eingespritzt. Die Anbindung erfolgt außermittig auf die Fläche der Dichtung. Das Werkzeug öffnet sich wieder und der Fertigspritzling wird durch den Stiftauswerfer, der gleichzeitig als Kavitätsbegrenzung dient, ausgeworfen. Der Auswerfer wird nur in der Position 2 zur Entformung des Fertigspritzlings betätigt. Auf der festen Werkzeughälfte können die beiden Komponenten getrennt temperiert werden. Auf der beweglichen Werkzeugseite existiert ein gemeinsamer Kühlkreislauf.

### **Werkstoffe**

Für das Modellteil "lokal temperaturfest" wurde PA66 mit PF31 und MP182 sowie PPE mit PF31 gespritzt.

Beim Modellteil "lokal transmissiv" wurden alle Kombinationen für die Materialien PMMA, PC und PS als transmissive und PC, PET und PEI als nicht transmissive Komponente gespritzt.

Die Kolbenstange wurde aus den Materialkombinationen POM, PA6 und PBT jeweils mit Desmopan385, PA6 mit Desmopan588 sowie POM und PA6 jeweils mit Pebax3533 gespritzt.

### **Simulation**

Zur Simulation der vorliegenden Teile kam die kommerzielle Software "Moldflow" zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein Simulationsprogramm, das das Füllen einer Kavität mit Kunststoffschmelze, das Abkühlen unter Berücksichtigung der Kühlkanäle und der Strömungsvorgänge in den Kühlkanälen sowie Schwindung und Verzug berechnen kann.

In diesem Projekt sollte insbesondere überprüft werden, ob die Anwendbarkeit von Simulationssoftware für Bauteile mit Abmessungen der Mikrosystemtechnik gegeben ist, nachdem für Bauteile mit größeren Abmessungen bereits Erfahrungswerte vorliegen. Dazu wurden Simulationen durchgeführt und die sich ergebenden Werte für den Verzug mit Messungen an den gespritzten Bauteilen verglichen.

Beim Füllvorgang der ersten Komponente des Modellteils "lokal temperaturfest" fällt auf, dass sich mit den gewählten Einspritzparametern noch hohe Drücke von 300 bar am Fließwegende einstellen, wie am dunkelblauen Bereich im Bild 5 zu sehen ist. Damit ist am Bauteil mit Überspritzungen zu rechnen, die sich am gespritzten Bauteil durch "Schwimmhäute" äußern können.

Anhand der noch hohen Temperaturen von 316 °C am Fließwegende bei einer Heißkanaltemperatur von 330 °C läßt sich ableiten, dass das Bauteil entlang der Bindenaht keine Festigkeitsprobleme hat (siehe Bild 6). Dies konnte beim Prüfen der Bauteile bestätigt werden.

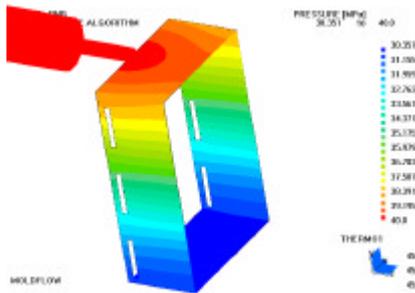


Bild 5: Simulation des Druckabfalls beim Füllvorgang am Rahmen des Modellteils "lokal temperaturfest"

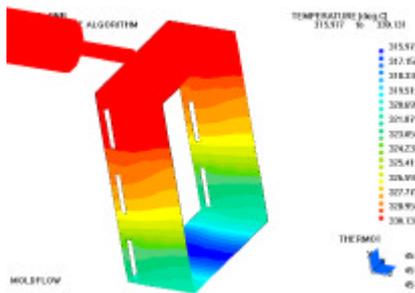


Bild 6: Simulation der Abkühlung der Schmelze während des Füllvorgangs am Rahmen des Modellteils "lokal temperaturfest"

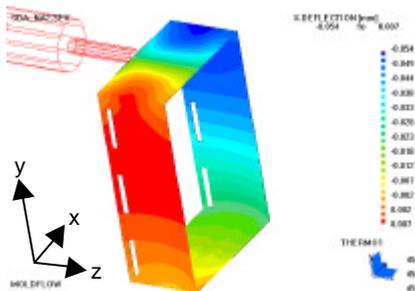


Bild 7: Simulation des Verzugs am Rahmens "lokal temperaturfest" in x-Richtung

Die Verzugsberechnung, wie in Bild 7 dargestellt, ergab für das Bauteil eine maximale Durchbiegung entlang der längeren Kante niedrigere Werte als die Messung. Ursachen dafür liegen in den Berechnungsschwierigkeiten des genauen Wärmeeintrags der Heißkanäle ins Werkzeug, in den Vergleichsproblemen zwischen der 1-K-Simulation und den Messungen

an 2-K-Teilen, in den durch höhere Verweilzeiten bedingten veränderten Werten für die Viskosität und in den Ungenauigkeiten der übrigen Stoffdaten wie z.B. dem p,v,T-Diagramm.

### Formteiluntersuchung

Bei stabilen Prozessbedingungen konnte bei allen Modellteilen eine gute Gewichtskonstanz und eine geringe Wanddickenschwankung erreicht werden.

Beim Modellteil "lokal temperaturfest" konnte mit der Materialkombination PPE / PF31 ein befriedigender Verbund erzielt werden, die anderen Materialien haben sich nicht verbunden. Mittels DSC-Analyse konnte nachgewiesen werden, dass die Aushärtung der Duromere immer gleichmäßig war.

Alle Materialkombinationen des Modellteils "lokal transmissiv" erwiesen sich als dicht. Die erzielten Werte für die Transmission entsprechen denen der Herstellerangaben. Mit der Materialkombination PC / PC konnten erwartungsgemäß gute Verbundfestigkeiten erreicht werden, die um nur 5 % hinter denen der Zugfestigkeit des reinen Materials zurückblieben. Mit PMMA / PC und PC / PET konnten gute Verbindungen erzielt werden, mit PS / PC, PC / PEI, PMMA / PET und PMMA / PEI konnten noch befriedigende Verbindungen erreicht werden, während PS mit PET und PEI eine nur noch geringe Haftung aufweist.

Die "Kolbenstange" lieferte für die Materialkombination PBT / Desmopan 385 keine Haftung, für die POM mit Desmopan 385 und Pebax eine nur geringe, ebenso wie für PA6 / Pebax. Nur mit der Materialkombination PA6 / Desmopan 385 und

-588 konnten Verbindungen erzielt werden. Für diese konnten auch hohe Dauerfestigkeiten ermittelt werden. Ebenso erwiesen sich diese Teile als dicht.

### Zusammenfassung

Die Einflüsse der Spritzparameter auf die Verbundfestigkeit von 2-K-Spritzgußteilen für den Einsatz in der Mikrosystemtechnik wurde an drei ausgewählten Modellteilen mit typischer Geometrie und unterschiedlicher Funktionalität untersucht.

Die spritztechnischen Aufgabenstellungen betrafen das Erreichen von Verbänden bei unterschiedlichen Materialkombinationen, die Form- und Maßhaltigkeit, und die, für jedes Modellteil spezifische Funktionalität wie z.B. Transmissivität, Dichtheit und Dauerfestigkeit.

Es konnten neue Erkenntnisse über die Werkzeugtechnik gewonnen werden, insbesondere über die Möglichkeiten der Heißkanaltechnik und über die gegenseitige Beeinflussung unterschiedlich temperierter Komponenten bei Mikrobauteilen.

Die Ergebnisse des Vorhabens zeigen klar, dass bei geeigneter Wahl der Spritzgießparameter und Materialkombinationen sehr gute Verbundfestigkeiten und die geforderten Funktionen der Modellbauteile erreicht werden konnten.

---

Kontaktperson:  
 Ing. grad. Hansjörg Seifert  
 Tel. ++49(711)121-3716  
 E-mail hansjerg.seifert@izfm.uni-stuttgart.de

---

# HSG-IFZ in Zahlen

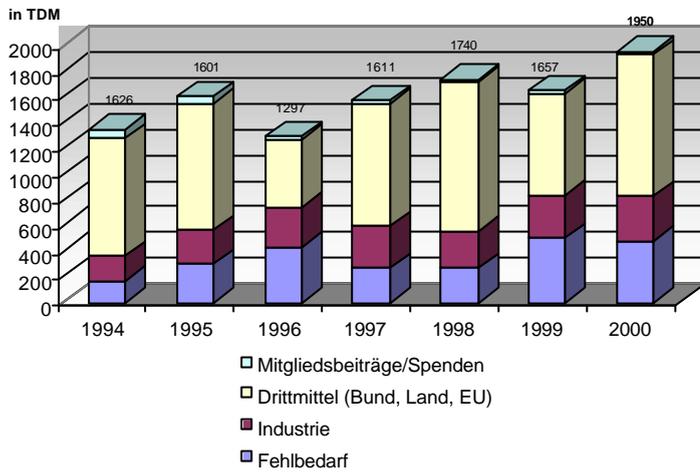


Bild 1: Entwicklung des Haushalts

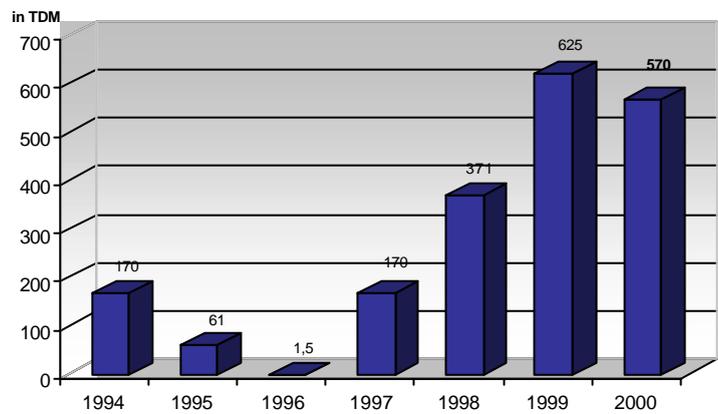


Bild 2: Gesamt-Investitionen

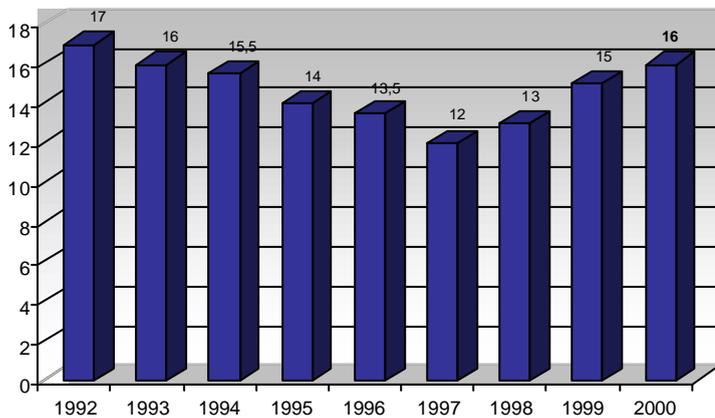


Bild 3: Stellenentwicklung

# Publikationen

## Konferenzbeiträge

H. Kück,  
"Aktuelle Arbeiten am Institut für Zeitmeßtechnik, Fein- und Mikro-  
technik sowie am HSG-IFZ",  
Sommerseminar am Fraunhofer-  
Institut für Mikroelektronische  
Schaltungen und Systeme, Duis-  
burg, August 1999

T. Gmelin, M.Giousouf, et al.,  
"Precision Tracer for Measuring the  
Inner Contour of Blind Holes",  
Proc. Eurosensor 99, Nürnberg, 18-  
20 May 1999, Vol. 1, pp. 269-272

R. Mohr,  
"SIMPLORER in der Anwendung  
bei elektromagnetomechanischen  
Systemen"  
Workshop 1999 der Firma SIMEC,  
Chemnitz, 6.-7.5.99

R. Mohr,  
"SIMPLORER in der Anwendung  
auf elektromagnetomechanische  
Systeme" und "Postprocessing und  
Optimierung",  
Informationstag "Praxisnahe Model-  
lierung und Simulation in der Fein-  
werk- und Miniaturtechnik, Lei-  
stungselektronik, Antriebstechnik",  
Universität Stuttgart, Rechenzen-  
trum und Institut für Zeitmeßtechnik,  
Fein- und Mikrotechnik, Fa. SIMEC  
GmbH & Co KG, Stuttgart, 16.3.99

H. Schenk et al.,  
"A New Driving Principle For  
Micromechanical Torsional  
Actuators",  
1999 International Mechanical  
Engineering Congress & Exposition,  
November 14-19, 1999, Nashville,  
Tennessee, USA

H. Schenk et al.,  
"A Novel Electrostatically Driven  
Torsional Actuator",  
Proc. 3rd International Conference  
on Micro Opto Electro Mechanical  
Systems, August 31 – September  
01, 1999, Mainz

## Veröffentlichungen

Allgeier, U., Baderschneider, K.,  
"Entwicklung funkgesteuerter  
Uhren",  
Jahresschrift 1999, Deutsche  
Gesellschaft für Chronometrie,  
Band 38, S. 139-149

D. Eichner, M. Giousouf, W. von  
Münch,  
"Measurements on micromachined  
silicon accelerometers with piezo-  
electric sensor action"  
Sensors and Actuators A76 (1999),  
p. 247-252

M. Giousouf, F. Assmus, H. Kück,  
"Structuring of Convex Corners  
Using a Reoxidation Process –  
Application to a Tuning Fork Reso-  
nator Made from (110)-Silicon"  
Sensors and Actuators A76 (1999),  
pp. 416-424

R. Mohr, L. Zacharias,  
"Damit die Zeit nicht stehenbleibt -  
Rechnergestütztes Design von Uh-  
renmotoren",  
F & M Feinwerktechnik, Mikrotech-  
nik, Mikroelektronik 107 (1999),  
Heft 6, S. 67-70

Schubert, M.,  
"Funkuhrtechnik und Funkuhr-  
entwicklung am Hahn-Schickard-  
Institut Stuttgart",  
Jahresschrift 1999, Deutsche  
Gesellschaft für Chronometrie,  
Band 38, S. 130-138

## Messebeteiligung

Innovationsbörse Neue Materialien  
- Verfahren und Produkte -  
8.7.99, Haus der Wirtschaft, Stutt-  
gart

## Kolloquium

Kolloquium anlässlich der  
Verabschiedung von Herrn Prof.  
Dr.-Ing. F. Aßmus, 26.2.99,  
Stuttgart

## Patentanmeldungen

M. Giousouf und H. Kück,  
"Elektromechanisches Bauelement  
und Verfahren zur Herstellung  
desselben",  
Tag der Anmeldung: 8.10.1999

M. Giousouf und H. Kück,  
"Mikromechanischer Ringresona-  
tor",  
Tag der Anmeldung: 2.11.1999

## Mitarbeit in Gremien

H. Kück:

Mitglied im Fachausschuß 4.1  
"Grundsatzfragen der Mikrosy-  
stemtechnik" der GMM

Leiter des Fachausschuß 4.8  
"Mikrofertigung" der GMM

Mitglied im Wissenschaftlichen Rat  
der AiF

# Diplom- und Studienarbeiten, Lehrveranstaltungen

## Seminare

11.02.1999

cand. mach. T. Fischer: Messungen an Drehratensensoren

11.02.1999

cand. el. J. Schaepperle: Berechnung von Synchronmotoren mit Hilfe des Feldberechnungsprogramms PROF1

10.06.1999

cand. mach. F. Segovía von Riehm: Viskositätsmessungen mit einem 1-MHz-Längsdehnungs-Quarزشwinger

11.11.1999

cand. mach. L. Blassmann: Erweiterung des Meßbereichs eines Miniaturtasters für Strukturen im 100 µm Bereich

## Vorlesungen

H. Kück: Grundlagen der Mikrotechnik I mit Übungen

H. Kück: Grundlagen der Mikrotechnik II mit Übungen

H. Kück, R. E. Müller: Miniaturtechnik I mit Übungen

H. Kück: Miniaturtechnik II mit Übungen

H. Kück, R. E. Müller: Zeitmeßtechnik

H. Effenberger: Elektrische Bauelemente in der Feinwerktechnik

H. Effenberger: Elektronik für Feinwerktechniker

B. Martin: Ausgewählte Meßverfahren der Fein- und Mikrotechnik

H. Sandmaier: Bauelemente der Mikrosystemtechnik

H. Sandmaier, M. Sesterhenn: Technologien der Mikrosystemtechnik

B. Schmidt: Anwendungen der Mikromechanik

## Praktika

Hauptfachpraktikum in Miniatur- und Mikrotechnik

Allgemeines Praktikum des Maschinenbaus

Elektronik-Praktikum für Feinwerktechniker

## Prüfungen

Fein- und Mikrotechnik:  
9 Teilnehmer

## Diplomarbeiten

Wörner, Holger  
Charakterisierung von Glob Top-Massen zur Abdeckung drahtgebondeter ICs auf organischen Schaltungsträgern  
Betreuer: Dr.-Ing. R. E. Müller

Stark, Achim  
Festverbindungen Duroplast-Thermoplast im Mehrkomponentenspritzguß  
Betreuer: Ing. grad. H. Seifert,

Buk, Peter

Untersuchungen zur Machbarkeit einer höchstauflösenden Stereolithographieanlage

Betreuer: Dipl.-Ing. Th. Gmelin

## Studienarbeiten

Segovia v. Riehm, Felipe  
Viskositätsmessungen mit einem 1-MHz-Längsdehnungs-Quarزشwinger  
Betreuer: Dipl.-Phys. M. Giousouf

Blassmann, Lars  
Erweiterung des Meßbereichs eines Miniaturtasters für Strukturen im 100 µm Bereich  
Betreuer: Dipl.-Ing. Th. Gmelin

Kleiber, Michael  
Aufbau eines signalverarbeitenden Systems zur Prüfung von Zahnradpaarungen  
Betreuer: Dipl.-Phys. U. Thissen, Ing. grad. H. Seifert

# Organe der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.

## 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 Egelhaaf  
Robert Bosch GmbH  
Forschungsleitung 1 (ZW1)

Professor Dr. H. Gleiter  
Mitglied des Vorstandes der  
Forschungszentrum Karlsruhe  
GmbH

MinRat Ulf Hecksteden  
Ministerium für Wissenschaft und  
Forschung Baden-Württemberg

Wolfgang Kammerlander  
TEMIC MBB Mikrosysteme 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

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

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

Professor Dr. W. Zahradnik  
Rektor der Fachhochschule  
Furtwangen

Jürgen von Schaewen  
Bundesministerium für Bildung und  
Forschung

## Vorstand

### Vorsitzender:

Dr. Harald Stallforth  
AESCULAP AG & CO. KG

### Stellvertr. Vorsitzende:

Dipl.-Ing. Reinhard Jäckle

Dr. Peter Jung  
Marquardt GmbH

Dipl.-Ing. Hans Weiss  
GMS Gesellschaft für Mikroelek-  
tronik und Sensorik mbH

### Schatzmeister:

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

### Ehrevorsitzender:

Dr.-Ing. Wolfgang Berger

## Aktuelle Partnerfirmen des HSG-IFZ

2E Rolf Hiller GmbH	General Electric Plastics GmbH	Speidel & Keller GmbH & Co. KG
A. Schulmann GmbH	Glyco-Metall-Werke	Strake B.V.
AESFULAP AG & Co.KG	Grässlin GmbH & Co.KG	Theben Werke GmbH
AHC-Oberflächentechnik GmbH & Co.OhG	Günther Heißkanaltechnik GmbH	Ticona GmbH
Arburg GmbH & Co.	HERION-Werke KG	U.T.S. Präzisionstechnik GmbH
Bernhardt Förster GmbH	Hopf Elektronik GmbH	Venus GmbH
Bielomatik GmbH & Co.	Horst Scholz GmbH & Co.KG	Whitford GmbH
BMT Breitmeier Messtechnik	IBL-Löttechnik GmbH	WIKA Alexander Wiegand GmbH
Bolta Werke GmbH	IDG-Dichtungstechnik GmbH	
Buss-Werkstofftechnik GmbH & Co.KG	Impella Cardioteknik AG	
Dietmar Adelhelm Kunststoffbeschichtungen	Keiper GmbH & Co.	
Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co.KG	Klüber Lubrication München KG	
Dr. Sauter Automation Anwendungstechnik GmbH	Kundo Staiger GmbH	
Dr. Tillwich GmbH	Mannesmann Tally GmbH	
Du Pont de Nemours	Marquardt GmbH	
Erich Lacher Uhrenfabrik	MIMOT GmbH	
ETA SA Fabriques d'Ebauches	MOS Matthias Oechsler & Sohn GmbH & Co.	
Faigle Kunststoffe GmbH	Parker-Hannifin GmbH	
FEM Forschungsinstitut für Edelmetalle	Pekass Automatisierungstechnik GmbH	
FESTO AG & Co.	PEZET GmbH	
Franz Hermle & Sohn GmbH & Co.KG	pretema GmbH	
Fritz Schunk GmbH & Co.KG	Robert Bosch GmbH	
Gebrüder Bühler GmbH	Schmauser Precision GmbH	
	Schmidt Feintechnik GmbH	
	Sieghardt Schiller GmbH & Co.	

# 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

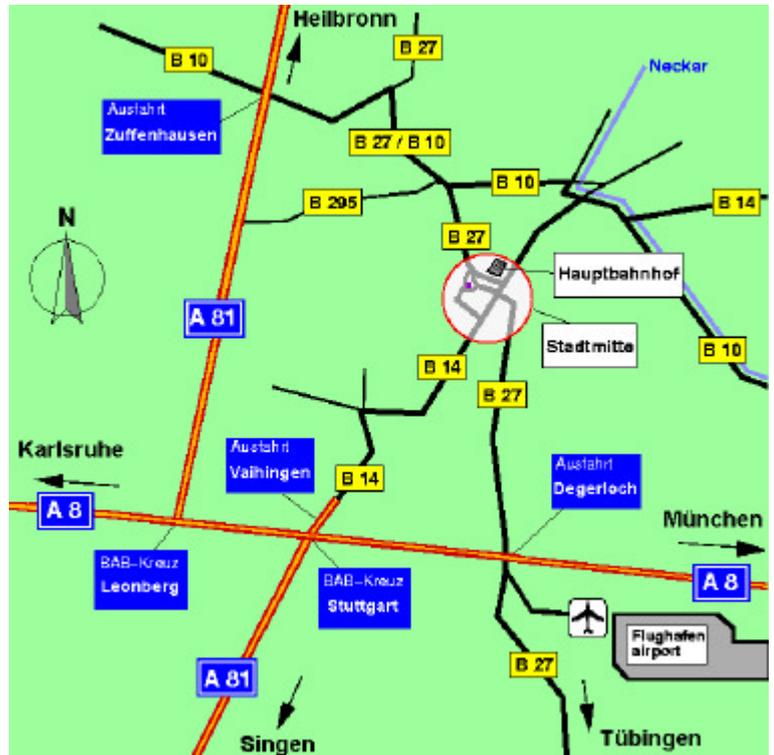
## Bei Anreise mit: Zug / S-Bahn

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

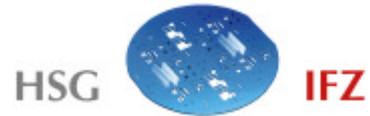
## Bei Anreise mit: Flugzeug

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 Katharinen-Hospital 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. 2b

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 Feinwerk- und Zeitmeßtechnik

Breitscheidstr. 2b

D-70174 Stuttgart

Telefon: ++49(711)121-3712

Telefax: ++49(711)121-3705

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

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

**Redaktion**

Ulrich Allgeier

**Gestaltung**

Ulrich Allgeier

**Druck**

E. Kurz & Co.  
70182 Stuttgart

© HSG-IFZ 2000