

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5670

**2. Statuskolloquium
des Projektes
Mikrosystemtechnik**
28./29. November 1995
im Forschungszentrum Karlsruhe

Projekt Mikrosystemtechnik

November 1995

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt
Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5670

**2. Statuskolloquium
des
Projektes Mikrosystemtechnik**

28./29. November 1995

im Forschungszentrum Karlsruhe

zusammengestellt von der Projektleitung

Projekt Mikrosystemtechnik

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
1995

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**ISSN 0947-8620
ISSN 0949-7404**

Inhaltsverzeichnis

Vorstellung des Projektes Mikrosystemtechnik.....	1
Darstellung wichtiger Arbeitsthemen des Projektes.....	9
Physikalische Mikrokomponenten für die Mikrosystemtechnik.....	11
Chemische Mikroanalysesysteme	15
Eine komponentenübergreifende Systemtechnik für die Mikrosystemtechnik - ein Anwendungsbeispiel.....	20
Werkstoffe und Werkstoffprozesse für die Mikrosystemtechnik	27
Mikroelektronik für die Mikrosystemtechnik	33
Aspekte der Kleinserienfertigung von Mikrosystemen.....	39
Erfahrungen beim Aufbau und Betrieb einer Kleinserienfertigung für LIGA-Spektrometer.....	41
Mechanische Mikrotechnik für Abformwerkzeuge und Kleinserien.....	45
Aufbau- und Verbindungstechniken für die Kleinserienfertigung von Mikropumpen	51
CAD und optische Qualitätskontrolle für LIGA-Mikrostrukturen.....	57
Ein System zur automatischen Montage von Mikrosystemen	62
Aufgaben und Ziele eines Technikums für die Kleinserienfertigung	67
Demonstratoren des PMT	73
Intelligentes triaxiales Beschleunigungssensorsystem.....	75
Optomechanische Bypass-Schaltung für die optische Informationstechnik	81
Optochemisches Mikroanalysesystem für die Umweltüberwachung.....	87
Gasanalytik mit akustischen Oberflächenwellen.....	93
ELMAS - ein modulares elektrochemisches Mikroanalysesystem	100
Experimenteller Telemanipulator für die Minimal-Invasive Chirurgie.....	106
Medizintechnik	113
Operationssysteme für die Minimal-Invasive Chirurgie.....	115
Instrumente und Führungssysteme für die endoskopische Chirurgie.....	118
Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik zur Herstellung von Mikrokomponenten für einen Herzkatheter.....	123
Chemische Mikrosensorik	129
Multigassensorchip auf Metalloxidbasis für Prozeßsteuerung und Umweltüberwachung	131
Integriert-optischer Sensor für die in-situ-Bestimmung organischer Schadstoffe.....	136
Neue Materialien für die Mikrosystemtechnik.....	143
Abformung mit ungefüllten und gefüllten Kunststoffen.....	145
Strukturieren und Fügen von Formgedächtnislegierungen mit Laserstrahlung	151
Magnetostriktive, piezoelektrische und Formgedächtnis Dünnschichtaktoren	155
Keramische Mikrostrukturen und ihre Anwendungen in der Mikrosystemtechnik	161

Mikrooptik	167
LIGA - Mikrolinsen und ihre Anwendungen in der Medizin- und Informationstechnik.....	169
Leistungsfähigkeit und Anwendungsgebiete von UV-VIS und IR-LIGA-Mikrospektrometern.....	175
Mikrooptische Funktionsmodule auf der Basis von LIGA- sowie Aufbau- und Verbindungstechnik; Konzepte, Potential und Anwendungen in der Informationstechnik.....	180
Poster/Exponate	185
Der „Karlsruher Endoskopietrainer“, ein auf „Virtual Reality“ Techniken basierendes MIC-Trainingsystem	187
Taktiler optischer Sensor für die Minimal-Invasive Chirurgie.....	188
Hydraulischer Mikroaktor	189
Bidirektionales Sende- und Empfangsmodul für die optische Datenübertragung.....	190
Mikromembransensoren	191
Integration von mikromechanischen und mikroelektronischen Komponenten mit Hilfe der positionierten Abformung auf vorstrukturierten Substraten	192
Mikroaktoren aus Formgedächtnislegierungen.....	193
Elektromagnetische Linearmikroaktoren nach dem LIGA - Verfahren.....	194
Ermittlung von Stoffeigenschaften	195
Wirkstoffsensor für Herbizide.....	196
Miniaturisierter photothermischer Sensor für Prozeß- und Umweltanalytik.....	197
Anwendungen der Mechanischen Mikrotechnik	198
Zerstörungsfreie, photoakustische Materialprüfung in der Mikrotechnik	199
Informationsverarbeitungsumgebung zur Kontrolle von Mikrostrukturen	200
Passive Ankopplung aktiver optischer Devices an monomodige Polymerwellenleiter	201
Abformung von Kunststoffmikrostrukturen.....	202
Miniaturisierungsschritte in der Mikroelektronik.....	203
Mikrofertigung und Analytik mit der Synchrotronlichtquelle ANKA : Dienstleistungsangebot an die Industrie	204
Liste aller ausgestellten Poster/Exponate.....	205
Liste der am Projekt Mikrosystemtechnik beteiligten Organisationseinheiten	206
Liste der Autoren.....	206

Vorstellung des Projekts Mikrosystemtechnik (PMT)

Peter Bley

Projektleitung Mikrosystemtechnik

Zusammenfassung

Das Projekt Mikrosystemtechnik (PMT) des Forschungszentrums Karlsruhe ist in fachlicher Breite von der Mikrostrukturierung, Sensorik, Aktorik, Systemtechnik bis hin zur Medizintechnik und in fachlicher Tiefe von der Grundlagenforschung über Vorlaufforschung bis hin zur anwendungsnahen Entwicklung angelegt. Im PMT arbeiten 250 Mitarbeiter in sieben Instituten und Hauptabteilungen zusammen, um Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (F&E) durchzuführen, die wesentliche Beiträge zur Markteinführung dieser neuen und zukunftsweisenden Technologie darstellen.

Die F&E-Arbeiten des PMT werden in vielfältiger Zusammenarbeit mit mehr als 90 Hochschulen und anderen Forschungseinrichtungen durchgeführt. Um einen wichtigen Beitrag zu liefern, technische Hemmnisse abzubauen, die bisher einer breiten industriellen Nutzung der Mikrosystemtechnik entgegenstanden, kooperiert das PMT im vorwettbewerblichen Bereich mit einer Vielzahl von kleinen und mittleren Unternehmen sowie mit der Großindustrie. Diese Kooperationen werden im Rahmen von vielen bilateralen Verträgen, BMBF-, EU-Verbundvorhaben und EUREKA-Projekten durchgeführt. Im wettbewerblichen Bereich führt das PMT Auftragsarbeiten für die Industrie durch. Das PMT kooperiert auf diese Weise mit insgesamt 52 verschiedenen Unternehmen, und knapp 40 % der Arbeiten des PMT werden in vertraglich festgelegter Form mit Industrieunternehmen durchgeführt.

Das PMT hat damit begonnen, eine "Kleinserienfertigung" für funktionstüchtige Labormuster aufzunehmen, für die industrielle Nachfragen vorliegen. Im Rahmen dieser Arbeiten werden Fragen der Prozesssicherheit, Prozessdokumentation, Qualitätskontrolle und Wirtschaftlichkeit bearbeitet.

Das PMT hat bereits eine führende Rolle bei der Etablierung der Mikrosystemtechnik übernommen und will diese künftig noch stärker ausbauen, indem das Forschungszentrum als Technologievermittler und -promotor industrielle Interessen der produzierenden Firmen zusammenfaßt.

1. Einführung in das Projekt Mikrosystemtechnik

1.1 Aufgabenstellung für das Projekt Mikrosystemtechnik

Ende 1992 wurden im Forschungszentrum Karlsruhe alle bereits seit mehreren Jahren verfolgten Arbeiten mit Bezug zur Mikrosystemtechnik und zur Minimal-Invasiven Chirurgie organisatorisch in einem "Projekt Mikrosystemtechnik" (PMT) zusammengefaßt. In ihm arbeiten unterschiedliche wissenschaftliche Institute und Hauptabteilungen gemeinsam daran, die Mikrosystemtechnik weiterzuentwickeln, sie für ein breiteres Anwendungsspektrum zu erschließen und sie möglichst vielen Unternehmen zugänglich zu machen. Institutsübergreifend werden komplexe Mikrosysteme, d. h. intelligente Kombinationen von Mikroelektronik, -sensorik und -aktorik entwickelt. Auf diese Weise werden in Zusammenarbeit mit industriellen Anwendern wesentliche Beiträge zur Markteinführung dieser Mikrosysteme geleistet. Im September 1993 wurde im Rahmen des 1. Statuskolloquiums über den damaligen Stand der Arbeiten berichtet [1].

Das **langfristige Projektziel** der vorwettbewerblichen Forschung sieht vor, die verschiedenen Mikrostrukturierungstechniken, Werkstoffe und Effekte kontinuierlich weiterzuentwickeln und neue Verfahren bereitzustellen. Weiterhin werden vor allem die Systemtechniken, die zur Herstellung komplexer Mikrosysteme benötigt werden, wie z. B. die Aufbau- und Verbindungstechnik sowie der Systementwurf, weiterentwickelt und für eine breite Nutzung bereitgestellt.

Das **kurzfristige Projektziel** ist es, die erzielten Ergebnisse rasch in vermarktbarere Produkte umzuwandeln. Hierzu kooperiert das PMT mit der Industrie in vielfältiger Form (vgl. Kapitel 4). Im Rahmen dieser Kooperationen mit potentiellen industriellen Anwendern erfolgt eine anwendungsoptimierte Weiterentwicklung entsprechend den Anforderungen und Bedürfnissen des Partners. Neben diesen Industriekooperationen werden vom PMT auch Entwicklungsaufträge unmittelbar für die Industrie bearbeitet.

Um seine Entwicklungen möglichst rasch aus dem Laborstadium herauszuführen und sie für die Industrie verfügbar zu machen, hat das PMT damit begonnen,

für ausgesuchte Entwicklungsprodukte Kleinserien in Angriff zu nehmen (vgl. Kapitel 5).

1.2 Organisation des Projekts Mikrosystemtechnik

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden im Forschungszentrum in selbständigen Organisationseinheiten (Institute und Hauptabteilungen) bearbeitet, die mit dem dafür ausgebildeten wissenschaftlich-technischen Personal und mit den geeigneten Geräten ausgestattet sind. Solche Teile des Forschungs- und Entwicklungsprogramms, die in verschiedenen Instituten/Hauptabteilungen bearbeitet und auf ein gemeinsames Ziel gerichtet sind, werden in Projekten durchgeführt, die institutsübergreifend organisiert sind (Matrix-Struktur). Seit Gründung des Projekts Mikro-

systemtechnik arbeiten vier Institute und drei Hauptabteilungen entsprechend ihrer Fachkompetenz zusammen. Tabelle 1, die den Stand 1995 widerspiegelt, weist aus, mit wie vielen Personen die-se Organisationseinheiten am Projekt beteiligt sind. 1995 arbeiten im Projekt insgesamt 252 Mitarbeiter.

In Abbildung 1 sind die am PMT beteiligten Institute und Hauptabteilungen den Arbeitsthemen des Projekts gegenübergestellt. Der dunkel ausgefüllte Teilkreis bei den Instituten und Hauptabteilungen gibt den prozentualen Anteil wieder, den die jeweilige Organisationseinheit für das PMT erbringt; dieser reicht z. B. von 18% bei HVT bis zu 96% beim IMT. Mit der restlichen Kapazität arbeiten die Organisationseinheiten anderen Projekten bzw. Arbeitsschwerpunkten des Forschungszentrums zu. Die Verknüpfungen zwischen den Organisationseinheiten und den Arbeitsthemen verdeutlichen, daß viele Themen von mehreren Instituten und Hauptabteilungen bearbeitet werden. Um diese vielschichtige Bearbeitung einzelner Themen umfassend aber ohne Doppelarbeit durchzuführen, ist eine enge Abstimmung der Arbeiten erforderlich. Die Koordination dieser Arbeiten obliegt der Projektleitung.

Das Forschungszentrum hat für das PMT einen Projektbeirat eingerichtet, dem 17 ausgewiesene Fachleute aus Wirtschaft, Forschung und Lehre sowie den Ministerien der Gesellschafter des Zentrums angehören. Aufgabe dieses externen Projektbeirats ist es, das Forschungszentrum vor allem hinsichtlich der langfristigen Zielsetzung des PMT zu beraten und dessen F&E-Programm zu begleiten.

Organisationseinheit	Personen-jahre
Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT)	81
Institut für Angewandte Informatik (IAI)	39
Institut für Radiochemie (IRCH) (zukünftig Institut für Instrumentelle Analytik)	34
Institut für Materialforschung (IMF)	46
Hauptabteilung Ingenieurtechnik (HIT)	18
Hauptabteilung Versuchstechnik (HVT)	17
Hauptabteilung Prozeßinstrumentierung und Elektronik (HPE)	10
Projektleitung	7
Summe	252

Tabelle 1: Zusammensetzung des Projekts Mikrosystemtechnik

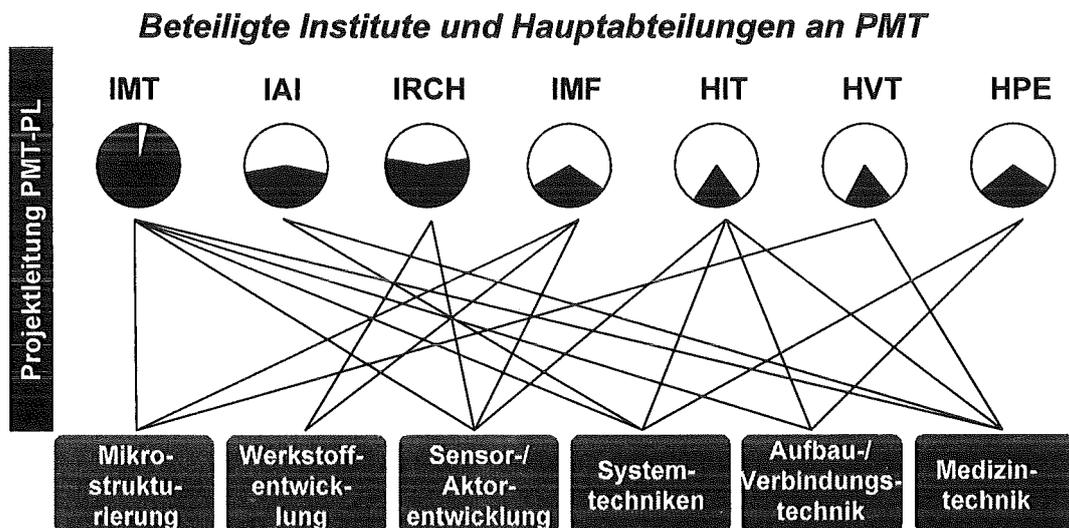


Abbildung 1: Mitwirkung der Institute und Hauptabteilungen an den Arbeitsthemen des Projekts Mikrosystemtechnik

1.3 Überblick über die Forschungsgebiete des Projekts Mikrosystemtechnik

Zur Entwicklung und Herstellung von Mikrosystemen ist die Zusammenarbeit verschiedenster Fachbereiche erforderlich. Das Forschungszentrum bietet hier in mehrfacher Hinsicht gute Voraussetzungen: Einerseits sind in den Instituten des Forschungszentrums hochqualifizierte Wissenschaftler der unterschiedlichsten Fachrichtungen tätig, wie z. B. Ingenieure aus den Bereichen Maschinenbau und Elektrotechnik, Physiker, Chemiker, Materialwissenschaftler, Mathematiker und Informatiker. Andererseits existieren im Forschungszentrum durch das Projekt organisatorische Strukturen, die einen direkten Zugriff auf fachlich unterschiedlich ausgerichtete Institute mit Erfahrungen auf wesentlichen Teilgebieten der Mikrosystemtechnik ermöglichen.

Die vielfältigen Forschungsarbeiten des PMT und die erzielten Ergebnisse werden in den nachfolgenden Beiträgen ausführlich beschrieben, so daß hier nur ein sehr kurzer Überblick gegeben wird. Auch wird auf die in den Einzelbeiträgen angegebenen Literaturangaben verwiesen.

Bei den Mikrostrukturtechniken nimmt das LIGA-Verfahren mit seinen Hauptprozessen Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung und Kunststoffabformung in den Entwicklungsarbeiten des PMT einen breiten Raum ein. Für die Herstellung von Mikrostrukturen mit kritischen Abmessungen über 5 Mikrometer wird die Mechanische Mikrotechnik (Präzisionszerspanung mit profilierten Mikroschneidwerkzeugen) vielfältig eingesetzt. Darüber hinaus finden auch Strukturierungsverfahren mit Elektronen- und UV-Lithographie, mit Lasern sowie Trocken- und Naßätzprozessen Anwendung.

Werkstoffe einschließlich ihrer Verbunde und der dazugehörigen Verbindungstechniken werden entsprechend den geforderten mechanischen, physikalischen (magnetischen, thermischen, optischen usw.) und chemischen Eigenschaften optimiert oder in vielen Fällen neu entwickelt. Bei der Entwicklung neuer Materialien stehen solche mit speziellen Sensor- oder Aktoreigenschaften (z. B. Formgedächtnis, Magnetostriktion, Piezoelektrizität) im Vordergrund. Analytische Mikrosysteme werden einerseits mittels chemischer Mikrosensoren, bei denen chemisch sensitive Schichten an ein mikroelektronisches und/oder mikrooptisches Bauelement gekoppelt werden, andererseits mit analytischen Mikrosonden, die physikalische Wechselwirkungen der nachzuweisenden Substanzen mittels miniaturisierter Komponenten analysieren, aufgebaut. Für die Realisierung von Aktoren werden sowohl „klassische“ Prinzipien (elektrostatische und elektromagnetische Kräfte, hydraulische und thermopneumatische Prinzipien) eingesetzt als auch die o.g. Funktionsmaterialien. Einige dieser Materialien können mit Aufdampf- und Sputtertechniken

als dünne Membranen direkt auf Substrate abgeschieden werden.

Die entwickelten Prozesse, Technologien und Werkstoffe werden zur Herstellung von Komponenten, Subsystemen und Systemen genutzt, die in die industrielle Nutzung überführt werden sollen.

Ergänzend zu den o. g. Arbeiten erbringt das PMT wesentliche Beiträge zum Systementwurf, zur Aufbau- und Verbindungstechnik, zur automatisierten Mikro- montage und zum modularen Aufbau der Systeme.

Für die Weiterentwicklung der Mikrosystemtechnik sind längerfristig angelegte Arbeiten der Vorlauforschung unverzichtbar. Sie bieten die Gewähr, daß das Zentrum auch zukünftig, wenn die derzeitigen F&E-Ergebnisse von der Industrie routinemäßig verwendet werden, in ausreichendem Umfang neue Technologien und neue Materialien zur Verfügung stellen und der Industrie zur Nutzung anbieten kann.

1.4 Apparative Ausstattung des Projekts Mikrosystemtechnik

Die am Projekt beteiligten Institute und Hauptabteilungen verfügen über hochwertige apparative Ausstattungen, die zur Durchführung der F&E-Arbeiten zur Mikrosystemtechnik notwendig sind. Daher sollen hier nur zusammengefaßt die wesentlichen Apparaturen und Anlagen in Zusammenhang mit ihren Anwendungen genannt werden. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß die meisten dieser Anlagen im Forschungszentrum entwickelt oder an die mikrosystem-technischen Anforderungen angepaßt wurden. Ein beträchtlicher Teil des jährlichen PMT-Aufwands fließt in die Entwicklung, Erweiterung und Instandhaltung dieser Ressourcen.

Zur Durchführung des LIGA-Prozesses stehen mit Ausnahme einer Synchrotronstrahlungsquelle alle notwendigen Geräte im Forschungszentrum zur Verfügung. Reinräume (200 m²) und Elektronenstrahl-schreiber für die Maskenherstellung, Belichtungs-apparaturen (in Bonn und Berlin, vgl. unten), Galvanik-anlagen, Spritz- und Reaktionsgießapparaturen sowie Prägeanlagen für Kunststoffe und Keramiken. Es werden vielfältige Prüfeinrichtungen eingesetzt, die besonders für die verwendeten Materialien, die Mikrostrukturen und die kompletten Systeme geeignet sind. Die Palette reicht von Nanoindenter über optische Bänke bis zu Raster- und Transmissions-Elektronen-mikroskopen. Eine ausgezeichnete ausgestattete Oberflächenanalytik sowie eine gut ausgestattete organische und anorganische Referenzanalytik sind für die Entwicklung von chemischen Mikrosensoren und zur Bearbeitung sonstiger mikrosystemtechnischer Fragestellungen vorhanden. Zum Entwurf und zur Simulation von Mikrosystemen, einschließlich deren Herstellungsprozessen, stehen sowohl die erforderlichen Rechenanlagen als auch die benötigte Software zur Verfügung. PMT verfügt zwar über keine

Herstellungslinie für Integrierte Schaltkreise (ICs), jedoch können die Entwürfe (einschließlich ASICs) durchgeführt und die Schaltungen in Multilayer-Dickfilmtechnik realisiert werden. Die Herstellung spezieller ICs erfolgt in Kooperation mit anderen Institutionen. Neben den Reinräumen für die Maskenherstellung, an die besonders hohe Anforderungen gestellt werden, sind für die Durchführung weniger kritischer Prozesse auch mehrere Reinräume niedrigerer Qualität (z. B. Reinraumzelle, Laminarflowboxen) vorhanden. Infrastrukturabteilungen für die Bereiche Maschinenbau, Elektrotechnik und Versuchstechnik ergänzen die Ressourcen des PMT zur Durchführung seiner F&E-Arbeiten und zur Zusammenarbeit mit der Industrie.

Die Röntgentiefenlithographie, d. h. die Belichtung der Proben mit Synchrotronstrahlung, erfolgt an der Universität Bonn (Elektronenstretcheranlage ELSA mit zwei Bestrahlungsstationen) und bei BESSY I in Berlin (eine Bestrahlungsstation). Die Bestrahlungen in Bonn werden seit vielen Jahren durchgeführt mit dem Nachteil, daß nur etwa alle zwei Wochen ELSA an wenigen Tagen für die Röntgentiefenlithographie genutzt werden kann. Nach der Inbetriebnahme eines supraleitenden Wellenlängenschiebers an BESSY I steht dem PMT dagegen seit etwa einem Jahr Strahlzeit kontinuierlich zur Verfügung. Für die Durchführung der Entwicklungsarbeiten ist es von großem, insbesondere zeitlichem Nachteil, daß die Bestrahlungsstationen in Berlin und Bonn sehr weit von allen für den LIGA-Prozeß notwendigen Labors im Forschungszentrum entfernt sind. Das Forschungszentrum strebt daher seit längerer Zeit an, zur Durchführung der Bestrahlungen im Forschungszentrum selbst eine eigene Synchrotronstrahlungsquelle aufzubauen, und hat hierzu ein ausführliches Proposal erarbeitet. Dabei soll diese Strahlungsquelle ANKA (Angström-Quelle Karlsruhe) neben dem Einsatz für das LIGA-Verfahren auch für analytische Aufgaben eingesetzt werden. Das Gesamtkonzept sieht vor, der Industrie Dienstleistungen in den beiden Bereichen Mikrofertigung und Analytik sowohl an ANKA als auch unter Nutzung der anderen Ressourcen des Zentrums anzubieten [2].

2. Wissenschaftliche Kooperationen

2.1 Zusammenarbeit mit Universitäten und anderen wissenschaftlichen Einrichtungen

Das Forschungszentrum Karlsruhe arbeitet im Rahmen seiner F&E-Aktivitäten traditionell mit Universitäten, insbesondere mit denen des Landes Baden-Württemberg, sowie mit sonstigen Forschungseinrichtungen zusammen. Besonders enge Verbindungen bestehen zwischen dem Forschungszentrum und der Universität Karlsruhe. Viele Leiter von Instituten des Forschungszentrums wurden gemeinsam berufen und üben gleichzeitig eine Professur an der Universität Karlsruhe aus. Mit der Universität Freiburg, die vor kurzem die 15. Fakultät für Angewandte Wissenschaften mit den Studiengängen Mikrosystem-

technik und Informatik gegründet hat, besteht ebenfalls eine enge Zusammenarbeit in Forschung und Lehre. Zwischen dem Forschungszentrum und der Universität Tübingen (Chirurgische Klinik) besteht ein Vertrag über die Zusammenarbeit bei der Weiterentwicklung der Minimal-Invasiven Chirurgie (MIC).

Da verschiedene Fraunhofer-Institute auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik tätig sind, wurde ein Zusammenarbeitsvertrag für dieses Arbeitsgebiet zwischen dem Forschungszentrum und der Fraunhofer-Gesellschaft abgeschlossen.

Zur Durchführung der notwendigen Belichtungen mit Synchrotronstrahlung (LIGA-Technik) arbeitet das Forschungszentrum eng mit der Universität Bonn und der BESSY GmbH, Berlin, zusammen.

Darüber hinaus bestehen mit vielen anderen deutschen, europäischen und überseeischen Universitäten und sonstigen Forschungseinrichtungen im Bereich der Mikrosystemtechnik unterschiedlich enge Kooperationen. Einerseits vermittelt das Forschungszentrum seine Kenntnisse im Bereich der Vorlaufforschung, andererseits nutzt es so optimal die Kenntnisse, die an anderen Stellen erarbeitet wurden, so daß Doppelarbeit vermieden wird.

Insgesamt arbeitet das PMT national und international mit etwa 90 Hochschulen und sonstigen Forschungseinrichtungen zusammen.

2.2 Nachwuchsförderung

Die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses im Bereich der Mikrosystemtechnik stellt ebenfalls eine wichtige Aufgabe des PMT dar und erfolgt auf zwei Wegen: über Fachvorlesungen und mittels Betreuung und Durchführung selbständiger wissenschaftlicher Arbeiten.

An sieben verschiedenen Universitäten, Fachhochschulen und Berufsakademien werden Vorlesungen zu ausgewählten Themen der Mikrosystemtechnik angeboten, die von den Institutsleitern im Rahmen ihrer Verpflichtungen als Lehrstuhlinhaber sowie von Privatdozenten und sonstigen Mitarbeitern abgehalten werden.

Einen erheblichen Beitrag zur Nachwuchsförderung leistet das PMT, indem es seine apparative Ausstattung zur Durchführung selbständiger wissenschaftlicher Arbeiten zur Verfügung stellt und diese Arbeiten durch Wissenschaftler des Projekts intensiv betreuen läßt. Seit Gründung des Projekts wurden am Forschungszentrum im Bereich der Mikrosystemtechnik insgesamt 40 Doktorarbeiten abgeschlossen und 62 weitere sind in Bearbeitung. 120 Studien- und Diplomarbeiten wurden durchgeführt. Zahlreiche Studenten von Fachhochschulen leisten im Bereich der Mikrosystemtechnik ihre Praktikumssemester ab. Am Projekt sind ferner durchschnittlich pro Jahr 30 Nachwuchswissenschaftler beschäftigt, die so ihre wissen-

schaftliche Tätigkeit nach Abschluß ihrer Dissertation fortsetzen und vertiefen können.

Es sei hier ausdrücklich darauf hingewiesen, daß im Rahmen dieser wissenschaftlichen Nachwuchsförderung wesentliche Beiträge zur Weiterentwicklung aller Arbeitsgebiete des PMT erbracht werden.

3. Demonstratoren des Projekts Mikrosystemtechnik

Um seine Fähigkeit im Bereich der Mikrosystemtechnik deutlich zu machen, insbesondere was die Konzipierung und Herstellung komplexer Mikrosysteme betrifft, wurden unmittelbar nach Einrichtung des PMT prototypische Mikrosysteme, sog. Demonstratoren definiert, die vom PMT konzipiert, entworfen, hergestellt und getestet werden sollten. Diese Demonstratoren liegen nun als funktionstüchtige Labormuster vor und werden in den nachfolgenden Beiträgen [Session „Demonstratoren des PMT“] im einzelnen beschrieben. Alle wurden in enger Zusammenarbeit mehrerer Organisationseinheiten entwickelt (in Klammer ausgewiesen):

- Intelligentes triaxiales Beschleunigungssensorsystem (IMT, IAI, HPE)
- Optomechanische Bypass-Schaltung für die optische Informationstechnik (IMT, IMF)
- Optochemisches Mikroanalyzesystem für die Umweltüberwachung (IMT, IRCH, IMF, HPE, HVT)
- Gasanalytisches Mikrosystem mit akustischen Oberflächenwellen (IRCH, HPE)
- ELMAS: Elektrochemisches Mikroanalyzesystem (IMT, IRCH, IAI, IMF, HPE, HVT)
- Experimenteller Telemanipulator für die Minimal-Invasive Chirurgie (IAI, HIT, HVT)

Ausgehend von den im Forschungszentrum vorhandenen Technologien war die Aufgabe der Demonstratoren zum einen, Anwendungspotentiale der Technologie aufzuzeigen, zum anderen, die Möglichkeit der Systemintegration zu erarbeiten. Diese Demonstratoren bilden aber vor allem die Basis für industrie-relevante Entwicklungsprojekte in enger Kooperation mit bzw. im Auftrag der Industrie.

4. Zusammenarbeit mit der Industrie

Die erfolgreiche Nutzung der Chancen der Mikrosystemtechnik durch die Industrie setzt voraus, daß eine Reihe von Problemen gelöst wird, zu denen hier nur einige Schlagworte genannt werden sollen: Finanzierbarkeit risikoreicher Produktinnovation, Technologiemanagement, Systemdenken, Innovationsmanagement. Es wird hierzu insbesondere auf das "Programm Mikrosystemtechnik 1994-1999" im Rahmen des Zukunftskonzeptes "Informationstechnik" verwiesen, das Anfang 1994 vom damaligen BMFT aufgelegt wurde [3]. Um seinen Beitrag zur Lösung der identifizierten Probleme zu leisten, ordnet sich das Forschungszentrum mit seinem Projekt Mikrosystemtechnik in die allgemeine forschungspolitische Zielsetzung des BMBF ein und richtet seine Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet ganz auf eine industrielle Anwendung aus.

Zur Zusammenarbeit mit der Industrie hat das Forschungszentrum mehrere Möglichkeiten, die in Abb. 2 zusammenfassend dargestellt und unten näher beschrieben sind. 1995 führt das PMT insgesamt 37% seiner Aktivitäten im Rahmen von verschiedenen vertraglich festgelegten Zusammenarbeiten mit der Industrie durch.

4.1 Industriekooperationen

Im vorwettbewerblichen Stadium werden in Form von Industriekooperationen entweder mit mehreren Partnern BMBF- bzw. EU-Projekte durchgeführt oder die Industrie beteiligt sich an gemeinsamen bilateralen Forschungsprojekten. Diese Arbeiten können i. a. der Vorlauforschung zugeordnet werden.

Das PMT beteiligt sich an BMBF- und EU-Verbundvorhaben, um im Rahmen solcher Verbundvorhaben seine F&E-Arbeiten industrienah ausrichten zu können, gegenüber den Industriepartnern seine Kompetenz zu demonstrieren und sich dadurch weitere Kooperationsmöglichkeiten zu erschließen.

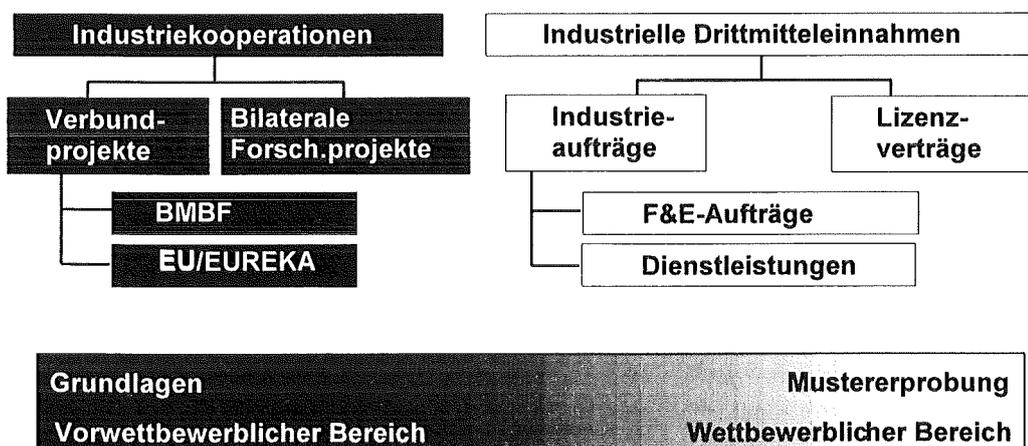


Abbildung 2: Formen der Zusammenarbeit des PMT mit der Industrie

Das PMT nimmt an folgenden BMBF-Vorhaben teil: AVT-KEO (Aufbau- und Verbindungstechnik als Basistechnologie für elektrische und optische Mikrosysteme), METEOR (Methoden- und Werkzeugentwicklung für den Mikrosystementwurf, MFV-Mikrosysteme (Fertigungsgerechte Montage- u. Fügeverfahren zum Aufbau von Mikrosystemen), Mikrofabrikationstechniken für Mikrosysteme und MINOP: (Mikrosystemtechnik zum Einsatz in der Minimal-Invasiven neurochirurgischen Operationstechnik).

Gemeinsam mit europäischen Partnern aus Industrie und Forschung werden im PMT folgende sechs EU-Verbundprojekte und zwei EUREKA-Projekte bearbeitet: COMET (Processing and Charact. of Cordierite-Metal Composite Structures), ECAMMA (Europ. Concerted Action on Giant Magnetostrictive Materials and Applications), IMICS (Integration of Micro-components in an Interventional Cardiac Catheter System), MAGNIFIT (Magnetostriction in Films for Integrated Technologies), Human Capital & Mobility (Microfabrication with Synchrotron Radiation), EUREKA-Projekt MASTER (Minimal Access Surgery by Telecommunications and Robotics) und EUREKA-Projekt DONS (Development of Nitrate Sensor)

Industriekooperationen in Form von **bilateralen Forschungsprojekten**, bei denen beide Partner an der Durchführung von F&E-Arbeiten etwa gleichgewichtig beteiligt sind, werden vom Forschungszentrum seit Beginn seiner Arbeiten zur Mikrotechnik (1986) durchgeführt, um so industrierelevante Entwicklungsarbeiten verwirklichen zu können. Grundlage ist i. a. ein Zusammenarbeitsvertrag (teilweise schon ergänzt durch einen Lizenzvertrag), in welchem die Rechte und Pflichten der einzelnen Partner geregelt sind, ebenso der gleichgewichtige Umfang der Arbeiten, den die beiden Partner leisten. Diese Arbeiten, die dem vorwettbewerblichen Bereich zuzuordnen sind, können i. a. durchgeführt werden, ohne daß finanzielle Mittel zwischen den Partnern ausgetauscht werden müssen.

Von den 1995 durchgeführten direkten Industriekooperationen werden zahlenmäßig 30% der Kooperationen mit Großunternehmen durchgeführt und 70% mit kleinen und mittleren Unternehmen (KMU). Bei einer Aufteilung nach dem Umfang der Arbeiten entfallen auf Großunternehmen etwa 10% und auf kleine und mittlere Unternehmen 90%.

4.2 Industrielle Drittmittelaufnahmen

Im wettbewerblichen Bereich wirbt das PMT Drittmittel aus der Industrie ein, indem gegen Bezahlung vorgegebene Aufträge abgearbeitet werden. Im Rahmen dieser Industrienaufträge werden für den industriellen Auftragsgeber Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt, die bis zur Mustererprobung gehen. Da das PMT über hochqualifiziertes Personal mit entsprechendem Know-how und über die entsprechenden Anlagen verfügt, werden aber auch Arbeiten mit

Dienstleistungscharakter vom PMT übernommen, sofern diese Arbeiten nicht von der Industrie selbst durchgeführt werden können.

Von den 1995 bearbeiteten Industrienaufträgen kamen - nach dem Auftragsvolumen bewertet - ein Drittel der Aufträge aus Großunternehmen und zwei Drittel von kleinen und mittleren Unternehmen.

Bei der Zusammenarbeit des Forschungszentrums mit der Industrie wird, besonders von den KMUs, dem Abschluß von Lizenzverträgen der Vorzug gegenüber der direkten Auftragsvergabe für Forschungsarbeiten gegeben. Dies ist dadurch begründet, daß eine deutliche Belastung für das Unternehmen erst im Falle eines wirtschaftlichen Erfolgs auftritt, und das Unternehmen diese Kosten dann aus den entsprechenden Einnahmen bestreiten kann.

Für den Abschluß von Lizenzverträgen sind - neben dem Know-how - Patente von besonderer Bedeutung. Daher werden für die industrierelevanten und schutzwürdigen Ergebnisse des PMT Patente angemeldet und der Industrie zur Nutzung angeboten. Seit 1993 wurden vom PMT 101 Patente angemeldet, 40 Patente wurden in diesem Zeitraum erteilt.

5. Kleinserienfertigung/Technikum

Um neue Produkte und Verfahren, die innerhalb des PMT entwickelt wurden, in die Industrie zu überführen, ist es i. a. nicht ausreichend, ihre Funktion an Labor-mustern zu demonstrieren. Es hat sich gezeigt, daß es für den industriellen Anwender vielmehr wichtig ist, die Übertragbarkeit des jeweiligen Fertigungsprozesses vom Labor auf industrielle Produktionsbedingungen nachzuweisen. Damit soll das Entwicklungsrisiko der Industrie deutlich reduziert werden. Um in diesem Sinne die Industrietauglichkeit seiner Entwicklungen nachzuweisen, hat das PMT damit begonnen, für einige von der Industrie nachgefragte Produkte die Fertigung von Kleinserien in Angriff zu nehmen. (Eine ausführliche Beschreibung einzelner Arbeiten erfolgt in den nachfolgenden Beiträgen der Session „Aspekte der Kleinserienfertigung von Mikrosystemen“.) Dazu werden die jeweiligen Fertigungseinrichtungen und -verfahren insbesondere im Hinblick auf Zuverlässigkeit, optimierten Personaleinsatz (Teilautomatisierung), Verfahrenssicherheit und Reproduzierbarkeit aller Verfahrensschritte weiterentwickelt, um so im Rahmen einer Fertigung im halbindustriellen Maßstab belastbare Daten sowohl zur Qualität der Produkte als auch zur Kostenstruktur des Fertigungsprozesses zu erarbeiten. Mit dieser Kleinserienfertigung werden also drei Zielrichtungen verfolgt:

1. *Musterfertigung*

Mikrotechnische Komponenten können in kleinen Stückzahlen für interessierte Kunden bereitgestellt werden. Es wird damit dem industriellen Anwender möglich zu prüfen, ob diese mikrotechnischen Neuentwicklungen bei vorhandenen Produkten eingesetzt

werden können und/oder ob sie Ausgangspunkt für neue Produkte sein können.

2. *Prozeßfähigkeit*

Mit der Errichtung und dem Betrieb von Einrichtungen zur Kleinserienfertigung will PMT die Voraussetzungen dafür schaffen, die Industrietauglichkeit der benutzten Produktionsprozesse zu demonstrieren. Das bedeutet, daß die zunächst im Labormaßstab von hochqualifizierten Technikern und Wissenschaftlern und mit teils aufwendiger technischer Infrastruktur entwickelten Verfahrensschritten derart weiterentwickelt werden, daß sie routinemäßig mit hoher Zuverlässigkeit und weitgehend unabhängig vom Geschick des Personals Produkte gleicher Qualität liefern.

3. *Wirtschaftlichkeit*

Die Kleinserie soll die Basisinformationen für eine Kostenanalyse der mikrotechnischen Verfahren bzw. Produkte liefern. Aus den Erfahrungen der Kleinserie lassen sich unmittelbar Folgerungen für die weitere verfahrenstechnische Optimierung ableiten, die dann in die industrielle Kostenanalyse zur Massenfertigung von Mikrostrukturen einfließen. Die Kleinserie bildet damit einen wichtigen Anreiz insbesondere für die mittelständische Wirtschaft, diese Technologien oder Prozeßschritte daraus zu übernehmen.

6. **Vorteile und Marktchancen der Mikro-systemtechnik**

Die Mikrosystemtechnik hat sich zu einer eigenständigen Technologie entwickelt, die viele unterschiedliche Fachdisziplinen vereint. Zahlreiche Methoden der Mikrosystemtechnik sind aus der Mikroelektronik ableitbar, jedoch wurde die Mikrosystemtechnik inzwischen durch eine Vielzahl neuer Technologien erweitert.

Werden die Prozesse und Werkstoffe der Mikroelektronik auf nicht-elektronische Problemstellungen angewendet, können mechanische, optische, fluidische oder chemisch sensitive Strukturen analog zu mikroelektronischen Schaltkreisen relativ kostengünstig gefertigt werden. Die Mikrosystemtechnik läßt sich jedoch auch von einer anderen Seite erschließen: Im Gegensatz zu den amerikanischen und den meisten europäischen Entwicklungslabors, in denen man sich der Mikrosystemtechnik von der Mikroelektronik kommend nähert, bewegt man sich in Japan aus der Feinwerktechnik kommend auf die Mikrosystemtechnik zu. Auch beim Forschungszentrum gehen die Arbeiten zur Mikrosystemtechnik nicht auf die Chip-Fertigung zurück, sondern seine F&E-Arbeiten bauten u.a. auf Basiswissen aus den Bereichen Feinwerktechnik, Mikromechanik, Handhabungstechnik, chemische Analytik, Informationstechnik und Materialwissenschaft auf. Inzwischen hat das Forschungszentrum dieses Know-how mit den anderen, für die Entwicklung von

Mikrosystemen wichtigen Kenntnissen durch das Projekt Mikrosystemtechnik verbunden. Mit diesen Technologien konnten neue Einsatzgebiete für die Mikrosystemtechnik erschlossen, und dadurch auch die Marktchancen erhöht werden.

Auf die großen Marktchancen der Mikrosystemtechnik, die in zahlreichen Studien der letzten Jahre für diese neue Technik prognostiziert wurden, soll hier nicht näher eingegangen werden. Zur Verdeutlichung mag ein Beispiel genügen: Von SPC (System Planning Corporation) "Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)" wird für das Jahr 2000 ein Gesamtumsatz weltweit von 13,9 Milliarden US-\$ vorhersagt [4].

7. **Strategie des Projekts Mikrosystemtechnik**

Im Rahmen dieses Statuskolloquiums wird ausführlich gezeigt, daß das Forschungszentrum aufgrund seiner interdisziplinären Struktur in der Lage ist, in einer großen Entwicklungsbreite, die viele unterschiedliche Fachdisziplinen einschließt, und in einer großen Entwicklungstiefe, die sich von Vorlaufforschung über Prozeßentwicklung und Mustererprobung bis hin zur Kleinserienfertigung erstreckt, essentielle Beiträge für die Mikrosystemtechnik zu erbringen. Das PMT wird auch in Zukunft in dieser Breite und Tiefe F&E-Arbeiten durchführen, um so die Mikrosystemtechnik ganzheitlich zu bearbeiten, zu einer Reduktion der Herstellungskosten beizutragen und damit die Hemmnisse zu ihrer Markteinführung zu beseitigen.

Das PMT möchte mit seinen Beiträgen zur Etablierung der Mikrosystemtechnik als eigenständiger hochinnovativer Technologie weiterhin eine führende Stelle einnehmen. Es strebt dabei eine zentrale Rolle als Technologievermittler und -promotor zwischen den individuellen Interessen der produzierenden Firmen an. PMT wird bei seinen Entwicklungen nicht nur die isolierte Nachfrage einzelner Industriefirmen befriedigen, sondern strebt die Entwicklung von Technologien und Systemen an, die von vielen Anwendern - für unterschiedliche Ziele - genutzt werden können. In seinem F&E-Programm zielt es nicht auf Insellösungen ab sondern auf komplette, vielfach verwendbare Mikrokomponenten und -systeme.

Durch diese Bündelung der Arbeiten zur Mikrosystemtechnik steht das in Kooperation (vgl. Kapitel 4) erarbeitete Know-how vielen Industriepartnern zur Verfügung. Die entwickelten Produktionsprozesse werden zur Herstellung vieler unterschiedlicher Komponenten und Systeme eingesetzt. Diese finden wiederum - durch Vereinheitlichung der Schnittstellen - eine breite Anwendung. Hierdurch wird sich auch für Systeme, die aufgrund der hohen Spezialisierung keine sehr große Stückzahlen erreichen, eine kostengünstige Fertigung aufbauen lassen.

7.1 Zukünftige Ausrichtung des Projekts Mikrosystemtechnik

Sein Potential zur Systementwicklung - mit dem Aufbau der Demonstratoren (vgl. Kapitel 3) deutlich gemacht - wird das PMT in Zukunft für die weitere Entwicklung dieser und neuerer Systeme bedarfsorientiert in Kooperation mit industriellen Partnern einsetzen. Das PMT wird sich hierzu auch weitere Bereiche der Mikrosystemtechnik (z. B. Fertigung Integrierter Schaltkreise) durch Kooperationen mit anderen wissenschaftlichen Institutionen erschließen.

Das PMT sieht auch in Zukunft weiterhin eine seiner wesentlichen Aufgaben darin, Vorlauforschung zur Mikrosystemtechnik durchzuführen und im Rahmen dieser Arbeiten neue Technologien, Prozesse, Mikrostrukturen und vor allem leistungsfähige Mikrosysteme zu entwickeln. Dabei wird selbstverständlich darauf geachtet, daß die Forschungsarbeiten so durchgeführt werden, daß die erzielten Ergebnisse an die Industrie transferierbar und in marktfähige Produkte umsetzbar sind. Dazu strebt das PMT eine intensive Kooperation mit der Industrie besonders auf strategisch wichtigen Gebieten an, da es hierin eine unverzichtbare Voraussetzung für die industrielle Umsetzung seiner Arbeiten sieht.

Die Verstärkung seiner Aktivitäten zur Kleinserienfertigung (vgl. Kapitel 5) sieht das PMT als essentiell an, um für die von ihm entwickelten Prozesse und Systemkomponenten möglichst rasch die Voraussetzungen zu deren Übernahme durch die Industrie zu schaffen.

7.2. Ausblick

Seit Gründung des Projekts vor drei Jahren wurden wesentliche Fortschritte bei der Entwicklung von Mikrosystemen und Subsystemen erzielt. Die bei Gründung des Projekts verfügbaren Prozesse wurden deutlich erweitert und verbessert und neue Prozesse wurden etabliert. Damit ist es möglich geworden, eine Vielzahl von funktionstüchtigen Mikrosystemen und Subsystemen herzustellen und durch umfangreiche Tests auch ihre Funktionstüchtigkeit nachzuweisen, wie durch die folgenden Beiträge ausführlich dargelegt wird. Diese Systeme konnten z.T. interessierten Partnern aus der Industrie als Labormuster für eigene Tests zur Verfügung gestellt werden.

Das PMT hat nun einen Entwicklungsstand erreicht, in welchem Fragen der kostengünstigen Herstellung, der Prozeßsicherheit und -dokumentation, sowie der Qualitätssicherung eine hohe Priorität bekommen. Durch Aufnahme seiner Arbeiten zur Kleinserienfertigung in das F&E-Programm hat es dem Rechnung getragen.

Um sein primäres Ziel zu erreichen, sowohl kurz- als auch langfristig die Industrie bei der Entwicklung marktfähiger Produkte nachhaltig zu unterstützen, hält

das PMT eine umfangreiche Zusammenarbeit mit der Industrie für unabdingbar. Um die Industriekooperation zu steigern, ist es aber auch notwendig, daß die Industrie die Entwicklungen des PMT aufgreift und durch frühzeitiges Engagement bei der Festlegung der Entwicklungsrichtungen mitwirkt.

Literatur:

[1] 1. Statuskolloquium des Projekts Mikrosystemtechnik, KfK 5238, Sept. 1993, Kernforschungszentrum Karlsruhe

[2] H. O. Moser, P. Bley, D. Einfeld, H. Schweikert, R. Steininger, Mikrofertigung und Analytik mit der Synchrotronstrahlenquelle ANKA: Dienstleistungsangebote an die Industrie, dieses Heft

[3] Mikrosystemtechnik 1994-1999, Programm im Rahmen des Zukunftskonzeptes Informationstechnik, Herausgeber BMFT, Bonn, Januar 1994

Mikrosystemtechnik 1994-1999, Jahresbericht 1994, Herausgeber VDE/VDI-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH, Teltow

[4] MicroElectroMechanical Systems, an SPC market Study, July 1994, System Planing Corporation, Arlington, VG, USA

Weitere Literaturangaben zu speziellen Themen der Mikrosystemtechnik sind den nachfolgenden Beiträgen zu entnehmen

Darstellung wichtiger Arbeitsthemen des Projektes

Physikalische Mikrokomponenten für die Mikrosystemtechnik

Wolfgang Menz

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Bei der Konzeption und der Herstellung von Mikrokomponenten sind die besonderen Voraussetzungen der Mikrostrukturtechnik, die ihre Wurzeln in der Mikroelektronik haben, zu berücksichtigen. Eine herausragende Rolle spielt dabei die „Zweidimensionalität“ der Strukturen, die durch die Natur der Photolithographie gegeben ist. Ebenfalls ist beim Entwurf von physikalischen Mikrostrukturen zu beachten, daß mit zunehmender Miniaturisierung das Verhältnis Oberfläche zu Volumen ansteigt. Die Oberflächeneigenschaften nehmen daher eine hohe Priorität ein und müssen beim Entwurf entsprechend berücksichtigt werden. Trotz dieser Einschränkungen lassen sich Mikrosysteme mit hohem Leistungspotential aufbauen. Die Möglichkeit, Arrays mit hoher Packungsdichte und geringen Fertigungskosten zu integrieren, eröffnet viele neue Möglichkeiten. Für eine industrielle Implementierung der Mikrosystemtechnik, insbesondere für ein breitgefächertes Anwendungspotential, wird ein Modulkonzept vorgeschlagen. Hiermit ist es auch kleinen und mittelständischen Unternehmen möglich, auf dem Markt der Mikrosystemtechnik tätig zu werden.

1. Einleitung

Die Mikrostrukturtechnik und daraus folgend die Mikrosystemtechnik leitet sich aus der Mikroelektronik her. Der technologische Sprung von der aus Einzelteilen gefertigten und von Hand abgeglichenen elektronischen Schaltung zum monolithischen integrierten Schaltkreis wiederholt sich hier auf mechanischem, optischem und fluidischem Gebiet. An die Stelle des experimentellen Versuchsaufbaus aus konventionellen Komponenten tritt die Simulation auf dem Rechner, aus der unmittelbar der Entwurf und die Optimierung der Komponente folgt.

Unkonventionell ist aber nicht nur der Entwurf einer mikromechanischen Struktur, sondern auch die Fertigungstechnik. Eine entscheidende Komponente der Mikroelektronik - und auch der Mikrosystemtechnik - ist die Photolithographie, mit der die auf dem Rechner entworfenen und optimierten Strukturen auf das Werkstück übertragen werden. Die Photolithographie ist einerseits die aufwendigste und kostspieligste Investition in einer Halbleiterfabrik, andererseits aber auch der Prozeßschritt mit dem die größten Erfolge der Mikroelektronik ermöglicht werden konnten.

Bemerkenswert ist die Tatsache, daß durch die optische Abbildung nur zweidimensionale Strukturen übertragen werden können. Zunächst erscheint dies wie ein schwerwiegender Nachteil, da der Konstrukteur gewohnt ist, dreidimensional zu entwerfen und zu fertigen. Dennoch eröffnet die zweidimensionale Photolithographie die Möglichkeit, Strukturen darzustellen, deren Strukturdetails im wesentlichen nur durch die Wellenlänge des verwendeten Lichtes limitiert sind. Die

Verschleißfreiheit der optischen Abbildung erlaubt eine extrem hohe Wiederholgenauigkeit der Strukturübertragung in einem Mengenfertigungsprozeß, und wegen der Parallelität der optischen Übertragung sind sehr hohe Informationsflüsse zu erreichen.

Ein weiterer Vorteil der Mikroelektronik ist die konsequente Anwendung des Batch-Verfahrens. Da die Prozesse an allen Strukturen eines Wafers und an allen Wafern einer Charge gleichzeitig und simultan angreifen, ist die Fertigungstreuung äußerst gering, die Ausbeute entsprechend hoch und trägt ebenfalls zur Reduzierung der Kosten eines Einzelelementes oder eines ICs bei, obwohl die Absolutkosten für einen Halbleiterprozeß im Laufe der Jahrzehnte durch ständig steigende Anforderungen um Größenordnungen angewachsen sind.

2. Designprinzipien für Mikrokomponenten

Die Mikrosystemtechnik wird aber nicht nur aus der Mikroelektronik allein gespeist. Insbesondere in Japan, wo man sich bei der Massenfertigung hochpräziser Konsumgüter, wie etwa beim Videorecorder oder bei der Videokamera, Kompetenz in der mechanischen Fertigung im Sub-Mikrometer-Bereich erworben hat, bewegt man sich von der Feinwerktechnik auf die Mikrosystemtechnik zu. Prototypen lassen sich in „micromachine technology“ oder in Mischtechnik häufig schneller und kostengünstiger realisieren als in der aus der Mikroelektronik abgeleiteten „reinen“ Mikrosystemtechnik. Auch im Forschungszentrum Karlsruhe wird ein spanendes Mikrofertigungsverfahren unter Einsatz von Mikrodiamanten als Schneidwerkzeug

angewendet. Damit können sowohl im direkten Verfahren Mikrokomponenten (Mikrowärmetauscher, Mikroreaktoren) oder auch Prägestempel für das Heißprägen (Mikroventile, Mikropumpen) hergestellt werden.

Wenn also die konventionelle Feinwerktechnik wichtige Beiträge zum Mikrosystem liefert, so darf dennoch nicht übersehen werden, daß die Grundkonzepte der Mikrosystemtechnik aus der Mikroelektronik kommen. Ein entscheidendes Faktum der Mikroelektronik, nämlich die Zweidimensionalität, soll hier noch einmal aufgegriffen und im Detail behandelt werden. Mechanische Konstruktionen müssen in eine Zweidimensionalität umgesetzt werden, um sie mit den Mitteln der Photolithographie, also eines Projektionsverfahrens mit einer definierten Schärfenebene, auf das Werkstück (Substrat) übertragen zu können. Allzu häufig wird das konventionelle Maschinenelement nur durch lineare Verkleinerung in den Mikrometerbereich projiziert, ohne dabei zu berücksichtigen, daß etwa das Verhältnis Oberfläche zu Volumen linear mit dem Verkleinerungsmaßstab ansteigt. Eigenschaften der Oberfläche spielen daher in der Mikrosystemtechnik eine dominierende Rolle.

Andere physikalische Größen lassen sich ebenfalls nicht einfach auf Mikrostrukturen linear herunterskalieren. Wenn die Strukturen die Korngröße der Werkstoffe erreichen, sind nichtlineare Abhängigkeiten der Werkstoffparameter von der Strukturgröße zu erwarten. Es ist bekannt, daß sich in Dünnschichttechnik Materialparameter wie Härte, Reibkoeffizient, Korrosionsfestigkeit oder Durchschlagsfestigkeit erreichen lassen, wie sie im massiven Werkstoff nicht möglich sind. Damit können Mikrostrukturen mit Eigenschaften ausgestattet werden, die die der Makrokomponenten bei weitem übertreffen.

Mechanische, optische und fluidische Strukturen, die mit den Mitteln der Mikroelektronik gefertigt wurden, sind durch die Verwendung der Photolithographie und der optischen Übertragung der Strukturen auf das Werkstück im wesentlichen zweidimensional. Die dritte Dimension ergibt sich im allgemeinen zwangsläufig durch die Prozeßschritte der verwendeten Technologie. Die begrenzenden Flächen bei der Silizium-Mikromechanik sind die kristallographischen (111)-Flächen, in der LIGA-Technik wird die dritte Dimension durch die Strahlführung der Synchrotronstrahlung bestimmt.

3. Realisierung von Mikrosystemen

Im wesentlichen war bisher nur die Rede von der Mikrostrukturtechnik, also von den Grundprozessen, mechanische, fluidische, optische Einzelstrukturen auf einem Substrat darstellen zu können. Die Mikrostrukturtechnik ist eine zwar notwendige, aber nicht hinreichende Voraussetzung für das Mikrosystem. Das Mikrosystem aber ist eine Kombination von vielen Einzelelementen, die kostengünstig und in großer Packungsdichte auf einem

Substrat hergestellt werden, um dann durch intelligente Verknüpfung dieser Einzelelemente zu einer hohen Gesamtleistung zu kommen.

Ein entscheidender Vorteil der Mikrosystemtechnik ist die Möglichkeit der Implementierung von Sensorarrays. Mit der Mikrostrukturtechnik lassen sich viele Sensorelemente kostengünstig in hoher Packungsdichte auf einem Substrat unterbringen. Diese Sensoren können z. B. alle gleichartig sein, um durch Mittelwertbildung eine bessere statistische Gesamtaussage und durch Redundanz eine höhere Zuverlässigkeit des Gesamtsystems erreichen zu können. Andererseits lassen sich die Sensorelemente in ihrem Empfindlichkeitsbereich entsprechend stufen, so daß damit der Arbeitsbereich erweitert werden kann. Ebenso können Sensorelemente mit unterschiedlichen Charakteristiken oder Sensorelemente mit speziellen geometrischen Anordnungen gleichzeitig eine Fülle von Informationen aus der Umwelt aufnehmen. Ein Beispiel hierfür ist ein System, mit dem Beschleunigungen in Amplitude und beliebiger Richtung im Raum aufgenommen werden können. Die Sensoren, die in LIGA-Technik hergestellt wurden, lassen sich ohne großen Justieraufwand präzise in x- und y- Richtung ausrichten. Die Beschleunigung in z-Richtung, also normal zur Oberfläche des Substrates, wird am besten durch Sensoren in Siliziumtechnik gemessen (Abb. 1). An diesem Beispiel sieht man, wie die Kombination unterschiedlicher Technologien zu eleganten, kostengünstigen Lösungen führen kann. Die technische Realisierung eines zweidimensionalen Sensorsystems mit Redundanz ist in Abb. 2 zu sehen.

Bei Mikroaktorelementen liegt der Vorteil des Strukturierungsverfahrens darin, daß redundante Subsysteme kostengünstig und in hoher Packungsdichte aufzubauen, die bei Ausfall einer Komponente aktiviert werden und somit die Zuverlässigkeit des Systems erheblich verbessern. Mit diesen Möglichkeiten lassen

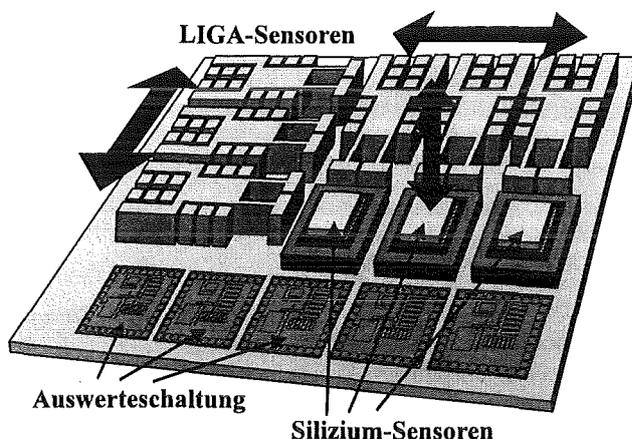


Abb. 1. Schema eines dreidimensionalen Beschleunigungsmeßsystems in einer Kombination von LIGA-Technik (x- und y-Richtung) und Si-Mikromechanik (z-Richtung).

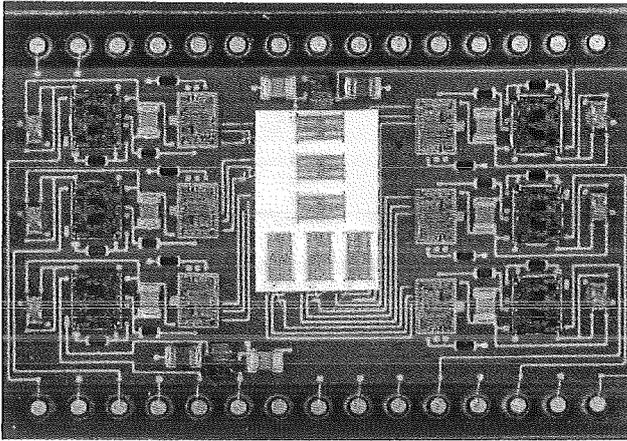


Abb. 2. Realisierung eines zweidimensionalen Beschleunigungssystems mit jeweils 3 Sensoren in LIGA-Technik für die x- und y-Richtung.

sich Systeme konzipieren, die sich ständig selbst überwachen und sich im Notfall auch selbst reparieren können.

Besonders kritisch bei beweglichen Mikrostrukturen, also insbesondere bei Mikroaktoren sind Friktion, Verschleiß und Passungsspiel. Geeignete Konzepte vermeiden daher weitgehend gleitende oder rollende Reibung und bevorzugen elastische Linearbewegungen von Biegeelementen oder Membranen. Beispiele für reibungslose Antriebe sind der elektrostatische Linearaktor, bei dem sich kammartig angeordnete Fingerstrukturen gegeneinander verschieben. Die Rückstellkräfte werden dabei durch elastische Aufhängung der Kammstrukturen bewirkt. Ein weiteres Funktionsmuster in dieser Konzeption stellt das elektromagnetische Relais dar, dessen Anker ebenfalls elastisch aufgehängt ist. Dieses Beispiel ist auch wegen der Kombination unterschiedlicher Werkstoffe (Permalloy, Gold, Kupfer) in einer LIGA-Struktur von besonderem tech-

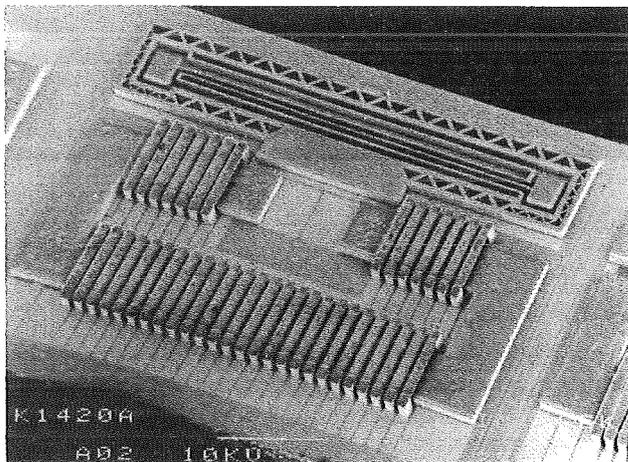


Abb. 3. Beispiel für eine reibungsfreie Ankerbewegung eines Relais in LIGA-Technik.

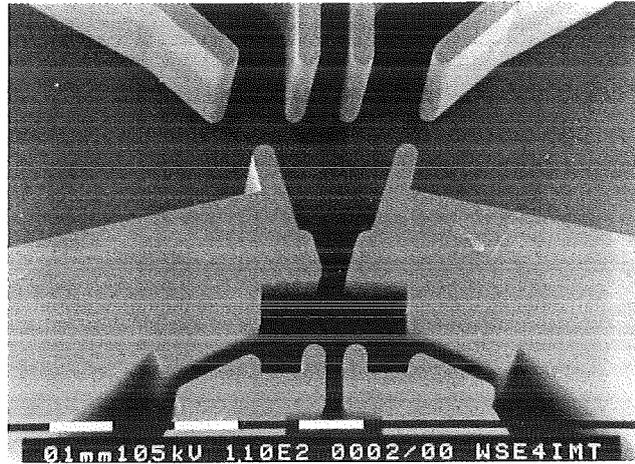


Abb. 4. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines bistabilen fluidischen Schalters. Der Hauptfluidstrom tritt unten Mitte in den Schalter ein und verläßt den Raum oben links oder rechts je nach Umsteuerung durch einen Steuerimpuls aus den mittig angeordneten Steuerkanälen.

nologischen Interesse (Abb. 3).

Ein Konzept, das gänzlich ohne mechanische Reibung auskommt, stellen fluidische Schalter oder Oszillatoren dar. Fluidische Elemente sind aus vielerlei Sicht geeignete Komponenten für die Mikrosystemtechnik. Als Beispiel für ein fluidisches Element sei der bistabile Schalter in LIGA-Technik angeführt (Abb. 4), dessen Hauptfluidstrom sich durch kurze Druckimpulse aus den Steuerleitungen wahlweise in die beiden Ausgänge leiten läßt. Fluidische Schalter lassen sich - ähnlich wie elektronische Schalter- zu komplexen logischen Funktionen integrieren. Durch die Rückführung eines Teils des Hauptfluidstromes in die Steuerleitung kann man einen fluidischen Oszillator darstellen. Der Betrieb fluidischer Elemente mit inerten Medien wie Wasser oder Stickstoff erweist sich als besonders vorteilhaft bei der Anwendung im Bereich der minimal invasiven Therapie. Mechanische Verschleißfreiheit und hohe Energiedichte sind weitere Vorteile in fluidischen Systemen.

Neben der Medizintechnik entwickelt sich die optische Kommunikationstechnik zu einer Domäne der Mikrosystemtechnik. Bei optischen Komponenten zeigt insbesondere die LIGA-Technik eine große Leistungsfähigkeit. Hervorzuheben ist einerseits die Materialvielfalt von Werkstoffen mit interessanten optischen Eigenschaften, andererseits die Möglichkeit der Formgebung von Strukturen mit optisch ebenen Seitenwänden und sehr hohen Aspektverhältnissen. In einer Kleinserienfertigung, die im Institut für Mikrostrukturtechnik aufgebaut wurde, konnte nachgewiesen werden, daß sich optische Strukturen mit Strukturdetails bis herab zu 200 nm (Mikrospektrometer) zuverlässig in einem industriellen Prägeverfahren vervielfältigen lassen (Abb. 5).

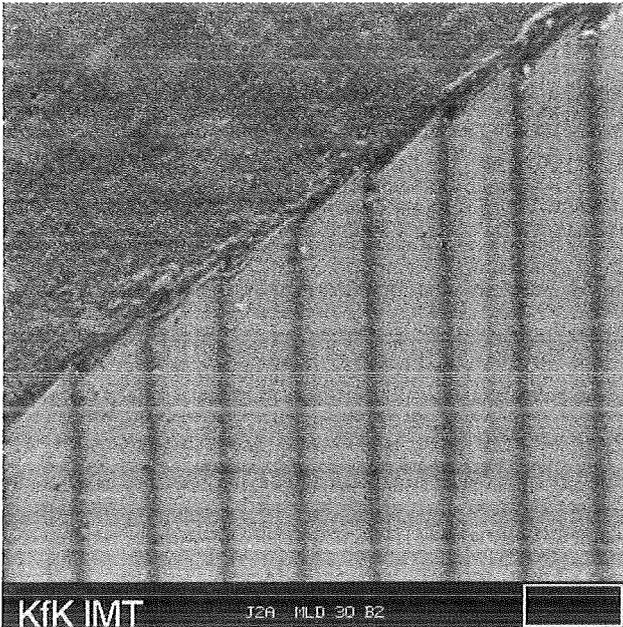


Abb. 5. Detail einer in Prägetechnik abgeformten optischen Mikrostruktur. Die Stufenhöhe des Beugungsgitters eines Mikrospektrometers beträgt 200 nm.

4. Industrielle Implementierung und Ausblick

Eine wichtige Zielgruppe für die industrielle Implementierung der Mikrosystemtechnik stellen die kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) dar, die entweder auf wenige Spezialprodukte spezialisiert sind, oder vielfältige Nischenlösungen bei jeweils kleinen Stückzahlen anbieten. Hohe Flexibilität in der Produktfertigung und schnelle Entwicklungszyklen bei geringen Vorleistungen und Investitionen sind hier von höchster Priorität. Dazu eignet sich ein Modulkonzept für die Mikrosystemtechnik, wie es schematisch in Abb. 6 dargestellt ist.

Die Module bestehen aus Einzelkomponenten oder Subsystemen, etwa Arrays von Sensoren, Auswerteschaltungen und weiteren Komponenten. Ein Modul könnte das Analogon zum Gate-Array der Mikroelektronik sein, wie gerade von den KMUs in vielfältiger Weise eingesetzt wird. Auch das Modul der Mikrosystemtechnik müsste individuell verschaltbar sein, um vielfältige Aufgaben erfüllen zu können. Mit einem solchen Modul-Konzept könnte ein Katalog von Komponenten bereitgehalten werden, aus dem industrielle Anwender ihre individuellen Mikrosystemen zusammensetzen.

Bereits heute zeigt sich schon ein außerordentlich großes Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten der Mikrosystemtechnik. Eine erste Einschätzung lässt 4 große Anwendungsgebiete erkennen:

1. Allgemeine Meß- und Regeltechnik.
2. Kommunikationstechnik.
3. Umwelttechnik.
4. Medizintechnik

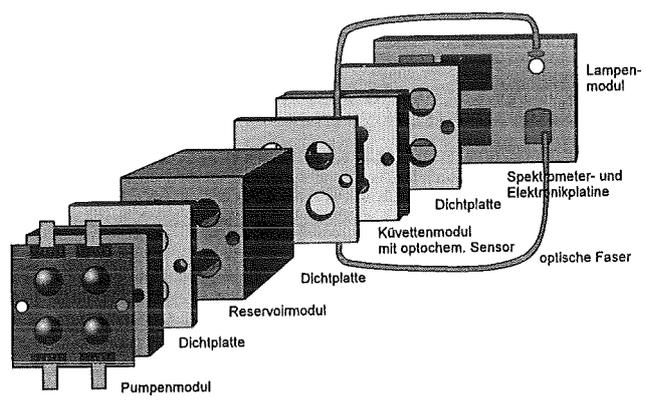


Abb. 6. Schema eines Modulsystems für Mikrosysteme. Im vorliegenden Beispiel sind die Module für den Aufbau eines optochemischen Schadstoffanalyzers aufgelistet.

Neben diesen bereits heute bekannten Anwendungsfeldern werden sich in Zukunft sicherlich noch völlig neue Felder auftun, die bis heute noch nicht einmal angedacht sind. Erst die enge Kooperation von Technologieentwicklern und industriellen Anwendern wird neue Ideen freisetzen zur Entwicklung neuer Produkte und Produktgruppen.

Literatur:

Alle in diesem Artikel erwähnten Entwicklungen und Funktionsmuster werden in den folgenden Veröffentlichungen im Detail vorgestellt. Auf ein Literaturverzeichnis wird deshalb an dieser Stelle verzichtet.

Chemische Mikroanalyzesysteme: Neuere Entwicklungen und ihre technologische Umsetzung

Hans J. Ache
Institut für Radiochemie

Zusammenfassung

Die Entwicklung von Chemischen Mikroanalyzesystemen wurde fortgeführt mit dem Ziel, insbesondere die Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der im Institut hergestellten Prototypen weiter zu verbessern und sie so für industrielle Anwendungen einsatzfähig zu machen. Außerdem wurde ihr Anwendungsbereich durch die Verwendung neuartiger Sensorarraysysteme erheblich erweitert. Grundlegende Arbeiten sollen mittel- oder langfristig zur Entwicklung neuartiger Sensorprinzipien und Methoden führen. Hierbei stehen die Untersuchungen zur „Analytik in kleinsten Volumina“, kombinierte Anreicherungs- und Meßtechniken mittels Multischicht-(Membran)-Systemen sowie Zuverlässigkeitsstrategien im Mittelpunkt des Interesses.

1. Einleitung

Im Rahmen dieses Statuskolloquiums soll dargestellt werden einmal die von dem Institut für Radiochemie (IRCh) in den letzten zwei Jahren verfolgte Strategie für die Entwicklung von chemischen Mikroanalyse-Systemen für den Einsatz in Forschung, Prozeß- und Qualitätskontrolle, Umwelt-überwachung, Arbeitssicherheit und Medizintechnik einschließlich ihrer Umsetzung in kommerzielle Produkte. Zum anderen sollen Ansätze für die mittel- und langfristig zu betrachtende Erforschung neuartiger Methoden und Techniken, die zum Teil auch auf Erkenntnissen und Anforderungen beruhen, die sich aus den bisherigen Arbeiten ergeben haben, aufgezeigt werden.

2. Markt- und Technologiesituation

Zum besseren Verständnis insbesondere der ersten Aufgabe erscheinen einige grundsätzliche Bemerkungen zu der Markt- und Technologiesituation auf dem Gebiet der „Chemischen Analyse-Systeme“ im allgemeinen angebracht. Obwohl bei allen Beteiligten, Entwicklern wie Anwendern, kein Zweifel besteht, daß hier insbesondere bei der in-situ- oder Vor-Ort-Analytik, womöglich noch als Echtzeit-methode, ein großer Bedarf an zuverlässigen und kostengünstigen Systemen besteht, dürfen die für diesen Bedarf geltenden Rahmenbedingungen nicht vergessen werden. Es ergibt sich hierbei folgendes Bild:

Unterschiedliche Anwendungen und Einsatzgebiete sowie Vielfalt und Komplexität der Meßaufgaben verlangen hohe (kunden)spezifische Ausrichtung der

Analysesysteme bei mittleren und kleineren Stückzahlen.

Massenprodukte sind nicht oder nur selten in Sicht. Produkte geringer Stückzahlen sind jedoch in vielen kleinen Teilmärkten auszumachen. Diese Teilmärkte zeigen technologisch eine große Vielfalt.

Hohe Zuverlässigkeit, Langzeitstabilität und lange Standzeit sind unverzichtbare Voraussetzungen für erfolgreichen Einsatz und Akzeptanz beim Anwender: Technologische Landschaft ist nicht nur heterogen, sondern zugleich auch sehr anspruchsvoll.

Haupteinsatzfelder sind die Überwachung kleinerer Prozeßeinheiten (Automotoren, Haushaltsgeräte etc.), flächendeckende Umweltanalytik oder medizinische Diagnostik. Da Anschaffungs- und Betriebskosten in angemessenem Verhältnis zu den Gesamtkosten der zu überwachenden Anlage stehen müssen, sind die Herstellungskosten für diese chemischen Analysesysteme extrem niedrig zu halten.

Der daraus resultierenden Forderung nach Zuverlässigkeit und gleichzeitig niedrigen Herstellungskosten ist mit den derzeit existierenden Technologien nur schwer nachzukommen.

Dagegen verspricht das Konzept eines mikrosystem-technischen Ansatzes, das eine systemorientierte Integration aller relevanten Funktionen in hybrider oder monolithischer Weise auf engem Raum ermöglicht, verbunden mit hoher Flexibilität und Adaptionfähigkeit des Fertigungsprozesses durch fortgeschrittene Software, eine Lösung für dieses Problem.

Ein nach diesen Gesichtspunkten gefertigtes (Totales) Chemisches Mikroanalyzesystem sollte dann als wesentliche Komponenten ein zentrales Fluidiksystem mit Mikropumpen und -ventilen für Probenahme, Probearbeitung und Einrichtungen zum Transport von Analyten, Kalibrierlösungen und anderen Hilfsreagenzien enthalten. Es kann entweder monolithisch oder in Hybridbauweise aufgebaut sein, am wahrscheinlichsten und zweckmäßigsten als Anordnung von Modulen, die die einzelnen Subsysteme enthalten. Das Subsystem, das die Identifikation und Quantifikation der Analyten durchführt, besteht entweder aus mikrosystemkompatiblen Mikrosensoren und/oder analytischen Mikroproben, d. h. miniaturisierten konventionellen Chemischen Analysengeräten oder Teilen hiervon. Signal- und Datenauswertung erfolgt mit Mikrokontrollern und -prozessoren.

Während Signalaufbereitung und Datenverarbeitung bereits einen hohen Stand der Technik erreicht haben, gilt das noch keineswegs für alle Mikrokomponenten eines solchen Systems. Mikroaktoren wie Mikropumpe und -ventile wie auch chem. Mikrosensoren werden zunehmend verfügbar, aber sie haben in den meisten Fällen noch nicht den Test für Langzeitstabilität, Zuverlässigkeit und Lebensdauer unter Bedingungen, wie man sie in der Praxis vorfindet, bestanden.

Die Weiterentwicklung dieser Komponenten wie auch des gesamten Systems dürfte sich deshalb als sehr zeit- und kostenintensiv erweisen, und es ist sicher richtig, bevor man weitergehende Verpflichtungen eingeht, sich den Fragen zu stellen, die oftmals von Kritikern der Mikrosystemtechnik im allgemeinen und der Mikroanalyse-Systeme im besonderen aufgeworfen werden. Die Miniaturisierung und die damit verbundene weitgehende Integration ist technologisch elegant und intellektuell attraktiv, aber ist sie wirklich wünschenswert und rechtfertigt sie die damit verbundenen hohen Entwicklungskosten? Und wo sind ihre klar definierten Anwendungen und das Marktpotential?

Die Schlüsselfrage ist die nach dem Marktpotential, denn nur daraus läßt sich abschätzen, ob der Entwicklungsaufwand gerechtfertigt ist. Das Marktpotential kann auf zwei Gebieten gesehen werden. Einmal können Mikroanalyse-Systeme konventionelle Geräte ersetzen, aber nur dann, wenn sie mit zumindest gleichen oder besseren Leistungsdaten zu einem beträchtlich günstigeren Preis angeboten werden können. Auf der anderen Seite können die mit Miniaturisierung verbundenen Besonderheiten neue Marktpotentiale und Anwendungsgebiete erschließen, wenn eine oder mehrere der folgenden Möglichkeiten realisiert werden können:

- Herstellung kostengünstiger und zuverlässiger Geräte für die Prozeß- und Umwelttechnik, wo eine analytische Überwachung und Kontrolle zwar wünschenswert, aber aus Kostengründen bisher nicht möglich war
- Herstellung von Mikroanalyse-Systemen für die Bestimmung von Analyten in extrem kleinen Volumina, verbunden mit einem stark reduzierten Chemikalienverbrauch und Abfall sowie erheblich verkürzter Analysendauer
- Herstellung von Mikroanalyse-Systemen für die Anwendung in biologischen und medizinischen (in-vivo) Untersuchungen, wo kleine Abmessungen entscheidend für den Zugang zu den Meßpunkten im Organismus sind (beispielsweise endoskopische Werkzeuge in der Minimal-Invasiven Chirurgie)
- Herstellung von Mikroanalyse-Systemen, bei denen die mit der Miniaturisierung unmittelbar verbundenen technischen Gegebenheiten zu einer drastischen Verbesserung der Leistungsdaten führen

3. Zielrichtung des IRCh während der letzten zwei Jahre

Aus diesen Überlegungen ergibt sich dann zwangsläufig die Zielrichtung für die IRCh-Arbeiten. Sie lassen sich dementsprechend kurz wie folgt zusammenfassen:

Applikationsorientierte Entwicklungen von innovativen Meß- und Regelsystemen, realisiert auf der Basis hochintegrierter chemischer Analysensysteme, die den Anforderungen einer kontinuierlichen und zuverlässigen Vor-Ort-Analytik in diversen Bereichen wie Prozeßtechnik, Umweltüberwachung oder Medizintechnik entsprechen.

Wie sieht das nun konkret aus:

Im Hinblick auf die von den Zuwendungsgebern gewünschte enge Kooperation mit der Industrie und einer schnellen Umsetzung der F & E-Ergebnisse in kommerzielle Produkte standen die anfänglichen Arbeiten des IRCh auf diesem Gebiet unter dem Aspekt der Entwicklung erster funktionsfähiger Labormuster.

Diese sollten sowohl das Potential der verwendeten Techniken wie auch die IRCh-Kompetenz demonstrieren, damit das Interesse der einschlägigen Gerätehersteller und Anwender wecken und dem IRCh als Einstieg in anspruchsvolle Innovationsprojekte in Zusammenarbeit mit der Industrie dienen.

Diese Entwicklungen schließen ein:

- SAW (Massensensitive) Gasanalyzesysteme
- Metalloxdifilm Gasanalyzesysteme
- Optische Schadstoffanalyzesysteme (gasförmig/flüssig)
- Elektrochemische Flüssigkeitsanalyzesysteme
- Evanescent Field Absorbance Sonde
- Photothermische Spektroskopie
- Fluoreszenz-Biosensor-Systeme (Herbizid-Wirkstoffsensor)

Es handelt sich dabei um originäre IRCh-Entwicklungen, basierend auf eigenen Grundlagenuntersuchungen und zum größten Teil durch eigene Patente oder Gebrauchsmuster abgesichert. Die praktische Umsetzung erfolgt bereits in den meisten Fällen in vertraglicher Zusammenarbeit mit Industriefirmen.

Da alle diese Systeme während dieses Statuskolloquiums in anderen Beiträgen noch detaillierter dargestellt werden, soll hier nur auf zwei näher eingegangen werden, um die Vorzüge einer mikrosystemtechnologischen Vorgehensweise zu verdeutlichen:

3.1 Massensensitives Gasanalyzesystem

Das erste ist das Massensensitive (SAW) Gasanalyse-System. Die Idee zu diesem System basiert auf der Forderung nach einem schnellen und kostengünstigen Analysegerät, das insbesondere höhermolekulare Substanzen in der Gasphase identifizieren und quantifizieren kann. An seiner Entwicklung lassen sich besonders gut die Vorzüge eines systemtechnischen Ansatzes demonstrieren. Die Spezifikationen, d. h. die von dem Gerät erwartete Leistungsfähigkeit, waren klar vorgegeben. Die verlangten Nachweisgrenzen wie auch die Empfindlichkeit orientierten sich an den Werten für die maximale Arbeitsplatzkonzentration für einige für die Umweltüberwachung relevante leichtflüchtige Substanzen. Zudem waren die maximalen Ansprechzeiten durch die Analysedauer und andere Leistungsdaten wie auch Größe und Energieverbrauch definiert. Im Hinblick auf eine schnelle Umsetzung in ein industrielles Produkt wurde deshalb ein top-down-Ansatz, der auf einem Zusammenwirken von in der Praxis bewährten Bauelementen beruhte, gewählt und konsequent durchgeführt. Als ersten Schritt galt es, entsprechend der vorliegenden Spezifikationen, ein chemisch sensitives Bauelement für die Messung zu finden. Als Basis dafür boten sich SAW-Bauteile an, die in der Elektronikindustrie, allerdings für einen anderen Zweck, mit Mitteln der Mikroprozeßtechnik millionenfach und mit äußerster Präzision hergestellt werden und außerordentlich kostengünstig erhältlich sind.

Die unterschiedliche chemische Sensitivität wurde durch Beschichten dieser Transducer mit verschiede-

nen kommerziell erhältlichen und ebenfalls in der Gaschromatographie seit Jahrzehnten bewährten sehr stabilen Polymerphasen erreicht. Aus den bekannten Verteilungskoeffizienten der zu untersuchenden Analyten zwischen Gas- und Polymerphase ließen sich die Nachweisgrenzen für diese Analyte und das Selektivitätsverhalten der unterschiedlich beschichteten SAW-Elemente abschätzen und sinnvolle Sensoranordnungen durch Modellrechnungen zusammenstellen. Besondere Aufmerksamkeit mußte der Signalauswertung zuteil werden, auch um das für diese Nachweisgrenzen entscheidende Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu optimieren. Dazu kamen Entwicklungen für die Thermostatierung der Einheit sowie ein selbstentwickeltes zentrales Fluidsystem mit kommerziell erhältlichen und bewährten Minipumpen und -ventilen sowie die gesamte Prozeßsteuerung. Das Resultat ist ein vollautomatisch arbeitendes, sich selbst kalibrierendes System, das selbständig und kontinuierlich Gasproben nimmt und deren Zusammensetzung qualitativ und quantitativ mittels eines neuronalen Netzes als Auswertesystem analysiert. Diese gelungene Umsetzung einer Idee in ein nahezu marktfertiges Produkt ist damit ein gutes Beispiel für eine konsequente systemtechnologische Vorgehensweise unter Ein-schluß von Mikrobauteilen.

3.2 Evanescent Feld Absorbance Sonde

Als zweites Beispiel und als Beispiel dafür, wie die Miniaturisierung inherent zu ganz entscheidenden technischen Verbesserungen führen kann, soll die Evanescent Feld Absorbance Sonde (EFAS) angeführt werden. Die Optische Spektroskopie im Nahen Infrarot ist z. Zt. die am stärksten verfolgte Technik in der Prozeßüberwachung. Das hat seinen Grund darin, daß in diesem Spektralbereich das optische Signal über weite Entfernungen hinweg mittels Quarzfaserlichtleitern transportiert werden kann und das Signal im NIR-Bereich eine Fülle von Informationen auch über relevante organische Substanzen beinhaltet. Die Grundidee war es zu Beginn der Arbeiten auf diesem Gebiet, ein Gerät zur kontinuierlichen Überwachung der Kontamination von Abwässern wie auch des Grundwassers u. a. zu entwickeln. Da die toxischen Substanzen meist nur in kleinen Konzentrationen vorliegen, war es nötig, einen kontinuierlichen Anreicherungsschritt vorzuschalten. Dazu wurde eine optische EFAS-Sonde aus einer Quarzfaser mit einem hydrophoben Polysiloxan-cladding entwickelt (Durchmesser 200 - 400 µm). In einer wäßrigen Lösung, die unpolare Schadstoffe wie z. B. chlorierte Kohlenwasserstoffe enthält, reichern sich diese in hydrophoben Polysiloxanschichten an und werden von der evaneszenten Welle, die eine kurze Distanz in die Polymerschicht eindringt, ohne Interferenzen von den breiten O-H-Absorptionsbanden des Wassers, das nicht in die Polymerschicht eindringen kann, wahrgenommen. Diese in Feldversuchen be-

währte Makrosonde besteht aus ca. 12 m aufgespulten Quarzfasern mit Polysiloxancladding und wird mit einem einfachen selbstkonstruierten Prozeßfilterphotometer zusammengekoppelt und von verschiedenen Anwendern getestet. Chlorierte Wasserstoffe können damit im ppm- und sub-ppm-Bereich nachgewiesen werden. Eine nun erfolgte Miniaturisierung des Sensorelements sollte folgenden technischen Verbesserungen dienen:

- Erzielung einer größeren mechanischen Stabilität
- Aufbringung optimierter Polymerschichten für den jeweiligen Analyt oder die Analytgemische
- Erreichen besserer Nachweisgrenzen bei gleichzeitiger Reduktion der geometrischen Dimensionen (mikrosystem-kompatibel)

Dies konnte durch den Einsatz von planaren, sehr klein dimensionierten Wellenleitern (Durchmesser 10 µm) erreicht werden. Diese wurden durch den Austausch von Ag- gegen Na-Ionen in Borosilikat-Gläsern in mikrotechnischen Prozessen hergestellt und mit geeigneten Polymeren beschichtet. Diese wesentlich kleineren Strukturen erhöhen, wie sich vorausberechnen läßt, das evaneszente Feld um den Faktor 60 und mehr. So zeigt zum Beispiel ein planarer Wellenleiter mit einer 17 cm langen Schleife bessere Nachweisgrenzen für gasförmiges Trichlorethen (TCE) als ein 12 m langer Faserwellenleiter. IO-Bauteile mit mehreren Schleifen bis zu z. Zt. 56 cm bei bemerkenswert niedrigen Dämpfungszahlen wurden gerade in Zusammenarbeit mit der Universität Dortmund hergestellt. Damit sind noch wesentlich bessere Nachweisgrenzen (ppb-Bereich) zu erwarten. Die Entwicklung von Mikrolichtquellen, Mikrospektrometern und Diodenarrays verläuft parallel dazu und soll schließlich zu dem Kompaktgerät führen, das all diese Komponenten enthält. Dieses Beispiel sollte noch einmal die mit der Miniaturisierung und nur mit ihr möglichen technischen Verbesserungen demonstrieren, wie hier stark verbesserte Nachweisgrenzen und mechanische Stabilität.

4. Mittel- und langfristige Entwicklungsziele

Was sind nun die mittel- und langfristigen Ziele? Zunächst einmal sollen die aus den bisherigen Arbeiten resultierenden Erfahrungen genutzt werden, um Forschungsprojekte zu etablieren, die dann als gemeinsam mit der Industrie oder dem Anwender geplante und am Ende erfolgsbewertete Innovationsprojekte fortgesetzt werden. Beispielhaft dafür sollen die folgenden Fragestellungen angegangen werden, die auf der einen Seite einen hohen wissenschaftlichen Anspruch beinhalten und dabei gleichzeitig von aus-

schlaggebender Bedeutung für technische Neu- und Weiterentwicklungen sind:

4.1 Zuverlässigkeitsstrategien für Chemische Mikroanalyse-Systeme

Ein entscheidender Durchbruch zu einer breiten industriellen Anwendung von Chemischen Mikroanalyse-Systemen setzt voraus, daß sie sowohl in allen technischen Anforderungen wie auch ökonomischen Gesichtspunkten wie Anschaffungs- und Betriebskosten den derzeitigen (Makrosystemen) überlegen sind. Ein Schwachpunkt in vielen Anwendungen ist jedoch zur Zeit noch die beschränkte Lebensdauer und Stabilität der in diesen Systemen eingesetzten chemischen Mikrosensoren.

Es gilt daher, neue Zuverlässigkeitsstrategien zu entwickeln, die insbesondere eine verlässliche Lebensdauer- und Funktionsvorhersage des chemischen Sensors erlauben, wie es bei physikalischen Sensoren schon seit längerem der Fall ist. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Frage der Selbstkalibration der chemischen Mikrosensoren unter Verzicht auf störanfällige Kalibrationszyklen mittels Ventilen und Pumpensystemen etc. Eine ständige Selbstüberwachung des Systems, das je nach Aufgabenstellung auf elektrochemischen, optischen oder massensensitiven Sensorprinzipien beruht, muß einmal in der Lage sein, die Funktion des Sensors durch eine ständige und unabhängige Kontrolle des Zustands der chemisch-selektiven Schicht des Sensors zu gewährleisten, beispielsweise durch eine Korrelation von sich verändernden Stoffeigenschaften mit dem Sensorsignal. Zum zweiten wird eine ständige Kontrolle der Funktionen des Transducers und der angeschlossenen Signalverarbeitung erforderlich sein.

Obwohl diese Ansicht von den meisten Herstellern und Anwendern geteilt wird, gibt es bisher, wenn überhaupt, nur ganz wenige Ansätze dazu, dieses Problem zu lösen. Dies liegt in erster Linie an der Komplexität dieser Aufgabe, die große finanzielle und personelle Mittel binden und die Zeitvorstellungen der Anwender und Hersteller für die Entwicklung eines einzelnen Produkts weit überschreiten würde.

4.2 Analytik in kleinsten Volumina

Für die chemische Analytik stehen in vielen Fällen, insbesondere in der Medizin, Biologie usw. nur äußerst geringe Mengen an Analyten zur Verfügung (pL - fL). Dies erfordert gegenüber dem heute verfügbaren Stand der Technik völlig neue Analysemethoden. Ansatzpunkte des Zentrums hierzu werden z. B. gesehen bei

Anwendung der Nahfeld-Lichtquellen oder bei der photothermischen Spektroskopie.

Das Ziel ist daher die Entwicklung von analytischen optischen Nano-Sonden/Nano-Sensoren. Lichtquellen und optische Sonden in Dimensionen von einigen Nanometern können hergestellt werden, indem verschiedenste anorganische und organische Kristalle oder mit Farbstoffmolekülen gelabelte Polymere in der Spitze von Mikropipetten oder auf mit Nanotechniken hergestellten Mikrofasern fixiert werden. Insbesondere eine neue Nanotechnologie, die Photopolymerisation im Nahfeld von Mikrofasern, gestattet eine tausendfache Miniaturisierung gegenüber herkömmlichen faser-optischen chemischen Sensoren und eine Reduzierung der notwendigen Probevolumina um den Faktor 10^9 (μL - fL)! Durch diese extreme Miniaturisierung wird zudem eine Verbesserung der Ansprechzeiten (bei diffusionskontrollierten Reaktionen etwa um den Faktor 100) erhalten. Anwendungen dieser Nanosonden bzw. -sensoren werden im Bereich der Zellbiologie (Zellkulturen, Untersuchungen an einzelnen Zellen) gesehen. Teilweise eingeführt finden sich optische Nanosonden bereits im Near Field Scanning Optical Microscope (NSOM), etwa zum Erkennen von Defekten an der DNA oder, in Verbindung mit optischen Korrelationstechniken, zur Detektion/Analyse von einzelnen Molekülen.

Neben diesen wissenschaftlich anspruchsvollen Themenstellungen wird insbesondere von industrieller Seite der Einsatz von Mikrotechniken und in zunehmendem Maße auch der Nanotechnik zur Entwicklung von neuartigen Analysesystemen mit minimalem Platz- und Probemengenbedarf, d. h. kleinste Volumina, gesehen, insbesondere im Bereich des pharmakologischen Screenings, der Wertung von neuentwickelten Substanzen: *„Wir können im Sinne eines Massenscreening Hunderttausende von Substanzen sehr schnell testen. Auf dem Raum, wo heute 96 Substanzen geprüft werden, können es mittels Mikrotechnik rund 1000 sein. Besonders in der Pharmaforschung ist dies von entscheidender Bedeutung“* (Zit.: BASF Information, S. 2, 8. Febr. 95)

4.3 Simultane Anreicherung und Messung der Analyten mittels Multischicht (Membran)-Systemen

Da relevante Analyte, toxische Verbindungen etc. oft nur in Spurenkonzentration oder in komplizierten Gemischen vorliegen, müssen Anreicherungs- oder Abtrennungsschritte meist der eigentlichen Messung vorgeschaltet werden. Dadurch gestalten sich diese Messungen oftmals recht aufwendig, insbesondere wenn chromatographische Trennungen ausgeführt werden müssen. Wie bereits am Beispiel des Evanescent Field Sensors beschrieben, kann es aber gelingen, durch geeignete Multischichtsysteme eine selektive Anreicherung der zu bestimmenden Analyten zu erreichen und simultan zu messen. Derartige Schicht- oder Membransysteme finden immer stärkeren Einsatz, auch in der Produktion von chemischen Substanzen. Es ist daher damit zu rechnen, daß die Entwicklung derartiger Membransysteme, die auch rauen Umwelt- oder Produktionsbedingungen widerstehen können und selektive Permeations- oder Sorptionseigenschaften zeigen, in den nächsten Jahren einen starken Aufschwung nehmen wird. Für den hier betrachteten Bereich der Analytik ergaben sich dadurch einzigartige Möglichkeiten, wieder zu der ursprünglichen und so attraktiven Sensoridee zurückzukommen, nämlich eine Substanz in Gegenwart einer beliebigen Anzahl anderer Komponenten selektiv, ungestört und genau zu bestimmen, ohne großen zusätzlichen technischen Aufwand.

Eine komponentenübergreifende Systemtechnik für die Mikrosystementwicklung - Ein Anwendungsbeispiel

H. Eggert, W. Süß

Institut für Angewandte Informatik

Zusammenfassung

Systemtechniken (Methoden und Hilfsmittel) für die Mikrosystementwicklung sind heute in großer Zahl vorhanden und werden laufend durch verfeinerte Methoden und Hilfsmittel komponentenorientiert ergänzt, so daß der Entwicklungszyklus für Mikrosysteme mit diesen Hilfsmitteln nicht in einem einheitlichen Kontext erfolgt. Durch diesen Mangel, der jedoch nicht auf jeder Systemebene abgestellt werden kann, treten insbesondere in der Schnittstellenkomplexität des Gesamtsystems häufig beträchtliche Probleme auf. Hier soll ein Anwendungsbeispiel vorgestellt werden, bei dem erstmalig für die Gesamtsystemfunktion ein einheitlicher Entwicklungskontext, von der Systemanalyse bis zur Durchführung der Prototypentwicklung komponentenübergreifend durchgeführt wurde. Die Schnittstellenkomplexität des Gesamtsystems konnte damit leichter beherrscht werden, wodurch sich die Entwicklungszeit mindestens halbierte.

1. Einleitung

Probleme in der Systemtechnik traten weitgehend unerwartet in sehr großem Ausmaß in früheren Zeiten der Softwaresystementwicklung auf. Anfang der sechziger Jahre begann man damit, große Softwaresysteme (z.B. komplexe Betriebssysteme) zu entwickeln, ohne daß vorher eine passende Systemtechnik definiert wurde. So überstieg die Komplexität sehr schnell die Handhabbarkeit, was namhafte Firmen z.T. mit riesigen Verlusten bezahlen mußten.

Anfang der siebziger Jahre prägte sich aus dieser Situation heraus der Begriff der Softwarekrise, welcher aber eigentlich nicht den Kern des Problems bezeichnete. Gleichzeitig entstand der Begriff des Softwareengineering, dessen Inhalte schnell zu einem wesentlichen Teil der Informatik wurden und Prinzipien, Methoden sowie Werkzeuge hervorbrachte - kurz, eine Systemtechnik für die Softwareentwicklung bereitstellte. Bei der Entwicklung dieser Systemtechnik orientierte man sich neben typischen Informatikbegriffen wie Abstraktion, Information Hiding, Abstrakter Datentyp zusätzlich an Begriffen der praktischen Ingenieurtechniken wie z.B. Modul, Schnittstelle und Konstruktion. Der Begriff der Programmierung wurde hintenangestellt und man ging über zur Softwarekonstruktion: große Softwaresysteme wurden modularisiert, Softwarebausteine entstanden u.s.w.

Die siebziger und achtziger Jahre waren in der Informatik geprägt von immer neuen Methoden und Werkzeugen, wobei auch viel Unfug entstand und überzogene Erwartungen geweckt wurden.

Heute zeigt es sich, daß wenige fundamentale Methoden völlig ausreichen, um relativ zuverlässige große Softwaresysteme zu entwickeln. In bezug auf

wiederverwendbare und flexible, d.h. nachträglich ohne sehr großen Aufwand veränderbare Softwaresysteme scheint das objektorientierte Paradigma heute vorläufig die letzte fundamentale Methode zu sein, welche mit Erfolg in der Praxis umgesetzt wird.

Da die Informationstechnik für die Mikrosystemtechnik eine Schlüsseltechnologie darstellt, hätte man Mikrosysteme vor zwanzig Jahren in ihrer heutigen Komplexität, auch bei vorhandener Basistechnologie nicht entwickeln können, weil die Ingenieurtechniken allein nicht ausgereicht hätten.

Allerdings ist es auch nicht sinnvoll, heute jede Methode des Softwareengineering bei der Mikrosystemtechnik einzusetzen. Bestimmte Methoden haben einen sehr hohen Anspruch (z.B. beweisbare Korrektheit von Systementwürfen und Algorithmen). Die wichtigsten Vertreter sind hier höhere Petri-Netze und algebraische Spezifikationen [1,2,3]. Nicht zuletzt wegen ihres hohen Anspruchs sind diese Methoden und die dazugehörigen Werkzeuge nie in größerem Umfang verbreitet worden.

Vor Jahrzehnten wurden in der Informatik sogenannte endliche Automaten definiert. Diese lieferten zusammen mit den formalen Sprachen und der Algorithmentheorie die theoretischen Grundlagen der Informatik. Mit endlichen Automaten lassen sich alle Zustände und Zustandsübergänge eines Systems beschreiben sowie die Determiniertheit des Systems berechnen. Sie blieben aber lange ohne praktische Bedeutung in der Systemtechnik, weil die aus der Schnittstellenkomplexität heraus resultierenden unverzichtbaren Entwurfsprinzipien der Hierarchisierung (Verfeinerung) sowie der Beschreibung von Nebenläufigkeiten (parallele Abläufe) nicht im gleichen Kontext mit einem rechnergestützten Werkzeug

beschrieben werden konnten. Passend zu dieser Problematik lässt sich S. Papert (M.I.T.) zitieren: „Alles ist einfach, wenn man es in eine Sammlung von Modellen integrieren kann. Kann man das nicht, so wird alles schrecklich schwierig.“

2. Kontextabhängigkeit der Systemtechniken

Häufig sind die Methoden und Hilfsmittel komponentenorientiert, so daß der Entwicklungs-zyklus für Mikrosysteme mit diesen Hilfsmitteln nicht in einem einheitlichen Kontext erfolgt. Durch diesen Mangel, der auch nicht über alle Systemebenen hinweg abgestellt werden kann, treten insbesondere in der Schnittstellenkomplexität des Gesamtsystems häufig beträchtliche Probleme auf.

Es geht darum, Wege zu finden, so weit wie möglich komponentenübergreifend entwickeln zu können, um die Schnittstellenkomplexität in den Griff zu bekommen. Dabei gilt die Gesetzmäßigkeit, je komponentenübergreifender der Kontext gestaltet wird, um so höher ist die Abstraktionsebene.

Man kann einheitlichen Kontext auf verschiedenen Abstraktionsebenen durch folgende Mechanismen ermöglichen:

- Durch Systemeinbettung auf Werkzeugebene,
- durch Systemkopplung und
- durch Systemeinbettung auf Funktionsebene.

Bei der Systemeinbettung auf Werkzeugebene geht man von der höchsten Abstraktionsebene aus und sorgt dafür, daß wenigstens die benutzten Werkzeuge in einem einheitlichen Kontext, ähnlich wie in einem Werkzeugkasten verwendet werden können. (siehe Abb. 1).

Man legt dabei die Vorgehensweise beim Entwurf und bei der Herstellung eines Mikrosystems durch ein Aktivitätensnetz (Work Flow) auf einer Rechnerbedienoberfläche fest. Nur über diesen Work Flow kann man Werkzeuge (z.B. ein CAD-System) im Rechnernetz aufrufen und mit ihm arbeiten.

Die Informationen des Work Flows (z.B. Aktivitäten, Vorgänger, Nachfolger) sowie die Ein/Ausgabe-Daten der Werkzeuge werden zusammen in einer Datenbank verwaltet. Sofern die Ein/Ausgabe-Daten der unterschiedlichen Werkzeuge inhaltlich nicht in direktem Zusammenhang stehen, spricht man von Black Box Integration [4].

Stehen die Ein/Ausgabe-Daten inhaltlich in direktem Zusammenhang so arbeiten die Werkzeuge als Erzeuger/Verbraucher Systeme und man hat einen Mechanismus der Systemkopplung.

Wir benutzen die Systemkopplung z.B. bei der Erstellung des LIGA-Maskendesigns durch Kopplung von CAD-Systemen für den Mechanikentwurf und den Elektronikentwurf (siehe [4]). In der Regel müssen dafür spezielle Datenschemata entwickelt werden, über

die dann die Werkzeuge miteinander kommunizieren können. Für die Geometrieinformation mußte ein besonderes Datenschema entwickelt werden, da die Dateiformate der CAD-Systeme miteinander nicht kompatibel sind (IGES, GDSII). Man spricht dann von White Box Integration. Wir benutzen den Mechanismus weiterhin bei der Modellierung des gesamten LIGA-Fertigungsprozesses mit dem Ziel einer Fertigungsoptimierung [5].

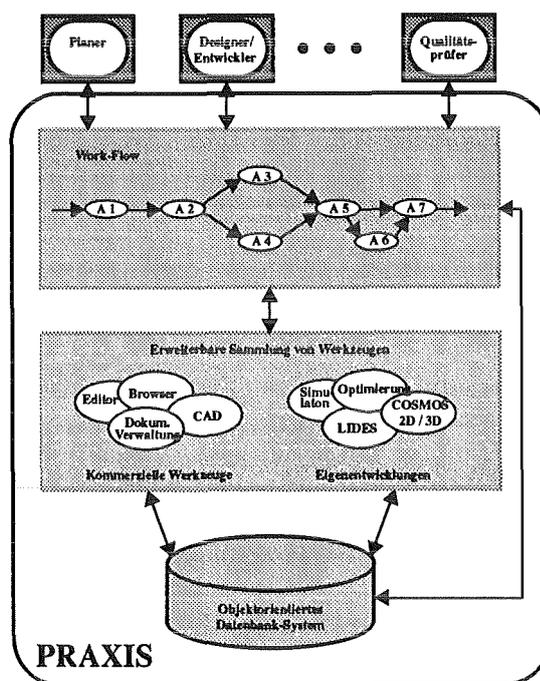


Abb. 1: PRAXIS (PRoduct And EXperimentation Information System)

Eine weitere Anwendung verfolgen wir bei der Kopplung von Simulationsmodellen mit einer Genetischen Maschine um auf heuristischem Weg rechnergestützt eine Designoptimierungen zu erhalten. Bei einer Systemeinbettung auf Funktionsebene wird von uns das Ziel verfolgt, ein Mikrosystem vollständig funktional zu beschreiben. Wir verwenden dazu ein Werkzeug zur Beschreibung von endlichen Automaten mit Verfeinerungs- und Nebenläufigkeitseigenschaften.

3. Systemeinbettung auf funktionaler Ebene

Bei einer Systementwicklung ist es ein zentraler Wunsch, den Kontext einer Spezifikation möglichst weit bis in die Realisierung des Systems hinein beizubehalten. Nur auf diese Weise kann hinreichend zuverlässig sichergestellt werden, daß sich Teilsysteme, welche über ihre Schnittstellen miteinander kommunizieren, bei ihrer Realisierung im System auch wie ursprünglich spezifiziert verhalten.

Inzwischen steht das rechnergestützte Werkzeug STATEMATE® zur Verfügung, das neben einer Beschreibungsmöglichkeit von Zuständen und Zustandsübergängen zusätzlich Beschreibungsmöglichkeiten für die Entwurfsprinzipien der Hierarchisierung und Nebenläufigkeit enthält.

Das Prinzip, mit diesem Werkzeug Systemspezifikationen zu beschreiben ist relativ einfach. Man definiert zunächst ein sogenanntes Aktivitäten-Diagramm (siehe Abb. 2). Über eine Daten- und Steuerschnittstelle kommunizieren Aktivitäten, also im weitesten Sinne Geräte (z.B. Sensoren, Aktoren, Bedienungseinheit) mit der Steuerung.

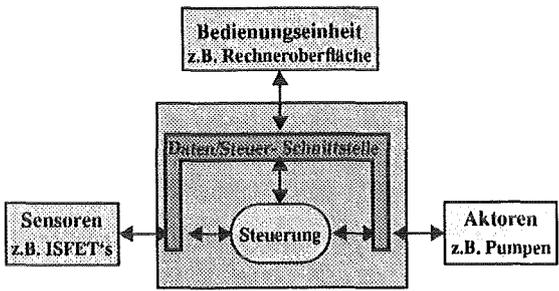


Abb. 2: Aktivitäten-Diagramm

Der Knoten welcher die Steuerung darstellt, ist bereits der Einstieg in den nächsten Schritt, ein sogenanntes Zustands-Diagramm zu definieren, welches die Steuerung näher beschreibt (siehe Abb. 3). Dabei beschreiben die Knoten die Zustandsmenge, welche die Systemsteuerung enthalten kann, zusammen mit allen Zustandsübergängen (Pfeile).

Eine beliebige Hierarchisierung ist möglich (z.B. enthält der Zustandsknoten Steuerung alle übrigen Zustandsknoten, der Zustandsknoten Kommando die beiden Unterzustandsknoten Lesen und Auswerten).

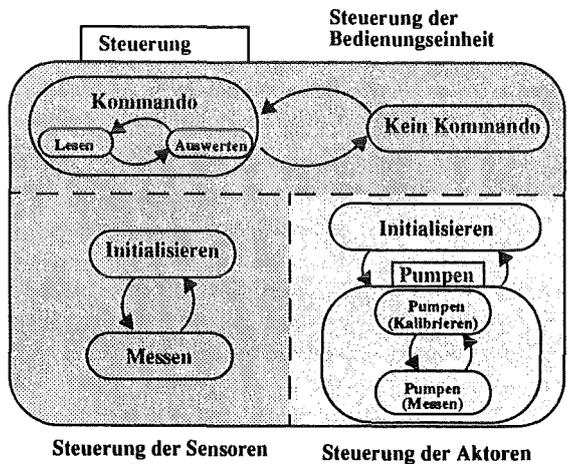


Abb. 3: Zustands-Diagramm zur Steuerung

Nebenläufigkeiten können dadurch beschrieben werden, daß man Teile des Zustands-Diagramms durch „gestrichelte Linien“ voneinander trennt. Praktisch bedeutet das, daß vom System parallel Sensordaten aufgenommen, Aktoren (z.B. Pumpen) gesteuert und von der Bedienungseinheit Kommandos entgegengenommen werden können.

Nun wäre diese Beschreibungsmethode relativ wertlos, wenn das Werkzeug nicht zusätzlich in der Lage wäre diese Spezifikation unter Berücksichtigung der Nebenläufigkeit als abstrakte Maschine auf dem Rechner dynamisch ablaufen zu lassen, d.h. alle möglichen Zustände über die Zustandsübergänge mit dem Ziel zu simulieren, mögliche Nichtdeterminiertheit nachzuweisen um damit Entwurfsfehler frühzeitig zu entdecken.

Bedenkt man, daß die Beschreibung von Systemzuständen mit den Zustandsübergängen in der Regel das Ergebnis langwieriger interdisziplinärer Diskussionen ist, so ist unmittelbar einsichtig, daß es bei hunderten von Zuständen und Zustandsübergängen die ein System annehmen kann, eine automatische Überprüfung durch den Rechner unbedingt notwendig ist; ganz im Sinne von M. Keynes (M.I.T.): „Fehler sind nützlich, aber nur wenn man sie schnell findet.“

Mit STATEMATE ist es zusätzlich möglich, aktivitätengesteuert Programmcode während der Simulation ausführen zu lassen. Damit kann man also die Funktion eines Systems zusätzlich durch komplexe Algorithmen (z.B. Meßdatenerfassung) komponentenweise beschreiben, so daß die simulierten Daten der Komponenten (Sensoren, Aktoren) entsprechend der Fertigstellung der realen durch diese ersetzt werden, bis zum Schluß nur noch der Automat der Systemsteuerung übrigbleibt.

4. Ein Anwendungsbeispiel - Das Mikrosystem ELMAS

An der Entwicklung von ELMAS (Elektrochemisches Mikroanalysesystem) sind mehrere Institute und Hauptabteilungen des Forschungszentrums Karlsruhe beteiligt [6]. Am Institut für Radiochemie (IRCh) werden die elektrochemischen Mikrosensoren entwickelt, das Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) fertigt in Zusammenarbeit mit der Hauptabteilung Versuchstechnik (HVT) und der Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (HPE) das Fluid-Handling-System. Das Institut für Angewandte Informatik (IAI) entwickelt die Signalverarbeitung und Systemsteuerung (siehe dazu auch [7]).

4.1 Aufbau und Funktion von ELMAS

ELMAS besteht im Endausbau aus Mikrosensoren, Mikropumpen, Mikrodurchflußzellen, einem Vorratsbehälter für Kalibrierflüssigkeit und einem Mikro-

® STATEMATE ist ein eingetragenes Warenzeichen von i-Logix, Inc.

controller (siehe [8,9]). Aufbau und Funktion von ELMAS werden in Abb. 4 verdeutlicht.

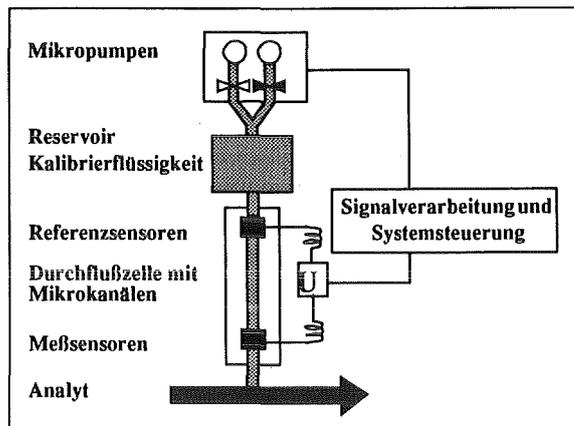


Abb. 4: Funktionale Struktur von ELMAS

In einer mit Mikrokanälen versehenen Durchflußzelle sind am Eingang und Ausgang jeweils ein - oder mehrere - elektrochemische Referenz- und Meßsensoren angebracht. Mikropumpen und Mikroventile erlauben alternierend den Transport von Kalibrierlösung aus einem Reservoir über die Sensoren in der Durchflußzelle, bzw. das Ansaugen von Probelösung bis zu dem Meßsensor am Eingang der Durchflußzelle.

Im Falle des Kalibrierens sind die Sensoren am Eingang und Ausgang der Durchflußzelle gleichermaßen der Kalibrierlösung ausgesetzt. Dabei wird am elektronischen Meßgerät die Spannung U als Differenzsignal des Meß- und Referenzsensors gemessen. Im Falle der angesaugten Probelösung ist der Referenzsensor der Kalibrierlösung und der Meßsensor der Probelösung ausgesetzt.

Wechselnde Kalibrier- und Meßphasen sind aufgrund der Driftprobleme der verwendeten Sensoren notwendig. Ohne die Kalibrierphasen ist die Zuverlässigkeit der Meßwerte nicht gewährleistet.

4.2 Die stufenweise Entwicklung des Mikrosystems

Zu Beginn der Entwicklung wurde von dem geplanten Mikrosystem eine ausführbare Spezifikation, basierend auf Statecharts [10] erstellt. Dieses auf Statecharts basierende Modell wurde mit einem Bedien-Panel kombiniert. In diesem Modell wurden sämtliche Komponenten des Systems (Pumpen und Sensoren) vom Rechner simuliert. Diese ausführbare Spezifikation war Grundlage zahlreicher Diskussionen zwischen den beteiligten Partnern, in denen das Konzept des geplanten Mikrosystems und dessen Handhabung erarbeitet und weiterentwickelt wurde.

Mit Hilfe des Modells wurde ein erster makroskopischer Prototyp des Mikrosystems erstellt. Dazu wurde die Simulation der Pumpen und Sensoren durch Einbindung realer Komponenten ersetzt. Als Pumpe

wird im makroskopischen Prototyp eine vom Rechner aus elektronisch (RS232 Schnittstelle) ansteuerbare Pipette eingesetzt. Die Auswertung der Sensorsignale geschah mit einem speziellen Meßgerät (dem sogenannten ECS-Meter), das ebenfalls über eine serielle Schnittstelle an einen Rechner gekoppelt werden kann. Dieser Prototyp diente verschiedenen Zwecken. Er lieferte zum einen Erfahrungen für das spätere Mikrosystem, und diente zum anderen als Testumgebung für die sich noch in der Weiterentwicklung befindlichen Mikrosensoren.

Für den Aufbau des makroskopischen Prototyps wurde das zu Beginn entwickelte Modell verwendet. Die zunächst nur vom Rechner simulierten Komponenten des Modells wurden nun durch die realen Komponenten Pipette und Meßgerät ersetzt. Das Modell steuert diesen makroskopischen Prototyp des Mikrosystems, welcher in Abb. 5 schematisch dargestellt ist.

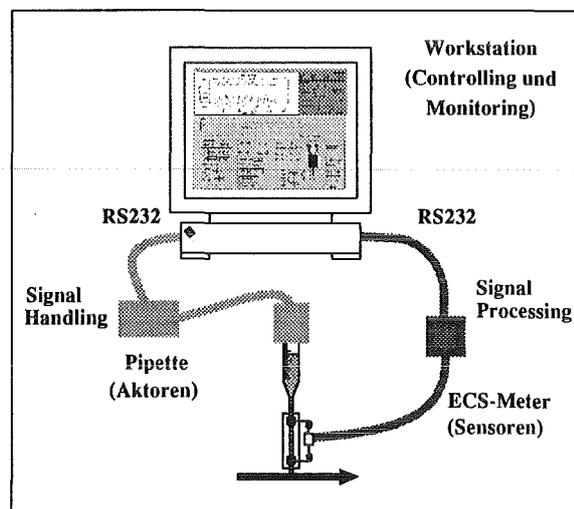


Abb. 5: Der ELMAS-Prototyp mit integrierten makroskopischen Komponenten)

Im Endausbau des Mikrosystems wurden die im Prototyp verwendete Pipette durch Mikropumpen und die Auswertung der Sensorsignale durch neu entwickelte Schaltkreise ersetzt. Die Ansteuerung der Pumpen und die Aufnahme der Sensorrohdaten wird durch einen Mikrocontroller ausgeführt. Die Elektronik für die Ansteuerung der Pumpen und für die Sensordatenaufnahme sowie der Mikrocontroller wurden zu einer kompakten Elektroneinheit zusammengefaßt. Das System wird weiterhin vom Modell gesteuert. Dazu kommuniziert das Modell über eine serielle Schnittstelle mit dem Mikrocontroller der Elektroneinheit. Vom Modell aus können der Meß- und Kalibrierzyklus sowie die Datenaufnahme und Datenvisualisierung des Systems gesteuert werden. Eine Darstellung des Mikrosystems zeigt Abb. 6.

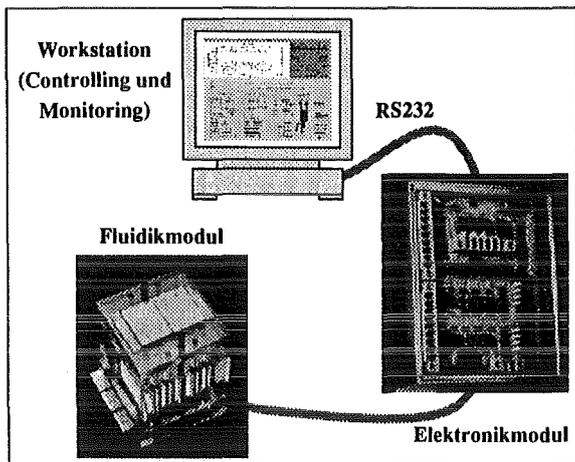


Abb. 6: Das ELMAS-Mikrosystem

In Abb. 7 ist das mit dem Modell gekoppelte Panel, von dem aus das Mikrosystem gesteuert wird, dargestellt.

Der untere Teil des Bildes zeigt das Bedienpanel, mit dem das Mikrosystem gesteuert wird.

Dieses Bedienpanel ist in die drei Blöcke Aktorsteuerung, Sensorsteuerung und Statusanzeige aufgeteilt. Mit dem Block Aktorsteuerung werden die Mikropumpen bedient. Der Block Sensorsteuerung dient der Aufnahme der Sensordaten und im Block Statusanzeige wird der Systemzustand des Mikrosystems visualisiert und die Sensordaten textuell dargestellt. Der obere Teil des Bildes zeigt den Teil der Oberfläche mit dem die Sensorsignale visualisiert werden. Es handelt sich hierbei um ein selbständiges Programm das über eine „named pipe“ mit dem Modell kommuniziert.

4.3 Das STATEMATE-Modell

Um einen Eindruck über das verwendete, auf Statecharts basierende Modell zu vermitteln wollen wir einige Teile des verwendeten Modells kurz vorstellen.

Dieses besteht aus einem sogenannten Activitychart und mehreren sogenannten Statecharts. Im Activitychart (siehe Abb. 8) wird die Struktur des Systems beschrieben, in dem die verschiedenen Aktivitäten und ihre logischen Verknüpfungen angegeben werden [7].

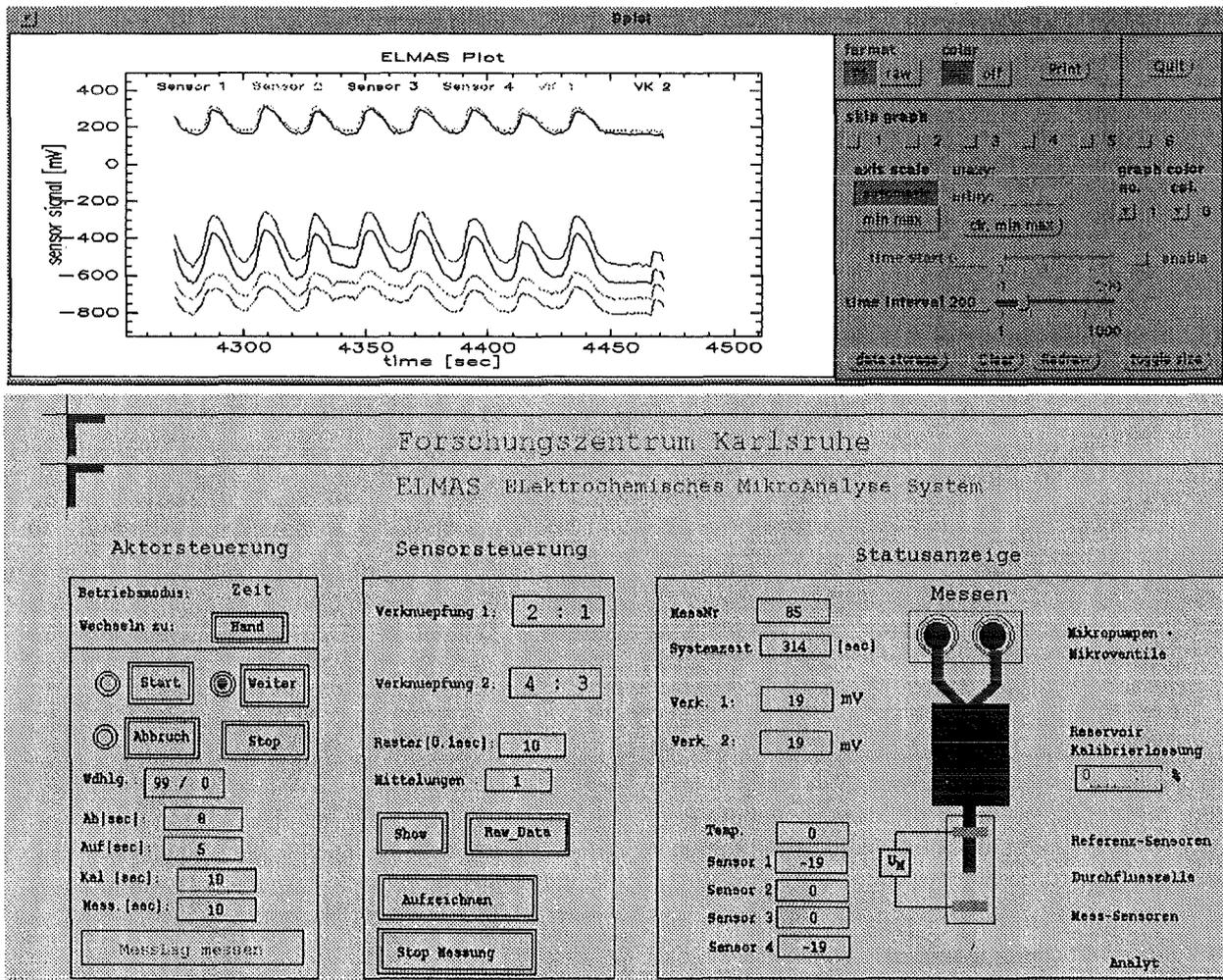


Abb. 7: Das Panel zum ELMAS-Modell

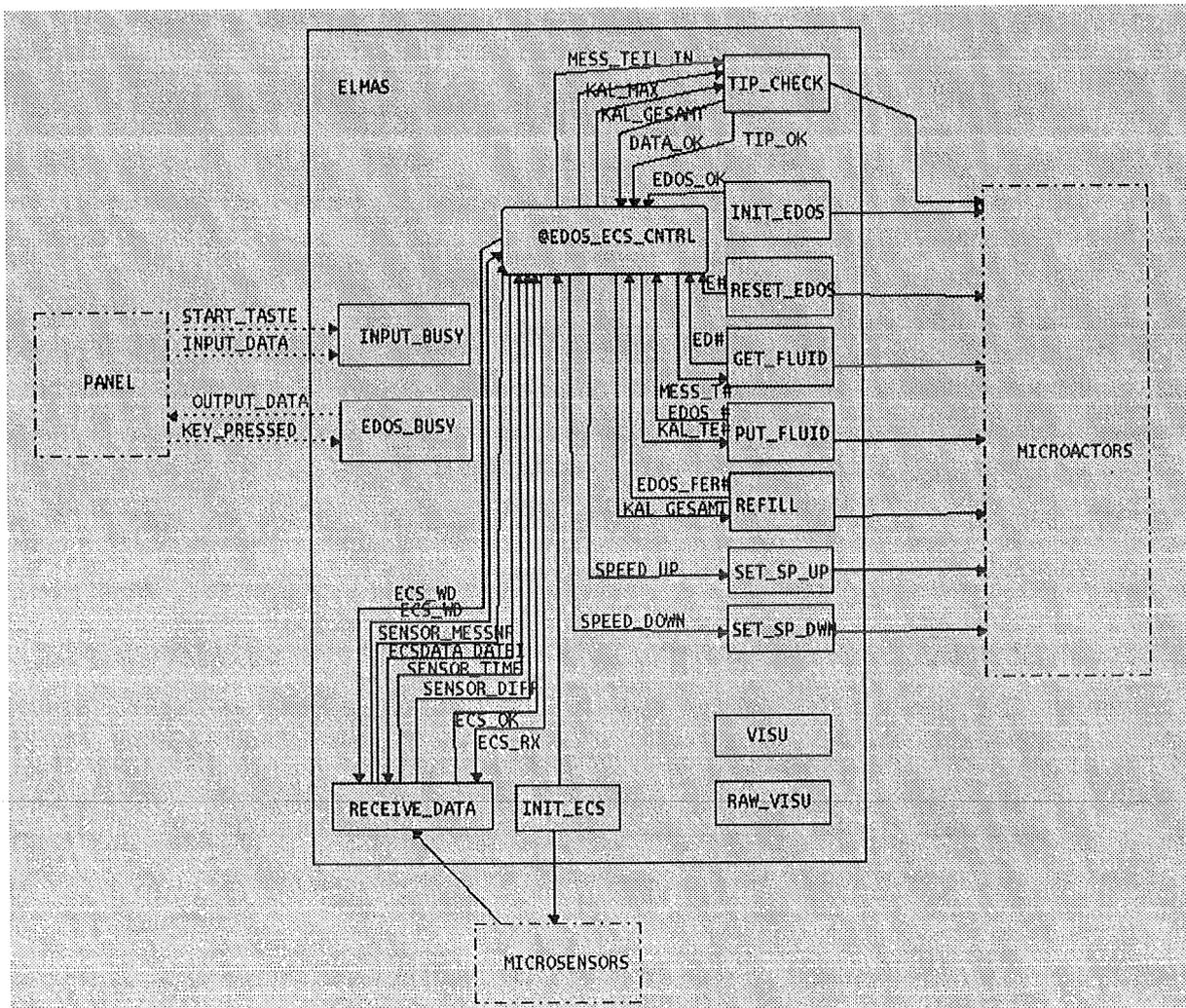


Abb. 8: Das Activity-Chart zum ELMAS-Modell

Die logische Funktionalität der einzelnen Teile des Modells wird durch Statecharts beschrieben. Ein Statechart ist in Abb. 9 dargestellt. Es stellt das übergeordnete Statechart des Modells dar. Es wird für die Interaktion zwischen Benutzer und System sowie für die Steuerung der Pumpen benötigt [7].

5. Schlußbemerkung

Die Verwendung von Statecharts zur Erstellung einer ausführbaren Spezifikation hat wesentlich zur weiteren Entwicklung des Mikrosystems beigetragen. Diese ausführbare Spezifikation war Grundlage zahlreicher Diskussionen zwischen den beteiligten Partnern, in denen das Konzept von ELMAS weiterentwickelt wurde.

Der aus dem ausführbaren Modell entstandene makroskopische Prototyp von ELMAS lieferte wichtige Erkenntnisse für das spätere Mikrosystem und diente als Testumgebung für die Weiterentwicklung der elektrochemischen Mikrosensoren. Dieser makroskopische Prototyp wurde zu einem ersten, funktionsfähigen Prototyp des Mikrosystems weiterentwickelt.

Durch die konsequente entwicklungsbegleitende Verwendung von Statecharts wurde die Entwicklung des Mikrosystems beschleunigt. Vor allem in der Endphase der Entwicklung des ersten Prototyps stand die Entwicklung unter großem Zeitdruck. Durch die Modellierung mit Statecharts waren wir aber in der Lage, die Steuerung von ELMAS so vorzubereiten, daß nach Fertigstellung der einzelnen Komponenten diese sofort getestet werden konnten. Dadurch war kurz nach Fertigstellung der letzten Komponente das System einsetzbar, da die Funktionalität im vorhinein schon getestet werden konnte.

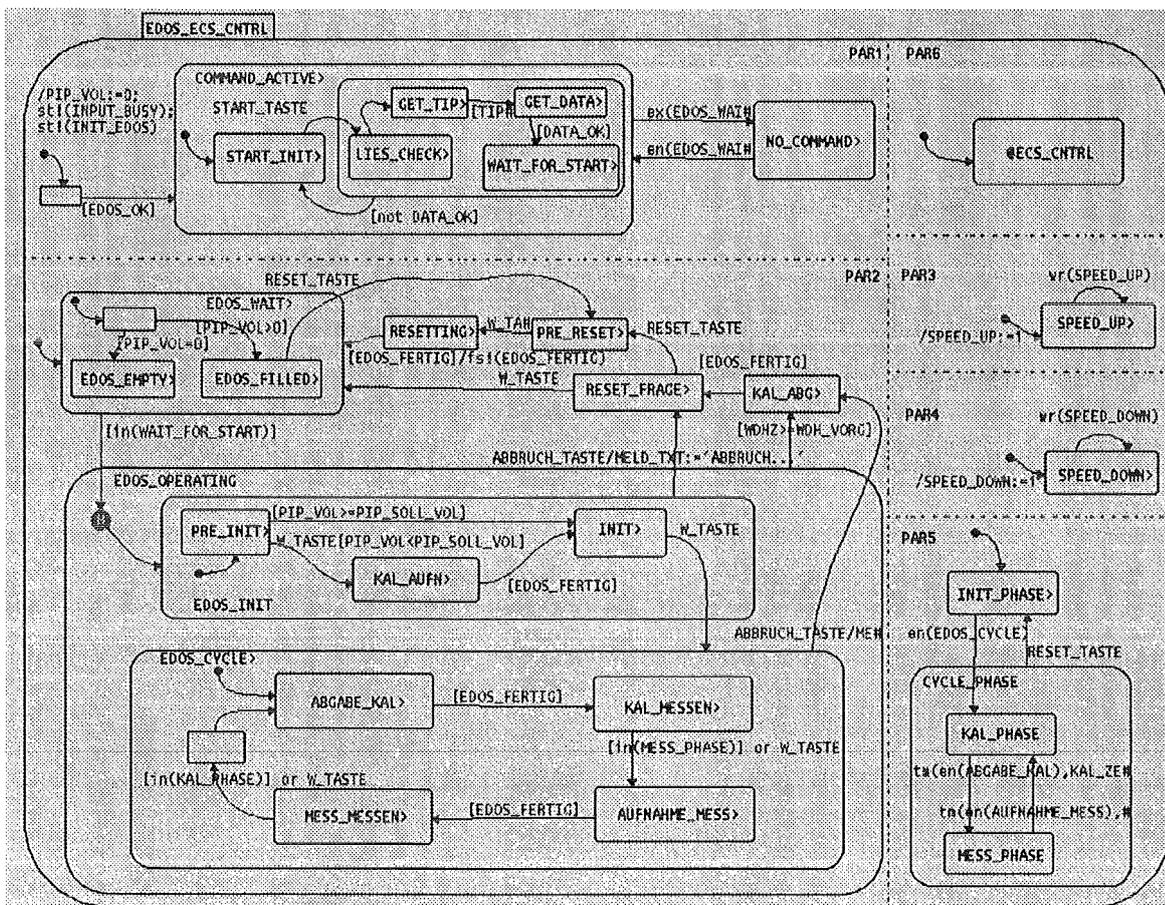


Abb. 9: Das übergeordnete State-Chart zum ELMAS-Modell

Literatur

- [1] M. Leszak, H. Eggert: Petri-Netz-Methoden und -Werkzeuge, Springer Verlag Heidelberg (1989)
- [2] C. Döpmeier: Algebraische Spezifikation und Modellierung in Höheren Petri-Netze mit zustandsabhängiger Schaltregel, Dissertation Universität Koblenz, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5279 (1993)
- [3] W. Süß: Konzeption und Entwicklung eines graphischen Analysewerkzeugs für Höhere Petri-Netze mit zustandsabhängiger Schaltregel, Dissertation Universität Koblenz, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5246 (1993)
- [4] P. Wieland, C. Döpmeier, H. Eggert, K.-P. Scherer: Entwurf eines Systems zur Erfassung und Weiterverarbeitung von Produkt-information bei der Herstellung von Mikrostrukturen, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5597 (1995)
- [5] I.H. Brauch: Wissensbasierte Modellierung des LIGA-Fertigungsprozesses, Dissertation Universität Karlsruhe, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5427 (1994)
- [6] W. Hoffmann et al.: ELMAS - ein modulares elektrochemisches Mikroanalyse-System, dieser Tagungsband
- [7] W. Süß, H. Eggert, M. Gorges-Schleuter, W. Jakob: Entwicklung von Mikrosystemen, 1. Workshop „Methoden- und Werkzeugentwicklung für den Mikrosystementwurf“ im Rahmen des 2. Statusseminars zum BMFT-Verbundprojekt METEOR, Karlsruhe, (15.11.1995), S. 164-171
- [8] W. Hoffmann, H. Eggert, W. Schomburg, D. Seidel: Elektrochemisches Mikroanalyse-System (ELMAS) für die Ionometrie von Flüssigkeiten, 1. PMT-Statuskolloquium, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5238 (1993)
- [9] W. Hoffmann et al.: ELMAS: Ein elektrochemisches Mikroanalyse-System, Nachrichten des Forschungszentrum Karlsruhe, (1995)
- [10] D. Harel: Statecharts: A Visual Formalism for Complex Systems, Science of Computer Programming Vol. 8, pp. 231-274 (1987)

Werkstoffe und Werkstoffprozesse für die Mikrosystemtechnik

Jürgen Haußelt

Institut für Materialforschung

Zusammenfassung

Wie in allen Bereichen der Technik bestimmt auch in der Mikrosystemtechnik die Verfügbarkeit geeigneter Werkstoffe zusammen mit den entsprechenden Formgebungs- und Strukturierungsverfahren die Funktion von Bauteilkomponenten und Systemen.

Im folgenden werden die Beiträge des Instituts für Materialforschung mit seinen Teilinstituten "Werkstoffphysik" (IMF I), "Werkstoffmechanik" (IMF II) und "Werkstoffprozeßtechnik" (IMF III) zur Entwicklung und Charakterisierung von Werkstoffen, zur Entwicklung von Formgebungs- und Strukturierungsverfahren und zur Entwicklung von Mikrokomponenten und -systemen an Hand ausgewählter Beispiele beschrieben.

1. Einleitung

Während wir in der "makroskopischen" Technik Zehntausenden von auf ihre jeweilige Funktion angepaßten Werkstoffen begegnen, sind Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik bisher auf eine vergleichsweise kleine Werkstoffpalette beschränkt. Dies liegt daran, daß in der Mikroelektronik - anders als in der Makrotechnik, wo Verfügbarkeit, Kosten und Rezyklierbarkeit die wesentlichen Auswahlkriterien für Werkstoffe darstellen - die Verfügbarkeit entsprechender Mikrostrukturierungsverfahren die Materialauswahl bestimmt und limitiert. So ist beispielsweise die Si-Mikromechanik auf Si und einige in der Mikroelektronik verwendete Dünnschichtmaterialien beschränkt. Demgegenüber erlaubt die LIGA-Technik die Verwendung einer wesentlich größeren Zahl von Werkstoffen. Aber auch sie ist - zumindest in ihrer ursprünglichen Form - auf lithographisch strukturierbare oder abformbare Polymere und galvanisch abscheidbare metallische Werkstoffe beschränkt. Eine Erweiterung der LIGA - Technik auf neue Werkstoffe mit interessanten Eigenschaften sowie die Entwicklung neuer Mikrostrukturierungsverfahren würde der Mikrosystemtechnik ein zusätzliches Anwendungspotential erschließen können. Eine zwingende Notwendigkeit dafür ist allerdings, daß diese Verfahren bzgl. Prozeßsicherheit und Wirtschaftlichkeit alle Voraussetzungen für industrielle Fertigungsprozesse besitzen.

Ebenso wichtig ist es, unsere Kenntnisse der aufgrund ihres extremen Oberfläche/Volumenverhältnisses besonderen Werkstoffeigenschaften mikrostrukturierter Bauteile zu vertiefen.

Die wesentlichen Ziele der Materialforschung für die Mikrosystemtechnik sind daher:

- Erweiterung der Werkstoffpalette
- Erweiterung der Verfahrenspalette
- Verbesserung der Prozeßsicherheit und der

Wirtschaftlichkeit

- Verbesserung des Verständnisses der Werkstoffeigenschaften in Mikrodimensionen

Das Institut für Materialforschung leistet zu diesen Zielsetzungen Beiträge im Bereich der Polymere, der Metalle und der Keramik.

Einige Ergebnisse der vergangenen 2 Jahre werden im folgenden dargestellt.

2. Kunststoffabformung und Galvanoformung in der LIGA - Technik

Bei unseren Arbeiten stehen die folgenden Aufgaben im Vordergrund:

1. Verbesserung der Prozeßsicherheit und der Wirtschaftlichkeit beim Spritzgießen
2. Verfahrensentwicklung zur Metallisierung spritzgegossener Mikroteile für metallische Mikrokomponenten
3. Charakterisierung galvanisch abgeschiedener Ni-Schichten

2.1 Spritzgießtechnik

Hierzu wurde im Januar 1995 eine prozeßgesteuerte Spritzgießmaschine mit Zweikreistemperiereinrichtung in Betrieb genommen. Die Maschine wurde sowohl zur Herstellung von Mikrokomponenten für Industrieaufträge wie für Demonstratoren eingesetzt (z. B. Pumpengehäuse aus PSU).

Außerdem wurde durch eine Prozeßoptimierung insbesondere im Bereich der Temperatursteuerung - zunächst am Beispiel von PMMA und POM - die Zykluszeit gegenüber dem Stand von Oktober 1994 um ca. 50% reduziert (s. Abb. 1) [1].

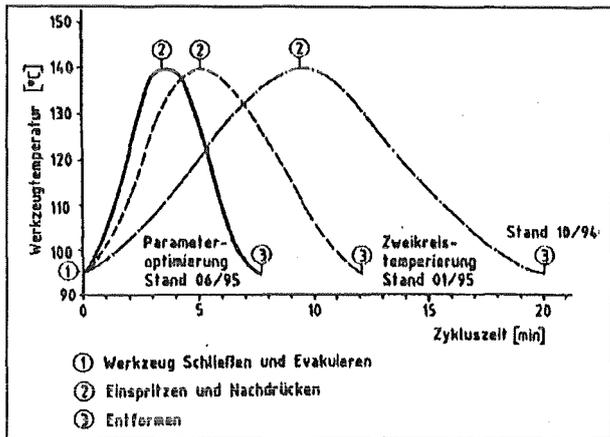


Abb.1 Reduzierung der Zykluszeit durch Zweikreistemperierung und Parameteroptimierung

Als große Hilfe erwies sich dabei der Einsatz rechnergestützter Simulationsverfahren (ABAQUS und MOLDFLOW), die eine deutliche Reduzierung der Entwicklungszeit erlaubten [2]. Wir sind deshalb dabei, diese Verfahren zur Entwicklung eines neuen, thermisch optimierten Werkzeuges einzusetzen, von dem wir uns eine nochmalige Verkürzung der Taktzeiten versprechen.

Inzwischen wurde die Anlage mit einer automatischen Granulatzuführung und einer automatischen Teileentnahmevorrichtung für den personalfreien und damit wirtschaftlichen Dauerbetrieb ausgerüstet. Die Arbeiten hierzu sind seit ca. 2 Monaten im Gang.

Bei der Kunststoffabformung im Mikrometerbereich verdient nicht nur die vollständige und fehlerfreie Werkzeugfüllung sondern auch der Entformvorgang besondere Beachtung. Dies gilt nicht nur für das Spritzgießen sondern auch für das Prägen. Beispielsweise lassen sich die Spannungs- und Verzerrungszustände polymerer Mikrostrukturen während des gesamten Prägevorganges mit Hilfe von FEM - Simulationsrechnungen erfassen. Den Rechnungen ist zu entnehmen, daß die Spannungen am Übergang zwischen Mikrostruktur und Restschicht und zu Beginn der Entformung - d.h. beim "Herausziehen" des Formeinsatzes aus dem Kunststoff - ihr Maximum erreichen. Weiter zeigt sich, daß die Spannungen mit abnehmender Restschichtdicke abnehmen (s. Abb. 2). Man erkennt außerdem, daß bei großen Restschichtdicken Substrate eher schaden als nutzen, daß bei kleineren Restschichten jedoch die Verwendung von Substraten, insbesondere mit niedriger thermischer Ausdehnung die Spannungen reduzieren [3].

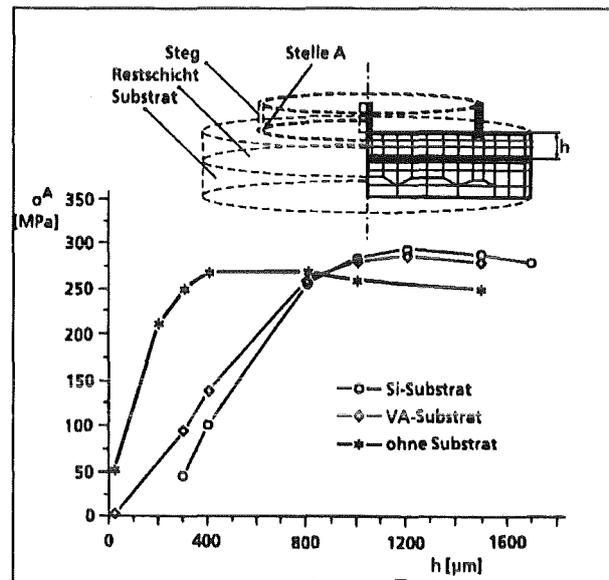


Abb.2 Verlauf der maximalen thermischen Spannung σ_A (Stelle A) bei verschiedenen Restschichtdicken h und Substratmaterialien beim Prägen von PMMA-Mikrostrukturen

2.2 Metallisierung spritzgegossener Mikrostrukturen

Die Herstellung metallischer Mikroteile und metallischer Tochterformeinsteckungen durch Galvanoformung nach dem LIGA-Verfahren setzt eine ausreichende elektrische Leitfähigkeit der zu galvanisierenden Kunststoffstrukturen, insbesondere im Bereich der Galvanikstartflächen voraus. Anders als beim Prägeverfahren, wo die Kunststoffstrukturen auf leitfähigen, i.a. Substraten mit metallischer Oberfläche abgeformt werden, bestehen Spritzgußteile üblicherweise aus homogenen, elektrisch isolierenden Polymeren und sind daher einer fehlerfreien galvanischen Abformung feinsten Strukturen mit hohem Aspektverhältnis nicht zugänglich.

Zur Lösung dieser Problematik haben wir mit dem Spritzgießen von Mikrostrukturen aus rußgefüllten, elektrisch leitfähigen Polymeren begonnen. Erste Ergebnisse an mit Hilfe mikromechanisch hergestellter Formeinsätze gespritzten Strukturen zeigen, daß eine galvanische Abformung möglich ist, wenn im Bereich der Grundplatte ein Oberflächenwiderstand von weniger als ca. 1 k Ω erzielt werden kann [4].

2.3 Galvanisch abgeschiedene Ni - Schichten

Neben den schon erwähnten Arbeiten zur Galvanoformung spritzgegossener Kunststoffmikrostrukturen befassen wir uns intensiv mit der Eigenschaftsuntersuchung und -optimierung galvanischer LIGA-Schichten.

Hierbei geht es in erster Linie um die Einflüsse der Badzusammensetzung und der Abscheidebedingungen auf Gefüge, Textur und Härte der abgeschiedenen

Schichten (s. Abb. 3). Ziel dieser Untersuchungen, die zunächst an Ni aus Sulfamatelektrolyten verschiedener Zusammensetzung durchgeführt wurden, ist es, besonders verschleißbeständige galvanische Schichten zu erzeugen, die bei den eingesetzten Abformverfahren - Prägen und Spritzgießen - hohe Werkzeugstandzeiten erlauben.

Die Meßergebnisse zeigen, daß sowohl die Textur als auch die Härte der Ni-Schichten in deutlichem Maße von der Badzusammensetzung, d.h. von der Ni-Konzentration, aber auch von Art und Menge der verwendeten Badzusätze wie z.B. Netzmittel abhängen. Einen deutlichen Einfluß zeigt auch die verwendete Stromdichte, weil über sie die Wachstumskinetik und damit der Gefügebau mit gesteuert wird [5].

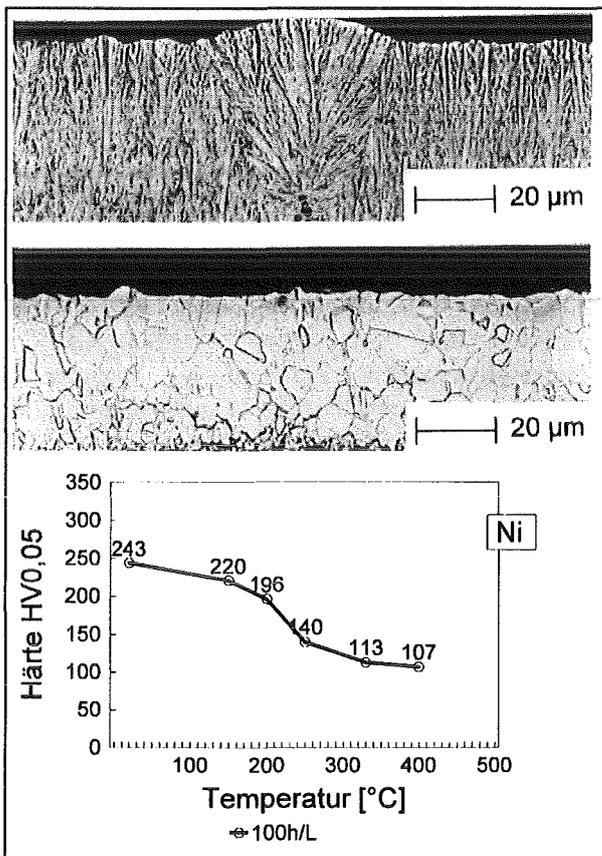


Abb.3 Gefüge und Härteverlauf galvanischer Ni-Schichten als Funktion nachfolgender Wärmebehandlung

Die Auswahl der auf diese Weise bestimmten optimalen Bad- und Abscheidebedingungen wird allerdings dadurch erschwert, daß in der praktischen Anwendung der LIGA-Galvanik nicht nur die Werkstoffeigenschaften, sondern auch die Abformungspräzision, die Badstabilität und wirtschaftliche Aspekte, wie die Beschichtungszeit zu optimieren sind. Ergänzt werden diese Arbeiten durch chemische und elektrochemische Untersuchungen zur Korrosionsbeständigkeit galvanisch gefertigter Formeinsätze.

Hierbei werden sowohl Vorgänge bei ihrer Herstellung als auch bei ihrem Einsatz bei der Kunststoffabformung untersucht [6].

3. Dünnschichtaktoren

Bei der Analyse bisher bekannter vollständiger Mikrosysteme aus intelligent verknüpften Sensor- und Aktorkomponenten fällt auf, daß der Vielzahl bekannter bzw. in Entwicklung befindlicher Sensorfunktionen nur eine sehr eingeschränkte Auswahl an Aktorprinzipien gegenübersteht.

Wir befassen uns daher intensiv mit der Entwicklung von Materialien und Prozessen zur Herstellung physikalischer Aktoren, welche thermische oder elektromagnetische Energie in mechanische Energie, d.h. in Wege und Kräfte umwandeln können.

Hierfür nutzen wir die folgenden Prinzipien

- Bimetall - Effekt
- Formgedächtnis - Effekt
- Magnetostriktion
- Piezoelektrischer Effekt

Zur Herstellung entsprechender, in der Mikrosystemtechnik einsetzbarer Mikroaktoren verwenden wir Dünnschichtverfahren (Magnetron-Sputter-Technik), Laserstrukturierung und verschiedene Verbindungstechniken, wie das Laserschweißen und das Lötten.

Die Dünnschichttechnik ermöglicht die Herstellung von Aktoren in Batchprozessen in zwei unterschiedlichen Prozeßfolgen: als Ausgangsmaterial vor der Strukturierung sowie als Beschichtung bereits strukturierter Mikrosysteme. Dabei ergänzen sich die verschiedenen Funktionswerkstoffe in ihrem Anwendungsprofil durch ihre unterschiedliche Ansteuerung (elektrisches bzw. magnetisches Feld, Temperatur), durch ihre unterschiedlichen Eigenschaften (Größe des Effekts, Zeitverhalten) sowie durch die verschiedenen Materialien und Aufbauten [7]. Die Abbildungen 4a-c zeigen schematisch diese drei Aktorprinzipien in der Biegebalken-Geometrie und nennen die wichtigsten Werkstoffe jeder Materialklasse. Im Fall des Formgedächtniseffekts wird die notwendige Temperaturänderung direkt mikroelektronikkompatibel durch Joulesche Wärme hervorgerufen.

Während diese Werkstoffe für Makrosysteme gut bekannt sind, ist für die Dünnschichtherstellung noch spezielle Materialentwicklung, -optimierung und -charakterisierung notwendig. Besonders die durch die Abschreckung aus der Gasphase bei der Dünnschichttechnik faszinierende Möglichkeit, neue metastabile, als kompakte Materialien nicht herstellbare Verbindungen und Gefüge zu erhalten, wird gezielt zur Eigenschaftsoptimierung der Werkstoffe untersucht. Für den realen Aufbau von Aktoren werden zudem Schutz- und Haftsichten eingesetzt sowie verschiedene Methoden der Strukturierung (Schattenmasken, Ätzverfahren, Laserstrukturierung)

erarbeitet. Im folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse kurz dargestellt [8].

Piezoelektrische Dünnschichten

Zur Ausnutzung des Piezoeffekts wurden piezoelektrische (z.B. ZnO) und ferroelektrische Dünnschichten (z.B. PZT) sowie die für ihre Ansteuerung notwendigen planaren Elektroden hergestellt. Auf der Basis von Modellierungen konnten metastabile Schichten im System ZnO-AlN-SiC hergestellt werden, die gegenüber den bekannten ZnO-Schichten verbesserte mechanische bei nahezu unveränderten piezoelektrischen Eigenschaften aufweisen [9]. Für die PZT-Schichten konnten Bedingungen für die Abscheidung der ferroelektrischen Perowskitphase in der gewünschten Stöchiometrie erarbeitet werden.

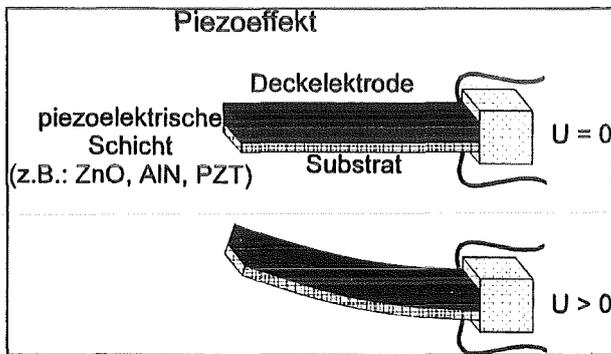


Abb.4a Schematische Darstellung eines piezoelektrischen Dünnschichtaktors in Biegebalken-Geometrie

Magnetostriktive Dünnschichten

Ziel der Entwicklungen war es, hochmagnetostriktive mit weichmagnetischen Eigenschaften zu kombinieren. Ausgehend von bekannten hochmagnetostriktiven Seltenen Erden-Eisen Laves-Phasen (z.B. Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂, Handelsname: Terfenol-D) wurden amorphe TbFe-, TbDyFe- mit positiver und SmFe-Schichten mit negativer Magnetostriktion hergestellt. Durch Beeinflussung der Schichteigenspannungen bei der Herstellung konnten Filme abgeschieden werden, die eine leichte Magnetisierungsrichtung in der Schichtebene aufweisen [10]. Dünnschichtaktoren, die mit diesen Materialien hergestellt wurden, weisen eine Sättigung der magnetostriktiv bedingten Auslenkung bei einem äußeren Feld von bereits 30 mT und eine Hysterese kleiner 1 mT auf.

Formgedächtnis-Dünnschichten

Durch Abscheidung amorpher Schichten mit anschließenden Glühprozessen konnten TiNi, Ti(Ni,Pd)- und TiPd-Schichten mit Formgedächtnis (Einweg- und Zweiwegeeffekt) hergestellt werden. Dabei

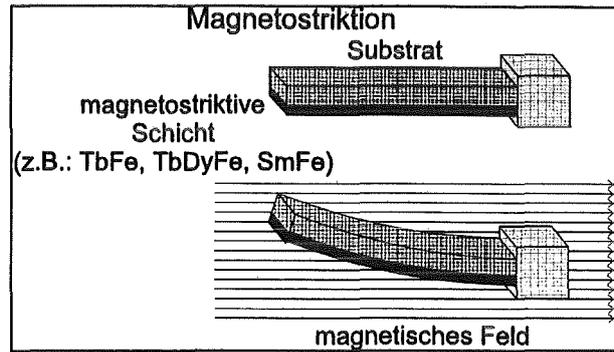


Abb.4b Schematische Darstellung der magnetostriktiven Dünnschichtaktors in Biegebalken-Geometrie

wurden zum einen spezielle TiNi-Legierungen erarbeitet, die eine besonders enge Hysterese aufweisen, zum anderen konnten durch die teilweise Substitution von Ni durch Pd Legierungen mit einstellbaren Umwandlungstemperaturen zwischen Raumtemperatur und 500°C erzeugt werden [11].

4. Dreidimensionale keramische Mikrostrukturen

Keramische Werkstoffe bieten aufgrund ihrer mechanischen und tribologischen Eigenschaften, ihrer chemischen und thermischen Beständigkeit und spezieller physikalischer Eigenschaften (dielektrische, piezoelektrische Eigenschaften) Möglichkeiten für neue Anwendungen in der Mikrosystemtechnik.

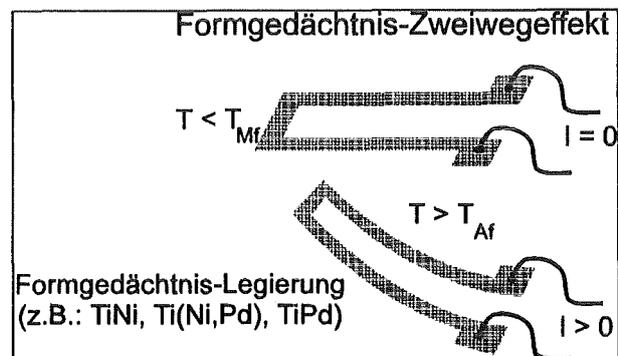


Abb.4c Schematische Darstellung eines Formgedächtnis-Dünnschichtaktors in Biegebalken-Geometrie

Die eingesetzten Keramiken müssen aufgrund der für mikrotechnische Anwendungen geforderten Strukturgrößen besonderen Anforderungen bzgl. Homogenität, Pulvercharakteristik und Strukturierbarkeit erfüllen. Im Laufe der letzten beiden Jahre wurden hierfür spezielle Mikrostrukturierungsverfahren und im Falle der Piezokeramik PZT auch spezielle Syntheseverfahren entwickelt [12 - 15].

Inzwischen ist ein Entwicklungsstand erreicht, der es mit Hilfe der Mikrostrukturierungsverfahren

Foliengießen und Prägen
Schlickerpressen

Elektrophoretische Direktabformung von Solen

erlaubt, zahlreiche dreidimensionale Mikrostrukturen herzustellen und nach dem Sintern bei allerdings großer Sinterschrumpfung in hochdichte keramische Mikroteile umzuwandeln.

Allen drei Verfahren ist gemeinsam, daß 3-dimensional strukturierte, metallische oder polymere Werkzeuge, die mikromechanisch oder mit Hilfe der LIGA-Technik hergestellt werden, mit flüssigen (Abformung von Solen) bzw. niedrig- (Schlickerpressen) oder hochviskosen (Prägetechnik) plastischen Prekursoren abgeformt werden. Außer durch die Prekursoren unterscheiden sich die Abformverfahren bzgl. der Vorbehandlung der Werkzeuge (elektrische Leitfähigkeit für die elektrophoretische Abscheidung erforderlich) und der erforderlichen Abformdrücke, -temperaturen und -zeiten. Je nach Verfahren, Werkstoff und abgeformter Mikrostruktur werden die Abformwerkzeuge aus dem Grünkörper mechanisch, chemisch oder thermisch entfernt. Da die Grünfestigkeit der Mikrostrukturen sehr begrenzt ist, muß dieser Entformungsschritt mit größter Sorgfalt erfolgen, um eine Beschädigung der empfindlichen Mikrostrukturen zu vermeiden. Erst das nachfolgende Sintern ergibt hohe Dichten und Festigkeiten. Bei multinären Keramiken, wie z.B. bei dem mit Dotierungszusätzen versehenen PZT, läuft während des Aufheizprozesses die Reaktion zu den gewünschten Phasen ab, wenn man, wie bei der pulverfreien Formgebung, von Sol - Gel - Prekursoren nicht von den später erwünschten Gleichgewichtsphasen ausgeht. Natürlich hat die Sinterung eine erhebliche Sinterschrumpfung zur Folge. Bei Gründichten nach der Abformung von 50 - 60 % und Sinterdichten von 90 - 99% der theoretischen Dichte liegt die lineare Schrumpfung zwischen 10 und 20%. Sie muß in Abhängigkeit von der gewünschten Teilegeometrie und Maßtoleranz bei den entsprechend größer zu gestaltenden Werkzeugmaßen berücksichtigt werden.

Auf Basis dieser Verfahren, die auf verschiedene Keramiken angewendet wurden (Al_2O_3 , Y-ZrO₂, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$, Si_3N_4 , $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$, PZT), arbeiten wir an den folgenden Anwendungen:

Piezoelektrisches Ultraschallsensor-Array
Keramischer Mikrowärmetauscher
Keramische Spinndüsen.

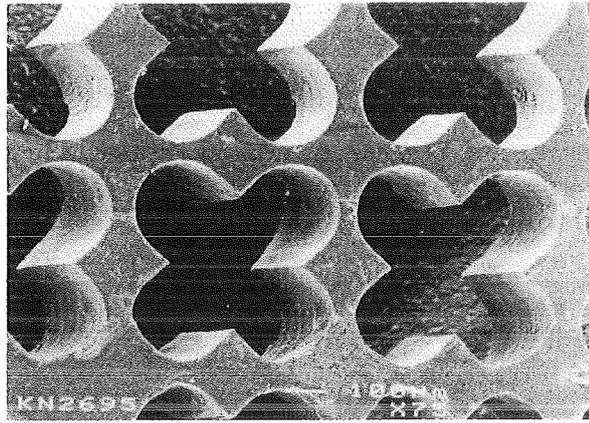


Abb.5 Düsenstruktur aus Al_2O_3

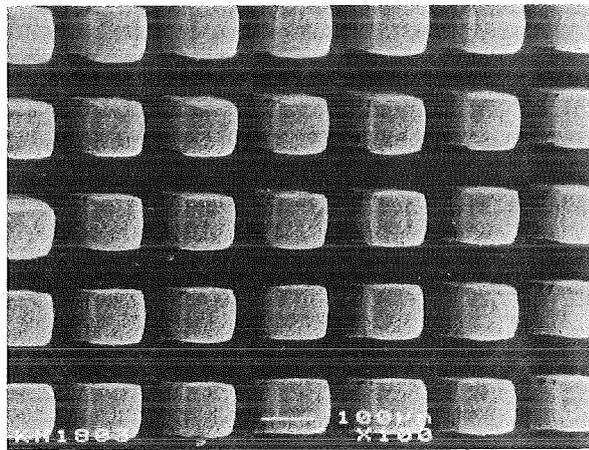


Abb.6 Piezokeramisches Säulen-Array für einen Ultraschallsensor

5. Werkstoffeigenschaften von Mikrokomponenten

Eine möglichst umfassende und genaue Kenntnis der Werkstoffeigenschaften ist für die Funktionsfähigkeit mikrotechnischer Komponenten und Systeme von essentieller Bedeutung. Neben der Tatsache, daß für bestimmte mikrotechnische Anwendungen neuentwickelte Materialien zum Einsatz kommen, die zunächst charakterisiert werden müssen, spielen 2 Phänomene eine wichtige Rolle:

Erstens hängen die meisten Werkstoffeigenschaften stark von den verwendeten Herstellungs- und Formgebungsbedingungen ab. Spezielle Verfahren der Mikroformgebung und -strukturierung haben deshalb spezielle Werkstoffeigenschaften zur Folge.

Zweitens steigt mit zunehmender Miniaturisierung das Oberflächen/Volumen-Verhältnis drastisch an, mit der Folge, daß die Werkstoffeigenschaften in erheblichem Maße von Oberflächeneinflüssen bestimmt werden.

Für die Mikrotechnik verbietet sich deshalb i.a. die Verwendung von Werkstoffdaten, die an makroskopischen Prüfkörpern bestimmt wurden.

Aus diesem Grund ist es notwendig, Werkstoffkennwerte direkt am mikrotechnischen Bauelement oder der Dünnschicht zu messen. Dazu wurden neue Prüfmethode entwickelt oder aber bestehende Prüfeinrichtungen entsprechend angepaßt [16-18]. Mit Hilfe dieser Prüfmethode können tribologische, mechanische und thermische Eigenschaften untersucht werden. Ziel und Ausrichtung dieser Prüftechnik ist es, neue werkstoffwissenschaftliche Mechanismen in Mikrodimensionen zu erkennen und diese Erkenntnisse einfließen zu lassen in die Entwicklung und Optimierung von Mikrosystemen.

Aus einer Vielzahl von gemessenen mechanischen, tribologischen und thermischen Werkstoffkennwerten ist in Abb. 7 beispielhaft das Verhalten der Wärmeleitfähigkeit [19] als Funktion der Schichtdicke in unterschiedlichen Dünnschichtmaterialien dargestellt. Man erkennt, daß die Wärmeleitfähigkeit in allen Fällen mit der Probendimension (Schichtdicke) deutlich abnimmt. Die Unterschiede zwischen wenige μm dicken Schichten und Massivproben können durchaus im Bereich einer Größenordnung der Wärmeleitfähigkeit liegen.

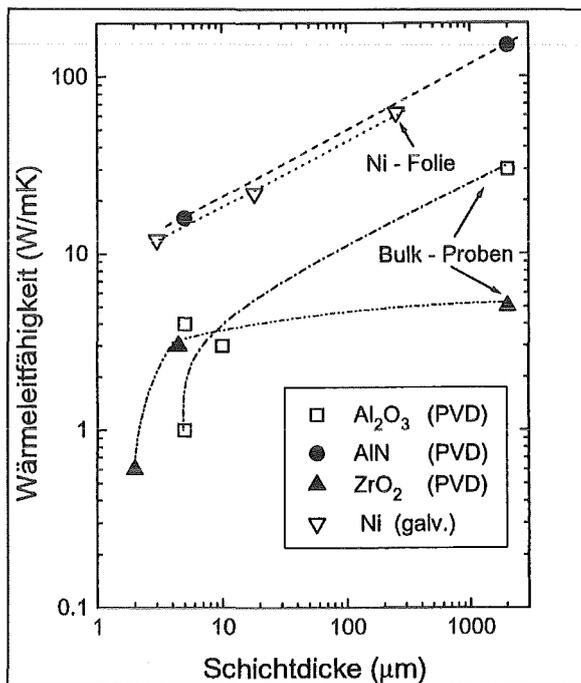


Abb. 7 Wärmeleitfähigkeit dünner Schichten

Literatur

- [1] Ruprecht, R.; Bacher, W.; Plotter, V.; Schmidt, L.: Abformung mit ungefüllten und gefüllten Kunststoffen, dieser Tagungsband.
- [2] Hanemann, T.; Müller, K.; Norajitra, P.: Abformung von Kunststoffmikrostrukturen, dieser Tagungsband.

- [3] Huber, N; Kerpe, S; Tsakmakis, Ch.: (1994) Simulation eines Abformvorgangs, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5418[18].
- [4] Ruprecht, R.; Bacher, W.; Haußelt, J.; Plotter, V.: Injection Molding of LIGA- and LIGA-Similar Microstructures Using Filled and Unfilled Thermoplastics, Conf. on Micromachining and Microfabrication, Oct. 1995, Austin, Tx., USA; to be published in SPIE Proc. Vol. 2639.
- [5] Graf, P.; Schneider, W.: Metallographische Untersuchungen an galvanisch abgeschiedenen Schichten aus Ni, interner Bericht des FZK, Feb. 1995.
- [6] Schanz, G.; Leistkow, S.: Elektrochemische Untersuchungen zur Charakterisierung von Ni-Galvanischschichten, interner Bericht des KfK, Dez. 1992.
- [7] Quandt, E.; Holleck, H.; (1995) Materials Development for Thin Film Actuators, Journal on Microsystems Technology, (im Druck).
- [8] Quandt, E.; Holleck, H.; Gugenberger, F.; Seemann, K.; (1995) Magnetostruktive, piezo-elektrische und Formgedächtnis Dünnschichtaktoren, dieser Tagungsband.
- [9] Kunisch, C.; Holleck, H. (1995) Design of piezoelectric films in the system AlN-ZnO, Surf. Coat. Tech. (im Druck).
- [10] Quandt, E.; Gerlach, B.; Seemann, K. (1994) Preparation and Applications of Magnetostrictive Thin Films, J. Appl. Phys. 76: 7000-02.
- [11] Quandt, E.; Halene, C.; Holleck, H.; Feit, K.; Kohl, M.; Schloßmacher, P. (1995) Sputter deposition of TiNi and TiNiPd films displaying the two way shape memory effect, Proc. Transducers'95/Eurosensors IX, Stockholm 25.-29.6.1995, S. 202-205.
- [12] Günther, E.; Maciejewski, U (1994): Thermal Two-Stage Process for Preparation of Doped PZT Ceramic Powder from Heterometallic Organocomplex Compounds. 8th Cimtec, Florence, 28.6. - 4.7.1994.
- [13] Knitter, R; Günther, E; Maciejewski, U; Odemer, C. (1994): Herstellung keramischer Mikrostrukturen. cfi/Ber. DKG 71, No.9, 549-556.
- [14] Knitter, R; Odemer, C: (1994) Foliengießen und Prägen als Verfahren zur Herstellung keramischer Mikrostrukturen. KfK-Nachrichten 4/94, 240-245.
- [15] Ritzhaupt-Kleissl, H.-J., Bauer, W; Günther, E; Laubersheimer, J; Haußelt, J. (1995): Development of Ceramic Microstructures, HARMST '95, July 3-5, Karlsruhe, (to be published in Microsystem Technologies).
- [16] Rohde, M., Thin Solid Films 238 (1994) S.199.
- [17] Bieger, T., Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Messtechnik 102 (1994) S. 69.
- [18] Feit, K., Hecke, M., Ilzhöfer, A., Schneider, H., DGM'95, Bochum, (1995) S. 156.
- [19] Rohde, M., Thermal Conductivity 22 (1994) S. 678.

Mikroelektronik für die Mikrosystemtechnik

H. Gemmeke, O. Fromhein, O. Krömer, T. Kühner, S. Wüstling
Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (HPE)

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes Mikrosystemtechnik werden in der HPE Hard- und Software für die Forschungs- und Entwicklungsaufgaben der Institute und Mikroelektroniksysteme für die Demonstratoren und Applikationen entwickelt. Der Status, die Strategie und die langfristigen Ziele für diese Entwicklungen werden beschrieben. Besonderer Wert wurde dabei auf die Beschreibung der F&E-Arbeiten in der HPE sowie die Beurteilung der Anforderungen an die Mikroelektronik gelegt. Es wird gezeigt, daß neue Informationstechniken wie neuronale Netze, Untersuchungen zu den physikalischen Grenzen bzgl. Auflösung sowie Optimierung der Gesamtsysteme mit Synergieeffekten von Sensorik und Elektronik neue Anwendungsgebiete erschließen können. Die Arbeiten der HPE zu den Demonstratoren finden sich in den dazugehörigen Abschnitten (z.B.[3]) dieses Statusberichtes wieder.

1. Einleitung

Im Projekt Mikrosystemtechnik des Forschungszentrums Karlsruhe werden Sensor- und Aktorelemente, die in den verschiedenen Instituten (IMT, IRCh, IMF) entwickelt werden, mit mikroelektronischen Komponenten ergänzt und so funktionsfähige Mikrosysteme hergestellt. Der Zusatz eines Mikrokontrollers und anwendungsspezifischer Software verleiht dem System intelligente Eigenschaften, wie z.B. die Möglichkeit für autonome Kontrollaufgaben, Regelung von Teilsystemen, Selbstkalibration, Fehlertest, Erkennung von kritischen Ereignissen und schließlich Triggerung der Kommunikation zu einem Hostprozessor. Auf die Vorteile intelligenter Mikrosysteme wurde schon im Detail in [1], [2] eingegangen. Hier wird nun die mikroelektronische Realisation dieser Systeme und die Strategie des weiteren Vorgehens beschrieben.

Dabei stellt man sich unter Mikroelektronik die Entwicklung von ASIC's (application specific integrated circuits) und hybriden Multilayer-Dickfilmschaltungen (Hybrid) vor, wobei sowohl ASIC's als auch ungehäuste Halbleiter-Chips (Dice), Dünnschichtwiderstände und SMD-Kondensatoren durch Ultraschall-Drahtbonden und Klebetechniken zum Mikrosystem zusammengefügt werden. In besonderen Fällen werden die Kondensatoren auch durch Multilayer-Druck erzeugt, sofern es die technischen Anforderungen erlauben, wie z.B. bei der Mikropumpensteuerung. In der HPE wurden dazu die technischen Einrichtungen der Aufbau- und Verbindungstechnik in dem vorhandenem Hybridlabor, siehe Abb. 1, entscheidend verbessert, so daß Kleinserienfertigung und einfache Flip-Chip-Bonding-Techniken möglich werden. Außerdem wurden für das ASIC-Design mit Viewlogic Werkzeuge für die Nutzung der

ASIC-Bibliotheken und Fertigungseinrichtungen des Instituts für Mikroelektronik Stuttgart (IMS) entwickelt.

Die HPE bringt mit 10 Mann etwa 20% seiner Mitarbeiter in PMT ein und ist damit der kleinste Partner (4%) im Gesamtprojekt. Aber bei der Entwicklung der Applikationen ist die Mikroelektronik ein ganz wesentlicher Bestandteil der Entwicklungsarbeit, wie z.B. für die Demonstratoren Beschleunigungs- und Oberflächenwellen-Sensorsystem sowie optisches Spektrometer. Der damit verbundene Arbeitsaufwand konnte u.a.



Abb. 1: Blick ins Hybridlabor der HPE

durch den vermehrten Einsatz von Praktikanten, Diplomanden und Doktoranden erbracht werden. Darüber hinaus war die Zusammenarbeit mit den umliegenden Hochschulen und Fachhochschulen, dem IMS, dem Forschungszentrum für Informatik und dem Rutherford Appleton Laboratory sehr hilfreich, um die kurz- und langfristigen Anforderungen der Mikrosystemtechnik an die Mikroelektronik zu erfüllen, siehe Kap. 3 und 4. Die Vorlaufforschung und Entwicklung (Kap. 2) im Bereich der Elektronik ist dabei eine besonders wichtige Voraussetzung für die Erarbeitung neuer Anwendungen für die Mikrosystemtechnik.

2. Beispiele zur Vorlaufforschung in HPE

Die HPE hat ihre Ressourcen für die Fertigungstechnologien ständig verbessert und speziell für PMT preiswerte und zuverlässige Aufbau- und Verbindungstechniken erschlossen. Für die unterschiedlichen "intelligenten" Mikrosysteme hat die HPE eine einheitliche Mikrokontrollerplattform in Hard- und Software entwickelt. Die Plattform basiert auf der SIEMENS 80C16X-Kontrollerfamilie, die aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit auch anspruchsvolle Lösungen erlaubt. Dieses System ist in allen aufwendigeren Anwendungen der Demonstratoren eingesetzt und hat viele Optionen bezüglich analoger und digitaler Schnittstellen, z.B. wurde auch ein CAN-Bus-Interface realisiert.

Soweit es die Anwendungen in der HPE erfordern, wird die vorhandene Bibliothek von ASIC-Submodulelementen für IMS-Gate-Arrays erweitert. Als nächstes sind Ringpuffer und Dezimierungsfiler für den Σ - Δ -Wandler des 3D-Beschleunigungssensors geplant.

2.1 Anwendung künstlicher neuronaler Netze

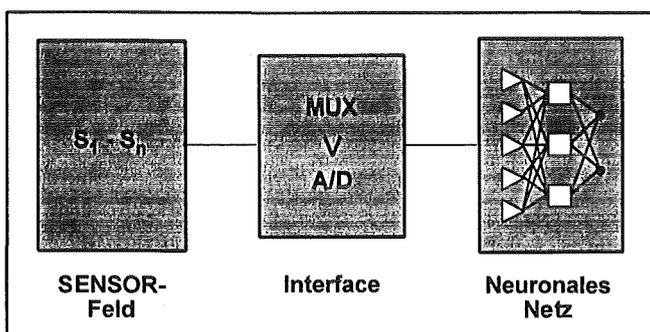


Abb.2: Durch ein Neuronales Netz konfigurierbares Sensorfeld

Die mit den Anwendungen verbundenen Soft- und Hardwareprozeduren können sequentiell von Mikrokontrollern oder ASIC's, aber auch parallel von einem künstlichen neuronalen Netz abgearbeitet werden. Ein neuronales Netz wird sich immer dann als vorteilhaft erweisen, wenn es auf eine schnelle, parallele und damit prozeßtaugliche Bearbeitung einer Aufgabe ankommt oder die Problemlösung nicht mit analytischen

Methoden gefunden werden kann. Das neuronale Netz lernt die Lösung aus den Daten. In diesem durch das neuronale Netz "intelligente" System wird *nicht* mehr für jede Anwendung ein spezifisches Sensorsystem oder Anwendungsprogramm benötigt. Vielmehr werden durch ein hinreichend redundant ausgelegtes Netzwerk viele Problemlösungen abgedeckt. Die mikroelektronischen Komponenten des neuronalen Netzes sind wie in der konventionellen Kontrollerlösung modular aufgebaut und mit dem Sensor-Aktor-System verbunden, siehe Abb. 2. Wenn die Datenverarbeitung nicht zeitkritisch ist, kann das neuronale Netz auch durch Software in einem Kontroller realisiert werden. Damit läßt sich die relativ aufwendige "partial-least-square" Methode für die Identifikation von Gasen im SAW-Sensorsystem (künstliche Nase) durch ein einfaches neuronales Netz ersetzen und so schon auf der Ebene des Mikrokontrollers realisieren. Für den SAW-Sensor wurde in der HPE die neuronale Netzlösung schon verwirklicht, für den optischen Schadstoff-Sensor ist sie in Arbeit. Ein prozeßtauglicher, paralleler ASIC-Aufbau läßt sich bei Bedarf preisgünstig mit Hilfe der IMS - ASIC - Bibliothek realisieren. Noch mehr neue Möglichkeiten für die Anwendung ergeben sich aus Hardware-Verbesserungen. Zu diesem Zweck wurden die physikalischen Grenzen von Sensorsystemen untersucht.

2.2 Physikalische Grenzen von Sensorsystemen

Für den LIGA-Beschleunigungssensor wurden die theoretischen Sensitivitätsgrenzen von Sensorelementen und Ausleseelektronik ermittelt und experimentell verifiziert.

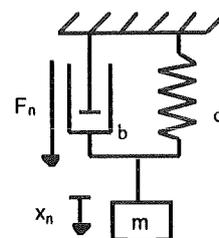


Abb.3: Mechanisches Blockschaltbild des Sensorelementes. Die beschleunigende Rauschkraft F_n verursacht eine Auslenkung x_n des Sensors.

Ein mikromechanisches Beschleunigungssensorelement besteht aus einer seismischen Masse m , die als bewegliches Element mit einer Biegezone mit der Federkonstante c zwischen zwei ortsfesten Elektroden gehalten wird [4], siehe Abb. 3. Eine Beschleunigung führt über die Auslenkung der seismischen Masse zu einer Verstimmung des Differentialkondensators, den feststehende und bewegliche Teile des Sensors miteinander bilden. Diese Elektrodenanordnung rauscht - mechanisch - durch die Brown'sche Molekularbewegung. Das die Sensorzunge umgebende Gas dämpft die Bewegung mit der Dämpfungskonstante b und verursacht eine effektive Rauschamplitude Δa_{neff} der Beschleunigung a von der Größe $\Delta a_{neff} = \sqrt{4kTb\Delta f} / m$ mit

der Boltzmann-Konstanten k , der absoluten Temperatur T und der Bandbreite Δf . Dieses Rauschen wird wegen des $1/f$ -Verhaltens erst bei mikromechanisch gefertigten Sensoren wichtig und lässt sich durch die Wahl einer geringeren passiven und einer aktiven elektronischen Dämpfung kontrollieren. Für die vorliegenden 2g-LIGA-Sensoren ergibt sich ein Rauschen von $\Delta a_{\text{neff}}/\sqrt{\Delta f} = 0,35 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, ein Bereich, der auch schon für Navigation und Seismologie sehr interessant ist. Um diesen Meßbereich auch elektronisch zu erschließen, wurde eine besonders rauscharme Schaltung entwickelt.

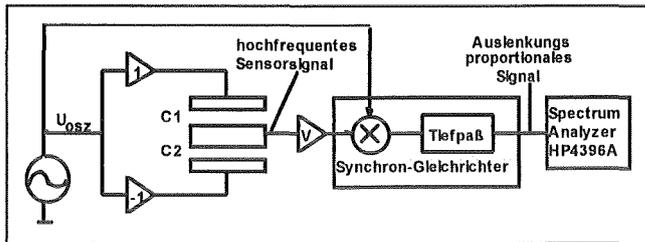


Abb. 4: Lagedetektion mit Hilfe der Hochfrequenz-Modulationsmethode

Mit Hilfe einer Lagedetektions-Schaltung (Abb. 4) gelang es, das Rauschen der Elektronik auf Werte unterhalb des mechanischen Rauschens zu drücken. Die wesentlichen Tricks dabei waren:

- Betrieb der Meßbrücke bei hohen Frequenzen, um das $1/f$ -Rauschen der Eingangselektronik zu vermeiden
- FET-Vorverstärker mit geringem Strom- und Schrotrauschen
- Synchron-Gleichrichter zur rauscharmen Demodulation des Sensorsignals
- Wahl eines hohen Oszillatorpegels (10V), um das Sensorsignal über das Eingangsrauschen des Vorverstärkers anzuheben.

Die sich ergebende spektrale Rauschdichte ist in Abb. 5 dargestellt. Nach Abzug des Rauschens des Meßsystems

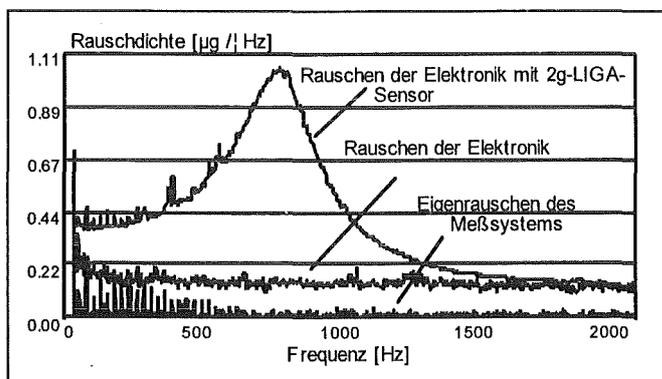


Abb. 5: Spektrale Rauschdichte des Sensorsystems und der Elektronik

ergibt sich bei niedrigen Frequenzen innerhalb des Meßfehlers die theoretisch berechnete Auflösung von $0,35 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. In der Nähe der Resonanzfrequenz ist das Rauschen des Sensors durch seine Transfer-

funktion stark überhöht. Damit ist der Nachweis des mechanischen Rauschens eines mikromechanischen Beschleunigungssensors gelungen. Mikromechanische Systeme lassen sich wegen des höheren Rauschlevels der Sensorik so auslegen, daß das Gesamtsystem nicht durch das Rauschen der Elektronik begrenzt wird. Andererseits konnte durch derartig rauscharme Elektronik dem mikromechanischen Beschleunigungssensor neue Anwendungsbereiche erschlossen werden, wie z. B. Navigation, hochsensitive Schwingungsanalyse und Seismologie.

Darüber hinaus wurde untersucht, inwieweit sich der Frequenzgang des Beschleunigungssensors durch eine aktive elektronische Dämpfung anstatt der direkten passiven Luft-Dämpfung linearisieren läßt. Dazu wurde ein spezieller Kaskadenregler entwickelt und getestet. Es ergaben sich zwei entscheidende Vorteile:

1. das Gesamtsystem wird unabhängiger von den Produktionsparametern des Sensors, und man ist in der Lage mit höherer Ausbeute und damit zu geringen Preisen Systeme in Serie zu fertigen.
2. Es können damit auch geringer bedämpfte Sensoren verarbeitet werden und so auch rauschärmere Gesamtsysteme für Frequenzen unterhalb 500 Hz produziert werden.

Dieses Beispiel zeigt, wie die gemeinsame Optimierung von Sensor und Elektronik die physikalischen Auflösungsgrenzen und damit die Anwendungsbereiche erweitern kann. Das ist ein erstes Beispiel für Synergie-Effekte von Sensor- und Elektronik-Entwicklungen.

2.3 Nutzung von Synergie-Effekten

Aus der Kombination und gemeinsamen Optimierung von mikromechanischen, mikrooptischen und mikroelektronischen Komponenten lassen sich Synergie-Effekte erzielen.

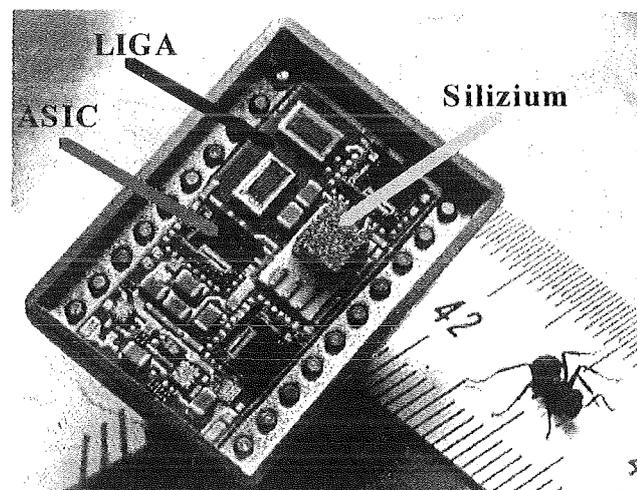


Abb. 6: 3D-LIGA-Silizium Beschleunigungssensorsystem mit ASIC-Ausleseeinheiten

Ein besonders einfaches Beispiel für Synergie ist die gemeinsame Verwendung von LIGA- und Silizium-Technik in einem planaren 3D-Beschleunigungssensorsystem. Während LIGA-Sensorelemente wegen des erreichbaren großen Aspektverhältnisses parallel zur Montagefläche sensitiv sind, messen Siliziumsensoren senkrecht zu ihrer Montageplattform. Damit kann man für einen 3D-Sensor einen Großteil der Probleme bei der orthogonalen Ausrichtung für die Montage dreier gleicher Sensoren auf einem Würfel umgehen und fertigungstechnisch viel einfacher zwei LIGA- und einen Siliziumsensor planar auf eine Plattform gemeinsam mit der Elektronik montieren (Abb.6). Damit vereinfacht sich auch die Aufbau- und Verbindungstechnik erheblich.

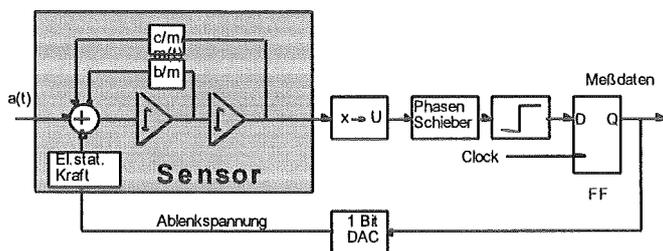


Abb.7: Prinzip des elektro-mechanischen Σ - Δ -Wandlers für den Beschleunigungssensor. Der Sensor enthält einen doppelten Integrator, der von der Elektronik mitgenutzt wird.

Ein weiteres Beispiel für Synergie und dadurch bedingte Einsparungen von Bauteilen und Leistungsverbrauch ergab sich bei der Entwicklung einer ASIC-Ausleseeinheit für den Beschleunigungssensor. Als Schaltung wurde ein elektromechanischer Σ - Δ -Wandler gewählt, siehe Abb. 7. Ein Σ - Δ -Wandler erfaßt die Höhe eines Analogsignals als Bit-Strom. Der Fehler der Wandlung wird durch doppelte Integration und Rückführung des Bit-Stromsignals mit steigendem "oversampling" immer kleiner. Auch bei einem sehr großen dynamischen Wandlungsbereich von 16 - 20 Bit, wie er für den Beschleunigungssensor notwendig ist, läßt sich die Schaltung mit vertretbarem Aufwand realisieren. Zudem enthält der Sensor inhärent die zweifache Integration einer aufgeprägten elektromotischen Kraft zu einer Sensorauslenkung, so daß in einer rückgekoppelten Schaltung die dazu notwendigen Operationsverstärker eingespart werden können, siehe Abb. 7. Die Bauteile- und die damit verbundene Leistungersparnis sind ein wichtiger Synergieeffekt, der sich bei batteriebetriebenen Geräten auszahlt.

3 Anforderungen der Mikrosystemtechnik an die Elektronik

Der im letzten Beispiel geschilderte niedrige Leistungsverbrauch ist neben der Miniaturisierung die wichtigste Anforderung der Mikrosystemtechnik an die Mikroelektronik.

3.1 Niedriger Leistungsverbrauch

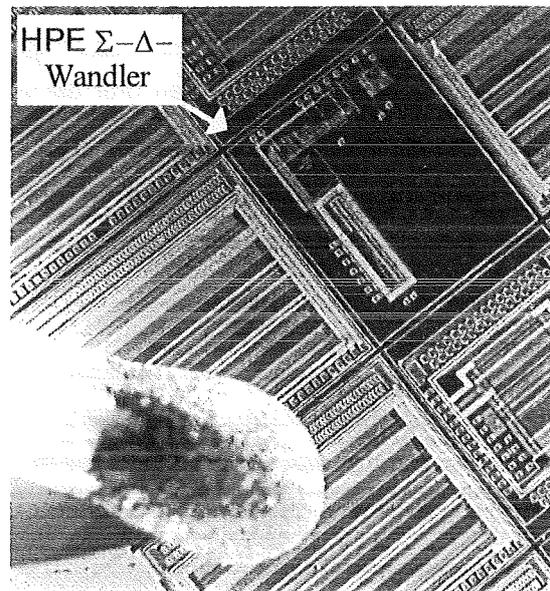


Abb.8: HPE-ASIC für die Auslese des Beschleunigungssensors

Mikrosysteme eignen sich wegen ihrer geringen Baugröße besonders für portable batteriebetriebene Geräte. Darüber hinaus benötigen zumeist seismologische Anwendungen und ausgedehnte Datenerfassungssysteme niedrigen Leistungsverbrauch. Die verwendete geringe Baugröße garantiert aber noch nicht den niedrigen Leistungsverbrauch. Es sind vielmehr aufwendige Schaltungstechniken notwendig, um dieses Ziel zu erreichen. Im Fall des triaxialen Beschleunigungssensors ist gegenüber der Standardschaltung (1,5W) eine ASIC-Auswertung sehr nützlich, um den Leistungsverbrauch auf 80 mW im analogen Schaltungsteil abzusinken, siehe Abb. 8. Andererseits darf man nicht übersehen, daß die leistungshungrigere Schaltung in Dickfilm-Technik oder mit surface-mounted-devices (SMD) auch etwas höhere Sensitivitäten $\approx 1 \mu\text{g}/\text{Hz}$ erlaubt. Zur Zeit beträgt der Unterschied noch einen Faktor 10.

3.2 Miniaturisierung der Mikroelektronik

Die vielschichtige Problematik der Miniaturisierung der Systeme soll hier anhand des Beschleunigungssensors dargestellt werden. Tab. 1 zeigt die für die verschiedenen Bauteiletechniken erreichbaren Modulbaugrößen eines 1D-Beschleunigungssensorsystems ohne digitale Auswertung. Welche Technik für die industrielle Anwendung infrage kommt, entscheidet der Preis und die Leistungsfähigkeit der entsprechenden Technologie für die spezifische untersuchte Anwendung. Einen niedrigeren Preis wird immer die Technik erzielen, die weniger

Bauteiletyp bzw. Techniken	Baugröße	time to market	Preis	Bemerkungen
bedrahtete Bauteile	100 x 50 mm ²	++	++	kein Mikrosystem
surface mounted devices (SMD)	25 x 30 mm ²	++	++	
Chip on board (COB)	25 x 13 mm ²	+	+	
Hybrid (multichip module, MCM)	25 x 13 mm ²	+	0	
ASIC	4 x 7 mm ²	--	--	Ä 5DM+(50-100TDM)/N

Tab.1.: Miniaturisierung der Analogdatenerfassung für einen 1D-Beschleunigungssensor in verschiedenen Techniken und ihre Bedeutung (++: sehr preiswert oder sehr schnelle Realisierung, über +, 0, - zu --: sehr teuer oder sehr große Entwicklungszeit)

Bauteile und Produktionsschritte sowie keine manuelle Anpassung der Elektronik an die schwankenden Produktionsparameter der Sensor/Aktorelemente benötigt. Aber oft ist noch entscheidender, daß die zu entwickelnde Lösung rechtzeitig ("time to market") auf dem Markt präsent ist, und auch Prototypen in einer Kleinserienfertigung schnell geliefert werden können. Bewertet man nun die in Tab. 1 gegebenen Techniken nach diesen Maßstäben, so bestimmen die Anwendungen die Auswahl der Technik.

Kompakte batteriebetriebene Geräte benötigen in den meisten Fällen ASIC's, d. h. die Anforderungen oder die niedrigen Preise bei großen Stückzahlen rechtfertigen diesen Weg. Die Schwelle für die Entwicklung von ASIC'S muß nicht erst bei 20 - 100 Tausend Chips liegen, sondern kann schon bei Nutzung von Gate-Arrays und Multi-Projekt-Wafers bei 100 - 500 Chips erreicht werden. Bei diesem Verfahren teilen sich mehrere Entwickler die einmaligen Masken- und sonstigen Fertigungskosten, indem sie ihre Chips gemeinsam auf einem Wafer unterbringen. Ein gutes Beispiel dafür ist der in der HPE entwickelte ASIC, siehe Abb. 8, für die Auslese des Beschleunigungssensors. Vergleichbare diskrete Aufbauten sind nicht unter 300 DM auf dem Markt zu erhalten, so daß sich diese Entwicklung schon ab 200 Stück lohnt!

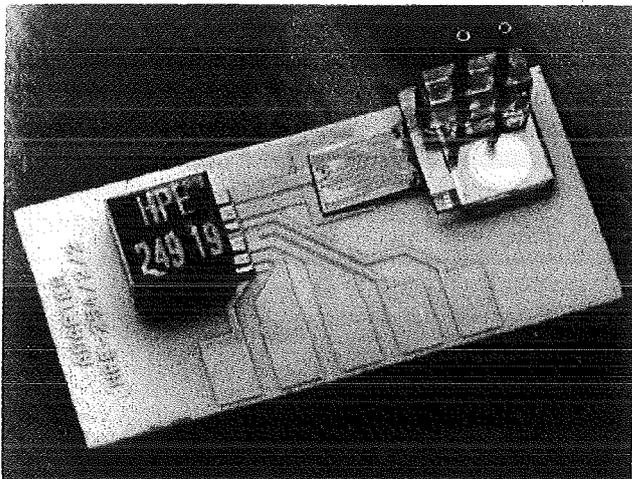


Abb.9: Ansteuerung der Mikropumpe als Multichip Modul 7*7 mm²

Multi-Chip-Module, eingebettet in Hybridtechnik, sind wegen der notwendigen aufwendigen zumeist manuellen

Fertigung und komplizierten Testtechnik in Reinräumen teuer, aber sehr kompakt und bei niedrigen Stückzahlen schnell zu fertigen. Ein Beispiel für die geringe Größe, die sich mit dieser Technik erzielen läßt, ist in Abb. 9 der Ansteuerschaltung der Mikropumpe zu sehen. In dem nur 4 mm hohen Modul ist die elektronische Steuerung (6 Chips und 10 Widerstände sowie Kondensatoren) für die Mikropumpe untergebracht und verarbeitet Heizströme bis zu 1A. Eine viel preisgünstigere SMD-Version, die deshalb eher für die Massenproduktion geeignet ist, füllt mit einer Fläche von 13 x 25 mm² fast die ganze Mini-Leiterkarte der MCM-Version aus.

Nach unserer Einschätzung gehört "Chip on board", einer Verbindung der üblichen preiswerten SMD-Technik mit einigen wenigen aufgebrauchten Spezial-Chips, die Zukunft. An vielen Stellen in der Welt wird an der dazu notwendigen preiswerten Verbindungstechnik für ungehäuste Dice auf gewöhnliche Leiterplatten gearbeitet. Auch in der HPE wird eine halbautomatischen Chip-on-board-Technik für die preiswerte und zuverlässige Kleinserienproduktion vorbereitet.

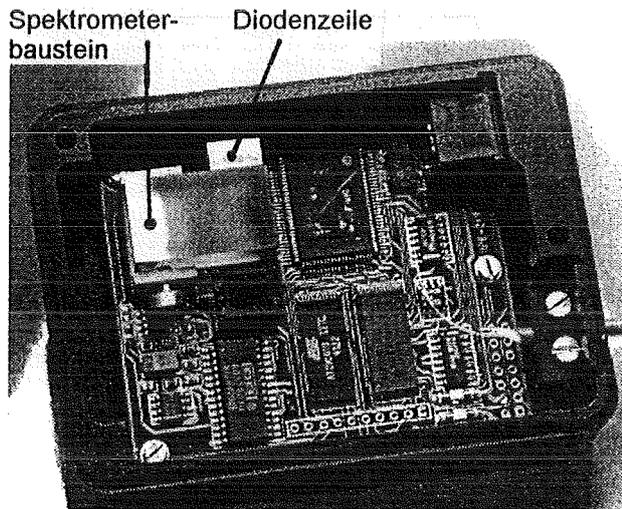


Abb.10: SMD-Aufbau des optischen Spektrometers

Die Kleinserienfertigung in SMD-Technik gehört in der HPE zum Standard. Für die Kleinserienfertigung wird erfolgreich ein sehr präziser Bestückungsautomat benutzt. Durch die integrierte computerisierte Fertigung vom Schaltungsentwurf über Simulation, Layout und Bestückung werden Fehler in den Zwischenschritten der Fertigung vermieden und die Effektivität erheblich

verbessert. Das hat sehr geholfen, flexibel und schnell auf Drittmittel-Aufträge zur Entwicklung und Fertigung zu reagieren. Ohne wesentliche Ausfälle konnte damit das optische Spektrometer (Abb. 10) in kurzer Zeit zur Serienreife gebracht werden.

3.3 Applikationsbedingte Anforderungen an intelligente Mikrosysteme

Die Entwicklung der LIGA-Technik steht in Konkurrenz zur Silizium-Mikromechanik. Daher kann man die Industrie nur dann überzeugen, wenn im FZK entwickelte Applikationen bedeutend besser oder preiswerter sind als die eingeführten Vorgänger oder eine neue Sensor-Aktor-Technik angeboten wird. Das erfordert nicht nur Verbesserungen in der Sensorik und Aktorik, sondern auch in der Elektronik. Aber es lassen sich auch Verbesserungen in Synergie mit der Siliziumtechnik finden, wie das vorgestellte Beispiel des triaxialen Beschleunigungssensorsystems gemischt aus LIGA- und Siliziumsensoren zeigt.

Darüber hinaus müssen die neuen Systeme bzw. Applikationen einige weitere Bedingungen erfüllen, d. h. es muß fertige, gut funktionierende Prototypsysteme geben und die Kleinserienfertigung sollte erprobt sein. Das Risiko, das unsere Industriepartner übernehmen wollen, ist in den letzten Jahren deutlich geringer geworden.

Für die HPE ist diese Situation etwas schwierig, da das fertige System immer am Ende der Kette der Entwicklungen liegt, während sich Aktoren und Sensoren auch direkt vermarkten lassen. Daher beginnen die Drittmittelwerbungen für die HPE erst am Ende des Projektes. Tab. 2 enthält die von der HPE innerhalb von PMT abgearbeiteten Aufträge inklusive den Demonstratoren. Die Drittmittelbeteiligung für HPE geschah bisher indirekt über PMT.

Systeme	Anzahl	geliefert	in Bau
Beschleunigungssensor	30	14	
SAW-Sensor	10	2	
optisches Spektrometer	77	-	
Chem-Fet-Meßeinrichtung	1	-	

Tab. 2: In HPE abgearbeitete Aufträge für PMT

4. Strategie und langfristige Ziele

Es ist die Strategie der HPE, bei der Entwicklung von Systemen für neue Anwendungen frühzeitig mitzuwirken, um neue Lösungen aus der Synergie von Sensorik, Aktorik und Elektronik finden zu können. Die guten Ergebnisse dieser Strategie sind im Rahmen dieses Reports am Beispiel des Beschleunigungssensorsystems ausführlich beschrieben worden. Dieses Vorge-

hen garantiert nach der Erfahrung in HPE mit Technologie-Transfer auch die besten Chancen auf Erfolg bei Systementwicklungen in Zusammenarbeit mit Industriepartnern. Dabei kann die HPE die Rolle eines Entwicklungsbüros für die Klein- und Mittelständige-Industrie übernehmen, das die Aufgaben der Vorlauforschung und Entwicklung der Mikroelektronik in der Mikrosystemtechnik bearbeitet.

Um das zu erreichen, werden einige Arbeitsgebiete weiter ausgebaut. Für die *Aufbau- und Verbindungstechnik* wird die Hybrid-Technik für kleine Serien in Richtung Flip-Chip-Technologie für "Chip on Board" weiterentwickelt. Das *ASIC-Design* (analog und digital) - insbesondere in Richtung Testeinrichtungen - wird hierzu auf eine breitere Basis gesetzt, um die Anforderungen der Mikrosystemtechnik erfüllen zu können. Gerade in diesem Bereich lassen sich Anforderungen, wie geringe Baugröße und geringer Leistungsverbrauch, realisieren. Mit der Miniaturisierung treten auch neue Effekte der *elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV)* zwischen Sensorik, Aktorik und Elektronik auf, die untersucht werden müssen. Schließlich erfordern verteilte Sensor- und Aktor-Systeme die Integration *neuer Informationstechnologien*, um prozeßtaugliche Informationen aus den intelligenten Mikrosystemen liefern zu können. Komplizierte Algorithmen, die bisher größere Arbeitsplatzrechner benötigen, werden in *neuronalen Netzstrukturen* übersetzt, die sich auf Mikrokontrollern direkt ins Sensor-Aktor-System einbauen lassen. Für Aktoren sind *neuro-fuzzy* Regler in Entwicklung. Der adaptive Charakter dieser Informationstechnologien macht sie besonders geeignet für die Anpassung von Sensoren und Aktoren an die momentane Umgebung und für die Kompensation von Alterungseffekten und Nichtlinearitäten.

Literatur:

- [1] H. Gemmeke, M. Balzer, O. Fromhein, O. Krömer, T. Kühner: Schaltungsentwurf für Mikrosysteme, 1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, 23.-24. September 1993, Bericht des Forschungszentrums Nr. 5328, S. 170
- [2] H. Gemmeke: Intelligente Mikrosysteme, Kurs "Neue Produkte durch den Einsatz von Mikrosensoren und Mikroaktoren" in der FTU des Forschungszentrum Karlsruhe, 14.-15. September 1994
- [3] O. Krömer, H. Eggert, O. Fromhein, H. Gemmeke, T. Kühner, K. Lindemann, J. Mohr, J. Schulz, M. Strohrmann, O. Wollersheim: Intelligentes triaxiales Beschleunigungssensorsystem, dieser Tagungsband
- [4] O. Krömer, O. Fromhein, H. Gemmeke, T. Kühner, J. Mohr, M. Strohrmann, High-precision readout circuit for LIGA acceleration sensors, Sensors and Actuators A 46-47(1995)196

Aspekte der Kleinserienfertigung

Erfahrungen beim Aufbau und Betrieb einer Kleinserienfertigung für LIGA-Spektrometer

O.F. Hagen, W. Bacher, M. Hecke, J. Mohr, H. Moritz, C. Müller

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Eines der Anwendungsgebiete der LIGA-Technik ist die Fertigung von Mikrospektrometern [1,2]. Der wesentliche optische Baustein des Mikrospektrometers enthält zunächst eine 0.1 mm dicke lichtleitende Kunststoffschicht (Kernschicht) aus PMMA mit Abmessungen von 10 x 20 mm². Sie trägt am Rand die Mikrostrukturen für das Reflexionsgitter und für die Ein- und Auskopplung des Lichtes. Zur Führung des Lichtes durch Totalreflexion ist diese Kernschicht zwischen zwei Schichten mit kleinerem Brechungsindex eingebettet. Die Stufenhöhe des Reflexionsgitters beträgt 200 nm, das Aspektverhältnis für dieses Teil liegt bei 500. Die kleinen kritischen Abmessungen bei diesem hohen Aspektverhältnis lassen sich gegenwärtig nur mit dem LIGA-Verfahren realisieren. Für die Fertigung des Spektrometerbausteins in großen Stückzahlen ist ausschlaggebend, daß es als Abformteil hergestellt werden kann [3,4]. Für den Transfer des Herstellungsverfahrens in die Industrie hat FZK im Rahmen der Zusammenarbeit mit seinem Industriepartner Fa. Mikroparts mit der Kleinserienfertigung von Spektrometerbausteinen begonnen. Die Hauptkomponenten der Abformanlage wurden nach FZK-Entwürfen bei der Industrie in Auftrag gegeben. Parallel dazu wurden im FZK die optischen Testeinrichtungen und die Abformwerkzeuge für den neuen Spektrometertyp entworfen und gefertigt. Die Qualität der Abformwerkzeuge und die Funktionalität der neuen Abformanlage wurden durch die Auslieferung spezifikationsgerechter Bausteine nachgewiesen.

1. Das LIGA-Spektrometer

In den Jahren 1990 - 1994 führten die Entwicklungsarbeiten im IMT zu ersten Labormustern von LIGA-Spektrometern, die über einen Abformprozeß hergestellt waren. Dies war die Basis für die Aufnahme einer Kleinserienfertigung von Spektrometerbausteinen mit folgender Spezifikation:

Spektralbereich: 380 - 750 nm
Auflösung bei 560 nm: < 7 nm (FWHM)

Die Kleinserie umfaßt die Fertigung des Bausteines (vgl. Abb. 1) mit eingelegter Glasfaser zur Einkopplung des Lichtes und einem integrierten 45°-Umlenkspiegel zur Auskopplung des spektral zerlegten Lichtes auf eine Diodenzelle. Die optischen Leistungsdaten werden durch entsprechende Meßprotokolle nachgewiesen. Mit dieser Kleinserienfertigung sollten die Vorbedingungen für die Übertragung des Herstellungsverfahrens in die Industrie geschaffen werden. Die Gesamtverantwortung für das Projekt liegt beim IMT, das sich dabei auf die Mitarbeit der anderen Institute des PMT abstützen kann, insbesondere von HIT, HBT und HPE.

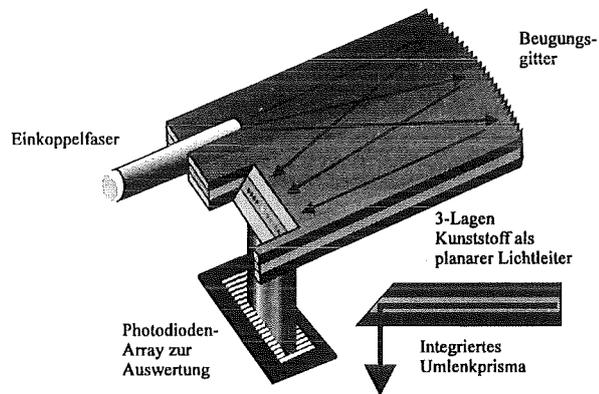


Abb. 1: Schematische Darstellung eines LIGA-Mikrospektrometerbausteins mit Einkopffaser, selbstfokussierendem Reflexionsgitter und Fotodiodenzelle.

2. Vom Labor zur Serienfertigung

Die Fertigung des Spektrometerbausteins ist in Abb. 2 schematisch dargestellt. Der erste Schritt ist das Heißprägen der Kernschicht mit den optischen Mikrostrukturen, gefolgt vom Verschweißen mit der Mantelschicht. Nach dem Entformen folgt die Verspiegelung des Gitter- und Umlenkspiegelbereiches durch Aufputtern einer dünnen Silberschicht.

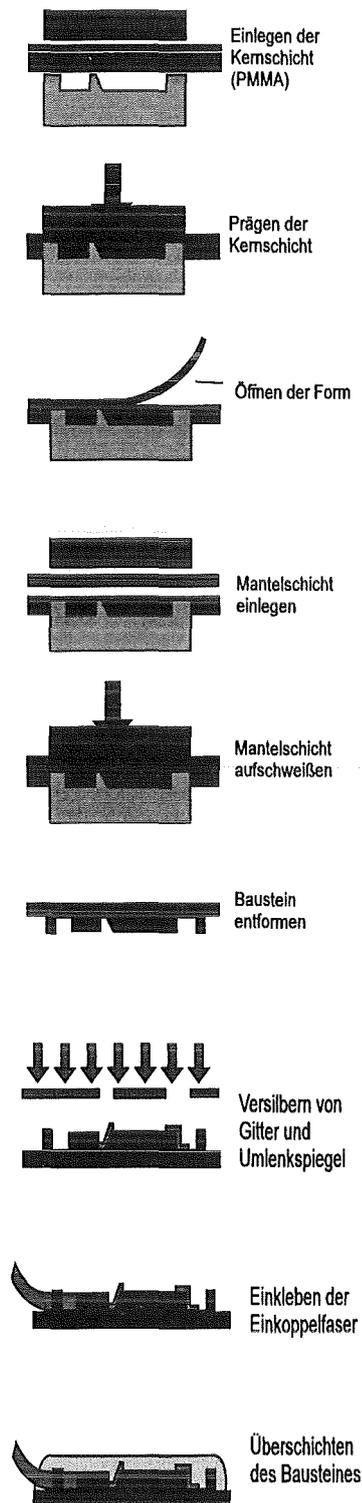


Abb. 2: Fertigungsschritte bei der Herstellung von Mikrospektrometerbausteinen.

Zur optischen Vermessung wird eine Glasfaser in den Baustein eingelegt. Bei entsprechender Qualität wird der Baustein mit einem Polymer als oberer Deckschicht überschichtet und dabei die Faser fixiert. Diese im Labormaßstab durchgeführten Teilprozesse mußten nun in die Serienfertigung überführt werden. Schwerpunkt war dabei, die vorhandenen Technologien unter den Gesichtspunkten Zuverlässigkeit, Prozeßsicherheit, Automatisierung und Fertigungszeit weiter auszubauen.

2.1 Abformanlage

Die Abformanlage hat als Hauptkomponenten zwei Pressen mit beheizbaren Stempeln, die in einer teilbaren Vakuumkammer angeordnet sind, jeweils eine Presse für das Prägen und eine für das Verschweißen. Zur Sicherung gegen Maschinenausfall sind die Pressen baugleich, d. h. beide Teilprozesse können auf jeder Maschine durchgeführt werden. Abb. 3 gibt einen Blick auf das Reinraumzelt (Klasse 1000), in dem die Fertigungsanlage untergebracht ist.



Abb. 3: Fertigungsanlagen für Spektrometerbausteine im Reinraumzelt.

Im Hintergrund sind die beiden Pressen zu sehen, rechts die automatische Prozeßsteuerung über PC und links der Arbeitstisch zum manuellen Be- und Entladen der Formen. Abb. 4 zeigt die geöffnete Vakuumkammer; der untere Flansch ist mit dem Abformwerkzeug (Formeinsatz) bestückt. Auch die Sputteranlage, in der die entformten Bausteine im Bereich des Gitters und des Umlenkspiegels versilbert werden, ist im Reinraumzelt untergebracht.

Abb. 5 zeigt einen Block aus 5 Bausteinen nach der Verspiegelung. Man erkennt am Außenrand vor dem Gitterbereich den sogenannten Handhabungsstreifen. Er erleichtert das Entformen und bietet Platz für die Markierung des Bausteines. Zur Vereinzelung des Bausteinblockes wurde eine Abkantschere mit mehreren Schneidmessern gebaut, die ihn in einem Arbeitsgang in die fünf Einzelbausteine zerlegt.



Abb. 4: Blick auf die geöffnete Vakuumkammer der Prägepresse. Auf der unteren Platte ist das Abformwerkzeug (Formeinsatz) für die Fertigung von 5 Spektrometerbausteinen zu erkennen.

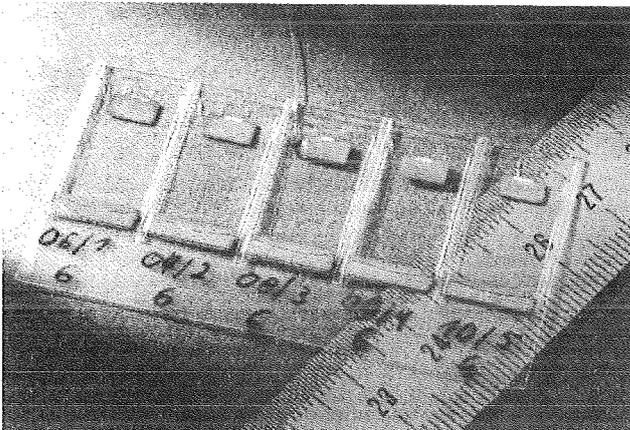


Abb. 5: Fertigungsnutzen von 5 Spektrometerbausteinen nach dem Verspiegeln.

2.2 Optischer Teststand

Vor der Vermessung des Bausteines im optischen Teststand wird zunächst eine Glasfaser eingelegt. Danach wird eine Deckschicht aus einem Polymer mit einem gegenüber dem von PMMA geringeren Brechungsindex aufgebracht. Während das Einlegen der vorgeschrittenen Faser unter mikroskopischer Beobachtung durch manuelle Steuerung eines x-y-z-Tisches erfolgt, kann der eigentliche Meßvorgang automatisch ablaufen, angefangen beim Einjustieren des anderen Faserendes auf die Lichtquelle über den Filterwechsel zur Messung der Transmission bei verschiedenen Wellenlängen bis zur Meßwertauswertung und Ausdruck des Ergebnisses. Das Aufbringen der Deckschicht und Einkleben der Faser erfolgt wiederum von Hand.

2.3 Abformwerkzeuge

Entsprechend den optischen Anforderungen mußten für dieses Projekt neue LIGA-Abformwerkzeuge hergestellt werden. Dabei stellte die von bisher 300 auf 196 nm verringerte Stufenhöhe des Gitters besonders hohe Anforderungen an die Qualität aller Prozessschritte, von der Schreibstrategie beim Strukturieren der Zwischenmaske mit dem Elektronenstrahlschreiber bis zur Steuerung der Nickelgalvanik. Zur Beurteilung der Qualität der Gitterstrukturen dienten Untersuchungen der Formen mit dem Rasterelektronenmikroskop. Angesichts dieser mehr qualitativen Daten war letztlich wesentlich, daß Bausteine mit den geforderten Eigenschaften hergestellt werden konnten. Wie aus Abb. 4 ersichtlich, sind in dem Standard-LIGA-Werkzeug von 26 x 66 mm² fünf identische Bausteinformen untergebracht. Zur Erhöhung des Durchsatzes ist bei der Auslegung der Pressen bereits vorgesehen, daß auch zwei Werkzeuge gleichzeitig in einer Werkzeugplatte untergebracht werden können. Zusätzlich ist geplant, das Formwerkzeug in fünf separate Formnester aufzutrennen. Defekte Formnester lassen sich dann ohne großen Aufwand durch neue ersetzen.

2.4 Materialprobleme

Für den Spektrometerbaustein werden drei verschiedene, optisch transparente Kunststoffmaterialien benötigt [3]:

Die lichtleitende *Kernschicht* ist aus optisch reinem PMMA mit den Abmessungen (pro Bausteinblock) ca. 20 x 75 mm², 87 µm dick.

Die *Mantelschicht* mit einem etwas kleineren Brechungsindex als PMMA besteht aus einem fluorhaltigen Copolymer (Abmessungen: ca. 40 x 75 mm², 300 µm dick).

Die *obere Deckschicht* muß wiederum einen kleineren Brechungsindex haben und darf die Kernschicht und den Silberfilm nicht beschädigen.

Lediglich für die Deckschicht war ein kommerzielles Produkt verfügbar. Für die PMMA-Kernschicht gab es nur Granulat bzw. dickere Folien von verschiedenen Herstellern. Aus beiden Ausgangsmaterialien wurden Kernschichten durch unterschiedliche Verfahren hergestellt und auf ihre Eignung bezüglich der optischen Eigenschaften und der Verarbeitbarkeit getestet. Das jetzt im Einsatz befindliche Material steht als extrudierte Folie zur Verfügung. Die Mantelschicht wird als Spezialwerkstoff wie bisher von FZK hergestellt.

2.5 Anlagenbetrieb - Erfahrungen und Ausblick

Nach den bisherigen Betriebserfahrungen hat sich das Gesamtkonzept der Fertigungsanlage als richtig erwiesen. Die automatische Prozeßsteuerung sorgt für die Einhaltung vorgegebener Präge- und Schweißbedingungen. Von großer Bedeutung sind saubere Arbeitsbedingungen. Neben der Aufstellung der Anlage im Reinraumzelt gehört dazu die Sauberkeit der Halbzeuge, d.h. die Folien müssen vor Einbau sorgfältig gereinigt und auf Partikelfreiheit geprüft werden. Zur Zeit werden diese Arbeiten, vom Zuschnitt der Folien bis zum Bestücken der Formen, in einem Reinraumlabor durchgeführt.

Verbesserungen bzw. Erleichterungen im Fertigungsablauf werden von folgenden Maßnahmen erwartet:

- *Überarbeitung der Prozeßsteuerung.* Die vom Pressenhersteller gelieferten Programme müssen auf die spezifischen Belange des Abformprozesses abgestimmt werden. Dazu gehört die Vernetzung mit den Programmen und Datensätzen des optischen Teststandes.

- *Teilautomatisierung der Halbzeugfertigung.* Der Arbeitsaufwand für Zuschnitt, Reinigung, Prüfung und Bereitstellung der Folien soll durch entsprechende Handhabungshilfen verringert, die Qualität dadurch zugleich erhöht werden.
- *Einsatz von Doppel-Formwerkzeugen.* Hierdurch läßt sich die Fertigungskapazität erhöhen.
- *Ausbau und konsequente Anwendung der Qualitätssicherungsmaßnahmen* auf die Arbeits- und Prüfvorgänge einschließlich einer durchgängigen Dokumentation.

Die Umsetzung dieser Maßnahmen wird jetzt, nach Verfügbarkeit von Kernschichtmaterial mit guten Verarbeitungseigenschaften, mit Vorrang betrieben. Ziel ist dabei die Verringerung der Zykluszeiten bei gleichzeitiger Erhöhung der pro Zyklus gefertigten Bausteine. Parallel dazu wird der Transfer des Fertigungsprozesses zum Industriepartner Fa. Mikroparts durchgeführt.

Danksagung

Die Arbeiten zur Spektrometerfertigung hatten die Unterstützung sehr vieler Einrichtungen des FZK, von der technischen und administrativen Infrastruktur bis zu den Partnern im Projekt Mikrosystemtechnik. Dafür haben wir vielmals zu danken. Die Autoren stehen stellvertretend für die beteiligten Arbeitsgruppen im IMT; sie danken ihren Mitarbeitern für ihren oft das übliche Maß weit übersteigenden Einsatz.

Literatur:

- [1] Mohr, J., Göttert, J., Müller, C., Bley, P.: KfK-Nachrichten **23** (1991), S. 93ff
- [2] Müller, C., Krippner, P., Kühner, T., Mohr, J.: dieser Band, S. 175ff.
- [3] Müller, C., Mohr, J.: Bericht FZKA 5609, (1995). Müller, C. Dissertation Universität Karlsruhe (1995).
- [4] Wechsung, R.: mst news Nr. 14 (1995), p. 13ff.

Mechanische Mikrotechnik für Abformwerkzeuge und Kleinserien

Th. Schaller¹⁾, W. Bier²⁾, G. Linder¹⁾, K. Schubert¹⁾

¹⁾Hauptabteilung Versuchstechnik

²⁾Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Die im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte Methode der Mechanischen Mikrotechnik beruht auf der spanabhebenden Bearbeitung meist metallischer Oberflächen mit hochgenau profilierten Mikrowerkzeugen. Auf diese Weise gefertigte Mikrostrukturprodukte wie Mikrowärmeübertrager mit hoher spezifischer Übertragungsleistung sowie statische Mikrovermischer mit hoher Vermischungseffektivität und chemische Mikroreaktoren mit hoher spezifischer Reaktionsleistung befinden sich bereits im Industrietest. Nach Optimierung der einzelnen Fertigungsschritte wurden im Jahr 1995 in zwei Kleinserien Mikrowärmeübertrager und Mikroreaktoren an vorhandenen Fertigungseinrichtungen im Forschungszentrum Karlsruhe hergestellt.

Die mechanischen Mikrostrukturierungsverfahren eignen sich darüber hinaus zur Herstellung von Werkzeugen zur Abformung mikrostrukturierter Systemkomponenten aus Kunststoff. Die Abformwerkzeuge sind mehrteilig und mehrstufig aufgebaut und enthalten komplexe dreidimensionale Strukturen. Kunststoffabformungen davon haben sich bereits als Zellkultursysteme, Glasfaserkoppler, Retroreflektoren sowie als Komponenten für Mikrosysteme, Mikropumpen und Mikroventile bewährt.

1. Einleitung

Seit der Entwicklung der „klassischen“ Mikrostrukturierungsverfahren, nämlich den auf Silizium basierenden Ätz- und Schichttechnologien, und deren Weiterentwicklung zur Silizium-Mikromechanik stehen vor allem lithographische Verfahren wie UV-Lithographie und LIGA-Verfahren sowie Laserstrukturierungstechnologien im Mittelpunkt des Interesses. Mit der Verstärkung des Interesses an marktfähigen Produkten erfolgt seit einiger Zeit jedoch eine Besinnung auf preisgünstige Verfahren, die mit vergleichsweise geringem Aufwand die Fertigung hochentwickelter Mikrostrukturkomponenten ermöglichen. Als tragfähige Lösung haben sich die im Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) entwickelten Methoden der Mechanischen Mikrotechnik erwiesen. Sie basieren auf einer früheren Zusammenarbeit mit der Firma MBB (heute DASA) und bestehen in einer konsequenten Weiterentwicklung der konventionellen Feinwerktechnik im Hochpräzisionsbereich unter Verwendung serienmäßiger CNC-Maschinen. In die gleiche Richtung tendiert ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Sommer 1995 beschlossenes Schwerpunktprogramm zum Thema „Mikromechanische Produktionstechnik“, in dessen Rahmen für die Klein- und Mittelserienfertigung mikrosystemtechnischer Komponenten konventionelle Fertigungsverfahren gefördert werden sollen. Die mit der Mechanischen Mikrotechnik zugänglichen Strukturgrößen oberhalb etwa 5 µm bei Strukturhöhen über 1 mm sind für sehr viele Anwendungen ausreichend und brauchen mit ihrer Präzision von ca.

1-2 µm und Rauheiten kleiner als 100 nm (R_z) den Vergleich mit anderen Verfahren nicht zu scheuen [1, 2, 3].

Für eine Fertigung mikrostrukturierter Komponenten und Bauteile tritt recht schnell die Frage nach großen strukturierten Flächen bzw. hohen Stückzahlen in den Vordergrund. In beiden Fällen kann die Mechanische Mikrotechnik Lösungen anbieten:

Bei der Strukturierung aufgespannter Folienbänder mit parallelen Nuten sind Strukturierungsraten von einigen 100 cm²/h kein Problem, so daß die direkte Verwendung dieser Strukturen wirtschaftlich sein kann. Als Beispiel sollen Mikrowärmeübertrager und Mikroreaktoren behandelt werden, die sich aus vielen solcherart einfach strukturierten Folienstückchen zusammensetzen. Dieses effektive Strukturierungsverfahren stößt bei komplizierteren Strukturen an seine Grenzen.

Demgegenüber ermöglicht ein weiteres Verfahren zur Strukturierung metallischer Oberflächen die Fertigung geometrisch komplexer Geometrien auf vergleichsweise kleinen Flächen. Die geringe Strukturierungsrate von 0,1 bis maximal 10 cm²/h verbietet in den meisten Fällen eine direkte Verwendung der Strukturen; diese eignen sich jedoch hervorragend als Abformwerkzeuge z.B. für die Kunststoffabformung durch Spritzgießen, wodurch hohe Stückzahlen kostengünstig zu erreichen sind.

Für beide Verfahrensvarianten gibt es Beispiele für Fertigungsansätze über den Labormaßstab hinaus, von denen für die direkte Verwendung von Mikrostrukturen

die Kleinserienfertigung von Mikrowärmeübertragern und Mikroreaktoren vorgestellt wird; als Ausgangspunkt für die Massenproduktion von Mikrostrukturen in Kunststoffen werden einige Abformwerkzeuge mit komplexeren Geometrien erläutert.

2. Kleinserienfertigung von Mikrowärmeübertragern und Mikroreaktoren

Nachdem Mikrowärmeübertrager aus Edelstahl seit längerem insbesondere von einem Automobilkonzern auf ihre Einsatzfähigkeit in speziellen Anwendungen getestet werden, wurde Anfang 1995 dazu eine Kleinserie von 16 Mikrowärmeübertragern nach Kundenspezifikation aufgelegt und in einem Zeitraum von 3 Monaten in den Labors des Instituts für Mikrostrukturtechnik, der Hauptabteilung Versuchstechnik und der Hauptabteilung Betriebstechnik erfolgreich abgewickelt. Abb. 1 zeigt schematisch die Kette der sechs notwendigen einzelnen Bearbeitungsschritte für die Kleinserienfertigung, angefangen mit der Auftragsbearbeitung bis zu Endkontrolle und Versand. Dabei stellen die Schritte Mikrostrukturierung, Schneiden und Reinigen sowie Stapeln und Diffusionsschweißen diejenigen Arbeitsschritte dar, in denen das im FZK entwickelte Know-how der Mechanischen Mikrotechnik zum Einsatz kommt.

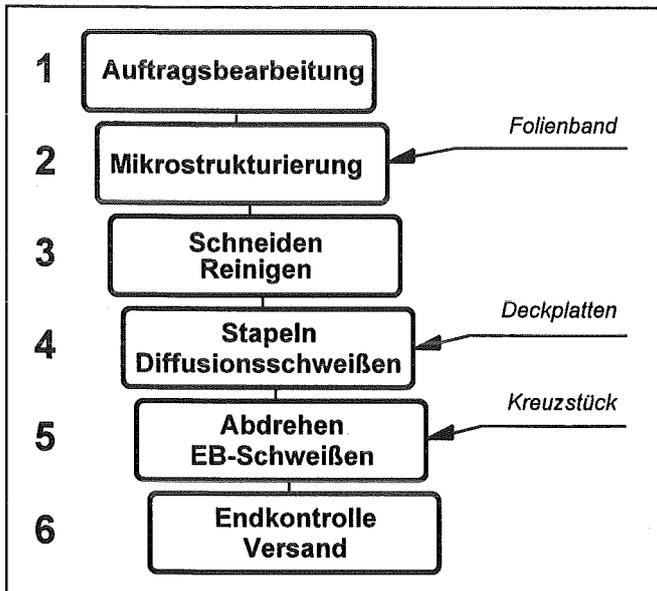


Abb. 1: Arbeitsschritte zur Fertigung von Mikrowärmeübertragern und Mikroreaktoren.

2.1 Mikrostrukturierung von Folien an Drehmaschinen

Die Mikrostrukturierung von Edelstahlfolien mit hochpräzise geschliffenen Cermet-Werkzeugen erfolgt an einer Drehmaschine (Abb. 2): Ein Folienband wird mit Hilfe einer Federspannvorrichtung am Umfang einer Scheibe gespannt, die auf die Spindel einer Drehmaschine aufgesetzt ist. Das Foto zeigt außerdem die auf dem Maschinentisch unterhalb der Scheibe mon-

tierten Werkzeughalter mit den Mikroschneidwerkzeugen. Durch die Mikrometeregenaue CNC-Steuerung der Tisch- und Spindelachsen werden parallel verlaufende Kanäle mit einer durch das Mikrowerkzeug vorgegebenen Form in die Oberfläche der Folie eingearbeitet. Mit Hilfe der auf dem Bild erkennbaren Mikroskope werden die Nulllagen der Schneidwerkzeuge Mikrometeregenau einjustiert.

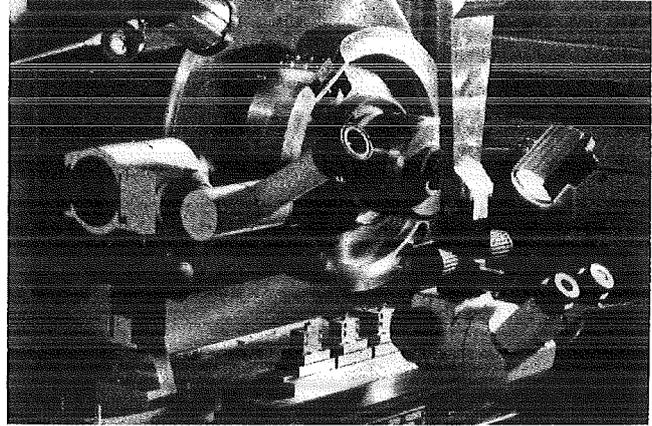


Abb. 2: Vorrichtung zur Mikrostrukturierung von Folienbändern mit parallel verlaufenden Kanälen.

2.2 Mikrowärmeübertrager

Über die Herstellung von Standard-Mikrowärmeübertragern in Kreuzstrombauweise mit einem aktiven Übertragungsvolumen von 1 cm^3 wurde bereits berichtet [4]. Abb. 3 zeigt in einer rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme (REM-Aufnahme) eine Schnittfläche durch einen Standard-Mikrowärmeübertrager. Die Schnittebene wurde so gelegt, daß die beiden senkrecht zueinander stehenden Strömungsrichtungen eines Kreuzströmers gleichzeitig sichtbar werden. Durch den schrägen Anschnitt wird der Querschnitt der Mikrokanäle (ca. $70 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$) verzerrt wiedergegeben. Unter Ausnutzung der Tiefenschärfe des Rasterelektronenmikroskops werden die von Folienlage zu Folienlage unterschiedlichen Kanalrichtungen deutlich sichtbar.

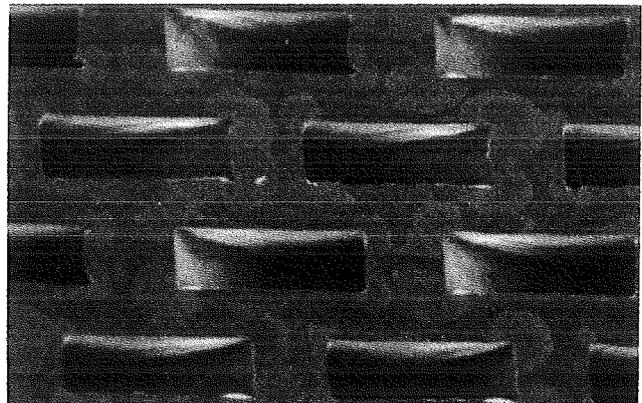


Abb. 3: REM-Aufnahme einer Schnittfläche durch einen Standard-Mikrowärmeübertrager.

Nach dem Einschweißen der mikrostrukturierten Grundkörper in das sogenannte Kreuzstück mit den Anschlüssen für die ein- und austretenden Fluide durch Elektronenstrahlschweißen (Arbeitsschritt 5) und Endkontrolle konnte eine Kleinserie von Mikrowärmeübertragern aus Edelstahl (Abb. 4) mit garantierten Spezifikationen termingerecht an den Vertragspartner ausgeliefert werden. Es wurde bei dieser Fertigung eine Ausbeute von 75% erzielt. Die Analyse dieser Kleinserienfertigung zeigt, daß die Herstellung der eigentlichen Mikrostrukturkörper mit einer Ausbeute von 90% weitgehend beherrscht wird und nur mit ca. 45% zu den augenblicklichen Herstellungskosten des kompletten, mit Anschlüssen versehenen Mikroproduktes beiträgt. Innerhalb des mikrotechnischen Kostenanteils ist die Folienstrukturierung mit nur einem Drittel enthalten. Ein deutliches Potential zur weiteren Kostensenkung ist bei den konventionellen Arbeitspaketen und bei der Automatisierung einzelner jetzt noch im „Handbetrieb“ abgewickelter Arbeitsgänge zu erkennen.

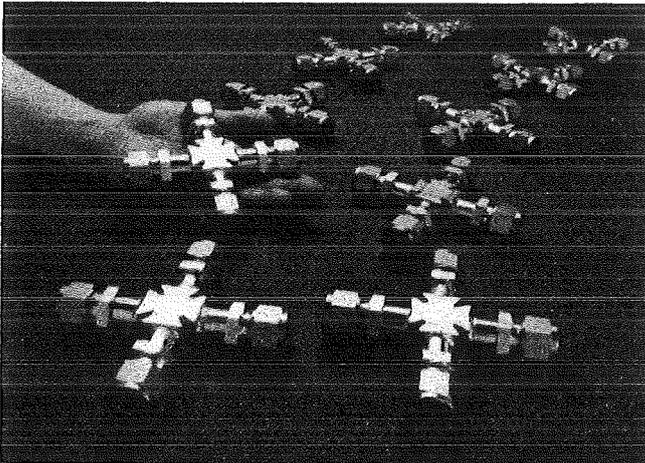


Abb. 4: Kleinserie von Mikrowärmeübertragern aus Edelstahl.

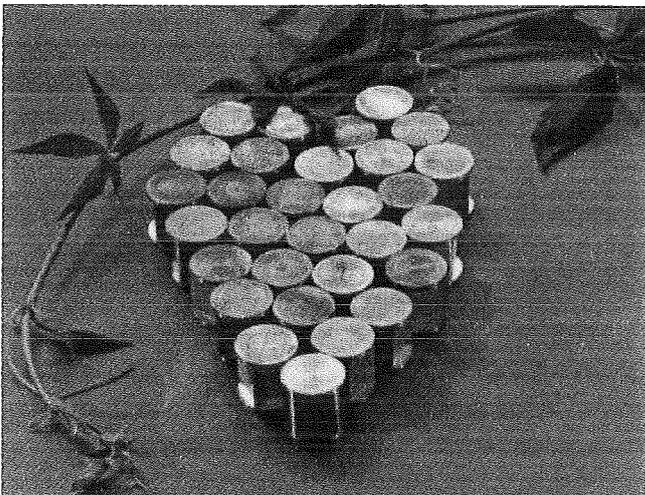


Abb. 5: Kleinserie von Mikroreaktoren aus Kupfer.

2.3 Mikroreaktoren

Mikrowärmeübertrager der beschriebenen Bauart eignen sich aufgrund ihrer hohen spezifischen Wärmeübertragungsleistung infolge des großen Verhältnisses von innerer Oberfläche zu Volumen gleichermaßen als chemische Mikroreaktoren. Diese Mikroreaktoren werden sowohl für heterogen katalysierte Reaktionen, wobei die Wand aus einem entsprechenden metallischen Katalysatormaterial besteht, als auch für schnelle und hoch exotherme Gasphasen- und Flüssigkeitsreaktionen eingesetzt.

Für den Fall heterogen katalysierter Reaktionen ist derzeit eine Kleinserienfertigung von Mikroreaktoren aus Kupfer in Bearbeitung. Abb. 5 zeigt die bereits fertiggestellten Mikrostrukturkörper ohne die Adapter für die Fluidführung.

Im Fall hoch exothermer Reaktionen kann die entstehende Wärme in der Kühlpassage äußerst effektiv und schnell abgeführt werden bei einer gleichzeitig äußerst geringen Verweilzeit der Reaktionspartner im Reaktor. Für diese Bedingungen wurde ein Mikroreaktor entwickelt, der aus zwei Bauteilen besteht, einem statischen Mikrovermischer und einem als Kreuzströmer ausgebildeten Reaktorteil. Die Reaktionspartner werden zunächst getrennt dem Vermischerelement zugeführt, danach auf einem frei wählbaren Vermischungsweg effektiv vermischt, bevor sie in den thermostatisierten Reaktor eintreten. Messungen des Industriepartners am statischen Mikrovermischer alleine haben gezeigt, daß dieser Mischer den bekannten konventionellen Mischelementen überlegen ist [5].

2.4 Eigenschaften und Vorteile

Die herausragenden Eigenschaften der entwickelten verfahrenstechnischen Mikroapparate lassen ein hohes Potential für den chemischen Apparatebau und für neuartige Verfahrensführungen von chemischen und physikalischen Prozessen erwarten. Für die Chemie können folgende Vorteile genannt werden:

- Exakte und schnelle Temperatursteuerung von chemischen Prozessen, verbunden mit hohen Produktausbeuten durch Minimierung von unerwünschten Nebenprodukten.
- Vermeidung bzw. Minimierung von Verdünnungsmedien bei stark exothermen Reaktionen und dadurch Minimierung von Abfallströmen.
- Relativ hohe Durchsätze im Bereich von einigen tausend Tonnen pro Jahr und pro Mikroreaktor in der Standardversion mit 1 cm^3 aktivem Volumen bei flüssigen Medien.
- Erhöhte Sicherheit und verminderte Umweltrisiken bei potentiell explosiven und toxischen Stoffen, bedingt durch die extrem hohen Wärmeabfuhraten, den sehr kleinen Hold-up, eine hohe Druckfestigkeit von 1000 bar, gemessen bei Edelstahlapparaten, und die explosionshemmende Wirkung der Mikrokanäle.

Die Erprobung dieser neuartigen Mikroapparate erfolgt gemeinsam mit der Industrie.

3. Mikrostrukturierte Abformwerkzeuge

Die Abformung mikrostrukturierter Abformwerkzeuge als kostengünstiges Verfahren zur massenhaften Vervielfältigung aufwendig erzeugter Mikrostrukturen ist bereits als wesentlicher Bestandteil des LIGA-Verfahrens bekannt und kann - bei Vermeidung von Abformhindernissen wie Hinterschneidungen usw. - als Stand der Technik angesehen werden. Die Mechanische Mikrotechnik ermöglicht durch Details wie über die gesamte Strukturhöhe exakt senkrechter oder beliebig geneigter Wände und sehr glatte Strukturflächen die Fertigung außerordentlich abformfreundlicher Werkzeuge bei gleichzeitig großen geometrischen Variationsmöglichkeiten in mehreren Strukturierungsebenen. Eine wesentliche Voraussetzung ist dabei die feinmechanische Präzision, die durch die Verwendung mikrostrukturierter Diamantwerkzeuge auf hochpräzisen Maschinen erreicht wird.

3.1 Mikrostrukturierung durch Fräsen und Bohren mit Diamant- und Hartmetallwerkzeugen

Zur Strukturierung von Metalloberflächen - meist Kupfer, Messing, Aluminium und seine Legierungen - finden formgeschliffene Diamanten, Diamant-Fingerfräser und Bohrer aus Hartmetall Verwendung. Sie werden auf Hochfrequenzspindeln montiert, die wiederum Bestandteil CNC-gesteuerter Hochpräzisions-Bearbeitungsmaschinen sind. In bekannter Weise werden die Diamantwerkzeuge dem Substrat (mit eben und glatt präparierter Oberfläche) mikrometergenau zugestellt und strukturieren dessen Oberfläche mit werkzeugspezifischen Geometrien.

Bei der Verwendung formgeschliffener Diamanten erhält man lineare Strukturen, die das Schneidenprofil des Diamanten abbilden und die durch Bearbeitung in mehreren Richtungen zu prismatischen und pyramidenförmigen Strukturen kombiniert werden können. Typische Abmessungen liegen bei 20-50 µm für Einzelstrukturen und Höhen über 500 µm. Diamant-Fingerfräser eignen sich zur lateral freien Strukturierung von Nuten mit senkrechten oder geneigten Wänden; die Nutbreite ist durch den Fräserdurchmesser auf derzeit 300 µm beschränkt, die Strukturhöhe kann 1 mm überschreiten. Fräser mit kleineren Durchmessern befinden sich in der Entwicklung. Mit beiden Fräservarianten können im Rahmen der zugänglichen Geometrien beliebig gestufte Strukturen gefertigt werden. Eine Ergänzung stellen Mikrobohrer aus Hartmetall dar, mit denen Löcher mit Durchmessern bis minimal 50 µm gebohrt werden können. Die Vielfalt der Strukturierungsmöglichkeiten bildet die Basis zur Fertigung von Abformwerkzeugen; weitere Ergänzungen sind die Integration von Paßstiften sowie ein gestufter und modularer Aufbau zur Reduzierung der Bearbeitungszeiten und zur Realisierung spezieller Details wie z.B. scharfe Innenkanten. Sämtliche Techniken sind bereits erprobt und haben sich in vielen

Abformwerkzeugen bewährt [6, 7]. Sie sollen anhand einiger Beispiele erläutert werden.

3.2 Mikropumpe

Ein Beispiel für einfache gefräste Mikrostrukturen ist das Abformwerkzeug (Abb. 6), von dem die Gehäuseteile der im FZK entwickelten Mikropumpe [8] abgeformt werden. Die 100 µm tiefen und 300 µm breiten Kanäle wurden mit einem Diamant-Fingerfräser eingebracht. Nach erfolgter Programmierung und maßlicher Feinabstimmung liegt die reine Strukturierungszeit bei wenigen Stunden. Eine zweite Strukturierungsebene wird durch die vorstehenden Säulenstrukturen gebildet. Diese Säulen sind als Paßstifte ausgeführt, um ein zeitaufwendiges Ausfräsen aus dem vollen Material zu vermeiden. Die um 0,5 mm vorstehenden Paßstifte mit einem Durchmesser von 1,5 mm sind nahezu spaltfrei eingesetzt, um eine problemlose Abformung bzw. Entformung zu gewährleisten.

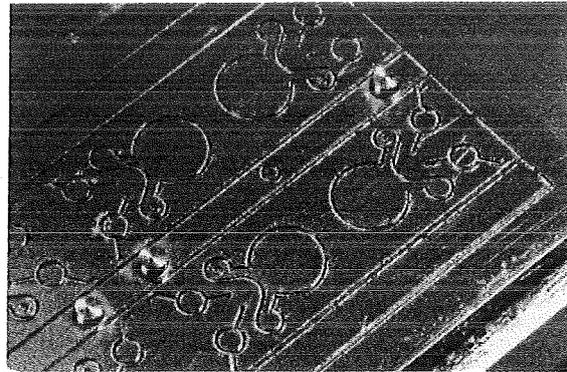


Abb. 6: Detail eines Abformwerkzeugs für Komponenten von Mikropumpen.

3.3 Glasfaser-Y-Koppler

Eine besondere Herausforderung an die Mechanische Mikrotechnik stellt ein Abformwerkzeug für Glasfaser-Y-Koppler dar (Abb. 7). Dabei sind weniger die Faserschächte mit ca. 1 mm x 1 mm Querschnitt problematisch, sondern vielmehr die Forderungen nach einer den Strahlengang aufteilenden möglichst scharfen Schneide und schmalen Anschlägen für die Glasfasern in den Faserschächten.

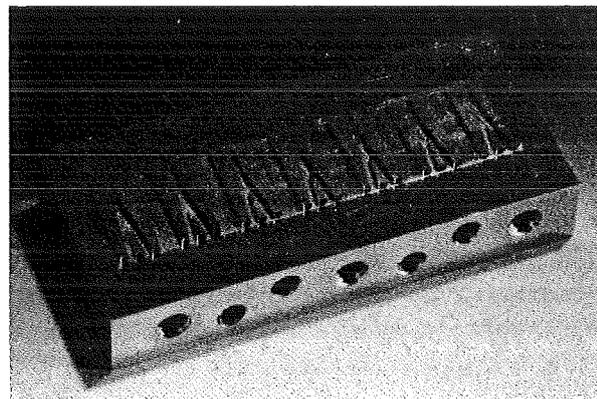


Abb. 7: Abformwerkzeug für Glasfaser-Y-Koppler.

Die Schneide konnte absolut senkrecht mit einem über die gesamte Höhe von 1040 µm gleichmäßigen Ver-rundungsradius von 5 µm ausgeführt werden, wobei in 10 Schritten à 104 µm zugestellt wurde.

Die für die Faseranschlüge erforderlichen scharfen Innenkanten sind aufgrund des Fräserdurchmessers nicht direkt zu fräsen. Durch eine Teilung des Substrats und die separate Strukturierung der einzelnen Teile konnten die Faserschichtbreiten variiert werden, so daß nach dem mikrometergenauen Zusammenfügen durch Verstimfen und Verschrauben an den Trennebenen definierte Stufen an den Wänden entstehen. Abb. 8 zeigt einen Ausschnitt eines ca. 30 µm breiten Faseranschlugs. Deutlich ist die Trennebene der zwei Substrateile zu erkennen; die Fügegenauigkeit ist aus dem fast stufenlosen Übergang am Grund des Faserschachts ersichtlich.

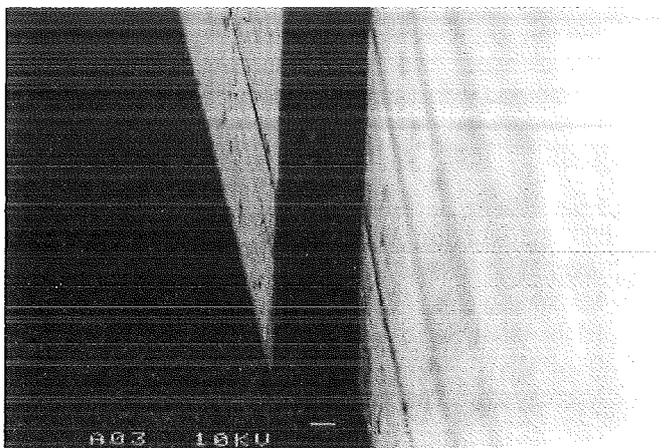


Abb. 8: REM-Aufnahme eines Faseranschlugs in einem Abformwerkzeug für Glasfaser-Y-Koppler.

3.4 Mikroanalysesystem (ELMAS)

Der Ansatz, ein Abformwerkzeug mehrteilig aufzubauen, führt in konsequenter Weiterentwicklung zu einer modularen Konzeption, die einen schichtartigen Aufbau zur Minimierung des zu strukturierenden Volumens mit der Aufteilung in lateral aneinandergrenzende Strukturelemente zur Erzielung besonderer Geometrien wie Innenkanten verbindet. Darüber hinaus erlaubt ein modular aufgebautes Abformwerkzeug im Falle von Beschädigungen den schnellen Austausch der betroffenen Elemente, ohne den Aufwand einer kompletten Neustrukturierung betreiben zu müssen.

Alle diese Gesichtspunkte fanden Eingang in ein Abformwerkzeug für Komponenten eines im FZK entwickelten elektrochemischen Mikroanalysesystems [9]. In Abb. 9 erkennt man auf einem mikrostrukturierten Bereich von ca. 66 mm x 26 mm deutlich drei Felder, von denen die beiden äußeren und das mittlere jeweils verschiedene Strukturen enthalten. Diese Strukturen sind erforderlichenfalls als komplette Einheiten zu ersetzen. Die äußeren Einheiten bestehen wiederum aus mehreren Teilen sowie vielen eingesetzten Paßstiften.

In Abb. 10 kommt die Strukturvielfalt auf mehreren Strukturierungsebenen deutlich zum Ausdruck. Der reine Mikrostrukturierungsaufwand durch Fräsen ist dabei auf ein Minimum reduziert. Die Strukturierungspräzision wurde durch die Paßgenauigkeit der abgeformten und zusammenzufügenden Komponenten auf Anhieb bestätigt.

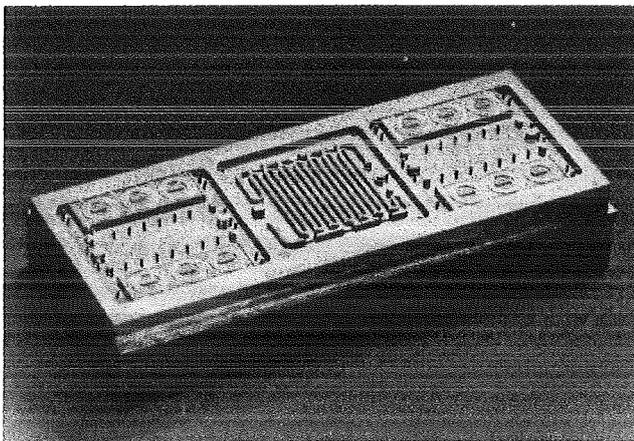


Abb. 9: Modular aufgebautes Abformwerkzeug für ein elektrochemisches Mikroanalysesystem (ELMAS).

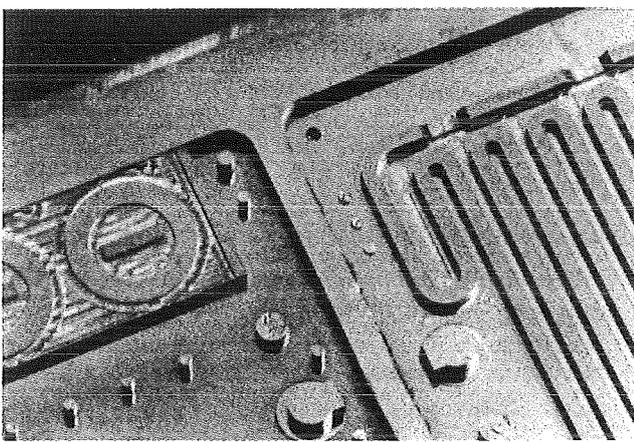


Abb. 10: Detail eines Abformwerkzeugs für ein elektrochemisches Mikroanalysesystem (ELMAS).

4. Ausblick

Die Mechanische Mikrotechnik besitzt alle Voraussetzungen für die serientaugliche Bereitstellung an-wenderspezifischer Mikrostrukturen. Die Weiterentwicklung der Mechanischen Mikrotechnik wird deshalb konsequent und unter Berücksichtigung der absehbaren Anwenderinteressen fortgesetzt, wobei auch Kombinationen mit anderen Strukturierungsverfahren erprobt werden [10, 11]. Besondere Schwerpunkte der Entwicklung werden in der weitestmöglichen Reduzierung des Fertigungsaufwandes und einer weiteren Stabilisierung der Fertigungsschritte liegen. Außerdem sollen Verfahren zur Vervielfältigung von Strukturen und zur Formatvergrößerung entwickelt werden. Für ausgewählte Anwendungen wird zudem die Etablierung einer Mikroverfahrenstechnik angestrebt.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit war nur durch die Mitarbeit und das Engagement unserer Kolleginnen und Kollegen möglich. Wir danken allen für ihre Beiträge, insbesondere Frau S. Schweikert und den Herren L. Bohn, H. Braun, M. Hemmerlein, P. Ihle, G. Klossack, L. Krämer, R. Machts, H. Mangold, G. Rabsch, H. Schlenker, K. Schlipf, M. Schöffler, F. Seitz und S. Zimmermann.

Literatur:

- [1] Bier, W., Linder, G., Seidel, D., Schubert, K.: Mechanische Mikrotechnik, KfK-Nachrichten 2-3, S. 165-173, 1991
- [2] Bier, W., Guber, A., Linder, G., Schaller, Th., Schubert, K.: Mechanische Mikrofertigung - Verfahren und Anwendungen, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5238, S. 132-137, 1993
- [3] Schaller, Th., Bier, W., Linder, G., Schubert, K.: Mechanische Mikrostrukturierung metallischer Oberflächen, F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik Messtechnik 5-6, S. 274-278, 1994
- [4] Linder, G., Bier, W., Schaller, Th., Schubert, K., Seidel, D.: Mikrowärmeübertrager und Mikroreaktoren. Achema '94, Frankfurt, Symposium „Mikrotechnik“, 1994
- [5] Ergebnisbericht über Forschung und Entwicklung 1994, Forschungszentrum Karlsruhe, S. 223, 1995
- [6] Schaller, Th., Bier, W., Linder, G., Schubert, K.: Realization of Microstructured Mould Inserts Using Mechanical Microengineering Methods, High Aspect Ratio Microstructure Technology 1995 (HARMST '95) 1995, to be published in: Microsystem Technologies
- [7] Weibezahn, K.F., Knedlitschek, G., Bier, W., Schaller, Th.: Mechanically Processed Microstructures Used to Establish an *In Vitro* Tissue Model, in: Reichl, H. et al. (Hrsg.), Micro System Technologies '94, S. 873-878, 1994
- [8] Büstgens, B., Bacher, W., Bier, W., Ehnes, R., Maas, D., Ruprecht, R., Schomburg, W.K., Keydel, L.: Micromembrane Pump Manufactured by Molding, Actuator '94, 4th International Conference on New Actuators, Bremen, Conf. Proc., S. 86-90, 1994
- [9] Hoffmann, W., Rapp, R.: Integrated Microanalytical System with Electrochemical Detection, Transducers '95 - Eurosensors IX, Stockholm, Technical Digest, 1995
- [10] Köhler, U., Guber, A.E., Bier, W.: Manufacturing Microlenses by Plasmaless Isotropic Etching Combined with Plastic Molding, Transducers '95 - Eurosensors IX, Stockholm, Technical Digest, 1995
- [11] Fahrenberg, J., Schaller, Th., Bacher, W., El-Kholi, A., Schomburg, W.K.: High Aspect Ratio Multi-level Mold Inserts Fabricated by Mechanical Micro Machining and Deep Etch X-Ray Lithography, High Aspect Ratio Microstructure Technology 1995 (HARMST '95) 1995, to be published in: Microsystem Technologies

Aufbau- und Verbindungstechniken für die Kleinserienfertigung von Mikropumpen

D. Seidel, B. Büstgens, W. Keller, D. Maas

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Die Mikropumpe ist ein typisches Produkt aus einer Gruppe von mikrofluidischen Komponenten, die durch im Institut für Mikrostrukturtechnik entwickelte Verfahren gefertigt werden und modular zu Systemen zusammengefügt werden können. Die Mikropumpe wird aus vergleichsweise preiswerten Materialien mit automatisierbaren Verfahrensschritten gefertigt und hat bereits großes industrielles Interesse geweckt. Um die Nachfrage zu decken, wird die Mikropumpe im Rahmen einer Kleinserienfertigung hergestellt. Soweit möglich und sinnvoll, werden bei den verschiedenen Fertigungsschritten jeweils mehrere Mikropumpen parallel, d.h. im Nutzen bearbeitet. Für die Verbindung der beiden spritzgegossenen Pumpengehäusenutzen aus Polysulfon mit dem Membrannutzen wurde eine spezielle **Kammerklebtechnik** entwickelt. Hierzu befinden sich in den Pumpengehäusen um die Funktionsbereiche herum angeordnet Vertiefungen, die im Kontakt mit der Membran Kammern zur Aufnahme des Klebstoffs bilden. Die Funktionsbereiche, die nicht verklebt werden dürfen, sind durch Trennwände gegen diese Kammern abgegrenzt. Nach dem Ausrichten werden die zu verklebenden Teile aufeinander gepreßt und der Klebstoff in die Kammern injiziert. Mit dieser Technik werden in zwei Klebschritten zwölf Mikropumpen parallel gefertigt. Nach dem Vereinzeln wird für den elektrischen Anschluß ein Flachbandkabel mit einer anisotrop elektrisch leitenden Klebfolie auf die Kontaktflächen der Mikropumpe gebondet (**Anisotropes Leitkleben**). Im letzten Arbeitsschritt werden die Pumpen mit den Fluidanschlüssen versehen. Zur Aufnahme der Anschlußröhrchen werden Adapter aus Plexiglas auf das Pumpengehäuse geklebt, wobei die Verteilung des Klebstoffs in der Klebfuge unter Ausnutzung von Kapillarkräften erfolgt (**Kapillarklebtechnik**). Durch Optimierung der Prozesse, vor allem bei der Teileherstellung und bei den Klebtechniken, wurde die Ausbeute an funktionsfähigen Mikropumpen in den zurückliegenden Monaten beträchtlich gesteigert und liegt jetzt bei etwa 70 %. Bisher wurden an 9 verschiedene Kunden insgesamt 35 Mikropumpen verkauft. Seit Beginn der Kleinserienfertigung wurden mehr als 150 Mikropumpen hergestellt.

1. Einleitung

Von der Mikromembranpumpe, über deren Aufbau, Funktion und Leistungsdaten bereits berichtet wurde [1, 2], werden im Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) zur Zeit kleine Stückzahlen im Rahmen einer Kleinserienfertigung hergestellt. Mit der Kleinserienfertigung werden drei Zielrichtungen verfolgt. Für interessierte Kunden können Mikropumpen in ausreichender Zahl kurzfristig zur Verfügung gestellt werden. Auf dem Weg zu einer zukünftigen industriellen Fertigung wird die Umsetzung von Prozessen und Arbeitstechniken, die bisher unter Laborbedingungen betrieben wurden, in wirtschaftliche und zuverlässige Herstellungsverfahren demonstriert. Die Kleinserie liefert die Basisinformationen für eine Kostenanalyse des Produkts und bietet damit Ansatzpunkte für die weitere herstellungstechnische Optimierung. Es wird davon ausgegangen, daß die Kleinserienfertigung einen wichtigen Anreiz insbesondere für mittelständische Unternehmen bildet, diese Technologie oder Prozeßschritte daraus zu übernehmen. Das Nahziel bei dieser Kleinserienfertigung ist der Nachweis einer Fertigungskapazität von 100 funktionsfähigen Mikropumpen pro Monat bei einer möglichst hohen Ausbeute und realistischen Produktkosten. Eine Herstellung der Mikropumpe durch monolithische Integration ist aus funktionalen und fertigungstechni-

schen Gründen nicht möglich. Vielmehr wird die Mikropumpe in Einzelteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen und mit unterschiedlichen Prozessen gefertigt. Für den Zusammenbau der Einzelteile sind deshalb zuverlässige und kostengünstige Aufbau- und Verbindungstechniken erforderlich, die den funktionellen Anforderungen, wie beispielsweise Dichtheit, Festigkeit, kleiner elektrischer Kontaktwiderstand und Alterungsbeständigkeit, genügen müssen. In der Mikrotechnik häufig eingesetzte Verbindungsverfahren, wie z.B. das anodische Bonden, das eutektische Bonden, Löten oder Schweißen, können hier nicht angewendet werden, weil die Einzelteile der Mikropumpe vorwiegend aus Kunststoffen bestehen. Kunststoffe bieten für den Einsatz in der Medizin und in der chemischen Analytik Vorteile, lassen aber keine hohen Prozeßtemperaturen bei deren Verarbeitung zu. Hier bietet das Kleben im Hinblick auf die Materialvielfalt der Fügepartner und wegen der relativ niedrigen Verarbeitungstemperaturen zwischen Raumtemperatur und 150 °C entscheidende Vorteile [3]. Für die Kleinserienfertigung von Mikropumpen werden Klebstoffe auf Epoxidharzbasis eingesetzt, die sich durch einen relativ kleinen Schrumpf beim Aushärten und eine geringe Wasseraufnahme im ausgehärteten Zustand auszeichnen. Die

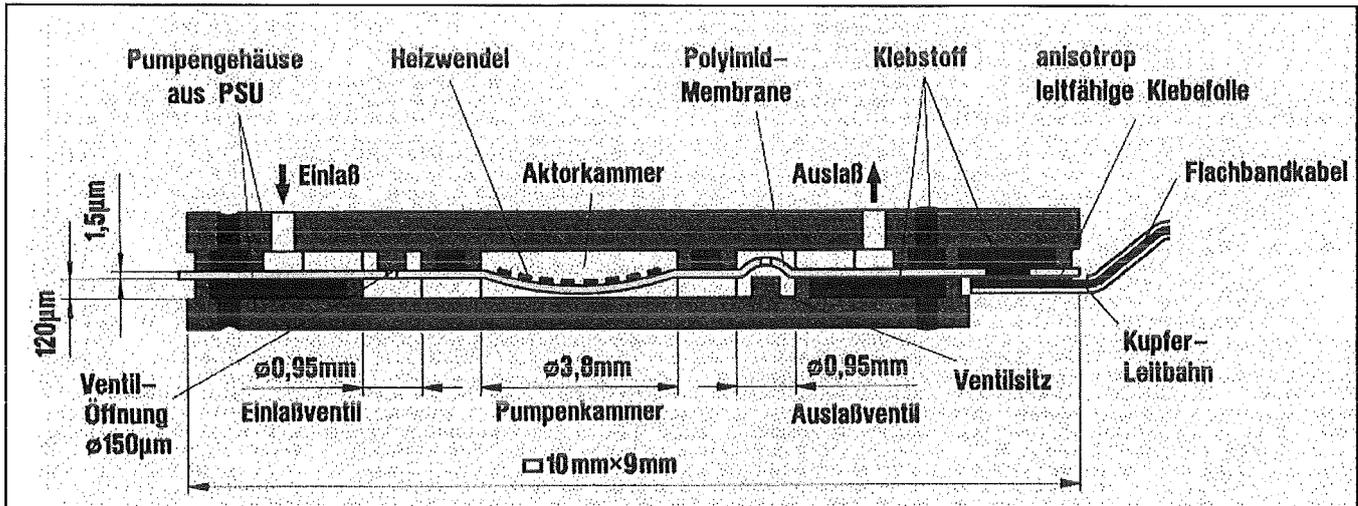


Abb. 1: Schematische Schnittdarstellung einer Mikropumpe bestehend aus den beiden spritzgegossenen Gehäusehälften und der flexiblen Polyimidmembran mit der in Dünnschichttechnik ausgeführten Heizwendel.

Festigkeit der Klebverbindungen genügt den hier gestellten Anforderungen, wenn bereits beim Design der Füge­teile entsprechende Regeln beachtet werden [4] und für die unterschiedlichen Klebverbindungen der jeweils geeignete Klebstoff bei optimalen Verarbeitungsbedingungen ausgewählt wird.

Für das Fügen der Pumpengehäuse sowie für das Anbringen der fluidischen und der elektrischen Anschlüsse an der Mikropumpe wurden Klebtechniken angepaßt und optimiert, bzw. neu entwickelt. Zum Einsatz kommen eine spezielle Kammerklebtechnik, eine Kapillarklebtechnik und das anisotrope Leitkleben. Diese Techniken werden im folgenden näher beschrieben.

Eine wesentliche Voraussetzung für eine wirtschaftliche Fertigung ist, daß bei möglichst vielen Fertigungsschritten nicht einzelne Mikrobau­teile, sondern mehrere parallel bearbeitet werden (Fertigung im Nutzen) und so die Herstellungskosten für das einzelne Bauteil beträchtlich gesenkt werden. Deshalb wurde bereits beim Design der Mikropumpe die Bearbeitung im Nutzen, angefangen von der Herstellung der Einzelteile für die Pumpengehäuse und der Pumpenmembranen bis zur Integration dieser Teile, berücksichtigt [1]. Erst nach der Integration der Pumpengehäuse werden die Nutzen vereinzelt. Die elektrische Kontaktierung und das Anbringen der Fluidanschlüsse erfolgen an der Einzelpumpe.

2. Beschreibung der Mikropumpe

Bevor auf die bei der Integration der Mikropumpe eingesetzten Füge- und Kontaktierungstechniken näher eingegangen wird, sollen der Aufbau und die Funktion der Mikropumpe anhand der schematischen Darstellung in Abbildung 1 zusammenfassend erläutert werden [1, 2]. Die Mikropumpe besteht aus zwei im Spritzgußverfahren hergestellten Gehäusehälften aus Polysulfon (PSU), in welche Aktor- und Pumpenkammer, die Strömungskanäle, die Ventil­sitze und die Klebstoffkammern als Vertiefungen hineinstrukturiert

sind. Zwischen den beiden Gehäusehälften befindet sich eine dünne Polyimidfolie, die als Pumpenmembran und als Membran für das Ein- und Auslaßventil dient. Für den thermopneumatischen Antrieb der Mikropumpe ist auf der Pumpenmembran eine dünne Heizwendel aus Gold aufgebracht. Durch kurze Strompulse mit einer Frequenz von typischerweise 20 Hz wird die Heizspirale und damit auch die Luft in der abgeschlossenen Aktorkammer periodisch erwärmt. Dadurch wird in der Aktorkammer und über die Auslenkung der Pumpenmembran auch im Fördermedium in der Pumpenkammer ein Druckimpuls erzeugt, der das Einlaßventil schließt und das Auslaßventil öffnet. Beim Abkühlen kehren sich die Druckverhältnisse um, sodaß über das Einlaßventil Fördermedium in die Pumpenkammer angesaugt wird. Abbildung 2 zeigt gemessene Förderraten für Luft in Abhängigkeit von der Druckdifferenz zwischen Ein- und Austritt bei unterschiedlichen Pumpfrequenzen. Im Dauerbetrieb mit 20 Hz erreichten die ersten Mikropumpen Laufzeiten von ca. 6 Tagen. Module mit jeweils 4 Mikropumpen werden in den Demonstratoren des Optischen Schadstoffanaly­sat­ors [5] und des Elektrochemischen Analysesystems ELMAS [6] eingesetzt.

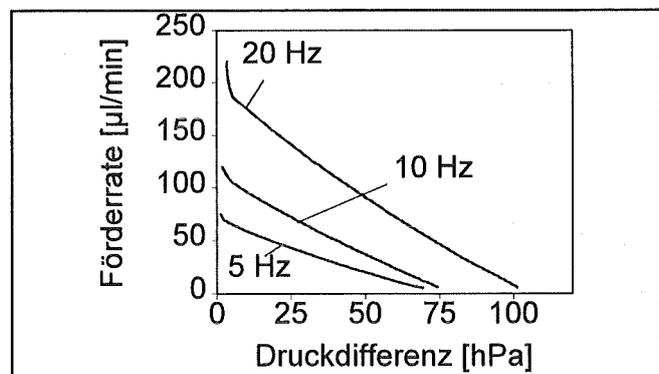


Abb. 2: Mit Luft gemessene Förderrate einer Mikropumpe in Abhängigkeit von der Druckdifferenz zwischen Ein- und Austritt bei verschiedenen Pumpfrequenzen.

3. Herstellung der Mikropumpe

Die wesentlichen Prozessschritte zur Herstellung der Mikropumpe sind in Abbildung 3 dargestellt. Die beiden Gehäusehälften werden für jeweils 12 Mikropumpen im Nutzen durch Spritzgießen hergestellt und von der Rückseite her auf die erforderliche Dicke abgefräst. Das Abformwerkzeug für das Spritzgießen wurde aus einem Messingsubstrat durch Bearbeitung mit einem Fingerfräser (Durchmesser 300 µm) hergestellt [7].

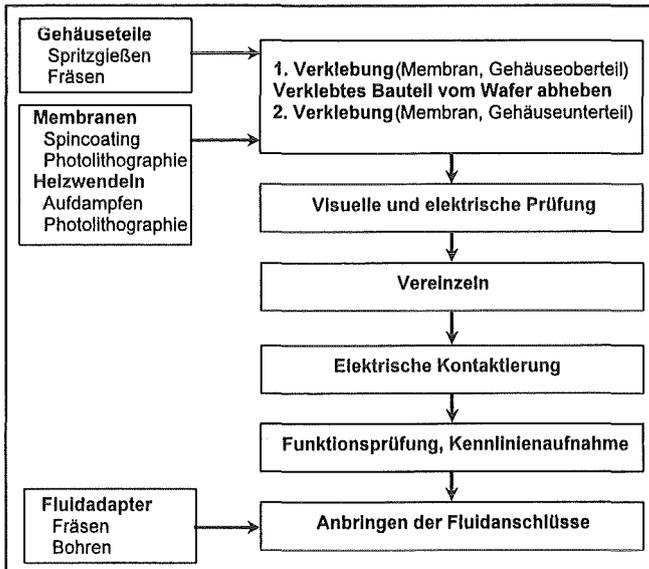


Abb. 3: Ablaufschema der wichtigsten Prozessschritte bei der Kleinserienfertigung von Mikropumpen.

Die Polyimidmembranen für 24 Mikropumpen werden im Nutzen auf einem mit einer dünnen Goldtrennschicht beschichteten 4"-Siliziumwafer durch Spincoating aufgebracht und photolithographisch strukturiert. Der direkte Kontakt der Polyimidschicht mit dem Silizium in den Randbereichen außerhalb der Goldtrennschicht gewährleistet die erforderliche Haftung. Die Heizwendeln mit den Leiterbahnen werden als ca. 300 nm dicke Goldschicht auf die Polyimidschicht aufgedampft und mittels Photolithographie und Naßätzen strukturiert.

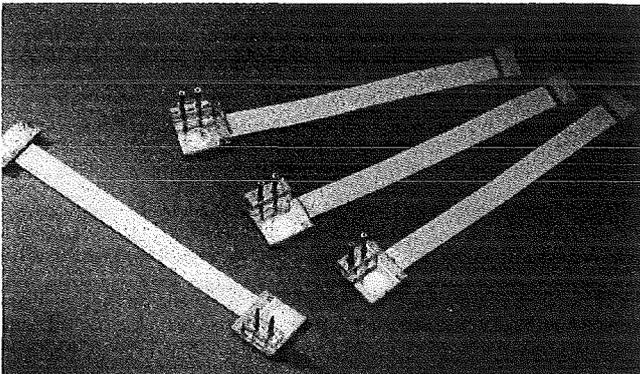


Abb. 4: Anschlußfertige Mikropumpen aus der Kleinserienfertigung.

In zwei Schritten werden die Gehäusehälften mit der Polyimidmembran verklebt. Anschließend werden die Heizwendeln einer elektrischen Prüfung unterzogen und der Nutzen zersägt. Die Mikropumpen werden elektrisch kontaktiert, einem Funktionstest mit Aufnahme der Kennlinie unterzogen und im letzten Arbeitsgang mit Anschlüssen für die Zu- und Abführung des Fördermediums versehen (Abbildung 4).

3.1 Fügen der Pumpengehäuse

Die Klebverbindungen zwischen den beiden Gehäusehälften und der Polyimidmembran müssen zwei Kriterien genügen, die für die ordnungsgemäße Funktion der Mikropumpe ausschlaggebend sind. In die Funktionsbereiche (Pumpen- und Aktorkammer, Ventile) darf kein Klebstoff eindringen. Um eine definierte Lage der Ventilmembran über dem Ventilsitz zu erreichen, ist eine möglichst dünne Klebschicht erforderlich. Daß die Klebtechnik für die parallele Verarbeitung von mehreren Mikropumpen geeignet sein muß, wurde bereits erwähnt. Zu diesem Zweck wurde bei den beiden Gehäusehälften um die Funktionsbereiche herum ein zusammenhängendes System von offenen Vertiefungen angeordnet, das dann, im Kontakt mit der Membran, Kammern zur Aufnahme des Klebstoffs bildet (Abbildung 5). Diese Kammern sind zu den Funktionsbereichen hin durch Trennwände (Höhe 120 µm, Breite 300 µm) abgeschlossen, die das Eindringen des Klebstoffs in die Funktionsbereiche unterbinden.

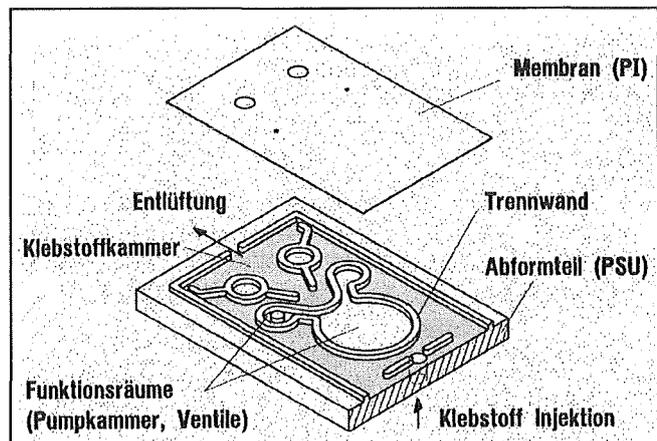


Abb. 5: Prinzipieller Aufbau einer Gehäusehälfte einer Einzelpumpe aus dem Nutzen mit den Funktionsbereichen und der umgebenden Kammer zur Aufnahme des Klebstoffs. Die Höhe der Trennwände ist stark überhöht dargestellt.

Für die Zuführung des Klebstoffs ist in der Mitte des Nutzens eine Einfüllöffnung vorhanden. Die Verteilung des Klebstoffs in den Kammern erfolgt symmetrisch nach beiden Seiten. Die beim Befüllen verdrängte Luft entweicht durch Öffnungen in der äußeren Trennwand.

Die Verklebung erfolgt in einer eigens hierfür konzipierten Vorrichtung (Abbildung 6), mit der zunächst die Teile zueinander ausgerichtet und bei vorgegebener Temperatur mit definierter Kraft zusammengepreßt werden. Danach wird die eine Gehäusehälfte mit der auf dem Siliziumwafer befindlichen Polyimidmembran verklebt.

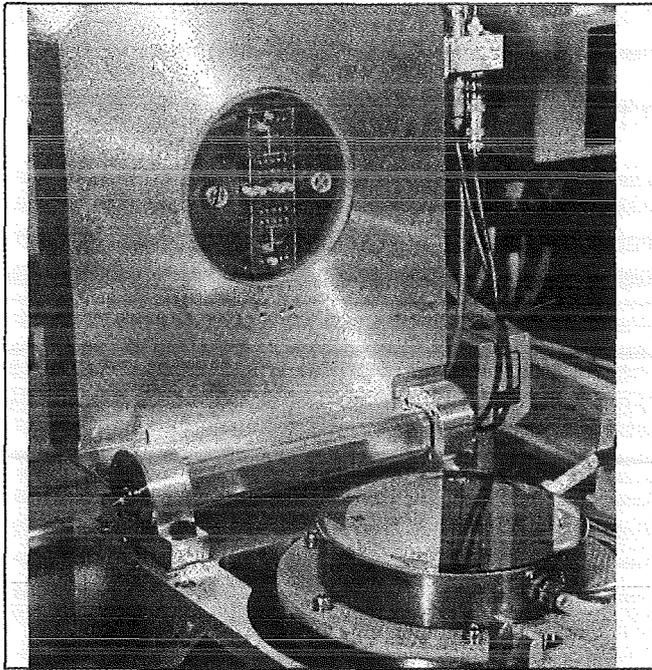


Abb. 6: Vorrichtung zum Verkleben der Nutzen mit 12 Mikropumpen. Die Vakuumspannvorrichtung für das oberliegende Füge teil ist im Bild nach hinten geklappt.

Dazu wird der Klebstoff mit einer Spritze unter geringem Überdruck in die hierfür vorgesehenen Kammern injiziert. Mit der erhöhten Temperatur während des Verklebens und Aushärtens wird die für die optimale Funktion der Pumpe erforderliche definierte Druckspannung in der Membran eingestellt. Nach dem Aushärten wird um das verklebte Teil herum die Polyimidmembran durchtrennt und von dem Siliziumwafer abgehoben. Anschließend wird in der gleichen Weise die andere Gehäusehälfte mit der Polyimidmembran verklebt. Mit dieser Technik werden 12 Mikropumpen parallel gefertigt (Abbildung 7). Für die Verklebung wird ein handelsüblicher, ungefüllter, wärmehärtender Klebstoff auf Epoxidharzbasis verwendet.

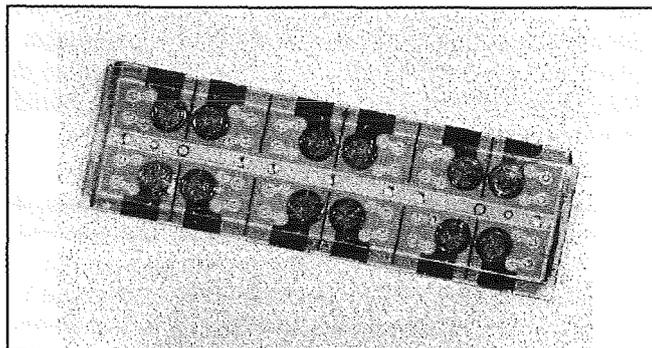


Abb. 7: Verklebter Nutzen mit 12 Mikropumpen.

3.2 Elektrischer Anschluß

Nach dem Vereinzeln der Mikropumpen erfolgt die Herstellung der elektrischen Verbindungen zwischen den Anschlußmetallisierungen der Mikropumpe und den Leiterbahnen eines flexiblen Flachbandkabels als externe Verbindung. Die elektrische Kontaktierung erfolgt mittels anisotropen Leitklebens. Dieses Verfahren wurde wegen seiner Prozeßkompatibilität, Funktionalität, Qualität und Wirtschaftlichkeit gewählt. Das anisotrope Leitkleben ist ein Simultankontaktierungsverfahren mit allen Vorteilen einer rationellen und zuverlässigen Arbeitstechnik.

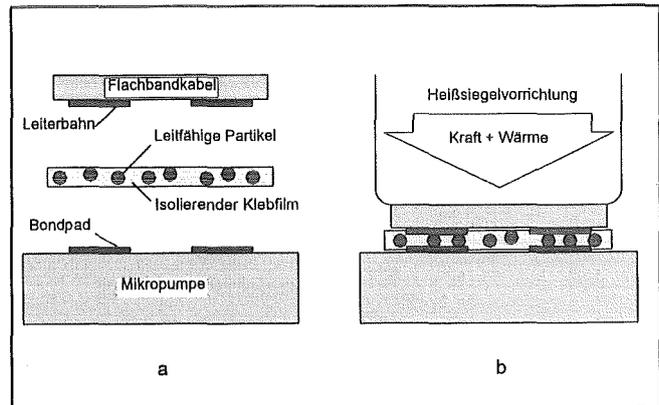


Abb. 8: Prinzip der Kontaktierung mit elektrisch anisotrop leitender Klebfolie.

Für die Leitklebverbindung wird eine Klebfolie aus einem elektrisch nichtleitenden Thermoplast-Duroplast verwendet, in der Mikrokugeln mit einem Durchmesser von ca. 12 µm aus einem thermoplastischen Kunststoff mit einem dünnen Nickelüberzug gleichmäßig verteilt sind (Abbildung 8).

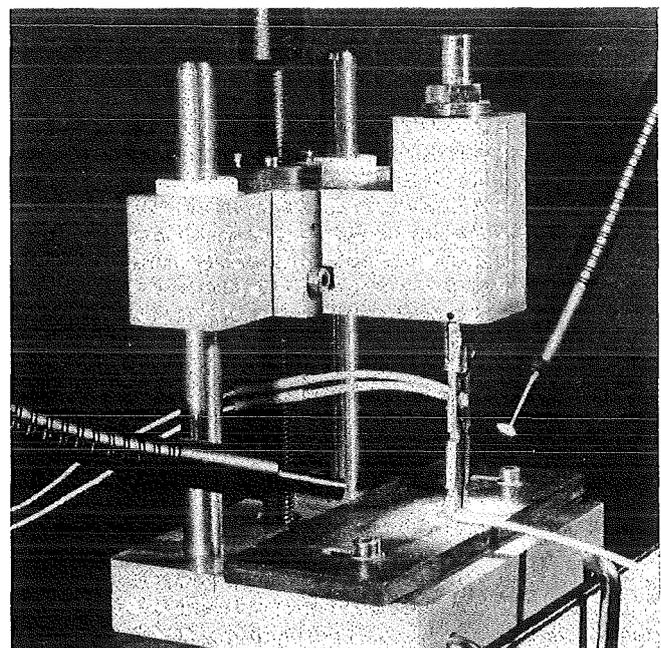


Abb. 9: Heißsiegelvorrichtung zum Kontaktieren der Mikropumpen.

Die Dicke der Leitklebfolie ist an die Höhe der Leiterbahnen des Flachbandkabels angepaßt und beträgt 25 µm. Die Leitklebfolie wird der Breite des Flachbandkabels entsprechend von Hand zugeschnitten und zwischen die Anschlußmetallisierungen der Mikropumpe und das Flachbandkabel gelegt. Mit Hilfe einer für diesen Einsatzzweck konzipierten Heißsiegelvorrichtung (Abbildung 9) wird die elektrische Verbindung unter Anwendung von Druck und Zuführung von Wärme hergestellt. Das Bondwerkzeug (Thermode) wird dazu nach einem in Vorversuchen ermittelten Zeitprogramm kurzzeitig bis auf 220 °C aufgeheizt. Die Klebfolie, deren Plastifizierungstemperatur bei 180 °C liegt, wird dabei soweit verformt bis die Mikrokugeln zwischen den Anschlußmetallisierungen der Mikropumpe und den Leiterbahnen des Flachbandkabels aufliegen und elastisch verformt werden. Die harte Nickelschicht der Mikrokugeln durchdringt dabei den Klebstoff und bekommt Kontakt mit den metallischen Grenzflächen. Wenn nach Beendigung der Aufheizphase die Glasübergangstemperatur des Klebstoffs von ca. 120 °C unterschritten ist, wird die Thermode abgehoben.

Die Kontaktierung durch die metallisierten Mikrokugeln bleibt auch nach dem Abheben der Thermode und Abkühlen auf Raumtemperatur bestehen, weil der thermische Ausdehnungskoeffizient der Klebfolie größer ist als der der metallisierten Mikrokugeln. Dadurch entsteht beim Abkühlen eine Druckspannung auf die Mikrokugeln, die einen dauerhaften Kontakt derselben mit den Anschlußmetallisierungen und damit stabile elektrische Eigenschaften der Verbindung sicherstellt. Der Übergangswiderstand im Kontaktbereich beträgt einige mΩ, der Isolationswiderstand zwischen den Kontakten liegt im MΩ-Bereich.

Die anisotrope Leitklebverbindung benötigt kein Flußmittel, bedarf also keiner nachträglichen Reinigung und enthält keine ionischen Anteile, was für eine hohe Langzeitstabilität eine gute Voraussetzung darstellt. Die Feuchtigkeitsaufnahme des Klebfilms ist so gering, daß eine Elektromigration nicht stattfindet.

3.3 Fluidanschlüsse

Bei der Mikropumpe erfolgt die Zu- und Abführung des zu pumpenden Mediums über Öffnungen, die bereits bei der Abformung des Gehäuseteils eingearbeitet werden. Um für die Anwender den fluidischen Anschluß der Pumpe einfach und zuverlässig zu gestalten, wird auf die Mikropumpe ein sogenannter Fluidadapter geklebt. Dieser Fluidadapter stellt die Mikro-/Makroschnittstelle zwischen den inneren, mikrostrukturierten Bereichen der Pumpe und der Außenwelt dar. Der Fluidadapter ist mit Anschlußröhrchen mit 910 µm Außendurchmesser versehen, auf die handelsübliche Schläuche manuell aufgesteckt werden können, ohne daß dazu besondere Vorrichtungen oder Schutzmaßnahmen gegen mechanische

Überlastungen beim Aufstecken nötig wären. Um diese beiden Anforderungen zu erfüllen, wurden die Dimensionen des Fluidadapters entsprechend groß gewählt.

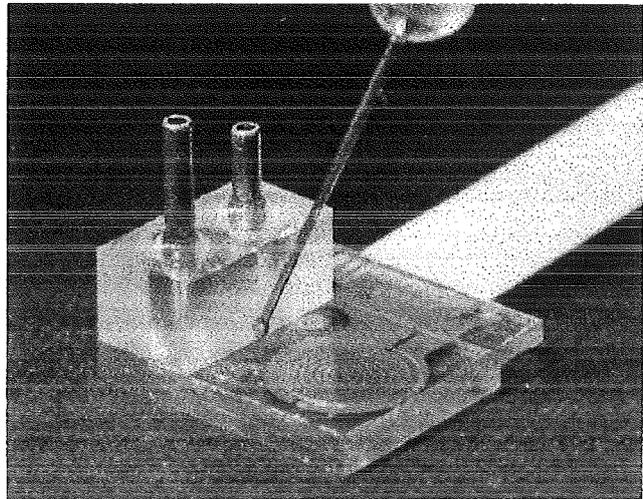


Abb. 10: Zuführung des Klebstoffs mit einer Nadel an die Klebfuge des Fluidadapters. Die Verteilung des Klebstoffs in der Klebfuge erfolgt unter der Wirkung von Kapillarkräften.

In einen feinwerktechnisch hergestellten Quader aus Plexiglas (PMMA) werden im Abstand der Ein- und Auslaßöffnungen der Mikropumpe Bohrungen eingebracht, in die Anschlußröhrchen eingeklebt werden. Die Röhrchen ragen auf der zu verklebenden Seite ca. 400 µm aus dem PMMA-Quader heraus (Montage mit Hilfe einer Lehre). Die Bohrungen sind auf der Seite, auf der die Röhrchen herausragen, angesenkt. Dieser Baustein wird - zur Zeit noch rein manuell - dann auf die Mikropumpe aufgesteckt, wobei die überstehenden Röhrchen in die Ein- bzw. Auslaßöffnung gepreßt werden und so für die Positionierung, Führung und vorläufige Fixierung sorgen. Ebenfalls von Hand wird mit einer feinen Nadel (z.B. einer Dispensernadel) tropfenweise Klebstoff an den Spalt zwischen dem Fluidadapter und der Mikropumpe gebracht (Abbildung 10). Aufgrund der in diesem Spalt wirkenden Kapillarkräfte verteilt sich der Klebstoff darin und füllt den Spalt vollständig aus. Die oben erwähnten Ansenkungen um die Bohrungen nehmen überschüssigen Klebstoff auf und schützen so das Innere der Pumpe gegen Klebstoffeintritt. Außerdem dichten die in die Löcher ragenden Röhrchen die Ein- bzw. Auslaßöffnung ab und bieten so einen zusätzlichen Schutz gegen die Gefahr des Verklebens funktioneller Bereiche im Innern der Mikropumpen.

Zur Montage des Fluidadapters sind also keine teuren Geräte und keine aufwendigen, schwer erlernbaren Klebprozesse nötig. Das Anbringen mit der geschilderten Methode birgt kein Risiko für die Funktionalität der Pumpe. Die Ausbeute bei diesem Prozeßschritt beträgt 100%. Die Anwendung von Klebstoffauftragstechniken wie Siebdrucken, automatisches Dispensieren oder Pintransfer mit nachfolgender Montage des PMMA-

Bausteins sind denkbar, wurden aber bislang noch nicht umgesetzt.

Eine benutzerdefinierte Ausführung der Fluidanschlüsse ist einfach realisierbar, da der Fluidadapter separat hergestellt wird und die übrigen Kleinserienprozesse nicht verändert werden müssen.

4. Ausblick

Zur Zeit ist ein neues Design der Heizwendel in Vorbereitung, womit eine Verlängerung der Laufzeit erreicht werden soll. In nächster Zukunft ist zur Demonstration des jetzt erreichten Standes bei der Kleinserienfertigung eine Serie von 100 funktionsfähigen Mikropumpen innerhalb von 4 Wochen geplant. Im Anschluß daran sollen die diesbezüglichen Aktivitäten schrittweise in das im Aufbau befindliche Kleinserien-Technikum verlagert werden. Dort sollen dann als nächster Schritt in Richtung einer zukünftigen industriellen Serienproduktion in verstärktem Maß die Prozesse unter Anwendung von Teilautomatisierung einzelner Prozeßschritte weiter optimiert werden.

Literatur:

- [1] Büstgens, B., Bacher, W., Menz, W., Schomburg, W.K.: Micropump Manufactured by Thermoplastic Molding, Proc. MEMS '94, January 25-28, 1994, Oiso, Japan, p. 18-21
- [2] Büstgens, B., Bacher, W., Bier, W., Ehnes, R., Keydel, L., Maas, D., Ruprecht, R., Schomburg, W.K.: Micromembrane Pump Manufactured by Molding, Proc. ACTUATOR '94, June 15-17, 1994, Bremen, Germany, p. 86-90
- [3] Maas, D., Büstgens, B., Fahrenberg, J., Keller, W., Seidel, D.: Application of Adhesive Bonding for Integration of Microfluidic Components, Proc. ACTUATOR '94, June 15-17, 1994, Bremen, Germany, p. 75-78
- [4] Maas, D., Büstgens, B., Fahrenberg, J., Menz, W., Schomburg, W.K., Seidel, D.: Design Optimization of Microstructures for Joining by Adhesive Bonding, Proc. and Lectures "Seminar on Handling and Assembly of Microparts", Ed. H. Detter, Vienna, Austria (1994)
- [5] Mohr, J., Büstgens, B., Fromhein, O., Kühner, T., Müller, C., Radloff, D., Reichert, R., Schoof, S., Stepputat, M.: Optochemisches Mikroanalysesystem für die Umweltüberwachung, dieser Tagungsband
- [6] Hoffmann, W., Rapp, R., Bier, W., Bruns, M., Büstgens, B., Deimling, B., Eggert, H., Freywald, K.H., Fromhein, O., Keller, W., Lindemann, K., Maas, D., Ruprecht, R., Schomburg, W.K., Stolze, D., Süß, W.: ELMAS - ein modulares elektrochemisches Mikroanalysesystem, dieser Tagungsband
- [7] Schaller, Th., Bier, W., Linder, G., Schubert, K.: Mechanische Mikrotechnik für Abformwerkzeuge und Kleinserien, dieser Tagungsband

CAD und optische Qualitätskontrolle für LIGA-Mikrostrukturen

K.P. Scherer, H. Eggert, H. Guth, P. Stiller, U. Stucky
Institut für Angewandte Informatik

Zusammenfassung

Um eine effiziente Konstruktion, Herstellung und geforderte Produktqualität zu gewährleisten, werden leistungsfähige Überwachungsmethoden benötigt. Die hergestellten Mikrostrukturen können mit zerstörungsfreien Prüfverfahren auf der Basis digitaler Bildverarbeitung kontrolliert werden. Die Ergebnisse der optischen Qualitätskontrolle basieren auf dem Vergleich der real erzeugten Strukturgeometrien mit den im CAD-System generierten Entwurfsgometrien.

Zwecks einer konsistenten Informationshaltung wird bereits in der Entwurfsphase spezifiziert, welche generierten Geometrien mit welcher Toleranz eingehalten werden müssen. Außerdem wird festgelegt, wie die optische Qualitätskontrolle in Form einer Vermessung durch das System COSMOS-2D (Computer System for Measurement of Optically Acquired Structure Surfaces in 2 Dimensions) für die hergestellten Strukturen durchzuführen ist. Jeder Vermessungsauftrag setzt sich zusammen aus einer wohldefinierten Abfolge von Einzelaufträgen, die sich auf die Verifizierung und Erkennung von Basisgeometrien (Linien, Kreisbögen) beziehen. Für die Konfiguration der Vermessungsaufträge, basierend auf der Bemaßung im MCAD-System, ist das System LIDES (LIGA Design and Engineering System) verantwortlich. Die vom Bildverarbeitungssystem erzielten Ergebnisse werden wiederum in das zentrale Datenmodell von LIDES eingebettet und durch einen weiteren Prozessor mit Graphikunterstützung bewertet.

1. Einleitung

Die Qualitätskontrolle gewinnt in der Industrie zunehmend an Bedeutung. Ständig steigende Anforderungen an die Güte von Produkten machen umfangreiche Kontrollen schon während der Fertigung notwendig, da eine Prüfung der Endprodukte nur die Freigabe eines fehlerhaften Produktes, nicht aber unnötige Kosten nicht korrekter Produktionsprozesse verhindert. Insbesondere bei der Fertigung von Mikrostrukturen nach dem LIGA-Verfahren [1], die über etliche Prozeßschritte erfolgt und dabei jeweils Zwischenprodukte erzeugt, ist es wichtig, Fehler unmittelbar zu erkennen und das entsprechende Zwischenprodukt aus der weiteren Produktionslinie auszuschließen, bzw. zu reparieren.

Die Qualitätssicherungskonzepte, die für den Bereich der Mikroelektronik existieren, können in der Mikromechanik nicht angewandt werden, da sie größtenteils auf elektronischen Funktionstests beruhen. Hier wird die Funktionalität auch wesentlich durch die geometrischen Eigenschaften bestimmt und diese lassen sich durch Kontrolle von Maßen überprüfen.

Die Vermessung der zweidimensionalen Geometrie von Mikrostrukturen beginnt bereits beim CAD-Entwurf durch das Festlegen von Meßaufträgen. Das wissensbasiertes System LIDES [2] faßt Geometriedaten und Meßauftragsdaten in einem objektorientierten Modell zusammen und erledigt die Konfiguration von Befehlen für das Strukturvermessungssystem COSMOS-2D [3]. Nach der automatischen optischen Mustererkennung werden die ermittelten Istdaten von einer weiteren

LIDES-Komponente aufbereitet und die Meßergebnisse graphisch und textuell dargestellt (Auswertung). Den Datenfluß zwischen den einzelnen Komponenten dieser Qualitätskontrolle stellt Abbildung 1 dar.

2. CAD-Entwurf

In einem ersten Schritt, dem Strukturdesign, entwirft der Konstrukteur mit Hilfe eines CAD-Systems für mechanische Konstruktion die Mikrostruktur bzw. ein Feld von Strukturelementen. Diese im CAD-System generierten Geometrien dienen als Referenz für die Geometrie der später real gefertigten Strukturen oder Halbzeuge. In der Praxis sind jedoch nicht beliebige Geometrieformen möglich, da vom Herstellungsprozeß und wegen der Handhabung und auch in Abhängigkeit der vom Nutzer vorgegebenen Funktionalität der Struktur Randbedingungen existieren, die eingehalten werden müssen.

Es ist spezielles Wissen notwendig, welche Methoden der Bildverarbeitung bei der späteren Vermessung angewendet und wie die Ergebnisse benutzt werden können, um im Vergleich mit der generierten Referenzgeometrie Aussagen zu finden, die auf einen eventuellen Fehler beim Herstellungsprozeß bereits in einem sehr frühen Stadium hinweisen.

Dies erfordert eine formale Repräsentation der einzelnen Wissensbereiche einschließlich der Methoden, dieses Wissen zu korrelieren. Eine solche Repräsentationsform wird realisiert in einem wissensbasierten System, wo

diese Wissensinhalte der verschiedenen Domänen in objektorientierter Struktur niedergelegt sind.

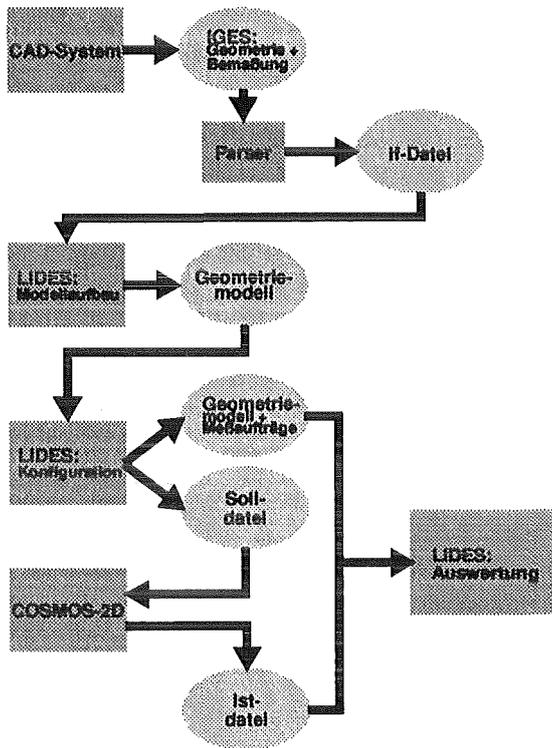


Abb. 1: Datenfluß für die optische Qualitätskontrolle (Systeme LIDES und COSMOS-2D)

3. Objektorientiertes Geometriemodell

Die im CAD-System generierten Geometrien liegen zunächst in einem speziellen Datenformat (IGES) vor [4]. Um einen natürlichen Zugang zu den Geometrieelementen zu haben (Defekte an einem speziellen Kreisbogen, an einer Kante), wurde ein Geometriemodell (zunächst für 2D) entwickelt, in welchem die gesamte topologische Information der Struktur niedergelegt ist.

Betrachtet man zum Beispiel beim Entwurf einer Maske das Layout für den Elektronenstrahlschreiber, so werden oftmals ähnliche Grundstrukturen (im folgenden als Zellen bezeichnet) in vervielfachter Form benutzt. Diese Grundzellen sind bis auf eine Translation, Rotation und Vergrößerung identisch. Um später die einzelnen Zellen und auch die Vermessungsaufträge gezielt ansprechen zu können, wird die Menge der Zellen als Klasse realisiert, wobei die zellenspezifischen Eigenschaften wie Translation, Rotation und Vergrößerung als klassenspezifische Attribute realisiert sind. Da eine Zelle sich aus Unterzellen zusammensetzen kann, wird zur Strukturierung der Zelleinheiten das gleiche

hierarchische Verfeinerungsmodell benutzt wie bei der Prozeßmodellierung. Auf der untersten Zellohierarchieebene besteht eine solche Zelle schließlich aus den Basisgeometrieelementen wie Linien und Kreisbögen mit ihren entsprechenden Parametern.

Die wichtigsten Klassen des objektorientierten Geometriemodells sind in Abbildung 2 dargestellt.

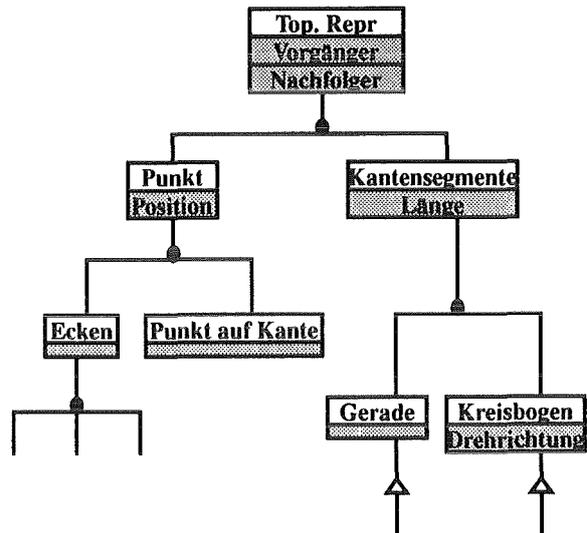


Abb. 2: Klassenhierarchie des objektorientierten Geometriemodells (Ausschnitt)

4. Entwurf und Vermessungsaufträge

Die Qualitätskontrolle bei den gefertigten Strukturen und Masken ist eng verknüpft mit dem Entwurfsschritt, da in diesem vom Konstrukteur die Geometrie einschließlich ihrer Toleranzmaße spezifiziert wird. Diese Bemaßung ist die Grundlage für den im wissensbasierten System generierten Vermessungsauftrag. Jeder solche Vermessungsauftrag setzt sich zusammen aus einer wohldefinierten Abfolge von Einzelaufträgen, die sich auf die Verifizierung und Erkennung von Basisgeometrien (wie Linien, Kreisbögen, etc.) beziehen. Soll zum Beispiel die Distanz zwischen einem Punkt auf einem Kreisbogen und einer Ecke (Schnitt zwischen einem Kreisbogen und einem Geradenstück) vermessen werden, so muß nach Festlegung eines Aufsetzpunktes erst diese spezielle Ecke vom entsprechenden Eckentyp an der richtigen Position erkannt und der Kreisbogen verifiziert werden. Letzteres setzt wiederum die Detektion der Eckpunkte dieses Kreisbogens und die Verifizierung der Kreisparameter voraus.

In der Geometriewissensbasis wird die Konfiguration der Einzelvermessungsaufträge durchgeführt. Da die Aufträge sich auf spezielle geometrische bzw. topologische Objekte beziehen, werden sie auch objektorientiert an diese Objekte angebunden. Nach der gesamten Auftragsgenerierung wird der so erzeugte File nach einer Datenkonversion in das spezielle COSMOS-Format an das Bildverarbeitungs-system übertragen, wo dann das Abarbeiten der Aufträge stattfindet.

5. Vermessung

Das System COSMOS-2D, das die konfigurierten Befehle zur Objekterkennung abarbeitet, besteht aus einem computergesteuerten Lichtmikroskop und einem Multiprozessor-Rechner. COSMOS-2D arbeitet auf der Basis digitaler Bildverarbeitung und Mustererkennung. Durch den Einsatz der Mustererkennung ist eine präzise Vermessung der auf einem Substrat befindlichen Strukturen auch bei ungenauer Positionierung des Substrates möglich. Damit ist man in der Lage, einen kostengünstigen Mikroskopkreuztisch einzusetzen.

Die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise basiert auf der Überlegung, daß jede Struktur durch ihre Randlinien, die Strukturkanten beschrieben wird. Die Strukturgeometrie wird durch einen Kantenzug dargestellt, der sich in geometrische Grundelemente zerlegen läßt. Solche Grundelemente sind gerade

Strecken und Kreisbögen (in Anlehnung an CAD-Systeme), mit denen man beliebige Strukturformen zusammensetzen kann. Aus Performance- und Datenhaltungs-Gründen wurden noch die Grundformen Kreis und Spirale eingeführt. Bei Bedarf kann dieser Primitive-Satz um spezielle Geometrieformen, wie z.B. Parabel, Hyperbel oder Splines erweitert werden. Die Orte, an denen die oben genannten linienförmigen Primitive beginnen, bzw. enden, werden als Ecken bezeichnet. Diese Ecken sind natürlich gleichzeitig die Punkte, an denen die Linien-Grundformen zusammentreffen. Aus diesem Grund ergeben sich für die Ecken verschiedene Ausprägungen (Strecke-Strecke, Strecke-Kreisbogen und Kreisbogen-Kreisbogen). In der Hierarchie der geometrischen Primitive bilden die Ecken die unterste Ebene.

Für Strukturen mit langen Strecken, die bei der von LIDES vorgegebenen Mikroskopvergrößerung nicht in ein Bildfeld passen (z.B. Biegebalken eines Beschleunigungssensors) wurde aus Gründen der rechnerinternen Handhabung ein weiterer Eckentyp eingeführt. Es handelt sich dabei um den Punkt, bei dem die Strecke den Bildrand kreuzt.

Die Vermessung der Strukturgeometrie basiert auf der Verarbeitung der von einem speziellen Algorithmus extrahierten Kantenpixel des von LIDES geforderten Strukturteils, nachdem das Mikroskop in den entsprechenden Zustand versetzt und ein Bild akquiriert

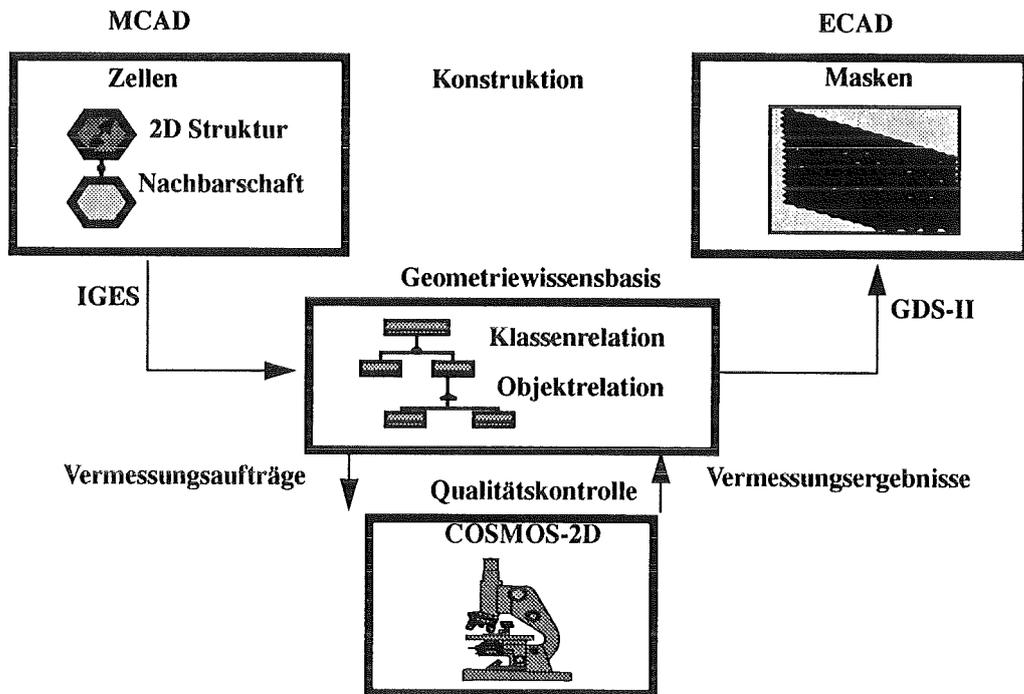


Abb. 3: Geometriewissensbasis als Schnittstelle im Gesamtentwurf (ECAD, MCAD, COSMOS-2D)

wurde. Es erfolgt die Detektion der Ecken als Begrenzung der zu verifizierenden Linien- Grundformen. Anschließend können die Pixel-positionen zwischen den Ecken für eine ‚Least-Squares-Anpassung‘ der geometrischen Parameter des entsprechenden Linientyps herangezogen werden. Bei dieser Anpassung wird auch die Varianz der Linie ermittelt. Diese geometrischen Parameter mit den zugehörigen Eckpositionen dienen als Grundlage für die geforderte Vermessung und Bewertung der Geometrie, für die inzwischen eine Teilkomponente von LIDES zuständig ist.

6. Auswertung und Visualisierung

Die LIDES-Systemkomponente zur Auswertung von Ergebnissen des Systems COSMOS-2D bereitet in einem ersten Schritt die eingehenden Daten auf. Dabei werden zu einzelnen Meßaufträgen die geforderten Meßgrößen und eine Bewertung des Ergebnisses berechnet.

Am zweiten Schritt dieser Systemkomponente ist der Anwender interaktiv beteiligt. Hier werden - zusammen mit der Sollgeometrie - die Meßaufträge graphisch visualisiert. Dabei kann farblich zwischen einwandfreien und fehlerhaften Strukturteilen sowie nicht durchgeführten Meßaufträgen unterschieden werden. Der Anwender hat zudem die Möglichkeit sich textuelle Informationen über die gemessenen Größen anzeigen zu lassen.

Eine Verbindung zwischen der Auswertungs-komponente und COSMOS-2D erlaubt ein Anfahren der Probe unter dem Mikroskop, so daß sich der Anwender kritische Bereiche zusätzlich im Original ansehen kann. Abbildung 4 zeigt als Beispiel Teile aus der Visualisierung von Meßergebnissen. Dargestellt ist ein Array aus 20 x 20 Strukturen. Das Fenster im Vordergrund zeigt einen vergrößerten Ausschnitt. Dort hat der Anwender unter anderem die Möglichkeit, weiter zu vergrößern.

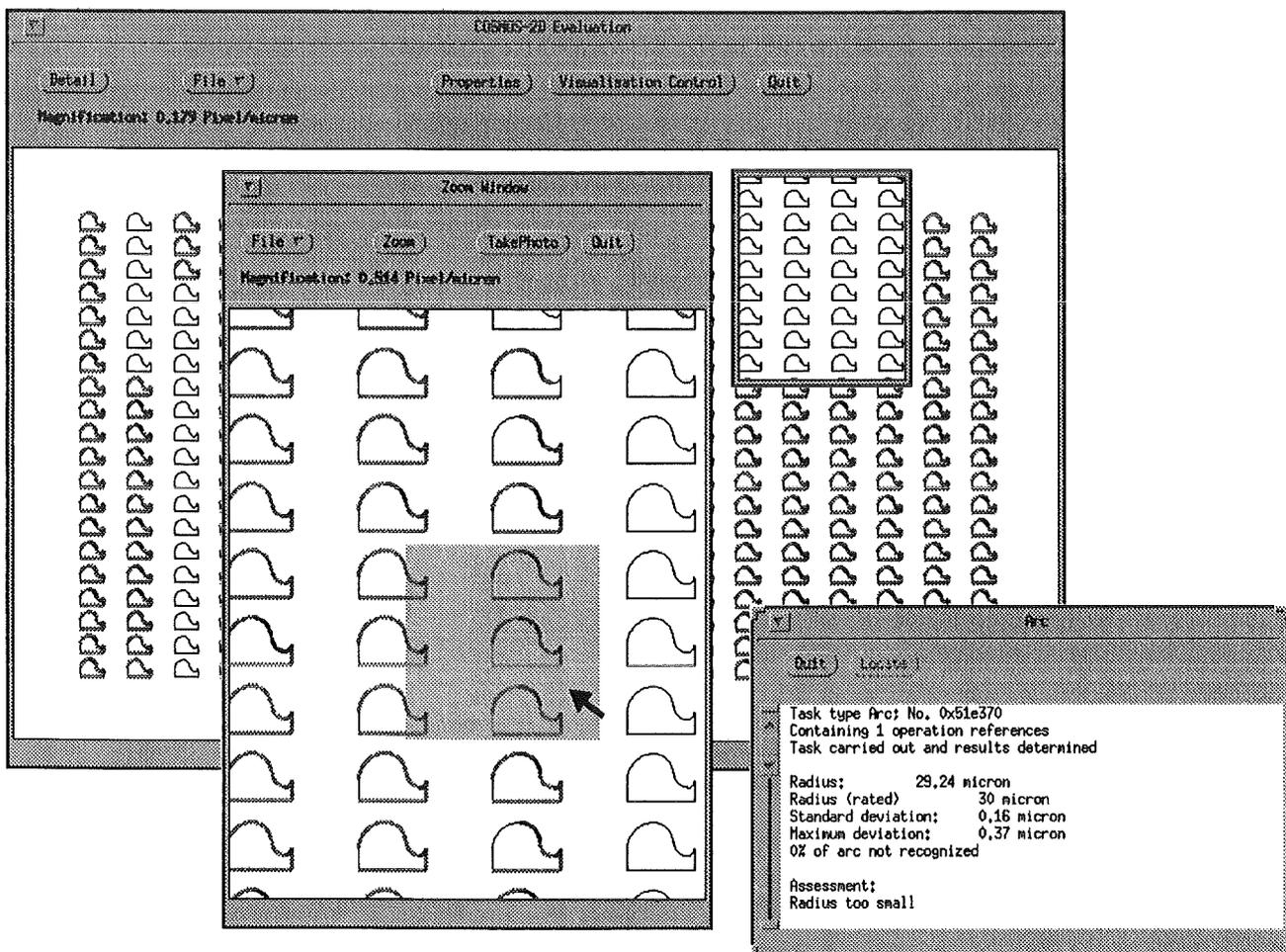


Abb. 4: Teile der Visualisierung bei der Auswertung von COSMOS-2D - Meßergebnissen. Dargestellt ist eine Situation, in der der Anwender den Bildausschnitt für eine zusätzliche Mikroskopaufnahme auswählt. Das Fenster rechts zeigt die textuellen Informationen zu einem Meßauftrag vom Typ Arc (Kreisbogenverifikation).

Durch Verschieben des in diesem Bild grau dargestellten Quadrats kann der Bildausschnitt für eine neue mikroskopische Aufnahme gewählt werden.

Außerdem ist in Abbildung 4 ein Textfenster dargestellt, in dem sämtliche textuellen Informationen zu einem Auftrag zur Verifikation eines Kreisbogens (Typ Arc) enthalten sind. Ein Anwender kann zu jedem Meßauftrag ein Textfenster erzeugen, indem er in der Zeichenfläche das entsprechende Meßauftragssymbol selektiert.

7. Schlußbemerkung

In [5] wurden Konzepte zur Werkzeugintegration in eine rechnergestützte Entwurfs- und Fertigungsumgebung erarbeitet. In diesem Rahmen wird es in Zukunft möglich sein, ein Aktivitätensnetz (Work Flow) auf einer Rechnerbedienoberfläche bereitzustellen, aus dem heraus alle benutzten Werkzeuge aufgerufen werden können. Alle Ein-/Ausgabe Daten werden in einer darunterliegenden objektorientierten Datenbank, zusammen mit der Work Flow Information (Aktivitäten, Vorgänger, Nachfolger), verwaltet. Auf diese Weise kann eine vollständige Transparenz einer Mikrosystemfertigung geschaffen werden, welche bei der Komplexität der Abläufe in Zukunft unverzichtbar ist.

Literatur:

- [1] P. Bley, J. Göttert, Harmening, M. Himmelhaus, W. Menz, J. Mohr, C. Müller, U. Wallrabe, „The LIGA Process for the Fabrication of Micromechanical and Microoptical Components“, Reichl (ed), Micro System Technologies 91, [2nd International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanic Systems and Components, Berlin 1991], VDE Verlag Berlin, Offenbach 1991.
- [2] K.-P. Scherer, I. Brauch, H. Eggert, P. Stiller: Object Oriented Modelling of Different Knowledge Domains inside the LIGA-Process; System, Man and Cybernetics Conference (SMC), IEEE, Le Touquet/France, Oktober 1993, Vol. 4, S. 429-434
- [3] B. Bürg, H. Guth, A. Hellmann, „Parametric Optical Measurements of Micromechanical Structures with Arbitrary Plane Surface Geometries: The COSMOS-2D System“, Reichl (ed.), Micro System Technologies 91, [2nd International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanic Systems and Components, Berlin 1991], VDE Verlag Berlin, Offenbach 1991.
- [4] Reed (ed), Initial Graphic Exchange Specification (IGES)“, Version 5.1, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD 1991.
- [5] P. Wieland, C. Döpmeier, H. Eggert, K.-P. Scherer: „Entwurf eines Systems zur Erfassung und Weiterverarbeitung von Produktinformation bei der Herstellung von Mikrostrukturen“, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5597 (1995)

Ein System zur automatischen Montage von Mikrosystemen

U. Gengenbach¹⁾, J. Göttert²⁾, F. Engelhardt¹⁾, R. Scharnowell¹⁾

¹⁾Institut für Angewandte Informatik

²⁾Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Zur Fertigung von hybriden Mikrosystemen sind Montagetechniken erforderlich. Bei der Herstellung von Prototypen im Labormaßstab, werden die Montagevorgänge in den meisten Fällen von Hand durchgeführt. Um hybride Mikrosysteme industriell in Serie fertigen zu können, müssen automatische Montagetechniken entwickelt werden. Am Institut für Angewandte Informatik des Forschungszentrums Karlsruhe wird ein System zur automatischen Montage eines mikrooptischen Duplexers in kleinen Serien entwickelt. Die Arbeiten konzentrieren sich auf die Entwicklung von Magazinen für die Bereitstellung der Einzelteile, die Entwicklung von Greifern und Greiferwechselsystemen, die Einbindung der Gerätetechnik für Fügeprozesse und die Steuerungstechnik. Wesentliche Aspekte sind außerdem Untersuchungen zur montagegerechten Gestaltung und Standardisierung der Einzelteile und Magazine.

1. Einleitung

Hybride Mikrosysteme bestehen aus verschiedenen Mikrokomponenten, die eventuell sogar mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt wurden. Im Unterschied zu monolithisch gefertigten Mikrosystemen spielt daher die Montage eine wesentliche Rolle bei ihrer Produktion. Während die Einzelteile rationell in großen Stückzahlen, z.B. durch die Abformtechniken des LIGA-Verfahrens hergestellt werden können, existieren nur in wenigen Fällen Verfahren und Geräte für die automatische Montage. Daher werden diese Mikrosysteme oft von Hand montiert. Mit der manuellen Montage lassen sich jedoch keine größeren Stückzahlen in gleichbleibend hoher Qualität zu wettbewerbsfähigen Kosten herstellen.

Am Institut für Angewandte Informatik werden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrostrukturtechnik modulare Geräte und Verfahren zur automatischen Montage eines mikrooptischen Duplexers in kleinen Stückzahlen entwickelt.

(z.B. Telefon, PC) in jedem Haushalt. Es ist offensichtlich, daß es einen breiten Markt für solche Geräte geben wird, wenn sie in hohen Stückzahlen, in hoher Qualität zu niedrigen Kosten produziert werden können.

Der mikrooptische Duplexer besteht aus zwei Kugellinsen, einem Wellenlängenfilter und einer Glasfaser, die auf einer mikrooptischen Aufbauplatte montiert werden.

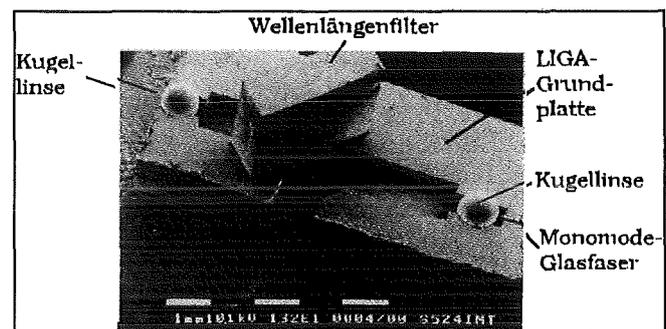


Abb. 1: Rasterelektronische Aufnahme der montierten mikrooptischen Aufbauplatte

2. Die Montageaufgabe

Der mikrooptische Duplexer ist ein Beispiel eines hybriden Mikrosystems (s.h. Abb. 1). Er wurde im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes AVT-KEO entwickelt [1]. Im "Fibre to the home"-Konzept der Telekommunikationsindustrie bilden Geräte wie dieses die Schnittstelle zwischen dem optischen Fasernetzwerk und den elektronischen Endgeräten

Das Wellenlängenfilter und die Kugellinsen werden kommerziell mit herkömmlichen Fertigungsverfahren der Optikindustrie hergestellt. Tabelle 1 zeigt die wesentlichen Eigenschaften dieser Komponenten.

Die mikrooptische Aufbauplatte ist eine PMMA-Struktur mit zwei Ebenen, die mit den Abformprozessen des LIGA-Verfahrens hergestellt wurde. Die hohe

Genauigkeit der Röntgentiefenlithografie erlaubt es die optische Funktion ohne aktive Justierung der Mikrokomponenten zu garantieren. Die Produktion der Aufbauplatte durch Spritzgießen erlaubt eine kostengünstige Massenproduktion mit hoher Qualität und hoher Reproduzierbarkeit. Die mikrooptische Aufbauplatte wird in ein Gehäuse eingebaut, das als Mikro/Makro-Schnittstelle für die Befestigung der aktiven optischen Elemente, einer Photodiode und einer LASER-Diode, dient. Die Glasfaser wird durch einen Stutzen am Gehäuse in den Faserschacht der Struktur geführt.

Die derzeit bearbeitete Montageaufgabe ist die Bestückung des mikrooptischen Duplexers. Das Montagesystem besteht aus den Hauptkomponenten:

- Handhabungssystem
- Teilebereitstellung
- Greifer
- Greiferwechselsystem
- Fügesystem
- Steuerung

Abb. 2 zeigt eine Gesamtansicht des Montagesystems.

Optisches Element	Abmessungen	Material
Kugellinse	$\varnothing = 900\mu\text{m}$ ($\pm 0.5\mu\text{m}$)	Glas, $n = 1.6$
Wellenlängenfilter	3mm ($\pm 50\mu\text{m}$) x 3mm ($\pm 50\mu\text{m}$) x 1mm ($\pm 0.5\mu\text{m}$)	mehrlagig optisch beschichtetes Glas
Single-mode Glasfaser	9/125 μm	Glas
Mikrooptische Aufbauplatte	4mm x 14mm x 1mm	PMMA

2.1 Handhabungssystem

Die Basis des Montagesystems ist ein hochpräzises vierachsiges Handhabungssystem der Fa. LPKF Thüringen. Es besteht aus einem xy-Tisch über dem starr an einem Granitportal eine z-Achse und eine Drehachse montiert sind. Durch die Entkoppelung der Bewegung in der xy-Ebene und der z- und Drehbewegung erreicht das System eine Positioniergenauigkeit von $\pm 2\mu\text{m}$. Andererseits ist es dadurch nicht wie bei anderen kartesischen Robotern möglich die Grundfläche für den Materialfluß zu verwenden. Dies bedeutet, daß alle Teile in ihren Magazinen auf den xy-Tisch gebracht und bei der Montage mitbewegt werden müssen.

Unter der Annahme, daß alle Einzelteile magaziniert im Arbeitsraum des Handhabungssystems zur Verfügung stehen, lassen sich grob folgende Montageschritte identifizieren:

- Aufbringen von Klebstoff und Absetzen der mikrooptischen Aufbauplatte im Gehäuse.
- Aufbringen von Klebstoff und Einpressen der Kugellinsen in ihre Führungsstrukturen auf der mikrooptischen Aufbauplatte.
- Aufbringen von Klebstoff und Einpressen des Wellenlängenfilters in seine Führungsstrukturen auf der mikrooptischen Aufbauplatte.
- Positionierung der Glasfaser im Faserkanal der mikrooptischen Aufbauplatte und Fixieren mit Kleber auf der Aufbauplatte und im Gehäuse.

Für diese Montageschritte ist eine Positioniergenauigkeit von ca. $\pm 20\mu\text{m}$ erforderlich.

2. Das Montagesystem

Das Institut für angewandte Informatik des Forschungszentrums Karlsruhe entwickelt einen ersten Prototypen eines modularen Mikromontagesystems (MIMOSE) für die automatische Montage von Mikrosystemen in kleinen und mittleren Stückzahlen.

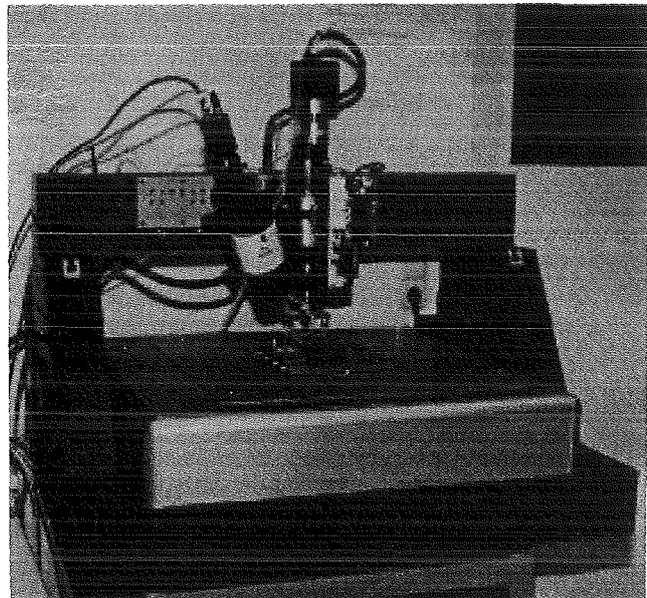


Abb. 2: Gesamtansicht des Mikromontagesystems

2.2 Teilebereitstellung

Im Hinblick auf die oben skizzierten Montageschritte wird dieses System mit teilespezifischen Magazinen und Greifern an die Montageaufgabe angepaßt.

Die Grundplatte für die Teilebereitstellung im Arbeitsraum der Maschine ist eine genau gefertigte Vakuumspannplatte. Sie ist in 16 Felder unterteilt, die einzeln mit Vakuum versorgt werden können. Jedes Feld ist zur präzisen Positionierung der Magazine mit drei Anschlagstiften versehen. Diese Anordnung mit manueller Positionierung der Magazine auf der Vakuumspannplatte bietet die im Prototypstadium notwendige Flexibilität und Umrüstbarkeit auf andere Aufgabenstellungen. Sobald das System einen höheren Reifegrad erreicht hat und die Anforderungen für die Serienfertigung festgelegt sind, werden automatische Teilezuführsysteme in Betracht gezogen.

Die Zukaufteile, wie Kugellinsen und Wellenlängenfilter, werden als Schüttgut geliefert und sind daher zunächst nicht für die automatische Montage geeignet. Der Grund hierfür liegt im wesentlichen in den geringen vom Forschungszentrum abgenommenen Mengen. Daher werden derzeit Magazine selbst entwickelt und in Anbetracht der kleinen Stückzahlen manuell befüllt. Randbedingungen bei der Entwicklung dieser Magazine sind:

- 1) Einfache Befüllung, die auch für eine Automation geeignet ist.
- 2) Teilebereitstellung mit möglichst geringen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit des Handhabungssystems bei der Teileübernahme.
- 3) Geringe Herstellkosten.

Die Komplexität der Teilebereitstellung und des Greifvorganges hängt von den Freiheitsgraden ab, die durch das Magazin bzw. dem Greifer festgelegt werden müssen, um das Teil für den Handhabungsvorgang hinreichend genau bereitzustellen.

Von allen handzuhabenden Teilen bestehen bei den Kugellinsen die geringsten Anforderungen in dieser Hinsicht. Es muß lediglich die Position, festgelegt werden, die Orientierung der Kugellinse ist unerheblich. Entsprechend wurde ein Magazin entwickelt, das die obigen Randbedingungen gut erfüllt, einfach aufgebaut ist und nur geringe Anforderungen an die Fertigungstechnik stellt.

Die Kugeln werden in einem zylindrischen Schacht, der unten eine Zuluftöffnung besitzt, übereinander gestapelt. Zur Entnahme wird der Sauggreifer über der Schachtöffnung positioniert und das Vakuum eingeschaltet. Durch die Strömung im Schacht und ihre Geometrie zentriert sich die Kugellinse am Sauggreifer. Neben seinem einfachen Aufbau, seiner Unempfindlichkeit gegen Positionsfehler, hat das Magazin den Vorteil, daß bis zu zwölf Kugeln an derselben Position aufgenommen werden können. Dies vereinfacht die Programmierung des Montagevorganges erheblich.

Das Wellenlängenfilter ist das andere Extrem, hier muß das Magazin Position und Orientierung vollständig

festlegen. Das Magazin wurde als Frästeil hergestellt. Es besitzt quaderförmige Aussparungen für jeweils zehn Wellenlängenfilter in fünf Reihen. Um den manuellen Einfüllvorgang zu vereinfachen, sitzen die Filter mit einer Toleranz von $\pm 50\mu\text{m}$ in Dickenrichtung und $\pm 750\mu\text{m}$ in Längsrichtung in ihren Aussparungen. Die daraus resultierende Positionsunsicherheit bei der Teileaufnahme wird durch eine entsprechende Gestaltung des Greifers ausgeglichen. Da diese Komponente unter 45° in der mikrooptischen Aufbauplatte montiert wird, wurde sie auch im Magazin unter diesem Winkel angeordnet, um eine Drehbewegung des Greifers einzusparen. Damit wird die Programmerstellung vereinfacht und die Taktzeit verkürzt.

Es ist beabsichtigt durch diese Untersuchungen Lösungen für die Teilebereitstellung zu finden, die von den Teileherstellern übernommen werden, sobald höhere Stückzahlen für eine industrielle Serienproduktion nachgefragt werden.

2.3 Greifer

Für die Kugellinsen und die Wellenlängenfilter wurden fluidische Greifer entwickelt. Durch die vorteilhafte Geometrie der Kugellinsen gestaltet sich dieser Greifer besonders einfach. Er besteht aus einem Drehteil mit kegelförmiger Öffnung, um die Kugellinse beim Einpreßvorgang sauber zu führen.

Der Sauggreifer für das Wellenlängenfilter hingegen ist ein recht kompliziertes Formeroderteil. Einführschrägen überbrücken die Positionsunsicherheit bei der Entnahme des Teils aus dem Magazin. Am Ende der Einführschräge wird das Wellenlängenfilter in einem prismatischen Teil in Dickenrichtung bis auf $\pm 5\mu\text{m}$ über eine Länge von 1mm geführt. Damit ist eine gute Führung beim Einpressen in die mikrooptische Aufbauplatte gewährleistet. In Längsrichtung ist aufgrund der schlechten Toleranz der Wellenlängenfilter ($\pm 50\mu\text{m}$) eine genaue Zentrierung nicht möglich, so daß dafür gesorgt werden muß, daß die Haltestruktur in der mikrooptischen Aufbauplatte in dieser Richtung Spiel besitzt. Um die Positionsunsicherheit in der Höhe, die aufgrund der Toleranz der Teile ebenfalls $\pm 50\mu\text{m}$ beträgt, auszugleichen, wurden marktgängige Kraftaufnehmer in die Sauggreifer integriert. Damit wird das Einpressen der Teile in ihre Führungsstrukturen in der mikrooptischen Aufbauplatte überwacht. Durch Aufzeichnen einer Kraft-/Weg-Kennlinie wird ermittelt, wann der Einpreßvorgang abgebrochen werden muß, da das Wellenlängenfilter auf dem Grund der Struktur aufsitzt.

Ein mechanischer Zweifingergreifer wurde zur Handhabung der Glasfaser entwickelt. Er wird mit kommerziell erhältlichen Piezobimorphenelementen angetrieben.

Ein Greifer für die Handhabung der LIGA-Grundplatte ist in Entwicklung.

2.4 Greiferwechselsystem

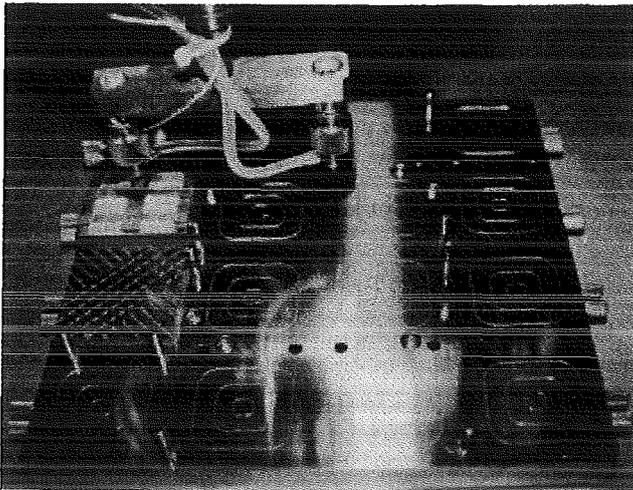


Abb. 3: Detailansicht der Tischaufbauten und der Greifwerkzeuge

In einer ersten Phase wurde an der Maschine ein einfaches Werkzeugwechselsystem zum Wechsel von zwei Werkzeugen durch Drehung der vierten Achse des Handhabungssystems angebracht. Abb. 3 zeigt eine Nahaufnahme der Vakuumspannplatte, der Magazine und des Werkzeugwechslers.

Ein Revolverwerkzeugwechsler mit sechs Werkzeugplätzen ist derzeit in Entwicklung. Randbedingungen dieser Entwicklung sind:

- Eigengewicht des Wechslers < 1000g
- Wiederholgenauigkeit beim Anfahren der Werkzeugposition besser als 5 μm

Da der Revolverwechsler einen eigenen Antrieb besitzt, wird die vierte Achse des Handhabungssystems, wieder frei für die Werkstückorientierung. Abb. 4. zeigt eine Skizze des Wechselsystems.

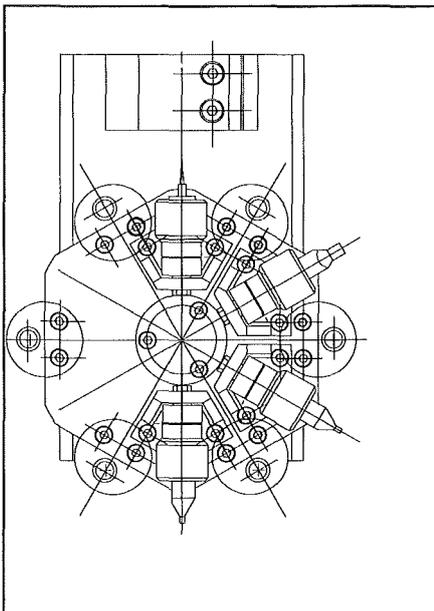


Abb. 4: Skizze des Revolverwerkzeugwechslers

2.5 Fügeprozeß

Um die Kugellinsen, das Wellenlängenfilter und die Glasfaser zu fixieren, ist ein Klebprozeß erforderlich. Aus diesem Grund muß ein automatisches Füge-system in die Montagestation integriert werden. Diese Integration umfaßt den gerätetechnischen Einbau in der Maschine, z.B. den Einbau eines Dosierkopfes an einer Position des Werkzeugwechselrevolvers, und die Einbindung in die Gesamtsteuerung des Systems. Der Klebprozeß wird derzeit im Institut für Mikrostrukturtechnik ausgearbeitet.

2.6 Systemsteuerung

Der gesamte Montagevorgang wird durch einen PC gesteuert, der Bewegungsbefehle an das Handhabungssystem abschickt, sowie über eine AD/DA-Wandlerkarte Sensorsignale einliest sowie die Greifer, das Greiferwechselsystem und das Füge-system ansteuert (Abb. 5).

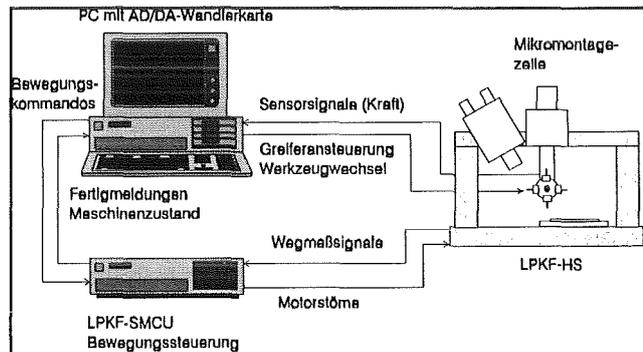


Abb. 5: Architektur der Systems

Eine grafische Bedienoberfläche wurde in C++ auf dem PC entwickelt. In einer grafischen Darstellung der Tischoberfläche mit Magazine (s.h. Abb. 6) können Positionen durch Mausklick angefahren werden. Durch Einlesen der Signale der Kraftsensoren in den Greifern über die D/A-Wandlerkarte können kraft-/weggesteuerte Bewegungen zum Einpressen der Bauteile vorgegeben werden. Greifer und Greiferwechsel werden über Funktionstasten angesteuert. Damit können Montageabläufe schrittweise, interaktiv durch Beobachtung durch das Stereomikroskop eingerichtet und auf einer Datei gespeichert werden. Das so erzeugte Montageprogramm wird schließlich aus dieser Datei aufgerufen und führt den Montagevorgang automatisch durch.

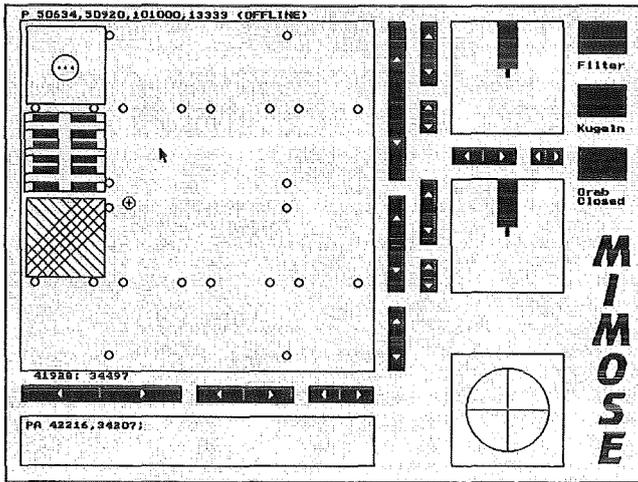


Abb. 6: Grafische Bedienoberfläche der Steuerung

3. Erste Ergebnisse

Mit dem Kugellinsenmagazin, dem Wellenlängenfiltermagazin und dem einfachen Werkzeugwechselsystem, an dem die Sauggreifer für Kugellinsen und Wellenlängenfilter befestigt waren (s.h. Abb. 3) wurden erste Versuche zum Einpressen der Kugellinsen und Wellenlängenfilter in die mikrooptische Aufbauplatte durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Positioniergenauigkeit des Handhabungssystems ist voll ausreichend für diese Montageaufgabe.
- Das Kugellinsenmagazin und der Sauggreifer für die Kugellinsen erfüllen die Anforderungen. Die Kugellinsen lassen sich sicher aus dem Magazin entnehmen und in die mikrooptische Aufbauplatte einpressen.
- Das Wellenlängenfiltermagazin ist manuell schwierig zu befüllen und für eine automatische Befüllung nicht geeignet. Es ist jedoch einfach und kostengünstig herzustellen.
- Mit dem Formsauger können die Wellenlängenfilter sicher aus dem Magazin entnommen werden. Die Einführschrägen im Greifer erlauben es relativ große Positionierungsunsicherheiten im Magazin zu überbrücken. Als mit hoher Genauigkeit form-erodiertes Teil ist seine Herstellung allerdings recht aufwendig.
- Das Einpressen der Wellenlängenfilter in die mikrooptische Aufbauplatte war erst nach Änderungen am Wellenlängenfilter möglich. Durch Anbringen von Fasern an den Unterkanten des Filters wurde auch bei diesem Bauteil eine Selbstzentrierung

erreicht. Damit vereinfachte sich der Einpressvorgang erheblich.

- Die grafische Oberfläche der Steuerung vereinfacht die Programmierung gegenüber der textuellen Programmierung erheblich.

4. Ausblick

Diese Entwicklungen werden im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes MFV-Mikrosysteme (Fertigungsgerechte Montage- u. Fügeverfahren zum Aufbau von Mikrosystemen) durchgeführt. Die nächsten Schritte sind:

- Die Erprobung des Fasergreifers und Entwicklung des Prozesses zur Einführung der Glasfaser durch die Öffnung am Gehäuse in den Faserschacht in der mikrooptischen Aufbauplatte
- Die Weiterentwicklung des Wellenlängenfiltermagazins
- Fertigstellung des Revolverwechslers
- Die Entwicklung des Magazins und des Greifers für die mikrooptische Aufbauplatte.
- Entwicklung des Fügeprozesses für die Fixierung der Bauteile auf der mikrooptischen Bank
- Weiterentwicklung der Steuerungstechnik

Ein wesentlicher Aspekt werden weitere Untersuchungen zur Magazingestaltung und zur montagegerechten Gestaltung von Mikrokomponenten sein. Ohne eine Vereinheitlichung und Standardisierung der Bauteile und ihrer Magazine ist an eine rationelle und kostengünstige Serienproduktion nicht zu denken.

Um eine leichte Umrüstbarkeit auch auf andere Montageaufgaben im Rahmen der Kleinserienfertigung zu ermöglichen, werden Hardware (Greifer, Werkzeugwechselsystem und Magazine) und Software modular aufgebaut.

Literatur:

- [1] A. Müller, J. Hehnmann, A. Rogner: "Bidirektionale Sende- und Empfangseinheit" 2. öffentliches Statureseminar "Aufbau- und Verbindungstechnik als Basistechnologie für elektrische und optische Mikrosysteme", Berlin, Januar 1994

Aufgaben und Ziele eines Technikums für die Kleinserienfertigung

H. Rininsland, L. Eulenberger, B. Karl

Hauptabteilung Ingenieurtechnik (HIT)

Zusammenfassung

Zur Unterstützung des Technologietransfers mikrosystemtechnischer F&E-Ergebnisse in die industrielle Verwertung baut HIT ein Technikum auf, das die Aufgabe hat, unter Einbeziehung des Prozeß-Know-hows der Forschungsinstitute, jeweils für ausgewählte, marktrelevante Labormuster der Mikrosystemtechnik eine industrieorientierte Kleinserienfertigung (KSF) zu realisieren. Dabei werden insbesondere fertigungstechnische Aspekte unter den Gesichtspunkten von Wirtschaftlichkeit und Qualität bearbeitet. Kooperation und unmittelbare Mitwirkung industrieller Partner sollen die Lösungsfindung verbessern und den Technologietransfer beschleunigen. Entwicklungen des Forschungszentrums Karlsruhe, z.B. im Bereich der Mikromontage oder der Informatik (Software-Tools), finden im KSF-Technikum ihre Serien-Erprobung.

1. Ausgangssituation

Das Forschungszentrum Karlsruhe hat in den vergangenen Jahren eine Reihe interessanter mikrotechnischer Komponenten und Baugruppen prototypisch als Versuchsmuster (z.B. Sensoren und Aktoren) realisiert und die Integration zu komplexen Mikrosystemen einschließlich ihrer Ankopplung zur Makrowelt durchgeführt.

Damit wurde sowohl die Fertigungsfähigkeit und Funktionstüchtigkeit dezidierter Mikrosysteme grundsätzlich nachgewiesen als auch die Nutzung für konkrete Einsatzgebiete aufgezeigt.

Um den Transfer mikrosystemtechnischer Entwicklungen des Zentrums in die industrielle Vermarktung zu beschleunigen, wird nun außerdem das Ziel verfolgt, exemplarisch an ausgewählten Baugruppen die Machbarkeit einer wirtschaftlichen Kleinserienfertigung (KSF) nach industrieorientierten Methoden zu demonstrieren. Durch diese Kleinserienfertigung ist es außerdem einfacher möglich, interessierte gewerbliche Unternehmen mit MST-Mustern zu versorgen.

Die derzeitigen Fertigungseinrichtungen im Forschungszentrum sind in der Regel für Experimentierzwecke und prototypische Einzelfertigung gebaut und erfüllen hierfür ihre universelle Aufgabe. Daher ist die jeweilige Prozeßkette derzeit durch viele manuelle und damit kostenintensive Prozeßeinzelschritte gekennzeichnet (z. B. Werkzeugwechsel, Einlegen und Entnehmen der „Werkstücke“ aus Vorrichtungen und Anlagen, Einstellung von Prozeßparametern, Vereinzelung, Qualitätsprüfung usw.).

Die Arbeiten zur Herstellung von Mikrosystemprototypen werden zu einem überwiegenden Teil von Forschungspersonal und Doktoranden ausgeführt. Dies gilt für die mechanische Strukturierung, für die Dünnfilmmontage, für die Abformtechnik ebenso wie für die jeweilige Aufbau-, Verbindungs- und Prüftechnik.

Die Beherrschung der einzelnen Prozeßschritte in Bezug auf konstante Qualität und Zuverlässigkeit wird derzeit vielfach durch hohe Sicherheitszuschläge (z.B. bei den Prozeßzeiten und durch zeitintensive manuelle Justagen (mit der Folge jeweils hoher Rüstzeiten) an den Anlagen (Blockierung der Maschinenhauptzeiten durch das Rüsten in der Anlage) sowie durch das Inkaufnehmen einer hohen Ausschußquote ersetzt.

Die detaillierte Fertigungs-Verfahrensweise (wie etwa Einstellparameter, Kontroll- und Reinigungsschritte usw.) zu den einzelnen Abschnitten der Prozeßkette stützt sich ganz wesentlich auf das Wissen der wenigen am Labormusterprozeß beteiligten Mitarbeiter (einschl. Diplomanden und Doktoranden).

Auf der Basis dieser vorhandenen Anlagen und Einrichtungen lassen sich zwar kleinere Stückzahlen herstellen, ohne hierbei jedoch den Anspruch ableiten zu können, nach industrieller Vorgehensweise bzw. wirtschaftlich gefertigt zu haben. Ein n-mal durchgeführter Labormusterprozeß stellt bei weitem noch keine industrielle Kleinserienfertigung dar, bei der eine Prozeßfähigkeit und kostenminimierte Fertigung garantiert werden kann.

Für den Aufbau und Betrieb einer industriellen Kleinserienfertigung steht an den Forschungsinstituten des Zentrums kaum spezifisches Personal zur Verfügung, so daß eine andere Lösung gefunden werden mußte.

2. Aufbau eines Technikums für Mikrofertigung

Zum Aufbau einer Mikrosystemtechnik-Kleinserienfertigung im Zentrum ist Anfang 1995 bei der Hauptabteilung Ingenieurtechnik (HIT) mit der Konzeption und mit der Einrichtung eines Technikums für Mikrofertigung begonnen worden.

Dieses Technikum hat die Aufgabe, sich gezielt den fertigungsorientierten Fragestellungen zu widmen. Im Vordergrund stehen hierbei neben einer durchgängigen Fertigungsdokumentation sowohl die Gesichtspunkte

der Kostenminimierung als auch die Anforderungen eines industriellen Qualitätsmanagements. Die Teilprozesse der jeweiligen Prozeßkette müssen bezüglich Flexibilität, Stabilität und Zuverlässigkeit optimiert werden. Die Reproduzierbarkeit der Teilprozesse einer Prozeßkette (Prozeßfähigkeit) spielt neben Fragen der Wirtschaftlichkeit eine dominierende Rolle.

In Labormustern vorliegende Forschungsergebnisse aus den Instituten werden mit der dort entwickelten Verfahrenstechnik ins Technikum übernommen und dort nach den Gesichtspunkten einer industriellen Kleinserienfertigung aufbereitet und optimiert. Höhere Stückzahlen erfordern auf jeden Fall eine grundlegende Überarbeitung der Fertigungseinrichtungen sowie teilweise des Produktdesigns (fertigungs-, montage- und prüfgerecht) sowie die Einführung teilautomatisierter Mikromontageeinrichtungen zur Erreichung von hoher Prozeßsicherheit und hoher Ausbringung.

Hierfür müssen in Kooperation mit Forschungsinstituten und weiteren Hauptabteilungen des Zentrums die Fertigungsschritte verbessert sowie Anlagen und Vorrichtungen bis hin zum Ersatz durch spezifisch für eine Kleinserienfertigung neu zu konzipierende Fertigungseinrichtungen weiterentwickelt werden. Zwischenzeitlich erreichte F&E-Ergebnisse (z.B. zur Mikromontage oder zur Fertigungssimulation) werden übernommen und dann einem realen Praxistest unterzogen.

Die Anwendung fertigungstechnischer Kleinserienmethoden wird zu Produktanforderungen (z.B. abform- und montagegerechte Konstruktion) führen, die Produkt-design-Änderungen notwendig machen: Dies führt zu Rückkopplungen mit den F&E-Instituten.

3. Organisatorische Einbindung im Forschungszentrum

Das Technikum für Mikrofertigung muß eigenständig agieren können und ist daher von Forschungsinstituten getrennt an der Hauptabteilung Ingenieurtechnik (HIT) angesiedelt, welche zudem über eine eigene Konstruktionsabteilung, über Projektteilungen sowie Werkstattkapazität verfügt. Es muß neben eigenem Technikumpersonal auch über eigene kleinseriengerechte Fertigungseinrichtungen verfügen, damit personelle und gerätetechnische Engpässe vermieden werden und sich das Forschungspersonal an den Instituten einschließlich Doktoranden der Durchführung des Forschungsprogramms widmen kann. Andererseits erfordern teure und Know-how-kritische Anlagen (wie auch extreme Reinraumbedingungen) eine abgestimmte gemeinsame Nutzung von Anlagen in den Instituten.

Trotz organisatorischer Trennung ist eine enge Kommunikation und Kooperation erforderlich zwischen dem F&E-Personal, welches das Prozeß-Know-how entwickelt hat, und dem Fertigungspersonal, das die Kleinserienfertigung durchführt. Diese Rückkopplung im Sinne einer interdisziplinären Zusammenarbeit ist für eine Optimierung der Prozeßketten für eine wirtschaftliche

Kleinserienfertigung unabdingbar. Dies entspricht auch der in der Industrie praktizierten Aufteilung von Verfahrensentwicklung einerseits und Nullserien-Fertigung andererseits.

Die aus den Anforderungen der Fertigungspraxis des Technikums resultierenden Entwicklungsarbeiten im Hinblick auf kleinseriengerechte Fertigungsanlagen und Prüfverfahren führen zu internen Entwicklungsaufträgen und zu weiteren Entwicklungskooperationen.

Während prozeßrelevante Entwicklungsaufgaben und die Entwicklungskooperation mit externen Forschungseinrichtungen im wesentlichen die Aufgabe der Forschungsinstitute des Zentrums bleiben, werden fertigungsorientierte Maßnahmen im Hinblick auf kleinseriengerechte Fertigungsanlagen vom Technikum in Kooperation mit den Konstruktions- und Fertigungsabteilungen des Zentrums und Ausrüsterfirmen erarbeitet und prototypisch für ausgewählte Kleinserien zur Anwendung gebracht.

Neben der Kleinserienfertigung, die zentral im Technikum durchgeführt wird, werden die in den Instituten vorhandenen Maschinen und Anlagen für eine dezentrale Fertigung genutzt, da es wirtschaftlich nicht sinnvoll ist, alle notwendigen, vor allem teuren Anlagen für das zentrale Technikum nochmals zu beschaffen. Die Fertigungs- und Verfahrensschritte, die somit in den Instituten ablaufen, unterliegen den gleichen Kriterien der Fertigungsüberwachung und -dokumentation sowie des Qualitätsmanagements. Diese Vorgaben und die Organisation der dezentralen Fertigung werden vom Technikum vorgenommen.

4. Industrie-Kooperation

Das Technikum für MST-Kleinserienfertigung sieht sich als Vermittler zwischen Forschungsinstituten und gewerblicher Wirtschaft. Es beabsichtigt die zunehmend wachsenden Aufgaben des Technologietransfers im Zusammenwirken mit der Stabsstelle „Technologietransfer und Marketing“, der Projektleitung PMT und den Mikrosystemtechnik-F&E-Bereichen des Forschungszentrums zu unterstützen. Dies zielt neben der realen Demonstration der Teilefertigung insbesondere auf Betreuung und Beratung von Industrieunternehmen bei der Umsetzung der MST-Technologie in Bezug auf Produkte, auf Fertigungstechnologie und auf Kontaktvermittlung in der Startphase ab, wobei kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) besondere Berücksichtigung finden sollen.

Für den Transfer vom Technikum in die gewerbliche Wirtschaft wird ein Know-how-Transfer auch durch zeitlich befristete Mitwirkung (z.B. Anlernphase) von Mitarbeitern aus der Industrie im Technikum erfolgen. Umgekehrt wird auch eine Personaldelegation von Technikumsmitarbeitern zu Industriepartnern, z.B. in der Einführungsphase, einerseits eine sinnvolle Hilfestellung für die Partner sein können, andererseits eine Bereicherung für die Technikums-Mitarbeiter im Sinne einer industriellen Praxiserfahrung.

Für interessierte Industriepartner steht mit der Realisierung von Kleinserienfertigung im Technikum auch eine nachvollziehbare Dokumentation der Fertigungskette (Arbeitspläne, erforderliche Betriebsmittel, Prüfpläne und qualitätssichernde Maßnahmen sowie Qualifikationsanforderungen für das Personal usw.) sowie eine detaillierte Aussage zu Kosten (Erstinvestitions-, Betriebs- und Personalkosten) bezogen auf eine bestimmte Stückzahl eines MST-Produktes zur Verfügung.

Für den Technologietransfer vom Zentrum (Institute und Technikum) in die Industrie werden fünf Zielgruppen (u.U. in Kombination) gesehen:

1. Hersteller von
 - Mikrosystemen
 - Baugruppen
 - Einzelbausteinen für Mikrosysteme
2. Zulieferer (als Ausrüster):
 - Hersteller von Abformwerkzeugen, Lieferanten von Komponenten und Baugruppen (elektronische, optische, bio-chemische usw.) sowie von Halbzeug (u.a. Kunststofffolien) und Hilfsstoffen (u.a. Kleber)
3. Hersteller von Fertigungsmaschinen, Anlagenausrüster, z.B. Spritzgießmaschinen, Prägeeinrichtungen, Meßtechnik, Steuerungstechnik, Montage- und Handhabungstechnik, DV-Komponenten (SW und HW)
4. Dienstleister
 - z. B. Strahlungsquelle/Bestrahlung, Maskenerstellung
5. Unternehmen, die MST-Baugruppen in ihre Produkte integrieren wollen

Bei der Kooperation mit Industriepartnern wird auf die unterschiedlichen Kooperationsziele je nach Typ des Partners zu achten sein.

Die Kooperation mit Ausrüstern bietet die Möglichkeit, fertigungs- und prüftechnische Anforderungen des Technikums in einer Entwicklungskooperation zu realisieren bzw. Ausrüster bei der Bedienung des Marktes indirekt zu unterstützen.

Bei der Zusammenarbeit mit Herstellern mikrotechnischer Komponenten und Systeme kann das Technikums-Know-how zur jeweiligen Fertigungskette unmittelbar weitergegeben werden; andererseits können über sie herstellerspezifische Wünsche und Anforderungen ihrer Kunden in das Technikum einfließen. Diese Rückkopplung aus der Anwendungspraxis ist für das Forschungszentrum ein wichtiger Faktor, wenn Qualität und Kundenzufriedenheit erreicht werden sollen.

Auch die Marktrelevanz von Prototypentwicklungen des Forschungszentrums wird sich über diese direkten oder indirekten Kundenkontakte besser einschätzen lassen. Der Ergebnistransfer aus den Forschungsinstituten über das HIT-Technikum in die gewerbliche Wirtschaft

bedarf vielfältiger, stützender Maßnahmen. Hierzu zählen:

- Vermittlung und Aufbereitung von Kontakten
- spezifische Bearbeitung von Anfragen
- Hilfestellung durch unterschiedliche technische Disziplinen, wie z. B. Materialforschung, Meß- und Regelungstechnik, Werkstückhandling- und Materialflußautomatisierung, Tools der Informatik für Modellbildung, Simulation und datenbankgestützte Dokumentation (Ingenieurdatenbank) sowie Konstruktion und Fertigung von Vorrichtungen und Betriebsmitteln
- Kontaktpflege zu anderen Forschungsstellen, zu Verbänden, zu Messe-/Kongreßorganisationen und zur Presse.

In enger Kooperation mit der Stabsabteilung Technologietransfer und Marketing und dem dort angesiedelten Marketingbeauftragten für Mikrosysteme sollen die Marktbedürfnisse für Mikrosysteme ermittelt werden, so daß zukünftig bei der Wahl der Produkte, deren Fertigungstechnik im Technikum zu einer gewissen Reife weiterentwickelt werden soll, mehr Sicherheit entsteht und zu einem möglichst frühen Zeitpunkt bereits ein Industrieinteressent in die Weiterentwicklung mit einbezogen werden kann.

5. Kooperationen und Koordination

Die Pflege von Industriekontakten durch das Fertigungs-Technikum entsprechend der oben definierten Zielgruppen wird in engem Zusammenspiel zwischen der PMT-Projektleitung, den MST-Forschungsinstituten und den Aktivitäten der Stabsabteilung TTM erfolgen. Sie ist unter den Gesichtspunkten „Technologietransfer“ und „Entwicklungskooperation“ zu realisieren:

MST-Technologietransfer

- Betreuung und Beratung von Industrie-Unternehmen (KMU) bei der Umsetzung der MST-Technologie bzgl.:
 - Produkte
 - Fertigung
 - Vertriebsunterstützung
- Anlagen-, Maschinen-, Geräte-Zulieferanten
- Abnehmer von KSF-Produkten (Versuchsmuster)
- Lizenzvergabe

Entwicklungs-Kooperation

- Industrie
- externe Forschungseinrichtungen
- Forschungszentrum Karlsruhe intern

6. Überführung von der Labormusterfertigung in das HIT-Technikum zur industriellen Kleinserienfertigung

Die Überführung von Fertigungsprozessen von Instituten in das KSF-T und die dortige Weiterbearbeitung besteht aus folgenden Schritten:

- a) Auswahl von MST-Bausteinen gem. Marktrelevanz und erreichter Stabilität der Teilprozesse, wie z. B. Mikrospektrometer, Mikropumpe, Mikroventilsysteme, Beschleunigungssensor
- b) Übernahme von verfahrenstechnischen Know-how
 - Begleitung der Labormusterfertigung in den Instituten durch KSF-T-Mitarbeiter
 - Erstellung/Vervollständigung einer durchgängigen Fertigungsdokumentation (IST-Stand) (Arbeitspläne, Prüfpläne etc.)
 - Übernahme von Personen als Know-how-Träger in das KSF-T
- c) Aufbau eines eigenen Fertigungs-Equipments

Folgende Aspekte sind dabei zu berücksichtigen:

- Kennenlernen der Prozeßabfolge aller Arbeitsschritte der Teilprozesse und der im Betrieb auftretenden Probleme sowie Bedienung aller Teilprozesse der Labormusterfertigung (z.B. vom fertigen Prägwerkzeug ausgehend) durch intensives „learning by doing“ derart, daß mit der Übernahme einer MST-Fertigung im KSF-Technikum ein eigenständiges Betreiben gewährleistet ist.
- Analyse der Schwachstellen und Mitwirkung bei deren Beseitigung (Kurzfristaktionen)
- Kennenlernen und Dokumentieren der Interimslösungen zur Behebung aktueller Probleme, der Prozeßalternativen (auch einschließlich nicht erfolgreicher Versuche)
- Erarbeitung von Verbesserungsvorschlägen im Hinblick auf Stabilität und Reproduzierbarkeit der Teilprozesse, auf Qualitätssicherung, Prozeßfähigkeit und Kostenreduzierung
- Zusammentragen aller verfügbarer Prozeßdokumentationen (einschließlich Gerätespezifikation, Betriebsanleitungen, Software) sowie in Zusammenarbeit mit den Forschungsinstituten Ergänzung der Prozeßparameter, Arbeits- und Prüfpläne, Zeit- und Kostenerfassung
- Analyse notwendiger qualitätssichernder Maßnahmen und deren Realisierung im KSF-T (fertigungsbegleitend)
- Analyse und Optimierung manueller Arbeitsplätze (Verwertung von Ergebnissen aus landesgeförderten Projekten)
- Prüfung der Verfügbarkeit von Fertigungseinrichtungen und Betriebsmitteln
- Festlegung von Kenngrößen für eine Kleinserienfertigung

Die in den Instituten entwickelten Verfahrensschritte werden dann in das KSF-Technikum übernommen, wenn die Teilprozesse ausreichend stabil sind.

7. Aufgaben des Technikums

Für dezentrale Kleinserienfertigung in den Instituten werden vom HIT-Technikum industrielle Fertigungsmethoden - wie sie etwa in ISO 9000 für das Qualitätsma-

nagement formuliert sind - für zentrumsinterne Anwendungen aufbereitet.

Dies bedeutet die Erarbeitung eines Qualitätsmanagementsystems nach ISO 9001/9002 (Produktion und Montage) einschließlich der Erstellung eines Qualitätsmanagement-Handbuches mit Verfahrens- bzw. Arbeitsanweisungen und den Aufbau eines QS-Konzeptes für das HIT-Technikum:

- Erstellung von Prüfplänen und Prüfprotokollen
- Mitwirkung bei der Spezifikation für Halbzeuge bzw. Materialien und Bestellungen
- Festlegung und Überwachung der Prüfmittel
- Mitarbeit bei Prozeßverbesserungen bzgl. der Maschinen- bzw. Prozeßfähigkeit
- Erstellung einer prozeßbegleitenden QS-Dokumentation mittels CAQ-Unterstützung

Die Ermittlung der Fertigungskosten stützt sich auf eine Zusammenarbeit mit der Abteilung „Einkauf“. Anstelle von Vollkosten müssen bei der Aufwandsanalyse die Maschinen- und Anlagenkostensätze gesondert berücksichtigt werden.

Es ist davon auszugehen, daß Kostengesichtspunkte auch zu Vorschlägen für alternative Schritte in der Prozeß-/Verfahrenstechnik führen (z.B. Reihenfolge von Fertigungs- und Prüfschritten, Zeitpunkt der Vereinzelung, alternative Verbindungstechniken ...).

Die für die Qualitätssicherung erforderlichen organisatorischen und technischen Maßnahmen in Bezug auf Reinraumbedingungen werden produktspezifisch überprüft und angepaßt sowie konstruktive Vorschläge und Konzepte für Prozeßverbesserungen (serientaugliche Anlagen, Automatisierung von Justage-, Beschickungs- und Entnahme- sowie Prüfvorgängen) erarbeitet.

Letztlich geht es auch um die Adaption rechnergestützter Methoden für die industrieorientierte Realisierung einer flexiblen Kleinserienfertigung.

8. Organisationsstruktur des Technikums für Mikrofertigung

Das für das Technikum verfügbare Personal setzt sich zusammen aus Mitarbeitern, die sich mit industrieller Fertigung beschäftigt haben, aus Know-how-Trägern mikrotechnischer Verfahren und wird ergänzt durch Zuarbeit aus den Ingenieur- und Projektteilungen der HIT (Konstruktion, Werkstatt, Versuchstechnik, E-Technik, u.a.). Die Organisationsstruktur des zentralen Technikums umfaßt die für eine industrielle Fertigung wichtigen Aufgabenbereiche wie

- Engineering
- Qualitätsmanagement
- Versuchstechnik
- Informationslogistik
- Produktionsvorbereitung
- Betriebsmittelkonstruktion
- Produktion
- Controlling

Für die Fertigung stehen im Gebäude 601 zunächst ca. 270 qm zur Verfügung.

Die Fertigungs-ausrüstung orientiert sich zunächst an den ersten ausgewählten MST-Produkten und zielt mittelfristig darauf ab, gewisse Basisprozesse, etwa des Abformens und der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT), der Meß- und Prüftechnik sowie des Handlings und der Reinraumtechnik möglichst breit einsetzbar und flexibel verfügbar zu halten und weiter zu entwickeln.

Mikrosystemtechnische Baugruppen erfordern jeweils produktspezifische Prozeßketten; daher wird in einer ersten Realisierungsstufe der Kleinserienfertigung von ausgewählten Produkten ausgegangen. Für weitere zukünftige Produkte sind die Prozeßschritte jedoch möglichst von Anfang an so zu gliedern (Produkt-design und Simulation, Maskenerstellung, Abformwerkzeug-Fertigung, Abformung, Aufbau- und Verbindungstechnik, Qualitätssicherung), daß eine hohe Wiederverwendbarkeit der Fertigungseinrichtungen, Betriebs- und Prüfmittel gewährleistet wird.

9. Erste Ergebnisse

Inzwischen wurden die Verfahrensschritte für die Herstellung der Produkte Mikrospektrometer, Mikropumpe und Mikrowärmetauscher fertigungstechnisch weitgehend analysiert.

Diese erste Analyse zeigt eindeutig, daß je nach Komplexität, Material und Anforderungen an die Produkte, der aktuelle Reifegrad der Teilprozesse sehr unterschiedlich ist, wenn man ihre Stabilität, Produktionssicherheit und Qualität als wichtigste Kriterien beurteilt.

Vergleichsweise einfache Verfahrensschritte, wie bei der mikromechanischen Herstellung der Wärmetauscher, können bereits mit einer hohen Fertigungssicherheit ausgeführt werden. Im Gegensatz dazu ist die Fertigung des Mikrospektrometerbausteins aufgrund der extrem hohen Genauigkeitsanforderungen, z.B. bei der Kantenlänge und -tiefe $< 1 \mu\text{m}$ und den hohen Anforderungen an die optischen Eigenschaften des Materials, z.Zt. noch mit großer Unsicherheit behaftet.

Für die o.g. Mikrotechnik-Produkte wurden von Mitarbeitern des Technikums zwischenzeitlich bereits detaillierte Arbeits- und Prüfpläne erstellt sowie Prüfprotokolle entworfen.

Generell macht die Analyse jedoch deutlich, daß für eine wirtschaftliche und industrielle Fertigung dem Technikum folgende Ziele gesetzt sind:

- Eine Umorientierung der heute weitgehend sequentiell abfolgenden Teilprozesse in parallel oder versetzt überlappende Arbeitsfolgen kann zur Einsparung von Fertigungszeit und zur besseren Nutzung teurer Betriebsmittel führen, wobei eine Kapazitätsplanung der Produktionsmittel erforderlich wird.

- Die Vereinzelung nach einer Reihe von Prozeßschritten im Mehrfachwerkzeug (Nutzen) ist in der Prozeßkette möglichst weit nach hinten zu verschieben, um damit Einsparungen an Justage-, Prozeß-, Montage- und Handlingszeit zu gewinnen.
- Die vielfältigen, zwischen maschinellen Prozeßschritten notwendigen manuellen Tätigkeiten und Eingriffe werden mit Maßnahmen zur ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung (Forschungsprojekt) und mittels neu zu entwickelnder Vorrichtungen und Betriebsmittel zu einer Reduzierung der Fertigungskosten führen.

Die in der Prozeßkettenanalyse immer wieder hervortretenden hohen Rüstzeiten und aufwendigen Reinigungsprozeduren machen einen Bedarf an materialflußorientierter Teilautomatisierung unter Reinraumbedingungen deutlich.

- Ein fertigungsübergreifendes Qualitätsmanagement muß mit dem Nachweis der Prozeßfähigkeit der Teilprozesse im Zuge einer verfeinerten Kleinserienfertigung das „Erprüfen“ von „Gut“-Teilen durch das Produzieren von „Gut“-Teilen ersetzen. Hierzu zählen auch:

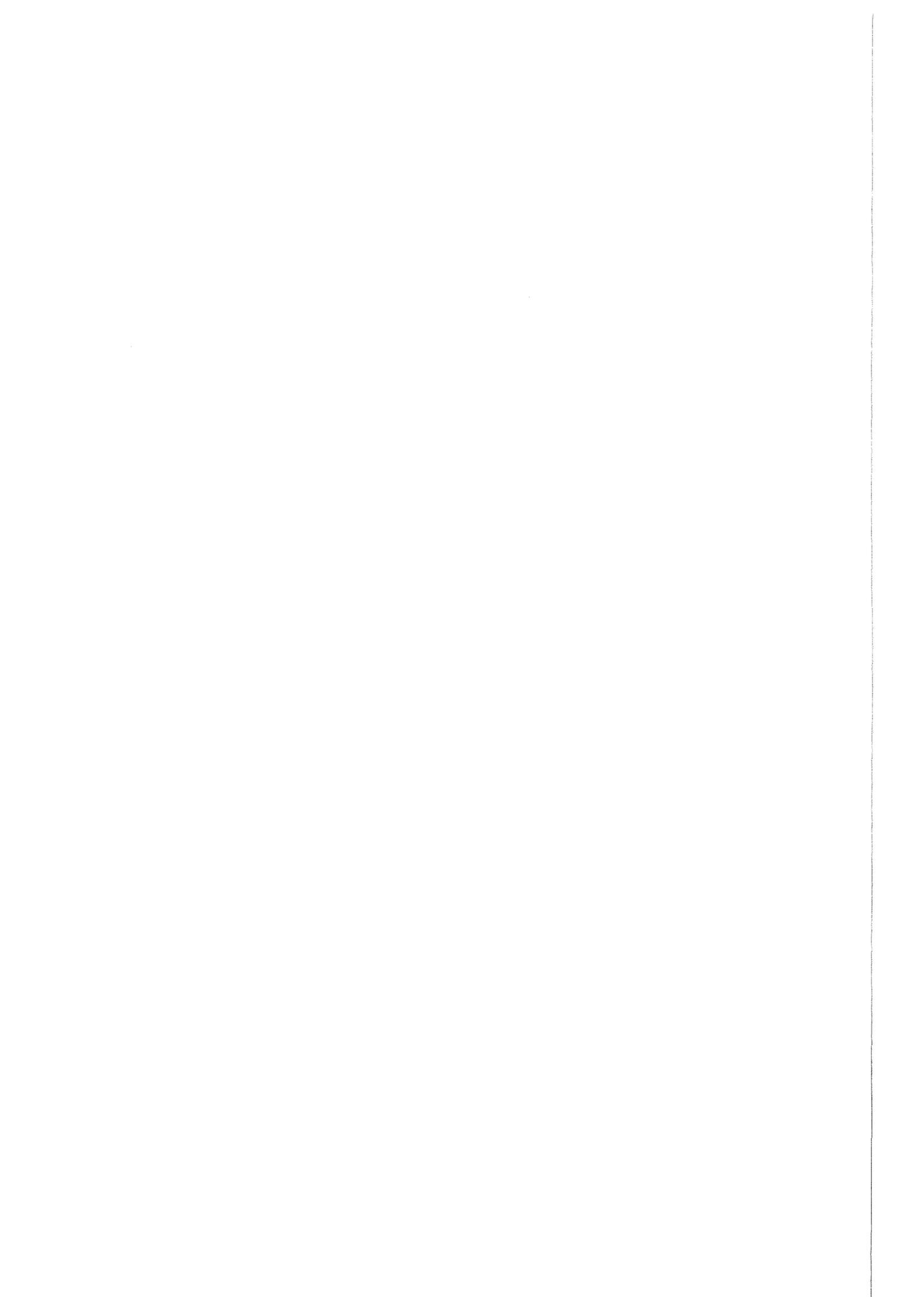
- Wareneingangsprüfung
- regelmäßige Kontrolle der Fertigungseinrichtung
- präventive Wartung
- eindeutige Auftragspezifikation
- durchgängige und vollständige Prozeßdokumentation
- produktbegleitende Fertigungsdokumentation
- Ersetzen von Prozeß-Steuerung durch Prozeß-Regelung, was online-Meßtechnik voraussetzt.

Folgende Engineering-Aufgaben sind derzeit in Arbeit:

- TRENNTÉCHNIKEN zur Vereinzelung und zum Schneiden von Folien
Ziel: halbautomatische Folienschneideeinrichtung
- DICKENPRÜFUNG für einzusetzendes Halbzeug sowie für Fertigungszwischenschritte
Ziel: reproduzierbare Positionierung an vordefinierten Meßpunkten und Prüfung
- HANDHABUNGS-VORRICHTUNGEN für Einsatzmaterial (Halbzeug/Zwischenprodukte) zur Vermeidung 'manueller' Verschmutzung incl. automatisierter REINIGUNGSVERFAHREN
- Untersuchungen zur Verlagerung von Fertigungsprozeßketten oder Teilen hiervon vom Reinraum bzw. Reinraumzelt in verkettete REINRAUMBOXEN (mit Schleusen für den Materialfluß)
Ziel: Reduzierung von Reinraumkosten, Erhöhung der Sauberkeit/Partikelfreiheit

Zur Realisierung dieser Aufgaben soll eine vernetzte DV-Technik mit modernen Software-Tools, z.B. zur Fertigungsplanung, Durchlaufzeitoptimierung, Qualitätssicherung und Kapazitätsplanung und letztlich zur Kosteneinsparung eingesetzt werden.

Demonstratoren des PMT



Intelligentes triaxiales Beschleunigungssensorsystem

O. Krömer¹⁾, H. Eggert²⁾, O. Fromhein¹⁾, H. Gemmeke¹⁾,
T. Kühner¹⁾, K. Lindemann²⁾, J. Mohr³⁾, J. Schulz³⁾, M. Strohrmann³⁾, O. Wollersheim³⁾

¹⁾Hauptabteilung für Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (HPE)

²⁾Institut für Angewandte Informatik (IAI)

³⁾Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT)

Zusammenfassung

Am Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) ist ein intelligentes Mikrosystem zur hochpräzisen Messung dreidimensionaler Beschleunigungen entwickelt worden. Grundlagen dieser Arbeiten bilden nach dem LIGA-Verfahren hergestellte mikromechanische Sensorelemente, bei denen unter Ausnutzung der freien lateralen Strukturierbarkeit des LIGA-Verfahrens eine hohe Linearität und ein geringer Temperaturgang erreicht werden konnten.

Zur Auswertung der Sensorelemente dient eine analoge Frontend-Elektronik, mit der die Beschleunigungssignale in extrem rauscharme Ausgangsspannungen umgesetzt werden. Durch gezielte Maßnahmen zur Reduktion des elektronischen Rauschens bis an die physikalischen Grenzen wird eine Auflösung von $1\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ erreicht. Die nach der Krafrückkopplungsmethode arbeitende Elektronik kompensiert mit Hilfe einer speziellen Reglerstruktur die Fertigungstoleranzen der Mikromechanik und linearisiert den Frequenzgang.

Nach einer Digitalisierung der analogen Beschleunigungssignale erfolgt die Auswertung auf einem Mikrokontroller-Modul. Eine programmierbare Verarbeitung der Sensorsignale durch einen Mikrokontroller erhöht die Zuverlässigkeit durch Plausibilitätsprüfung der Signale und die Meßgenauigkeit durch die Kompensation von Querempfindlichkeiten. Eine Reduktion der anfallenden Meßdaten auf die für die Anwendung notwendige Information kann durch die flexible Programmierung des Mikrokontrollers erreicht werden. Durch standardisierte Schnittstellen ist die Einbindung des Sensorsystems auch in komplexe Datenerfassungsnetze möglich.

1. Einleitung

Systeme zur Erfassung von Beschleunigungen haben eine Fülle von Anwendungsmöglichkeiten. Ein mittlerweile schon klassisches Anwendungsfeld ist die Automobiltechnik, wo Beschleunigungssensoren zur Auslösung von Airbags, für das Ausfahren von Überrollbügeln oder auch für Fahrwerks- und Antriebsregelungen eingesetzt werden. In Unfalldatenschreibern dienen sie zur Rekonstruktion des Bewegungsverlaufs des Fahrzeugs vor und nach einem Crash.

Auch für die Überwachung und Steuerung von Prozessen werden Beschleunigungssensoren eingesetzt. Möglich ist zum Beispiel die Schwingungsanalyse an Maschinen und Bauwerken, die Überwachung von Fertigungsstraßen, die dynamische Wägung bewegter Massen oder auch der Einsatz als Transportpion bei empfindlichen Gütern.

In der Medizin, Sportdiagnostik und Biomechanik dienen sie zur Erfassung der Bewegungsabläufe von

Gliedmaßen und Gelenken und können unter Umständen sogar körpereigene Sensorik ersetzen.

Weitere sehr anspruchsvolle Anwendungsgebiete sind die Seismologie, wo Beschleunigungen im μg -Bereich ($1\text{g} = \text{Erdbeschleunigung}$) erfaßt werden müssen, und die Navigation, wo durch eine zweifache Integration Geschwindigkeit und Weg aus dem Beschleunigungssignal berechnet werden.

Bei vielen dieser Anwendungen, insbesondere bei den beiden letztgenannten, genügt die Messung der Beschleunigung in nur einer Dimension nicht mehr. Hier muß mit einem triaxialen Sensorsystem der Beschleunigungsvektor in allen drei Raumdimensionen gemessen und ausgewertet werden. Im Vergleich zu einem eindimensionalen Sensorsystem sind hier bei den elektronischen Komponenten außer einem nahezu verdreifachten Hardware-Aufwand keine besonderen Maßnahmen nötig. Teile der Elektronik können von

allen drei Kanälen sogar gemeinsam benutzt werden. Beim Einsatz konventioneller Methoden steigt der Aufwand bei der Aufbau- und Verbindungstechnik jedoch überproportional an, da drei Einzelsensoren in drei zueinander orthogonalen Richtungen montiert, kontaktiert und justiert werden müssen. Durch die Kombination von zwei LIGA-Sensorelementen mit einem Silizium-Sensorelement wurde hier eine eher unkonventionelle aber auch unkomplizierte und bisher einzigartige Aufbau- und Verbindungstechnik gefunden, die außerdem auch ein sehr geringes Bauvolumen ermöglicht.

Bei fast allen Anwendungen werden die Beschleunigungssensoren in bereits bestehende Datenerfassungsnetze nachträglich eingebettet, oder es wird durch die dezentrale Anordnung mehrerer Sensorsysteme ein solches Netz erzeugt [1]. Zur Einbindung der Beschleunigungssensoren müssen daher entsprechende Schnittstellen (RS232, CAN-Bus, etc.) zur Verfügung stehen. Außerdem stellt die Einbindung in ein Netzwerk besondere Anforderungen an die Datenvorauswertung. Um das Netzwerk und den zentralen Überwachungs- und Steuerrechner nicht zu überlasten, ist die Datenvorauswertung fast immer eine Datenreduktion. Mit Hilfe einer im Sensorsystem in Form eines Mikrokontrollers enthaltenen Intelligenz werden die anfallenden Meßdaten auf die für die jeweilige Anwendung notwendige Information reduziert. In der Schwingungsanalyse wird dies z.B. eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) sein, in der Seismologie wären intelligente Triggerfunktionen auf bestimmte Signalverläufe denkbar, weiterhin steuert der Mikrokontroller die Kommunikation über die Schnittstelle und verwaltet die systeminternen Speichermedien (RAM, EPROM, etc.).

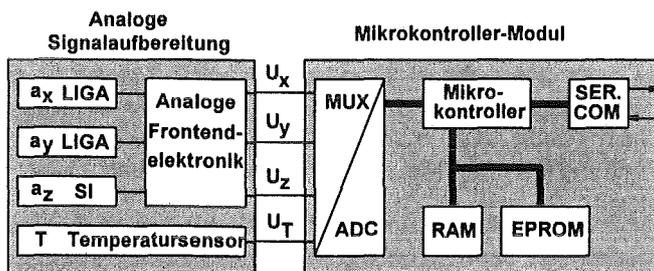


Abb. 1: Architektur eines intelligenten triaxialen Beschleunigungssensorsystems

Die Datenverarbeitung auf einem Mikrokontroller bietet außerdem die Möglichkeit, bekannte Querempfindlichkeiten der Sensoren, wie z.B. die Temperaturdriften, zu kompensieren. Mit Hilfe zusätzlicher Sensoren zur Erfassung der Störgrößen und der im Systemspeicher abgelegten Kennlinienfelder gelingt so die Minimierung von Meßfehlern bereits am Ort des Sensors. Somit entspricht auch die Kompensation von Querempfindlichkeiten einer Datenreduktion, da nur von Meßfehlern befreite Werte übertragen werden, was zu einer weiteren Entlastung der übergeordneten Netzwerkkomponenten beiträgt.

Nach diesen einführenden Betrachtungen gelangt man zu der in Abb.1 gezeigten Architektur eines intelligenten triaxialen Beschleunigungssensorsystems. Zur Erfassung der Querempfindlichkeiten ist ein Temperaturmeßkanal enthalten, zusätzlich können aber noch weitere Sensoren zur Erfassung von Störgrößen notwendig werden.

Um allen bisher genannten Anwendungen zu genügen, muß ein Beschleunigungssensorsystem folgende Eigenschaften aufweisen:

- kleiner Temperaturgang
- hohe Linearität
- große Meßbandbreite
- Erfassung statischer Größen (Messungen bei 0 Hz)
- großes Signal/Rausch-Verhältnis (hohe Auflösung)
- standardisierte Schnittstellen (Netzwerktauglichkeit)
- flexible, intelligente Datenverarbeitung und Meßwertkorrektur auf einem Mikrokontroller
- geringer Leistungsbedarf (Batteriebetrieb)
- geringes Bauvolumen

2. Sensorelement

Grundlage für eine präzise Beschleunigungsmessung bilden die Sensorelemente. Insbesondere werden der Temperaturgang, die Linearität und die Meßbandbreite des Meßsystems vornehmlich durch die Eigenschaften der Sensorelemente bestimmt. Bei dem LIGA-Sensorelement handelt es sich um einen mikromechanischen, kapazitiven Differentialsensor, der mit Hilfe der LIGA-Opferschichttechnik hergestellt wird. Das Sensorelement ist aus Nickel auf einem Keramiksubstrat (Aluminiumoxid) aufgebaut.

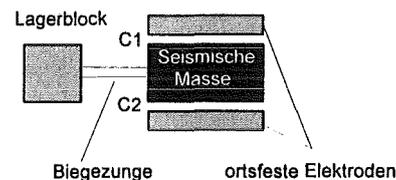


Abb. 2: Prinzipskizze eines kapazitiven Beschleunigungssensorelementes

An einer Biegezung wird eine seismische Masse frei beweglich zwischen zwei ortsfesten Gegenelektroden gehalten. Die seismische Masse ist gleichzeitig die Mittelelektrode des Differentialkondensators, den die beweglichen und ortsfesten Teile des Sensors miteinander bilden. Sowohl die seismische Masse als auch die Gegenelektroden werden in einem Prozeßschritt gefertigt. Damit sind Ungenauigkeiten aufgrund von Verbindungs- und Montageschritten ausgeschlossen.

Eine Beschleunigung des Sensors führt über die Auslenkung der seismischen Masse zu einer Verstimmung des Differentialkondensators, die mit einer entsprechenden analogen Frontend-Elektronik detektiert werden kann.

In einer ersten Design-Studie sind Sensorelemente hergestellt worden, die einer direkten Umsetzung der in Abb. 2 gezeigten Prinzipskizze in LIGA-Technik entsprechen [2]. Ziel dieses ersten Designs war weniger die Herstellung eines konkurrenzfähigen Sensorelementes, sondern die Verifikation und Optimierung der LIGA-Opferschichttechnik zur Herstellung frei beweglicher Strukturen an einem konkreten Beispiel. Außerdem konnten erste Erfahrungen in der Handhabung und der elektronischen Auswertung gewonnen werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten des Strukturmaterials (Nickel) und des Keramiksubstrates (Aluminiumoxid) stellt sich jedoch ein relativ hoher Temperaturgang des Offsets (TKO) von $7 \cdot 10^{-3}$ g/K ein. Ein weiterer Nachteil ist die winklige Auslenkung der seismischen Masse auf einem Kreisbogen anstelle einer Auslenkung senkrecht zu den Kondensatorflächen, was zu Nichtlinearitäten bei der Auswertung führen kann.

Um die Temperaturkoeffizienten zu minimieren, wurde unter Ausnutzung der freien Geometriewahl des LIGA-Verfahrens ein temperaturkompensiertes Sensordesign entwickelt [2] (Abb.3). Bei einer Temperaturerhöhung dehnt sich die schwarz eingezeichnete seismische Masse stärker aus als das darunterliegende Substrat. Deshalb wird im linken Sensorteil die Spaltweite verringert, während sie sich im rechten Sensorteil durch eine Aufspreizung der Gabelstruktur vergrößert. Bei einer Parallelschaltung der Elektroden mit einem idealen Längenverhältnis l_1/l_2 heben sich diese Effekte gerade auf, was zu extrem kleinen Temperaturgängen der Sensorkapazität führt.

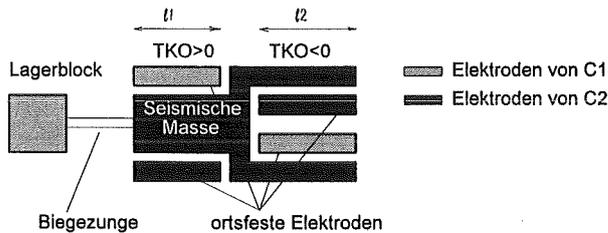


Abb. 3: Beschleunigungssensor mit temperaturkompensiertem Design

Komplexere Designs ergeben sich aus dem Wunsch nach einer senkrechten Auslenkung der seismischen Masse, einer möglichst hohen Ruhekapazität, einer hohen Rotationssteifigkeit und Anschlägen zum Schutz vor Überlast (Abb.4). Für das in Abb.4 dargestellte Sensorelement, das eine Fläche von 3mm x 1,5mm einnimmt, beträgt die Ruhekapazität $2 \times 4,5$ pF. Durch Variation der Biegezungenbreite können Sensorelemente für Meßbereiche zwischen ± 1 g... ± 10 g hergestellt werden.

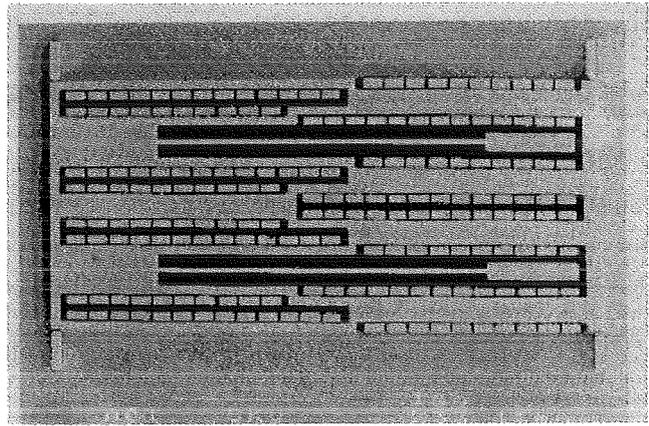


Abb. 4: REM-Aufnahme des temperaturkompensierten Sensorelementes

Durch die meßbereichsabhängige Dimensionierung der Biegezunge beträgt die Resonanzfrequenz des Masse-Feder-Systems 500...1200Hz. Die Dämpfung des Systems wird über Entlüftungskanäle in den ortsfesten Elektroden eingestellt. Angestrebt wird ein Dämpfungswert von ca. 0,7, bei dem ein flacher Frequenzgang mit geringer Resonanzüberhöhung erreicht wird (Abb.5).

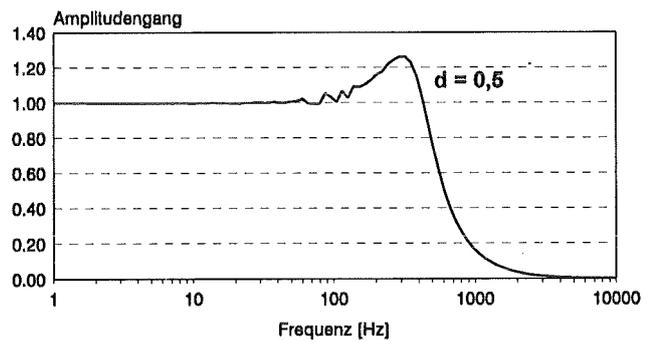


Abb. 5: Frequenzgang eines 1g-LIGA-Sensors ermittelt durch elektrostatische Anregung

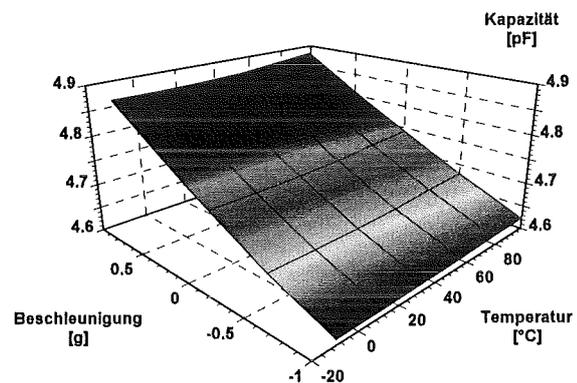


Abb. 6: Kapazität eines Sensorkondensators des temperaturkompensierten Sensorelementes über der Beschleunigung und der Temperatur als Störgröße

Aus dem Ausgangskennlinienfeld (Abb.6) erhält man für den Temperaturgang des Offsets (TKO) einen Wert von $2 \cdot 10^{-4}$ g/K, der bereits die Güte eines Präzisionsensors erreicht.

3. Analoge Frontend-Elektronik

Die Auswertung des Sensorelementes geschieht mit Hilfe der Krafrückkopplungsmethode (Abb.7). Hierzu muß die Auslenkung der seismischen Masse zunächst in eine entsprechende Spannung umgesetzt werden. Zu dieser Lagedetektion dient die Hochfrequenz-Modulationsmethode. Ein gegenphasiges Oszillatorsignal wird den ortsfesten Elektroden des Sensors zugeführt. Das Oszillatorsignal wird durch die Auslenkung der seismischen Masse amplitudenmoduliert und erscheint an der Mittelelektrode. Die Amplitude und Phase dieses Sensorsignals repräsentieren die Größe und Richtung der Auslenkung. Mit Hilfe eines Synchron-Demodulators wird das hochfrequente Sensorsignal phasensensitiv gleichgerichtet. Die Ausgangsspannung des Synchron-Demodulators ist proportional zur Auslenkung der seismischen Masse.

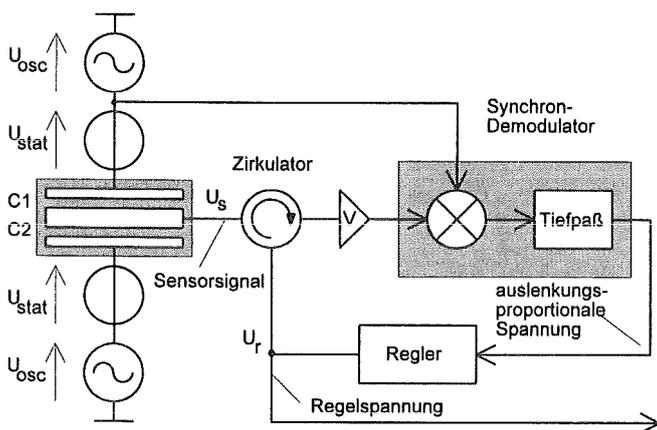


Abb. 7: Auswertung des Sensorelementes mit der Krafrückkopplungsmethode. Die Lagedetektion geschieht mit Hilfe der Hochfrequenz-Modulationsmethode

Mit Hilfe eines elektronischen Reglers wird aus der auslenkungsproportionalen Spannung eine Regelspannung U_r erzeugt und der Mittelelektrode des Sensorelementes zugeführt. Zusammen mit statischen Vorspannungen U_{stat} an den ortsfesten Elektroden erzeugt die Regelspannung an der seismischen Masse elektrostatische Rückstellkräfte, die der Beschleunigungskraft entgegenwirken. Bei einer entsprechenden Dimensionierung der Reglers heben sich die Beschleunigungskraft und die elektrostatische Rückstellkraft gerade auf, so daß die seismische Masse stets in der Ruhelage gehalten wird. Die Regelspannung, die zur Einstellung dieses Kräftegleichgewichts notwendig ist, ist direkt proportional zur

Beschleunigung und stellt gleichzeitig die Ausgangsgröße des Systems dar.

$$U_r = \frac{m d_0}{2 C_0 U_{stat}} \cdot a$$

- m - seismische Masse
- d_0 - Kondensatorspaltweite
- C_0 - Ruhekapazität des Sensors
- U_{stat} - statische Vorspannung
- a - Beschleunigung

Diese Art der Rückkopplung, bei der auch die Mikro-mechanik Bestandteil der Regelschleife ist, verbessert die Linearität und das Übertragungsverhalten wird weitgehend unabhängig von den Eigenschaften der Sensorelemente und der Elektronik. So ist z.B. die Federkonstante des Sensorelementes nicht im Übertragungsfaktor enthalten und seitens der Elektronik nimmt nur die statische Vorspannung Einfluß.

Neben der Auswertung des Sensorelementes mit Hilfe der sehr anspruchsvollen Krafrückkopplungsmethode war eine möglichst hohe Auflösung und damit ein geringes Eigenrauschen der Elektronik ein nicht minder wichtiges Entwicklungsziel, um das Meßsystem auch für Anwendungen in der Seismologie und Navigation zu qualifizieren. Durch gezielte Maßnahmen zur Reduktion des elektronischen Rauschens konnte die Auflösung bis an die physikalischen Grenzen gesteigert werden. Die Auflösungsgrenze ist bestimmt durch das mechanische Rauschen des Sensorelementes, das durch die Brown'sche Molekularbewegung der Gasteilchen innerhalb der Mikromechanik erzeugt wird. Bei den vorliegenden LIGA-Sensorelementen liegt diese Auflösungsgrenze bei $0,5 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Die Größe des elektronischen Rauschens wird bereits durch die Auswertemethode bestimmt. Durch die hochfrequente Ansteuerung und Auswertung wird zum Beispiel das $1/f$ -Rauschen der verwendeten Halbleiterbauelemente unterdrückt. Durch die Verwendung eines Synchron-Demodulators entsteht ein schmalbandiger und somit rauscharmer Gleichrichter, da das hochfrequente Sensorsignal mit dem Referenzoszillator korreliert wird. Starken Einfluß auf das Gesamt-rauschen nimmt der Hochfrequenzvorverstärker V und die Entkopplung der niederfrequenten Regelspannung U_r vom hochfrequenten Sensorsignal U_s . Der Einsatz eines aktiven Zirkulators anstelle einer Entkopplung im Frequenzbereich mit Hoch- bzw. Tiefpaßfiltern und die Wahl spezieller Halbleiterbauelemente für den Vorverstärker trugen hier wesentlich zur Reduktion des Rauschens bei.

Auch der verwendete Reglertyp und die Reglerparameter bestimmen das Rauschverhalten der Elektronik. Einfache Reglerstrukturen (PID-, PI-, PD-Regler usw.) führen nicht zu den gewünschten Ergebnissen, da bei einer Optimierung der dynamischen Eigenschaften des Regelkreises (Band-

breite, Dämpfung) das Eigenrauschen überproportional angehoben wird. Gelöst wurde das Problem durch den Einsatz einer zweistufigen Reglerstruktur, bei dem in einer inneren Regelschleife das PD-Signal und in einer äußeren das I-Signal erzeugt wird (Abb.8). Zur Regelung des Sensorelementes wird das Summensignal (PID-Signal) in den Kreis zurückgekoppelt, während nur der I-Anteil die Ausgangsgröße bildet. Obwohl der Regelkreis einen differentiellen Anteil mit hoher Rauschverstärkung enthält, entsteht ein extrem rauscharmes Ausgangssignal. Die Auflösung beträgt $1\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ und liegt nur geringfügig über dem mechanischen Rauschen der Sensorelemente (Abb.9).

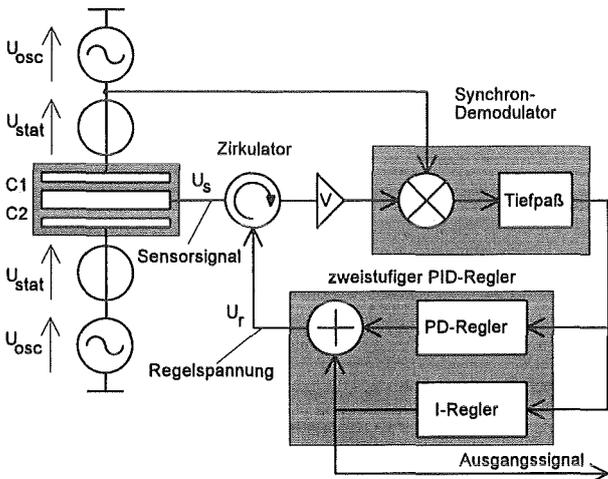


Abb. 8: Einsatz eines zweistufigen Reglers zur Optimierung des Signal/Rausch-Verhältnisses und zur Kompensation von Fertigungstoleranzen

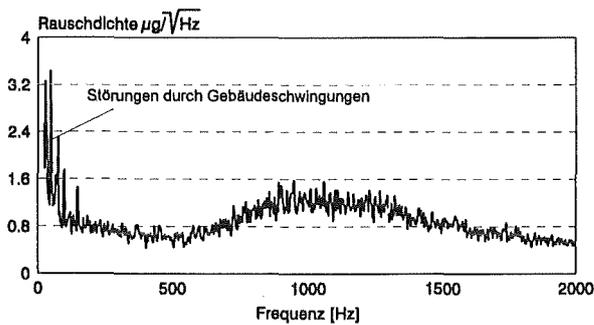


Abb. 9: Rauschdichtefunktion der analogen Frontend-Elektronik

Außerdem gelingt bei dieser Reglerstruktur eine Kompensation von Fertigungstoleranzen des mikro-mechanischen Sensorelementes ohne Abgleich der Hardware. Der P-Anteil der inneren Regelschleife wirkt am Sensorelement wie eine zusätzliche Federkonstante, der D-Anteil wie eine Dämpfungskonstante. Bei einem hinreichend hohen PD-Anteil werden die resultierende Feder- und Dämpfungskonstante vorwiegend durch Eigenschaften des Reglers bestimmt und die Einflüsse der Mikromechanik treten in den Hintergrund (Abb.10).

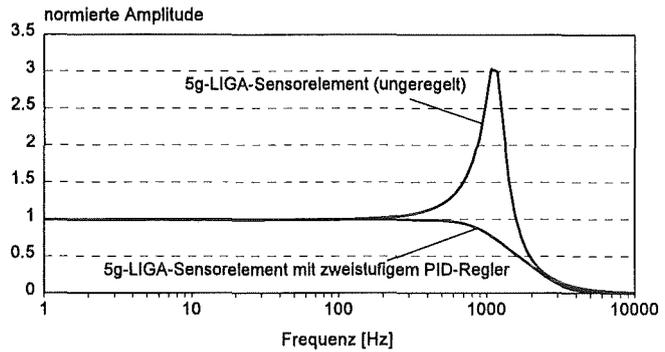


Abb. 10: Linearisierung des Frequenzgangs durch den Einsatz eines zweistufigen PID-Reglers

4. Triaxiales Sensormodul

Die Elektronik für ein triaxiales System wurde in Multilayer-Dickfilmtechnik auf einem Keramiksubstrat realisiert. Da LIGA-Sensorelemente prinzipbedingt parallel zur Montageplattform sensitiv sind und Siliziumelemente im Gegensatz dazu senkrecht zur Montageebene messen, wurden zwei LIGA-Sensorelemente mit einem Silizium-Element zu einem triaxialen Beschleunigungssensor kombiniert. Die Kombination verschiedener Technologien ermöglicht so die Realisierung eines triaxialen Beschleunigungssensors in planarer Montagetchnik. Resultat ist eine unkomplizierte Aufbau- und Verbindungstechnik bei geringem Justieraufwand und Raumbedarf. Die analoge Frontend-Elektronik benötigt zusammen mit den Sensorelementen eine Fläche von $25 \times 35 \text{ mm}^2$ bei einer Bauhöhe von nur 2mm (Abb.11).

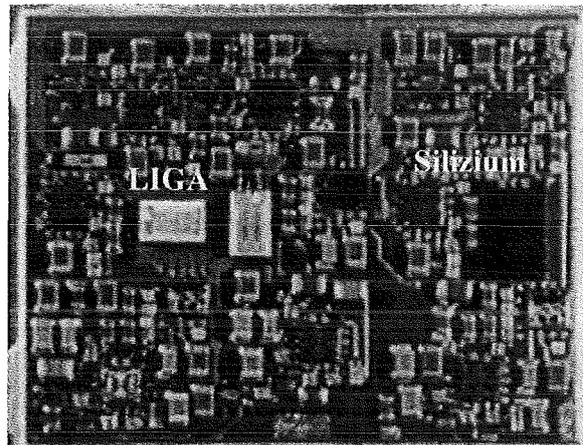


Abb. 11: Triaxialer Beschleunigungssensor in planarer Montagetchnik

5. Mikrocontroller-Modul

Zentrales Bauelement des Mikrocontroller-Moduls ist ein 16-Bit-Mikroprozessor von Siemens mit der Bezeichnung SAB 80C165. Seine Vorteile sind interne Timer, eine integrierte RS232-Schnittstelle und die Fähigkeit, externe Hardware ohne zusätzliche Logik zu

bedienen. Seine Rechenleistung von 10 MIPS erlaubt außerdem die Online-Verarbeitung der anfallenden Meßwerte. Als Speichermedien stehen 256 kByte RAM und 256 kByte Flash-EPROM zur Verfügung. Insgesamt können vom Mikrokontroller 16 MByte Speicher adressiert werden, was insbesondere bei Anwendungen mit großen Datenmengen (Datenlogger) wichtig sein kann. Hierbei handelt es sich jedoch um Spezialanwendungen, die im Rahmen des Demonstrators nicht abgedeckt werden können.

Der Datentransfer und die Programmierung geschehen wahlweise über eine RS232- oder eine CAN-Schnittstelle. Über die Schnittstellen werden die anwenderspezifische Software und die Kennlinienfelder der verwendeten Sensoren vom HOST-PC in das Flash-EPROM geladen. Nach der Meßwertkorrektur und der anwenderspezifischen Signalverarbeitung werden die Meßergebnisse im RAM abgelegt und können über die Schnittstellen abgerufen werden. Über einen Multiplexer werden die Beschleunigungssignale $U_x...U_y$ und ein Temperatursignal U_T ausgewählt und mit einer Auflösung von 16 Bit A/D-gewandelt.

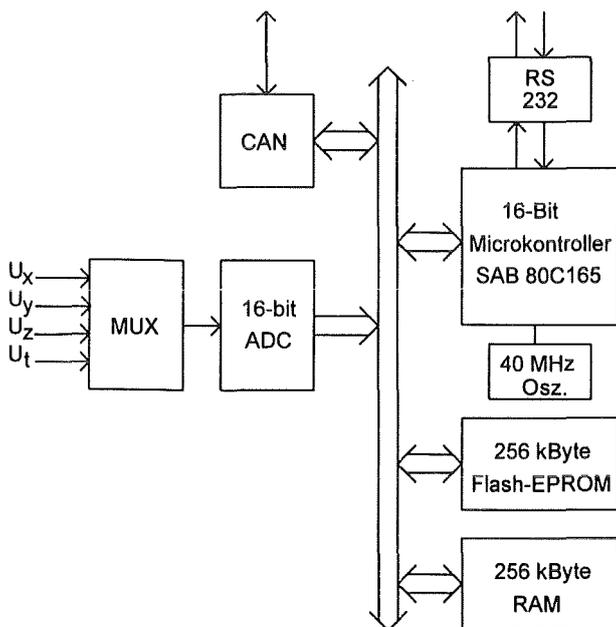


Abb. 12 : Blockschaltbild des Mikrokontroller-Moduls

Die Temperatur der Sensorelemente wird in Verbindung mit den abgelegten Kennlinienfeldern zur Meßwertkorrektur herangezogen. Außerdem können die mechanischen Querempfindlichkeiten der Sensorelemente, also die Sensitivitäten senkrecht zu den Hauptmeßrichtungen, korrigiert werden, da bei einem triaxialen System alle drei Komponenten des Beschleunigungsvektors bekannt sind (Orthogonalisierung). Als anwenderspezifische Datenverarbeitung existieren eine Fast-Fourier-Transformation (FFT), intelligente Trigger und Routinen für den Einsatz als Datenlogger oder Navigationssystem. Die Palette kann, abhängig vom

geplanten Einsatz des Systems, beliebig erweitert werden.

6. Diskussion

Über den Nachweis der prinzipiellen Tauglichkeit von LIGA-Sensoren hinaus zeigen die Ergebnisse, daß das temperaturkompensierte LIGA-Sensorelement Meßeigenschaften besitzt, die im Bereich von Präzisionsensoren liegen. Insbesondere wird dies durch seinen geringen Temperaturgang des Offsets von nur $2 \cdot 10^{-4}$ g/K erreicht. Großen Einfluß auf die erreichten Leistungsdaten nimmt die analoge Frontend-Elektronik. Durch den Einsatz der Krafrückkopplungsmethode zur Auswertung des Sensorelementes ist eine Linearisierung des Frequenzgangs und eine Erhöhung der Meßbandbreite über die Resonanzfrequenz der Mikromechanik hinaus gelungen. Durch den Einsatz eines zweistufigen PID-Reglers anstelle einfacher Reglerstrukturen werden Fertigungstoleranzen weitgehend kompensiert.

Durch die extrem hohe Auflösung von $1 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ hebt sich das Sensorsystem deutlich von den meisten am Markt etablierten Mikrosystemen ab. Insbesondere werden durch die hohe Auflösung neue Anwendungsbereiche in der Seismologie, der Navigation und der Schwingungsanalyse erschlossen. Die Kombination verschiedener Technologien (LIGA/Silizium) ermöglicht den Aufbau eines triaxialen Beschleunigungssensors in planarer Montagetechnik. Neben der Vereinfachung bei der Montage, Verbindungstechnik und Justierung wird hierdurch eine äußerst kompakte Bauform möglich.

Eindimensional messende Sensoren werden seit Mitte 1994 in kleineren Stückzahlen gefertigt und erfolgreich vermarktet. Das dreidimensional messende System steht in Form von wenigen Labormustern seit Mitte 1995 zur Verfügung und stößt seitens der Industrie und auch anderer Forschungsinstitute auf großes Interesse. In der realisierten Form soll es demnächst für diverse Anwendungen zum Einsatz kommen und untersucht werden.

Literatur:

- [1] H. Gemmeke, O. Fromhein: Mikroelektronik für die Mikrosystemtechnik, dieser Tagungsband
- [2] C. Buhrbaum, J. Mohr: Herstellung von mikro-mechanischen Beschleunigungssensoren in LIGA-Technik; Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 4859, (1991)
- [3] M. Strohmman, J. Mohr, J. Schulz: Intelligentes Mikrosystem zur Messung von Beschleunigungen basierend auf LIGA-Mikromechanik; Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5561, (1995)

Optomechanische Bypass-Schaltung für die optische Informationstechnik

A. Müller¹⁾, J. Göttert¹⁾, M. Kohl¹⁾, J. Mohr¹⁾, R. Müller-Fiedler²⁾

¹⁾ Institut für Mikrostrukturtechnik

²⁾ Robert Bosch GmbH

Zusammenfassung

Im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts „AVT-KEO“ (Aufbau- und Verbindungstechnik als Basistechnologie für elektrische und optische Mikrosysteme) wurde eine miniaturisierte Optomechanische Bypass-Schaltung für Einmodenfasern durch die Kombination von Silizium-Ätztechnik und LIGA-Verfahren realisiert. Die optische Signalführung wird durch einen mikrooptischen Aufbau auf der Basis einer mikrooptischen Bank bewerkstelligt, die durch Röntgentiefenlithographie auf einem anisotrop geätzten Siliziumwafer hergestellt wird. Durch Halterungen auf der mikrooptischen Bank werden die hybriden optischen Komponenten präzise auf einer optischen Achse positioniert. Die Schaltfunktion übernimmt ein mit dem LIGA-Verfahren parallel zur mikrooptischen Bank hergestellter elektrostatischer Linearantrieb. Die laterale Genauigkeit dieser Anordnung wird durch die monolithische Strukturierung sichergestellt. Die momentan erzielte Einfügedämpfung der Bypass-Schaltung liegt bei 5 dB und kann durch Vergolden des Mikrospiegels (1,5 dB) und Entspiegeln der Kugellinsen (1 dB) auf ca. 3dB verkleinert werden; die Schaltzeit beträgt 10 ms und kann bei gleichen Betriebsparametern auf ca. 5 ms reduziert werden. Damit sind die technischen Eigenschaften der optomechanischen Bypass-Schaltung mit thermooptischen Schaltern vergleichbar.

1 Einleitung

Bypass-Schaltungen werden in der optischen Nachrichtentechnik verwendet, um einen Netzknoten alternativ am Netzbetrieb zu beteiligen (Normalzustand) oder bei Ausfall oder Passivität zu überbrücken (Bypass-Zustand). Ein Netzknoten kann z.B. eine Vermittlung oder eine Verstärkerstation sein. Er ist allgemein dadurch gekennzeichnet, daß er Informationen empfängt, bearbeitet und wieder aussendet. Sicherheitskomponenten wie die Bypass-Schaltung finden häufig in Netzen mit hohen Übertragungsraten, d.h. im Einmodenbetrieb, Verwendung, so z. B. in Übertragungsnetzen für die Telekommunikation und in LANs lokaler Rechenzentren (FDDI-Protokoll). Wegen der Betriebssicherheit wird ein voll-optischer Bypass-Zustand angestrebt und auf integrierte optoelektronische Komponenten zur elektrooptischen Signalwandlung verzichtet. Weitere Gründe dafür sind eine voll-optische Signalverarbeitung (z.B. EDFA) und eine universelle Verwendbarkeit.

Aufgrund der Sicherheitsfunktion ergeben sich für eine Bypass-Schaltung als allgemeine Anforderungen eine hohe Zuverlässigkeit und niedrigere Kosten. Weitere Forderungen sind eine geringe Einfügedämpfung und eine niedrige Schaltleistung. Einen besonderen Vorteil bieten deshalb Schaltprinzipien, die durch die Potentialdifferenz getrieben werden und damit keine elektrische Energie dissipieren. Da der Ausfall oder auch das Zu- und Abschalten eines Knotens außerdem relativ seltene Ereignisse sind, eignen sich für Bypass-Schaltungen auch langsamere, thermooptische [1] oder optomechanische [2] Schaltmechanismen.

Im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts „AVT-KEO“ wurde eine miniaturisierte Optomechanische Bypass-Schaltung für Einmodenfasern durch die Kombination von Silizium-Ätztechnik und LIGA-Verfahren realisiert. Die optische Signalführung wird durch einen mikrooptischen Aufbau auf der Basis einer mikrooptischen Bank bewerkstelligt, die durch Röntgentiefenlithographie auf einem anisotrop geätzten Siliziumwafer hergestellt wird. Durch Halterungen auf der mikrooptischen Bank werden die hybriden optischen Komponenten präzise auf einer optischen Achse positioniert.

Die Schaltfunktion übernimmt ein mit dem LIGA-Verfahren parallel zur mikrooptischen Bank hergestellter elektrostatischer Linearantrieb [3]. Die laterale Genauigkeit dieser Anordnung im sub- μm -Bereich wird durch die monolithische Strukturierung sichergestellt.

2 Aufbaukonzept

Die Funktionsweise der Schaltung ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Die Gegenstandsweite der mit dem Netzwerk verbundenen Monomodefaser (Faser 1) ist so gewählt, daß die Strahltaile hinter der Kugellinse genau im Kreuzungspunkt der beiden Transmissionskanäle liegt. Mit Hilfe der rechten, oberen Kugellinse wird die Strahltaile auf die Stirnfläche der mit dem Teilnehmer verbundenen Faser 2 refokussiert. Der Teilnehmer verarbeitet das Signal und sendet ein aufbereitetes optisches Signal in die Faser 3. Über die beiden anderen Kugellinsen wird das Signal in die Faser 4 und weiter ins Netzwerk geleitet. Im Bypass-Zustand wird ein beweglicher Spiegel in den Strahlengang derart eingefahren, daß der von Faser 1 emittierte

Lichtstrahl mit Hilfe der beiden Kugellinsen direkt auf die Stirnfläche der Faser 4 am Teilnehmer vorbei abgebildet wird.

Aus beugungstheoretischen Gründen müssen Kugellinsen mit im Vergleich zu Fasern größerem Durchmesser zum Aufbau des optischen Abbildungs-systems verwendet werden [4]. Deshalb ist der Einsatz gestufter Substrate für die Röntgentiefen-lithographie notwendig, die eine exakte vertikale Positionierung der optischen Komponenten sicherstellen. Für die Bypass-Schaltung wurden zu diesem Zweck anisotrop geätzte Silizium-Wafer verwendet, bei denen die Ätzgrubentiefe auf $\pm 0.5 \mu\text{m}$ genau eingestellt werden kann. Durch die Wahl einer geeigneten Aufbaustrategie können bei der Kopplung zweier Einmodenfasern mit einer Lichtröhre mit diesem modularem Konzept Einfügedämpfungen von $<2\text{dB}$ erreicht werden, wobei 1 dB auf Fresnel-Verluste an den optischen Grenzflächen zurückzuführen ist [4].

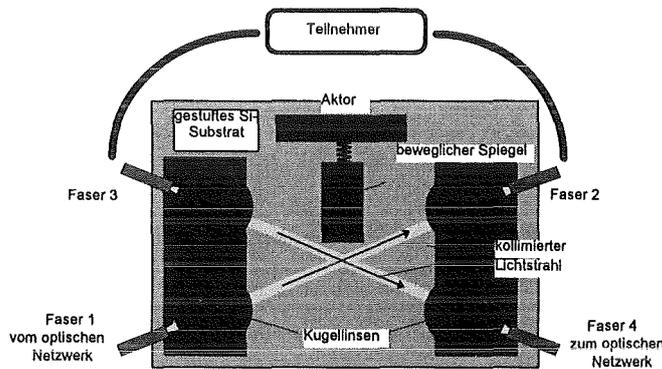


Abbildung 1a: Teilnehmer im Normalzustand

Das Schaltelement für den Spiegel ist als elektro-statischer Linearaktor aufgebaut. Etwa 500 kammartige Zähne einer beweglichen, an Federn aufgehängten und auf Massepotential liegenden Platte tauchen bei Anlegen einer Spannung in die Kammstrukturen der Gegenelektrode ein. Dabei wird der an dieser Platte befestigte Spiegel verschoben. Beim Abschalten der Spannung zieht die federnde Aufhängung den Spiegel in die Gleichgewichtslage zurück. Die Spannungsdifferenz kann auf den dotierten Wafern durch die isolierende Schicht des LPCVD-Nitrids der Ätzmaske aufrecht erhalten werden. Bei der zur Proessierung dieses Aktors verwendeten LIGA-Opferschichttechnik [5] werden Titan als Opferschichtmaterial und Flußsäure als Ätzmedium verwendet. Die Unterschiede der Ätzraten von Titan und Siliziumnitrid in Flußsäure sind ausreichend, um die Opferschicht selektiv zu entfernen.

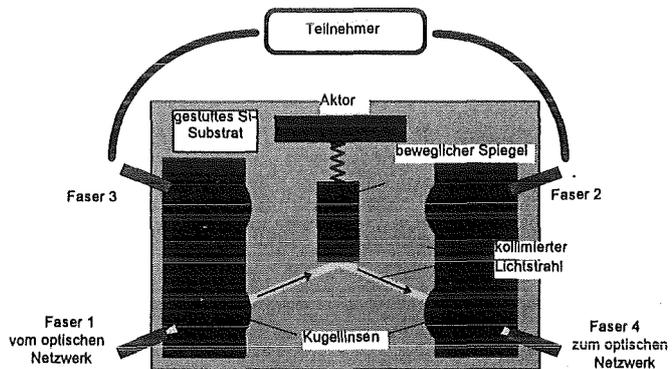


Abbildung 1 b: Teilnehmer im Bypass-Zustand

3 Design

Im Hinblick auf die Anfahrngenauigkeit des beweglichen Spiegels in die Sollposition wurde die Spiegel-anordnung variiert.

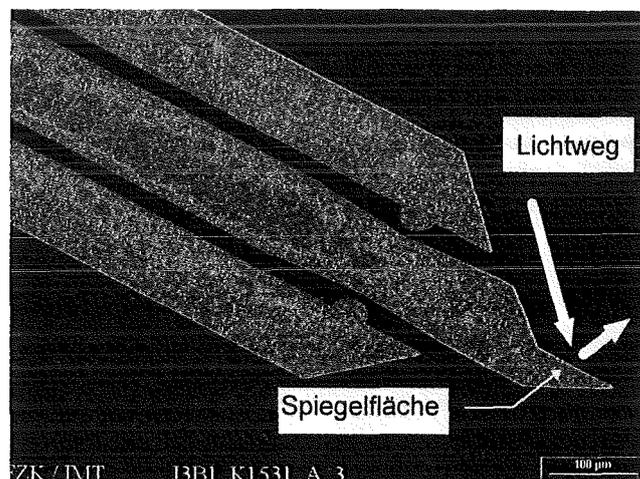


Abbildung 2: Senkrecht orientierte Spiegelform

Neben der ursprünglich angedachten Spiegelform (Parallelspiegel, Abbildung 1) wurde ein dazu um 90° gedrehter Spiegel (senkrecht orientierter Spiegel, Abbildung 2) konstruiert. Bei diesem Spiegel erfolgt das vom Feder-Masse-System verursachte Nachschwingen um die Sollposition quer zur Oberfläche, so daß keine Signaländerung entsteht. Beide Spiegelformen sind vom Design her identisch, wenn vom Einfallswinkel zum Komplementärwinkel auf 90° übergegangen wird. Die weiteren Ergebnisse sind deshalb explizit nur für den Parallelspiegel ausgeführt.

Um in allen Strahlengängen den gleichen Strahlverlauf realisieren zu können und damit Zusatzverluste durch Modenfehlanspassungen zu vermeiden, wurde die optische Anordnung im Gesamtsystem in Form eines Andreaskreuzes ausgelegt und als optisches Abbildungssystem eine modifizierte Lichtröhre [6] verwendet. Auf eine volle Kollimation und die damit verbundene Realisierung eines Aktorstellweges von ca. $180 \mu\text{m}$ wird verzichtet, so daß eine stabile Aufhängung des Spiegels möglich ist.

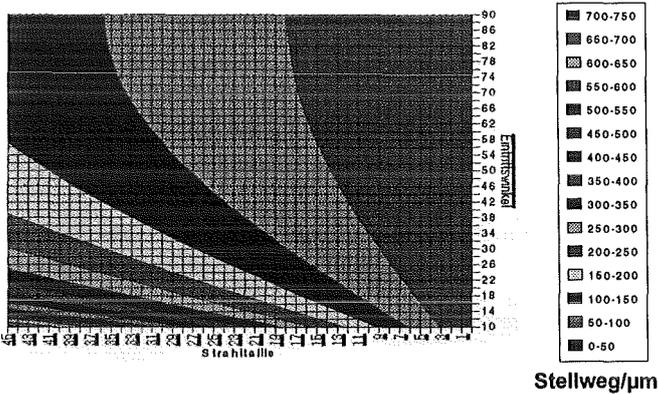


Abbildung 3: Aktorstellweg/ μm als Funktion von Eintrittswinkel und Strahltaille

Abbildung 3 zeigt den Aktorstellweg als Funktion von Eintrittswinkel und Strahltaille. Kleine Strahltaillen und große Einfallswinkel vermindern den Aktorstellweg. Zu kleine Taillen müssen jedoch vermieden werden, da sonst zusätzliche Verluste durch Streuung am Spiegel entstehen, bei dem eine typischen Rauigkeit von 30 nm zu erwarten ist [7]. Zu große Einfallswinkel dagegen erzwingen wegen des streifenden Einfalls einen sehr breiten Spiegel. Als Kompromiß für den Demonstrator wurden ein Eintrittswinkel von 55° und ein Taillenradius von $18 \mu\text{m}$ gewählt. Der benötigte Aktorstellweg beträgt dann nur $60 \mu\text{m}$. Mittelgroße Strahltaillen sind jedoch nur bei großen Kugellinsenabständen zu verwirklichen. Für den Strahlengang der Bypass-Schaltung ist ein Kugellinsenabstand von $4700 \mu\text{m}$ notwendig (Abbildung 4). Die paraxiale Bild- und Gegenstandsweite beträgt $785 \mu\text{m}$. In dieser Anordnung bewirken Aberrationen eine Verschiebung der Bildposition von $37 \mu\text{m}$ und Beugungsverluste am Aktor eine Zusatzdämpfung von 1,3 %. Durch die große Gegenstandsweite im Bereich der Kugellinsen werden die optischen Felder so groß ($w_0 = 120 \mu\text{m}$), daß im Siliziumsubstrat zusätzliche Lichtschächte freigeätzt werden müssen.

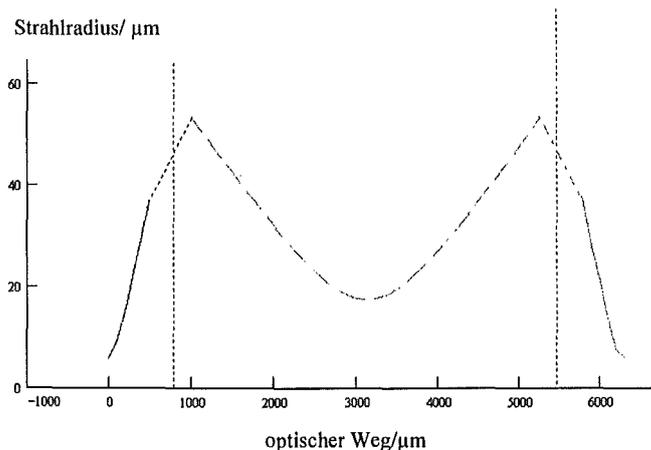


Abbildung 4: Berechneter Feldverlauf (Strahlradius) in der Bypass-Schaltung zwischen zwei Fasern in Abhängigkeit von der Achsposition (Maße in μm). Die vertikalen Linien geben die Position der Hauptebenen der Kugellinsen, die Unstetigkeiten im Strahlverlauf die

Position der Scheitelpunkte an. Bei $z=0$ und $z=6500$ befinden sich die Faserstirnflächen.

H/ μm	L/ μm	S/ μm	φ	D _{start} / μm	D _{end} / μm	V _{schalt} /V	Fk/ N/m
120	120	90 *	4°	10	3	62	11.4

Tabelle 1: Designparameter des elektrostatischen Linearantriebs: LIGA-Höhe H, Kondensatorplattenlänge L, Stellweg S (* begrenzt durch Anschläge), Konuswinkel der Kondensatorplatten φ , Plattenabstände in Start- und Endposition D_{start} und D_{end}, Schaltspannung V_{schalt}, Federkonstante Fk

In Tabelle 1 sind die Designdaten des elektrostatischen Linearantriebs zusammen gefaßt. Für die Kondensatorelemente wurde eine konische Plattenanordnung gewählt (Abbildung 5), weil damit auch ein Teil der Tangentialkräfte für die Bewegung genutzt werden kann. [3]

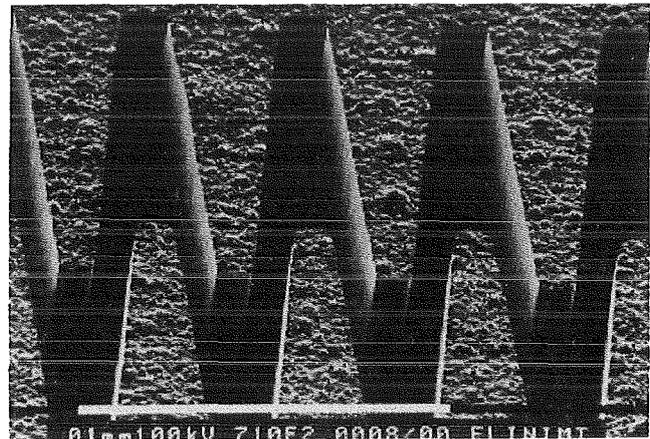


Abbildung 5: Konische Kondensatorelemente beim Linearantrieb

Optimale Verhältnisse der Kräfte in Stellrichtung im Vergleich zur Querrichtung werden durch eine möglichst hohe Anzahl von Kondensatorelementen pro Flächeneinheit erzielt. Die minimale Größe eines Kondensatorelements wird durch Stabilitätskriterien der Prozessierung festgelegt. Das Aktordesign enthält insgesamt 496 parallel geschaltete Einzelkondensatoren, die in einer 8×62 Matrix angeordnet sind. In Abbildung 6 sind Kraft-Weg-Kennlinien für vier verschiedene Betriebsspannungen zwischen 61 V und 67 V für $120 \mu\text{m}$ Strukturhöhe dargestellt. Oberhalb der Schaltspannung von ca. 62 V überwiegen die elektrostatischen Stellkräfte die Federkräfte, so daß die Nettostellkraft für den gesamten Stellweg positiv bleibt. In diesem Fall kann der gesamte Stellweg durchlaufen werden. Querkräfte spielen erst nach einem Stellweg von ca. $95 \mu\text{m}$ eine Rolle. Durch den Entwurf von Anschlängen kann der Einfluß von Querkräften vollständig ausgeschaltet werden.

Beim Aktor sind bei einem realisierten Stellweg von 90 μm und Schaltspannungen von 70 V Federsteifigkeiten von ca. 10 N/m möglich.

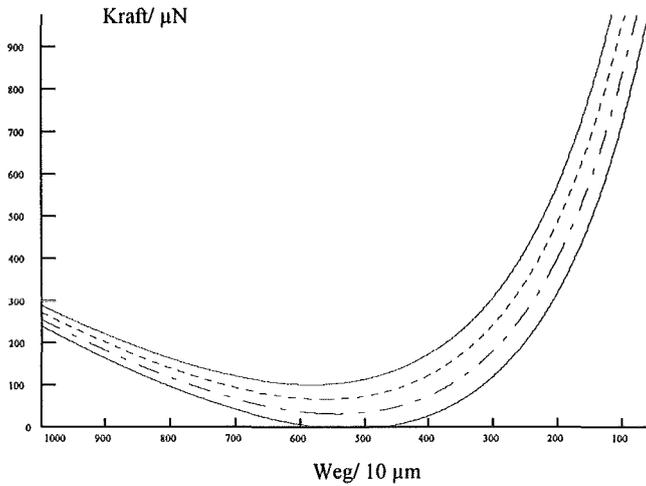


Abbildung 6: Berechnete Kraft-Weg-Kennlinien für Betriebsspannungen von 61V (durchgezogene Linie), 63V (strichpunktierte Linie), 65V (punktierte Linie) und 67V (gestrichelte Linie). Die starke Abnahme der Stellkraft am Ende des Stellweges wird durch elektrostatische Querkräfte verursacht. Der Stellweg des Aktors wurde daher auf den Wegbereich zwischen 100 μm (Startposition) und 10 μm (Endanschlag) begrenzt.

4 Prozessierung

Für die Prozessierung der Optomechanischen Bypass-Schaltung wird ein fünfteiliger Maskensatz bestehend aus vier Chrommasken und einer Röntgenmaske für die Tiefenlithographie benötigt. Da für das zweistufige Silizium-Ätzen ein Nitridmaskenprozeß [8] verwendet wird, ist auf der ersten Chrom-Maske nur das Layout der Lichtschächte zu strukturieren. Die zweite Chrom-Maske dagegen muß das Absorbermuster für die Kugellinsengruben und die Lichtschächte enthalten. Die dritte und die vierte Chrommaske des Designs werden zur Strukturierung der Dünnschichtebenen des Aktors benötigt, also der Leiterbahn- und der Opferschichtebene. Mit der fünften Designebene wird die LIGA-Maske zum Aufbau der mikrooptischen Bank und der Mikromechanik des Aktors definiert. In einem Nutzen können acht Schaltungen strukturiert werden. Der Block der Schaltungen ist um 45° gegen den Hauptflap des Silizium-Wafers gedreht, um die Lichtschächte entsprechend den Kristallebenen des Siliziums auszurichten und damit einfacher strukturieren zu können.

5 Leistungsdaten

Die Aufnahme einer fertig prozessierten Bypass-Schaltung zeigt Abbildung 7. Zur Charakterisierung der

Gesamtschaltung wurden elektromechanische Funktionstests mit dem Aktor, statische optische Messungen zum Bestimmen der Einfügedämpfung und dynamische optische Messungen zum Schaltverhalten durchgeführt.

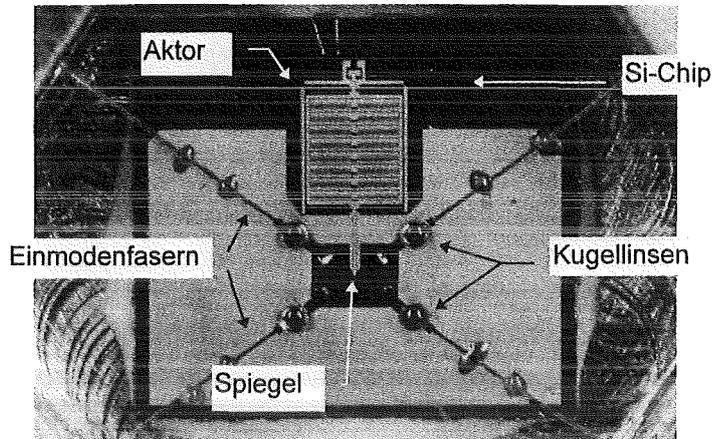


Abbildung 7: Foto einer prozessierten optomechanischen Bypass-Schaltung

5.1 Charakterisierung des Aktors

Wie sich bei der mechanischen Charakterisierung des Aktors herausgestellt hat, war der Maßverlust bei der Prozessierung der Biegefedern besonders groß, so daß sich eine Vorauslenkung des Spiegels um 8 μm und eine Abweichung der dynamischen Eigenschaften vom Design ergibt. Unter Berücksichtigung dieser Eingangsdaten entspricht die gemessene Spannungs-Weg-Kennlinie, die durch ein Mikroskop mit Balkenmeßgerät bestimmt wurde, gut der theoretischen Vorhersage (Abbildung 8).

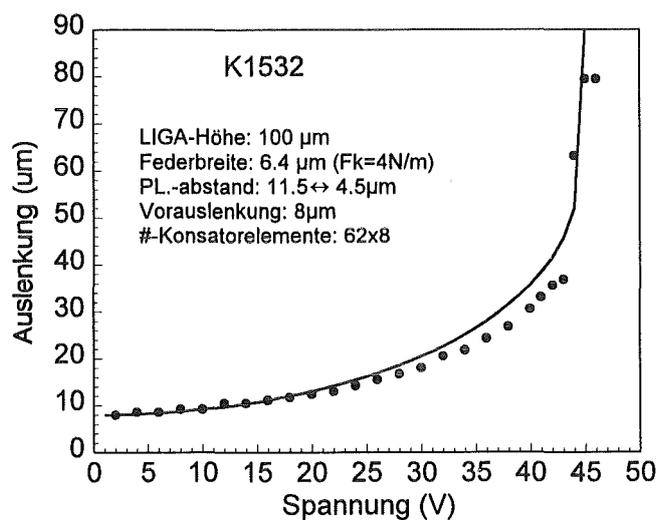


Abbildung 8: Spannungs-Weg-Kennlinie einer Bypass-Schaltung

Bei Anlegen einer Spannung, die kleiner ist als die zum Durchschalten erforderliche Schaltspannung wird der Aktor definiert auf eine feste Position, die kleiner ist als

der maximale Stellweg, gefahren. Bei einer Spannung von 45 V erreicht der Aktor eine Nicht-Gleichgewichts-Position und schaltet den maximalen Stellweg.

5.2 Optische Charakterisierung

Zur optischen Charakterisierung wurden mehrere Bypass-Schaltungen mit Kugellinsen und Fasern bestückt und die Einfügedämpfungen gemessen. Die Meßdaten wurden durch aktive Justierung der Fasern bestimmt. Als Referenz wurde die direkt mit einem optischen Leistungsmeßgerät bestimmte abgestrahlte Leistung der Einkoppelfaser verwendet.

Schaltung	senkrechter Spiegel	Parallelspiegel	ohne Spiegel
1	-4.5	-5.6	-1.6
2	-4.2	-4.8	-1.9
3	-5.5		-1.9
4	-4.9		-1.7
5	-5.9		-1.5
6	-5.1		
Mittelwert	-5.0	-5.2	-1.7
Standardabweichung	0.6	0.4	0.2

Tabelle 2: Einfügedämpfungen verschiedener Bypass-Schaltungen

Die Tabelle 2 zeigt die gemessenen Einfügedämpfungen in Abhängigkeit vom verwendeten Spiegel bei Reflexion bzw. bei Transmission. Die Mittelwerte liegen für den Reflexionsstrahlengang bei ca. 5 dB, im Transmissionsfall bei < 1.7 dB.

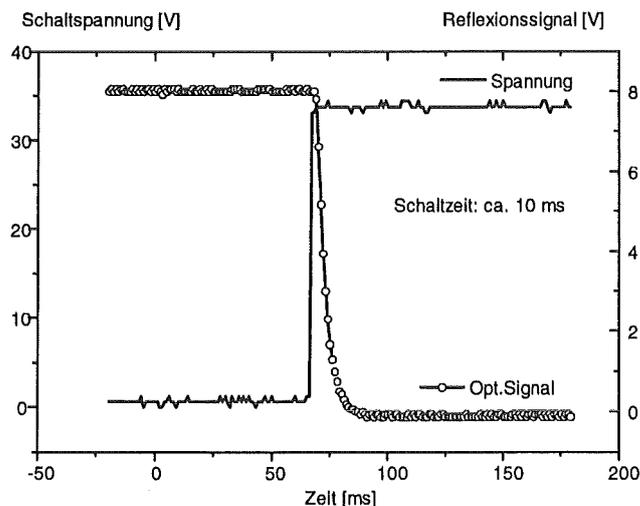


Abbildung 9: Zeitlicher Verlauf eines Schaltvorganges

Die größeren Dämpfungen beim Lichtweg über die Spiegel läßt sich auf die relativ geringe Reflektivität von Nickel (ca. 70 % = -1.5 dB) und hier speziell die Rauigkeit von galvanisiertem Nickel ($R_a=30$ nm, -1.5 dB) zurückführen, die zum Entstehen von Specklen führt. Die Reflektivität kann durch Aufspütern von 100 nm Gold auf ca. 95 % vergrößert werden [7]. Der geringfügige Unterschied zwischen dem parallelen und dem senkrechten Spiegel läßt sich durch den unterschiedlichen Einfallswinkel erklären. Unter Verwendung von entspiegelten Kugellinsen ist für derart optimierte Bypass-Schaltungen eine Einfügedämpfung um 3 dB zu erwarten.

Zur dynamischen Charakterisierung wurden mehrere Schaltungen elektrisch und optisch kontaktiert und der zeitliche Verlauf der Schaltfunktion unter Verwendung einer Photodiode und eines Speicheroszillographens gemessen (Abbildung 9). Die Schaltzeit liegt bei ca. 10 ms, und kann durch Vermindern des Maßverlusts der der Aktorfeder auf 5 ms verkleinert werden.

6 AVT

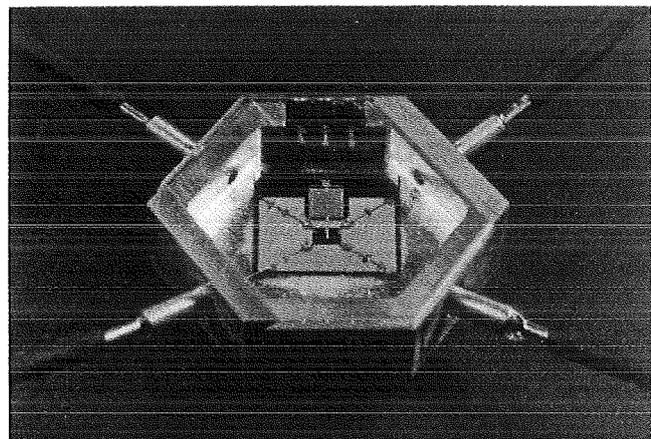


Abbildung 10: Foto einer fertig gebondeten und gehäusten Bypass-Schaltung.

Da die Kondensatormatrix des Aktorelements sehr empfindlich gegen eine Kontamination mit Staubpartikeln ist, wurde für die Bypass-Schaltung ein sechseckiges Laborgehäuse entworfen (Abbildung 10) in das die Chips nach einer Ausrichtung an den Faserdurchführungen eingeklebt werden. Die Fasern werden zur Stabilisierung in Metallröhrchen eingeklebt und sind durch Schrumpfschläuche zusätzlich mechanisch stabilisiert. Die in den Röhrchen konfektionierten Fasern werden in den Faserdurchführungen ebenfalls durch Kleben fixiert. Die Faserdurchführungen haben einen Winkel von 10° zum Gehäuseboden, so daß die Fasern in den Faserführungs Kanälen auf die Substratoberfläche gedrückt und an mehreren Punkten mit den Führungskanälen verklebt werden können (vgl. Abbildung 7). Die Kugellinsen werden mittels einer

Vakuumpinzette auf den Haltestrukturen abgelegt und durch definierten Druck bis zur Berührung mit dem Grubenboden in die Preßpassungen eingedrückt. Anschließend werden die Linsen am Rand mit den Halteelementen verklebt. Zur Kontaktierung der Aktoren ist eine Steckerleiste in eine Aussparung der Gehäusewand eingeklebt. Die Bondpads der Aktoren werden durch Drahtbonden mit dieser Steckerleiste verbunden. Zur Deckelung dient eine polierte Plexiglasplatte, die auch ein Beobachten der Schaltfunktion ermöglicht.

7 Bewertung

Die vorliegenden Ergebnisse haben gezeigt, daß sich mit der Kombination von LIGA-Verfahren und Silizium-Mikromechanik präzise gestufte mikrooptische Bänke für hybride mikrooptische Anwendungen herstellen lassen. In solchen Aufbauten kann ein definierter Verlauf der optischen Achse für passive und aktive mikrooptische Komponenten mit unterschiedlichen Abmessungen mit einer Genauigkeit von $\pm 1 \mu\text{m}$ gewährleistet werden.

Am Beispiel der Bypass-Schaltung wurden die Mikrostrukturierungstechniken LIGA-Verfahren und Silizium-Mikromechanik kombiniert und die Prozeßführung geeignet aufeinander abgestimmt. Der Demonstrator stellt deshalb ein Beispiel für die Kompatibilität dieser beiden Technologien in Hochpräzisionsanwendungen dar.

Die momentan erzielte Einfügedämpfung der Bypass-Schaltung liegt bei 5 dB und kann durch Vergolden des Mikrospiegels (1,5 dB) und Entspiegeln der Kugellinsen (1 dB) auf ca. 3 dB verkleinert werden; die Schaltzeit liegt aufgrund von Maßverlusten an den Biegefedern bei 10 ms und kann bei gleichen Betriebsparametern auf 5 ms verringert werden. Damit stellt die Optomechanische Bypass-Schaltung aufgrund ihrer Kenndaten eine Alternative zu thermooptischen Schaltern dar [9].

Danksagungen:

Die Autoren danken Thilo von Freyhold und Michael Weidig für die Charakterisierung der Schaltungen und Vorarbeiten bei der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie Franz-Josef Pantenburg für die Optimierung der Bestrahlungsbedingungen. Das Verbundprojekt wurde durch das BMBF finanziell unterstützt.

Literatur:

- [1] Robert Bosch GmbH: Abschlußbericht BMBF-Verbundprojekt AVT-KEO
- [2] M. Dautartas et al.: A Silicon-Based Moving-Mirror Optical Switch, *J. Lightwave Tech.*, Bd. 10 (1992), S. 1078
- [3] J. Mohr et al.: Micro Optical Switching by Electrostatic Linear Actuators with large Displacements, *Proc. Transducers '93, Yokohama 1993*
- [4] J. Mohr et al.: Mikrooptische Bypass-Schaltung für die Kommunikationstechnik, *FZK-Nachrichten 1/95*, S. 40-46
- [5] C. Burbaum: Herstellung von mikromechanischen Beschleunigungssensoren in LIGA-Technik, *Dissertation, Universität Karlsruhe 1991*
- [6] J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics*, San Francisco 1968, S. 86
- [7] U. Erhard: Untersuchungen zum Reflexionsvermögen von metallischen und metalisierten LIGA-Mikrostrukturen, *Diplomarbeit Universität Karlsruhe 1993*
- [8] Robert Bosch GmbH: 3. Zwischenbericht BMFT-Verbundprojekt AVT-KEO, Januar 1994
- [9] Horsthuis et al.: Packaged Polymeric 1x8 Digital Optical Switches, *Proc. ECOC 95*, Bd. 4, S. 1059

Optochemisches Mikroanalyse-System für die Umweltüberwachung

J. Mohr¹⁾, W. Bier¹⁾, B. Büstgens¹⁾, O. Fromhein²⁾, T. Kühner²⁾, C. Müller¹⁾, D. Radloff³⁾, R. Reichert³⁾, M. Stepputat¹⁾,
W.K. Schomburg¹⁾, S. Schoof³⁾

¹⁾Institut für Mikrostrukturtechnik

²⁾Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik

³⁾Institut für Radiochemie

Zusammenfassung

Für die Analyse von Schwermetallen in Flüssigkeiten wurde in hybrider Aufbauweise ein Mikroanalyse-System realisiert. Dieses System besteht aus einem Fluid-handling System, einer Mikroküvette mit optochemischen Sensoren und einem Mikrospektrometersystem zur Detektion der Transmissionsänderung der Sensoren. Dabei werden die Subkomponenten auf einfache Weise in Batch-Verfahren realisiert. Das Fluid-handling System wurde so aufgebaut, daß die Gefahr der Verschmutzung der Mikrokomponenten minimal ist und somit auch die Messung von verschmutzten Flüssigkeiten möglich ist. Die Untersuchungen zeigten, daß das System die gestellten Meßaufgaben zufriedenstellend lösen kann. Dies wurde mit der Messung eines Gemisches aus Quecksilber und Cadmium demonstriert. Insbesondere die Subkomponenten des Systems haben über den Einsatz im System weitere Anwendungsmöglichkeiten gefunden und werden derzeit industriellen Applikationen zugeführt. Sowohl Mikrospektrometer als auch Mikropumpe werden derzeit in Stückzahlen von 100 Stück pro Monat gefertigt und mit Industriepartnern im Markt plaziert.

1. Einleitung

Im Rahmen der Aktivitäten zur Mikrosystemtechnik stellt die Entwicklung von Mikroanalyse-Systemen zur Detektion von Umweltschadstoffen einen Schwerpunkt dar [1]. Dies liegt daran, daß die Überwachung von Schadstoffen in Luft und Wasser immer wichtiger wird, um die größer werdende Gefahr der Belastung von Luft und Wasser frühzeitig zu erkennen und entsprechende Gegenmaßnahmen ergreifen zu können.

Im Forschungszentrum Karlsruhe wird innerhalb des Projektes Mikrosystemtechnik in einer interdisziplinären Zusammenarbeit verschiedener Institute ein Mikrosystem zur optischen Analyse von Schadstoffen in Gewässern als Demonstrator entwickelt. Dieses System beruht auf dem Konzept des modularen Aufbaus verschiedener Funktionsmodule und besteht aus einem Fluid-handling System, einer Mikroküvette mit optochemischen Sensoren und einem Mikrospektrometer zur Detektion von Transmissionsänderungen der optochemischen Sensoren. Es verbindet somit chemische Mikrosensoren, Mikrofluidelemente, mikrooptische Funktionsmodule und Mikroelektronik.

Durch den modularen Aufbau ergibt sich eine eindeutige fluidische Schnittstelle zwischen Fluid-handling System und Meßküvette, die als Wegwerfteil ausgelegt ist. Außerdem weist das System eine eindeutige optische Schnittstelle zwischen Küvette und Spektrometersystem sowie eine elektrische Schnittstelle zwischen Spektrometersystem und Mikrorechner auf. Dies erlaubt einen variablen Aufbau, der auf verschiedene Anwendungen angepaßt werden kann.

Im vorliegenden Artikel wird der Aufbau und die Funktionsweise des Systems beschrieben. Die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems wird am Beispiel der Detektion von Quecksilber und Cadmium in Flüssigkeiten demonstriert

2. Gesamtaufbau und Funktionsweise des Mikrosystems

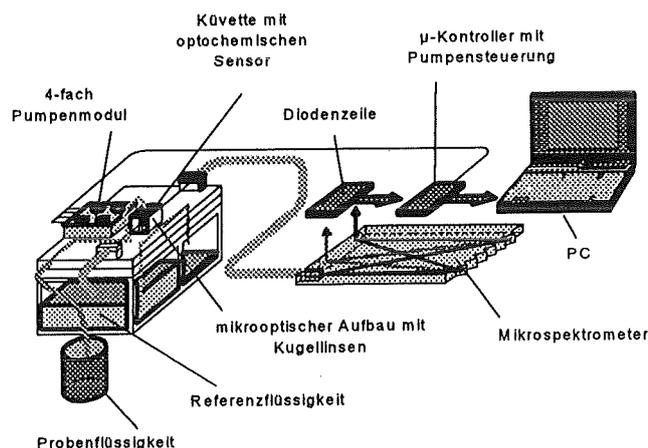


Abb.1: Prinzipieller Aufbau des Mikroanalyse-Systems zur Detektion von Schadstoffen in Flüssigkeiten. Das System besteht aus einem Fluid-handling System, einer Mikroküvette mit optochemischen Sensoren und einem Mikrospektrometer

Abb. 1 zeigt schematisch den Aufbau des Mikrosystems. Mit Hilfe des als Stapelaufbau ausgelegten Fluidsystems (Abb. 2), das aus Vorats- und Abfallbehäl-

tern, einem Vierer-Pumpenmodul und Kanalplatten besteht, wird die zu analysierende Substanz bzw. eine Referenzflüssigkeit einer Mikroküvette zugeführt, die in den Fluidaufbau eingesteckt wird. Vorratsbehälter, Kanalplatten, Mikroküvette und Pumpen werden im Batch durch Abformung sowie Aufbau- und Verbindungstechnik hergestellt. Der Aufbau des Fluidsystems als Stapel ist einerseits relativ kompakt, erlaubt andererseits eine variable Zusammenstellung des Aufbaus, was eine allgemeine Anwendungsmöglichkeit des Fluidsystems sicherstellt. Bei entsprechender Normung der Komponenten können bei Bedarf auch Elemente, die mit anderen Mikrostrukturierungsverfahren hergestellt wurden, eingebracht werden.

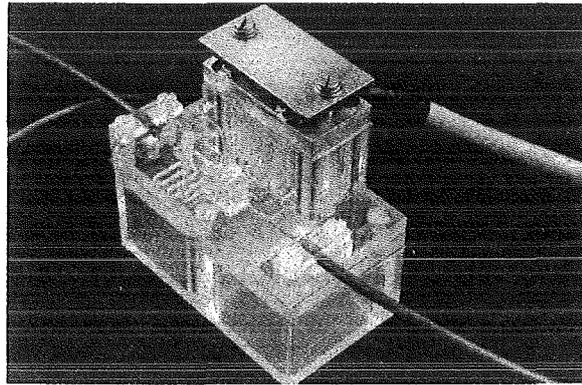


Abb.3 : Abbildung des Fluid-handling Systems.

Abb. 3 zeigt eine Aufnahme des Fluidmoduls. Das System ist so ausgelegt, daß es ohne Ventile auskommt. Zusammen mit der Tatsache, daß die am Forschungszentrum Karlsruhe hergestellten Mikropumpen in der Lage sind Gas zu pumpen und damit als Saug- oder Druckpumpe im Fluidsystem eingesetzt werden können, ergibt sich daraus der entscheidende Vorteil daß keine empfindlichen Mikroteile mit Fluid befüllt werden müssen. Dadurch vermindert sich die Gefahr der Verschmutzung der Teile und die Betriebssicherheit des Systems wird größer.

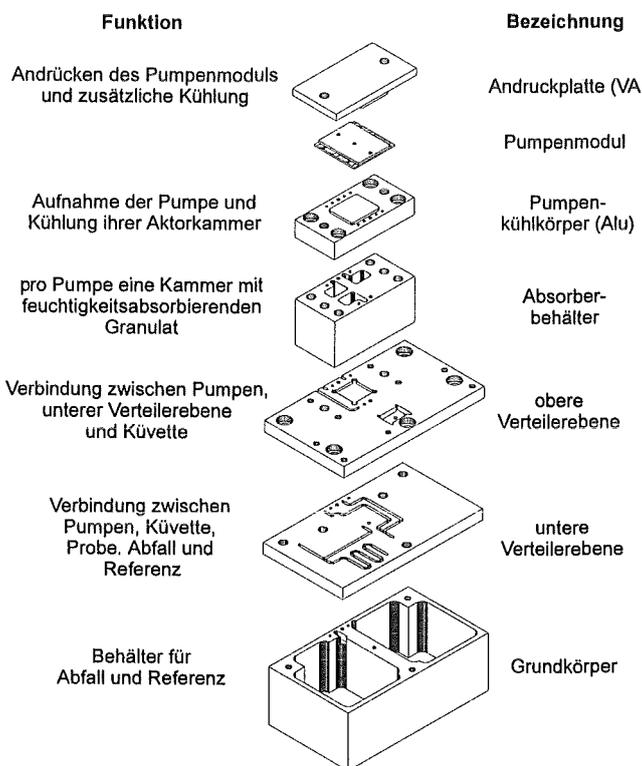


Abb.2: Aufbau des Fluid-handling Systems als kompakter Stapel

Die Küvette enthält die optochemischen Sensoren und ist in eine mikrooptische Aufbauplatte eingesetzt, so daß nur das Küvettenteil und nicht der optische Teil ausgewechselt werden muß. Zur Messung von Transmissionsänderungen der Sensoren wird die Küvette mit Licht, das von einer Multimodefaser abgestrahlt wird, durchstrahlt. Um die Verluste klein zu halten, wird die Faserstirnfläche über Kugellinsen auf die Stirnfläche der Detektionsfaser abgebildet. Über diese wird das Licht dem Spektrometer zugeführt, wo es spektral zerlegt wird. Die spektrale Intensitätsverteilung wird mit einer Diodenzeile detektiert. Das Signal wird in einem Mikrokontroller vorausgewertet und über eine intelligente Schnittstelle einem übergeordneten Rechner zugeführt. Dort erfolgt über entsprechende Auswerteprogramme eine Analyse des Signals, um den Gehalt der einzelnen Elemente festzustellen.

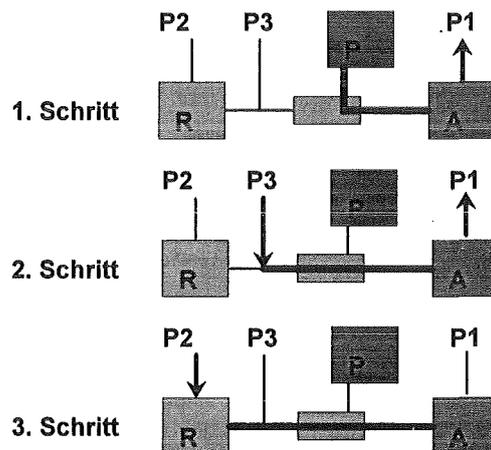


Abb.4 : Fließvorgänge bei den verschiedenen Schritten des Meßzyklus (A= Abfall, B= Probe, R= Referenz, P1,P2;P3 = Pumpen)

Die verschiedenen Flüssigkeiten werden über ein Luftpolster über die Küvette gepumpt, wobei je nach Medium verschiedene Pumpen in Betrieb sind (Abb. 4). In einem Meßvorgang wird im ersten Schritt zunächst die Probe über den Sensor gesaugt, indem im Abfallbehälter ein Unterdruck erzeugt wird. Aus diesem Grunde muß der Abfallbehälter dicht verschlossen sein. Er kann bei Bedarf über eine Ablassschraube entleert werden. Der zweite Schritt hat die Belüftung der Küvette zur Aufgabe, um ein Vermischen der beiden Flüssigkeiten zu verhindern. Dabei wird mit Pumpe 3 Luft in das Kanalsystem gepumpt, während Pumpe 1 weiter ansaugt. Der Prozessschritt läuft solange, bis alle Flüssigkeit in den Abfallbehälter verdrängt wurde. Im dritten Schritt wird der Sensor zurückgesetzt, indem durch Pumpe 2 Referenz- und Spülflüssigkeit aus dem

Vorratsbehälter in die Küvette gedrückt wird. Damit die Referenzflüssigkeit nicht in die Probe gedrückt wird, ist das Kanalsystem zwischen Küvette und Pumpe 3 mäanderförmig ausgelegt. Mit diesem dritten Schritt ist ein Meßablauf abgeschlossen und der Vorgang kann wieder neu beginnen.

Zum Kalibrieren des Sensors wird vor einer Meßkampagne eine Kalibrierlösung in gleicher Weise über den Probeneingang über den Sensor gepumpt.

Die mit diesem Fluidaufbau durchgeführten Untersuchungen zeigten, daß bei optimierter Auslegung der Fluidkanäle und bei Vermeidung von Leckagestellen am Fluidaufbau ein zuverlässiger Ablauf des Meßzyklus erreicht wird, obwohl die Pumpen aufgrund zwangsläufiger Undichtigkeiten in Pumprichtung die aufgebauten Über- bzw. Unterdrücke auf längere Zeit nicht halten können.

Die Ablaufsteuerung des Pumpvorgangs erfolgt über ein Programm, das in einem μ -Kontroller abgelegt ist. Im Falle des Schadstoffanalysators wird hierzu der μ -Kontroller eingesetzt, der im Spektrometersystem für die Datenvorauswertung und die Ansteuerung der Diodenzeile verantwortlich ist.

3. Die einzelnen Komponenten des Analyse systems

3.1 optochemische Sensoren

Die optochemischen Sensoren beruhen auf einer photometrischen Nachweisreaktion, die in einer Polymerschicht immobilisiert ist. Zum Nachweis selbst werden Porphyrine verwendet, die mit zweiwertigen Metallen und Übergangsmetallen Komplexe ausbilden. Diese Komplexe zeigen deutlich unterscheidbare Absorptionsbanden im UV/VIS-Bereich [2,3]. Dadurch ist es möglich, mit einem Porphyrinderivat, d.h. mit einem Sensorelement mehrere Metalle simultan zu detektieren, indem das gesamte Spektrum zur Auswertung herangezogen wird und die in der Probe enthaltenen Komponenten durch Entfaltung des Spektrums separiert werden.

Da die zur Schwermetall-Detektion verwendete Farbstoffklasse, die Porphyrine, sehr große Komplexbildungskonstanten aufweisen, erhält man einen sensitiven Nachweis, d.h. schon bei sehr geringen Schwermetallkonzentrationen werden die Analytionen in der Probelösung effizient komplexiert und deutliche Absorptionsänderungen erhalten. Zudem zeichnet sich diese Farbstoffklasse durch extrem große molare Extinktionskoeffizienten aus ($\epsilon > 10^5 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), so daß die optische Detektion sehr empfindlich erfolgen kann, d.h. auch bei Schichtdicken von nur einigen wenigen μm , die für eine schnelle Eindiffusion der Schwermetalle in die Sensorschicht erforderlich sind, zeigen die in der Schicht enthaltenen Porpyrinfarbstoffe eine genügende Grundabsorption.

Der entwickelte Sensor besteht aus einem monofunktionalisierten Porphyrinderivat (Aminotetraphenylsulfonato-Porphyrin, ATPPS), das kovalent an PolyHEMA, ein hydrophiles Polymer (Hydrogel) gebunden ist. Eine kovalente Anbindung erwies sich als unabdingbar, um auch bei längerem Betrieb des Sensors eine stabile Funktion zu gewährleisten. Sind hingegen die Porphyrine nicht kovalent immobilisiert, so werden sie innerhalb weniger Stunden aus dem Polymergel ausgewaschen. Demgegenüber zeigten Sensoren, die nach kovalenter Anbindung erhalten wurden, eine Stabilität von mehreren Wochen [3].

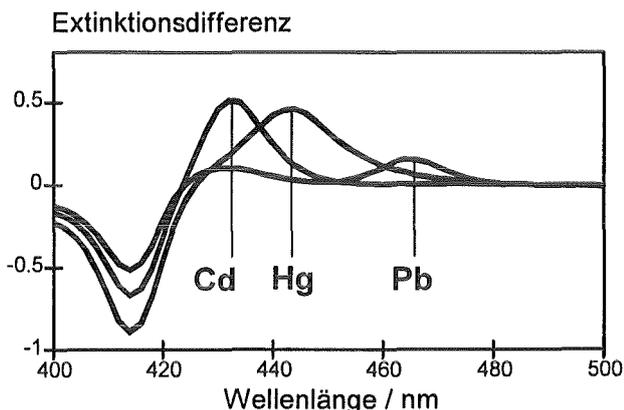


Abb. 5 Differenzspektren des optochemischen Schwermetallsensors bei Besprohung mit Quecksilber, Cadmium bzw. Blei. Deutlich zu erkennen sind die spektralen Unterschiede ($\lambda_{\text{max}}(\text{Cd})$ 433 nm, $\lambda_{\text{max}}(\text{Hg})$ 444 nm, $\lambda_{\text{max}}(\text{Pb})$ 465 nm). Schichtdicke ca. 3 μm , c_{Metal} je 10 ppm, Spektrenaufnahme nach 10 min.

In Abb. 5 sind die Differenzspektren dieses Sensors dargestellt, wie sie bei Beprobung mit Quecksilber, Cadmium bzw. Blei erhalten werden. Da sich die Absorptionsbanden teilweise überlappen, wird das Sensorsignal nicht an einzelnen Wellenlängen abgegriffen, sondern das gesamte Spektrum zur Auswertung verwendet. Dies wird mit einer chemometrischen Routine, dem sog. partial least square (PLS-) Verfahren ausgeführt.

Zur quantitativen Bestimmung von Gemischen werden zunächst die im entsprechenden Konzentrationsbereich erhaltenen Spektren sowohl für die Einzelkomponenten als auch für Mischungen aufgenommen, mittels des PLS-Verfahrens ein Eichmodell erstellt und dieses im Rechner abgelegt. Die Analyse einer aktuell vorliegenden Probe erfolgt dann interaktiv, d.h. die PLS-Auswertung ist in die Software des Systems eingebunden und gibt während der Messung eine „Vorhersage“ bzw. am Ende der Messung die berechneten Konzentrationswerte aus. Derzeit bearbeitet werden weitere Optimierungen zur Ansprechzeit und Nachweisstärke des Sensors im System (Bestimmung von Konzentrationen im ppb-Bereich) durch Optimierung des Dotierungsgrades der

Polymermatrix und deren Schichtdicke sowie der Fluidik (Anströmung des Sensors).

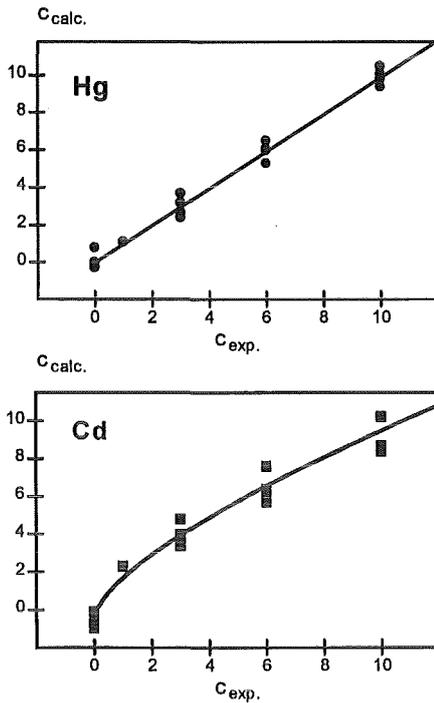


Abb. 6: Bestimmung von Quecksilber und Cadmium in binären Gemischen im Konzentrationsbereich 0 - 10 ppm. Zur Erstellung des Eichmodells mit dem PLS-Verfahren wurden 17 Proben (Messungen) verwendet. Die Korrelation vorgelegte vs. berechnete Konzentrationswerte (c_{exp}/c_{calc}) ist als gut zu bezeichnen. Die Gründe des nichtlinearen Verhaltens der Cadmiumbestimmung werden derzeit untersucht.

3.2 Mikroküvette

Die Mikroküvette ist als Wegwerfteil ausgelegt und muß sich leicht in den optischen und fluidischen Aufbau einpassen lassen. Sie muß transparent sein und auf einer mit Licht beaufschlagten Fläche das Sensormaterial tragen, das einfach auf die Küvette aufgebracht werden sollte. Außerdem dürfen im Innern der Küvette keine Ecken auftreten, da ansonsten Luftblasen entstehen, die das Meßergebnis verfälschen.

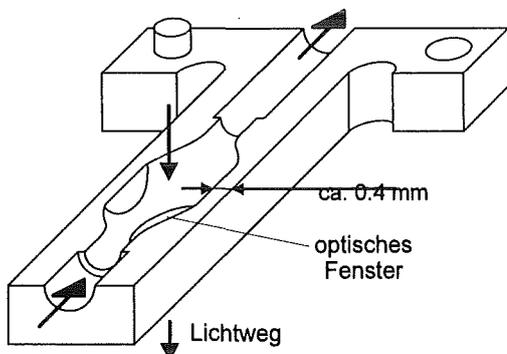


Abb. 7: Prinzipielle Gestalt der Mikroküvette

Abb. 7 zeigt die prinzipielle Gestalt einer Küvettenhälfte, wie sie durch Abformung im Batch hergestellt werden. In die Vertiefung in der Mitte wird das Sen-

sormaterial eingetropf und ausgedampft, bevor die beiden Küvettenhälften verklebt werden. Das gesamte Volumen der Küvette beträgt 8 µl, was zu einem sehr kleinen Probenvolumen bei der Messung führt.

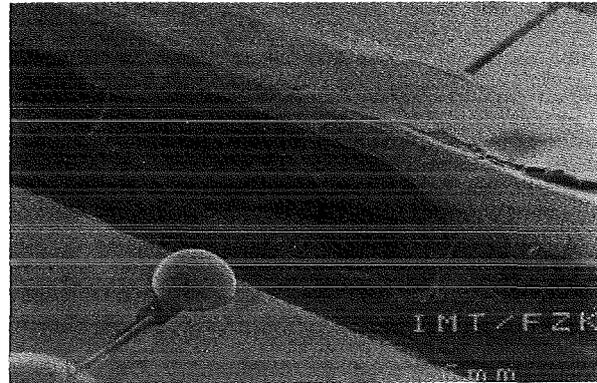


Abb. 8: Optischen Bank mit Mikroküvette. Durch die Abbildung der Faserstirnflächen mit Kugellinsen wird die Küvette mit kollimiertem Licht durchstrahlt.

Die Küvette wird nach dem Verkleben in den optischen Aufbau eingesteckt. Die zweite Verbindung zum Fluidsystem erfolgt über eine Schlauchverbindung. Abb. 8 zeigt eine Küvettenhälfte im optischen Aufbau. Die optische Aufbauplatte wird durch Abformtechnik hergestellt. Dabei werden Grabenstrukturen für Multimodefasern und Kugellinsen strukturiert. Mit Hilfe der Kugellinsen wird ein kollimierter Strahl durch die Küvette erzeugt und sichergestellt, daß bis zu 85 % Prozent des von der Beleuchtungsfaser abgestrahlten Lichtes in die Detektionsfaser übertragen wird. Durch das Steckprinzip kann die Küvette leicht ausgewechselt werden, während der aufwendigere optische Aufbau Bestandteil des Fluidsystems ist.

3.3 Mikropumpen

Für die Förderung der Fluide ohne Ventile werden insgesamt 3 Pumpen benötigt. Um den Ausfall einer Pumpe im System verkraften zu können wird im Fluidhandlungssystem ein Modul von 4 Pumpen eingesetzt (Abb. 9) [5]. Die Viereranordnung hat eine Größe von ca. 3 cm x 3 cm .

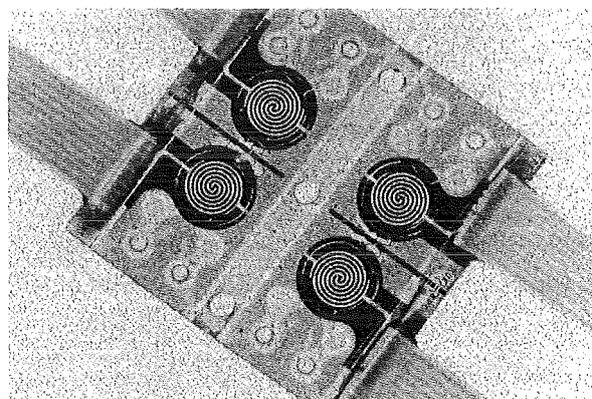


Abb. 9: Vierer-Pumpenmodul zum Einsatz im Fluid-handling System des Analysesystems

Die Pumpen werden durch Abformtechnik und Aufbau- und Verbindungstechnik im Batch hergestellt. Sie arbeiten nach dem thermopneumatischen Prinzip mit einer Frequenz bis zu 50 Hz. Derzeit kann für die Pumpen eine Förderrate von 150 $\mu\text{l}/\text{min}$ bei einer Pumpfrequenz von 20 Hz garantiert werden. Einzelne Pumpen aus der Serienfertigung erreichen Förderraten bis 270 μl . Die erreichbare Druckdifferenz liegt zwischen 70 hPa und 150 hPa. Die Standzeit bei Dauerbetrieb unter Maximallast beträgt 5 bis 6 Tage, was bei üblichem Einsatz des Gesamtsystems eine Einsatzdauer von bis zu 100 Tagen erwarten läßt. Möglichkeiten zur Verbesserung dieser Werte sind erkannt und werden derzeit umgesetzt.

3.4 Mikrospektrometer

Das für die Detektion der Transmissionsänderung des Lichtsignals verwendete Mikrospektrometer ist in Abb. 10 dargestellt [6,7,8]. Es besitzt etwa die Größe einer Zigarettenschachtel und enthält einen nach dem LIGA-Verfahren hergestellten Spektrometerbaustein, der auf einer Diodenzeile aufgebracht wird, über die das spektral zerlegte Licht aufgenommen wird. Die Auswerteschaltung ist in SMD-Technik realisiert und enthält einen μ -Kontroller über den die Ansteuerung der Diodenzeile erfolgt, die Anzahl der aufzunehmenden Spektren definiert wird und auch die Pumpen des Fluidsystems angesteuert werden können.

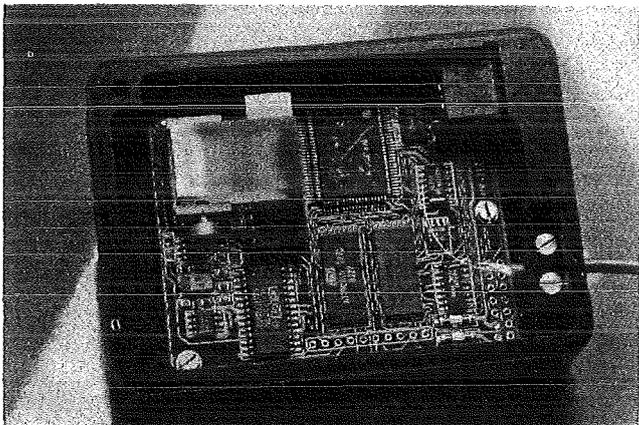


Abb. 10: Mikrospektrometersystem zum Einsatz im Analysesystem

Das Spektrometer arbeitet im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 750 nm mit einer Transmission von 7 % (380 nm) bis 15 % (600 nm). Es besitzt eine Auflösung (Rayleigh-Kriterium) von 6 nm. Die Dynamik liegt zwischen 10.000 und 20.000. Die Streulichtdämpfung beträgt ca. 4 dB für den Fall, daß ein Kantenfilter bei 490 nm eingesetzt wird, das alles Licht oberhalb dieser Wellenlänge durchläßt. Gemessen wird bei 475 nm. Für die Verbesserung der Streulichtdämpfung werden entsprechende Ansätze derzeit umgesetzt.

4. Ergebnisse am Gesamtaufbau

Abb. 11 zeigt exemplarisch einen Messablauf, wie er bei einer dreifachen Beprobung mit einer Komponente

(Quecksilber, jeweils 2 ppm), erhalten wurde. Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der für Quecksilber spezifischen Extinktionsdifferenz $E_{444\text{ nm}} - E_{412\text{ nm}}$.

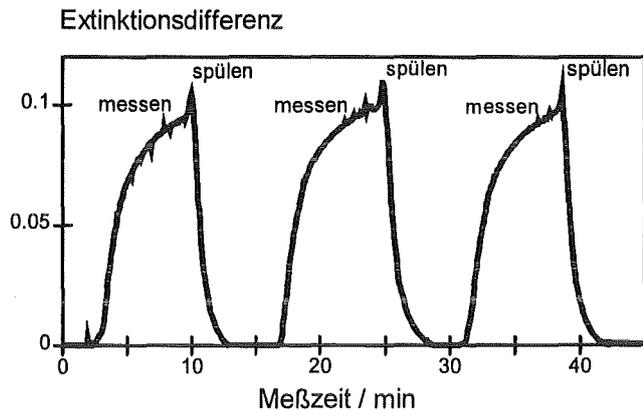


Abb. 11: Messkurve bei Quecksilberbeprobung

Aus den spektralen Daten des Sensors und der Auflösung des Spektrometers kann die Empfindlichkeit der Schwermetallbestimmung bei Einzelkomponenten auf etwa 10 ppb abgeschätzt werden. Die bisherigen Analysen bei Gemischen zeigten allerdings deutlich höhere Nachweisgrenzen (ca. 0,5 ppm), was durch Instabilitäten der verschiedenen Systemkomponenten (Sensor, Fluidik, Lichtquelle) während der Aufnahme des Eichdatensatzes erklärt werden kann. Die zur weiteren Steigerung der Nachweisstärke des Gesamtsystems notwendige Optimierung ist möglich und wird derzeit verfolgt.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Wie die bisherigen Tests ergaben, ist das System in der Lage, verschiedene Metall-Porphyrinkomplexe spektral zu differenzieren und damit Quecksilber und Cadmium simultan in einer Probe zu erfassen. Dies ist auch bei sehr geringen spektrale Änderungen möglich, da die Basislinie des Spektrometers über den gesamten Messbereich ein Rauschen von $\leq 10^{-3}$ Extinktionseinheiten aufweist. Außerdem konnte gezeigt werden, daß gerade der ventillöse Aufbau des Fluid-handling Systems weniger anfällig bzgl. Partikel in der zu messenden Flüssigkeit ist, eine Voraussetzung, um das System auch unter Feldbedingungen einsetzen zu können.

Trotzdem sind europäische Industriefirmen bisher noch zurückhaltend was die Anwendung des Systems betrifft. Dies hängt sicherlich auch damit zusammen, daß mit dem System doch ein großer Schritt getan wird im Vergleich zu heute eingesetzten Meßgeräten.

Im Gegensatz dazu sind die Komponenten "Mikropumpe" und "Mikrospektrometer" auf bestem Weg in industrielle Applikationen. Beide Teile werden vom Forschungszentrum in einer Kleinserie gefertigt. Derzeit werden von der Mikropumpe und dem Mikrospektrometer monatlich etwa 100 Stück hergestellt. Dies geschieht in Zusammenarbeit mit der

Industrie, die einen sich ausweitenden Markt für diese Komponenten erschlossen hat bzw. erschließt.

Dies zeigt, daß mikrotechnische Komponenten und einfache Systeme inzwischen industrielle Relevanz besitzen und somit auch den Weg in die Industrie finden.

Literatur

- [1] siehe z.B. Verbundprojekt "Vorprojekt Integriertes Mikroanalyzesystem" oder Verbundprojekt "Mikrosystemtechnik in der Biosensorik" im Rahmen des BMBF Förderungsschwerpunkts Mikrosystemtechnik
- [2] R. Czolk, J. Reichert, H.J. Ache: An optical sensor for the detection of heavy metal ions; *Sensors and Actuators B*, 7, 540-543 (1992)
- [3] A. Morales-Bahnik, R. Czolk, J. Reichert, H.J. Ache: An optochemical sensor for Cd(II) and Hg(II) based on a porphyrin immobilized on Nafion membranes, *Sensors and Actuators B*, 13, 424-426 (1993)
- [4] D. Simon, C. Matern, M. Plaschke, D. Radloff, J. Reichert, H.J. Ache: Enhancement of the stability of optochemical heavy metal sensors by covalent binding of a monofunctionalized porphyrine into polymeric films, in Vorbereitung
- [5] W.K. Schomburg, W. Bacher, W. Bier, B. Büstgens, J. Fahrenberg, C. Goll, D. Maas, W. Menz, D. Seidel: Fabrication of Microfluidic Devices by Thermoplastic Molding and Diaphragm Transfer, *Proceedings des Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition in San Francisco* (13.-17.11.1995)
- [6] C. Müller, O. Fromhein, J. Göttert, T. Kühner, J. Mohr: Microspectrometersystem Based on Integrated Optic Components in Polymers as Spectral Detection System for the VIS- and NIR Range, *Proceedings 7th Eur. Conf. on Integrated Optics (ECIO '95)*, April 3-6, 1995, Delft (Netherlands), 491-494
- [7] C. Müller, J. Mohr: A Microspectrometer Fabricated by the LIGA Process, *Interdisciplinary Science Reviews*, 18(3) (1993), 273-279
- [8] C. Müller, P. Krippner, T. Kühner, J. Mohr: Leistungsfähigkeit und Anwendungsgebiete von UV-VIS und IR-LIGA-Mikrospektrometern, *dieser Tagungsband*

Gasanalytik mit akustischen Oberflächenwellen

M. Rapp¹, M. Balzer², B. Böß¹, W. Coerd¹, O. Fromhein², T. Kühner², S. Stier¹, A. Voigt¹

¹Institut für Radiochemie (IRCh)

²Hauptabteilung für Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (HPE)

Zusammenfassung

Ausgehend von einem Array chemischer Mikrosensoren, die eine sensitive und spezifische Erfassung diverser organischer Gase gestatten, wurde ein automatisch arbeitendes, sich selbst kalibrierendes analytisches Mikrosystem realisiert. Als chemische Mikrosensoren werden sogenannte Surface-Acoustic-Wave-(SAW-) Bauelemente eingesetzt, die mit einer chemisch sensitiven Beschichtung versehen werden. Durch Variation der aufgetragenen Beschichtungen lassen sich die SAW-Sensoren an vorgegebene Meßaufgaben adaptieren. Um eine sowohl qualitative als auch quantitative Analyse von Gasgemischen durchführen zu können, ist es notwendig mehrere SAW-Sensoren mit unterschiedlicher Sensitivität für verschiedene Gaskomponenten zu einem Array zu kombinieren.

Im IRCh wurde ein vollautomatisch arbeitendes analytisches Mikrosystem zur Analyse von organischen Gasen entwickelt das als Kernstück ein Array aus acht unterschiedlich beschichteten SAW-Sensoren mit einem gemeinsamen Referenzsensor enthält. Neben einer automatisch arbeitenden Gasfluidik zu Beprobung enthält das System ein kompaktes mikroelektronisches Modul in Dickfilmtechnik. Von HPE entwickelt, dient es zur Aufbereitung und Erfassung der Sensorsignale (8-fache Frequenzzählung) und enthält einen programmierbaren ASIC-Baustein (FPGA) sowie eine serielle Schnittstelle zur externen Datenübertragung. Eine sowohl qualitative als auch quantitative Analyse von Gasgemischen wird mithilfe chemometrischer Methoden (PLS-Algorithmus) oder mit modernen Mustererkennungsverfahren (neuronalen Netze) durchgeführt.

1. Einleitung

Die chemische Überwachung der Umwelt und von Produktionsabläufen gewinnt in unserer hochtechnisierten Welt immer mehr an Bedeutung. Dies gilt insbesondere für die Messung von gasförmigen organischen Stoffen, die meist aus der flüssigen Phase durch Verdunsten in die Umwelt gelangen bzw. durch Verdampfen in Produktionsprozessen auftauchen. Für solche Aufgaben liefern die bisher etablierten Analysemethoden zwar hinreichend gute Nachweisgrenzen und Selektivitäten, sind jedoch oftmals mit einem zu hohen apparativen, zeit- und kostenintensiven Aufwand verbunden. Einen Ausweg stellen chemische Mikrosensoren bzw. -systeme dar, die als miniaturisierte Bauteile eine permanente Online-Analyse gewährleisten und sich kostengünstig produzieren lassen. Jedoch gerade für die Detektion organischer Gase war bislang noch kein wesentlicher Durchbruch zu vermelden; man ist immer noch auf klassische Analyseverfahren angewiesen, wie die Gaschromatographie, ein langsames, aufwendiges und diskontinuierliches Meßverfahren.

Ein Weg, die ganze stoffliche Vielfalt von organischen Gasen mit einem einzigen Sensortyp abzudecken, ist die Nutzung des gravimetrischen Sensorprinzips. Hier wird die bei der Anlagerung eines Analyten entstehende Massezunahme (träge Masse!) einer Sensorbeschichtung gemessen. Eine bereits länger bekannte

Form dieses Sensortyps ist der Schwingquarz [1], der bei vielen Vakuum-Beschichtungstechniken Anwendung findet. Chemosensoren mithilfe von Schwingquarzen zu realisieren scheiterten bislang an einer zu geringen Nachweisgrenze. Der Grund hierfür lag in der zu kleinen Resonanzfrequenz dieser Quarze.

Eine weitere massensensitiver Sensortyp ergibt sich aus der Verwendung akustischer Oberflächenwellen (Surface Acoustic Wave = SAW). Ausgangspunkt dieser Technik sind Bauelemente, die diesen Wellentyp nutzen, um für elektronische Anwendungen Frequenzen zu selektieren. SAW-Bauelemente können bis zu sehr hohen Frequenzen (10 GHz) arbeiten. Mittlerweile hat die SAW-Technik ein immer größeres Anwendungsspektrum in der signalverarbeitenden Elektronik gefunden. Überall dort, wo auf kleinstem Raum zum Zwecke der drahtlosen Kommunikation Frequenzen gefiltert, Oszillatoren stabilisiert oder Signalmuster kodiert werden müssen, sind diese Bauelemente nicht mehr wegzudenken, weshalb sie zu einem Massenprodukt der industriellen Mikrochipfertigung avanciert sind. Entsprechend dem typischen Preisverfall solcher Produkte sind die Preise auch bei qualitativ hochwertigen Bauteilen sehr niedrig und bewegen sich bei etwa 4 DM/Stück.

2. Chemische Sensorik mit SAW-Bauelementen

In modifizierter Form können SAW-Bauelemente zur hochsensitiven Detektion von Gasen verwendet werden [2]. Abb.1 zeigt das grundlegende Meßprinzip, den sogenannten "Dual Delay Line Oscillator", welcher in dieser Form seit längerem bekannt ist [3]. Zwei SAW-Bauelemente dienen jeweils als frequenzbestimmendes Element einer Oszillatorschaltung. Ein Bauelement wird mit einer selektiven Sorptionsschicht versehen und stellt das eigentliche chemische Sensorelement dar. Durch die Sorption eines Analyten entsteht eine Massezunahme der Beschichtung und damit eine Reduktion der SAW-Schallgeschwindigkeit, die wiederum eine dazu proportionale Frequenzverschiebung des Oszillators verursacht. Mithilfe eines zweiten, unbeschichteten Bauelementes wird ein Referenzsignal erzeugt und durch Frequenzmischung mit dem Signal des beschichteten Bauelementes eine Differenzfrequenz im Bereich von 0 – 2 MHz generiert. Letztere ist weitgehend von Temperaturdriften der SAW-Sensoren befreit und repräsentiert das eigentliche Sensorsignal. Diese Anordnung, im englischen „Dual Delay Line Configuration“ genannt, vermeidet bei gleichzeitiger Temperaturkompensation das direkte Weiterverarbeiten der hochfrequenten (HF-)Signale der einzelnen SAW-Oszillatoren. Ein wichtiger Punkt, da diese typischerweise im Bereich zwischen 200 und 500 MHz liegen, während sich die wesentlich niedrigere Differenzfrequenz durch einen simplen Frequenzzähler oder durch eine Digitalelektronik erfassen läßt.

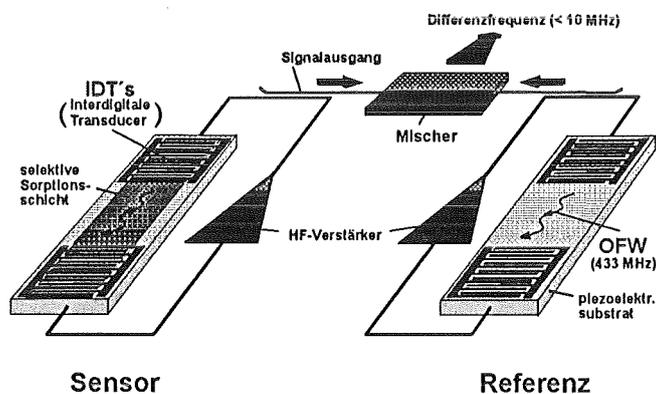


Abb.1: Typisches Meßprinzip, der sogenannte "Dual Delay Line Oscillator": Ein mit einer selektiven Sorptionsschicht versehenes OFW-Bauelement dient als frequenzbestimmendes Element einer Oszillatorschaltung (links). Zur Temperaturkompensation wird ein unbeschichteter Referenzoszillator (rechts) betrieben. Eine HF-Mischung erzeugt ein Differenzfrequenzsignal, das der weiteren Auswertung zugeführt wird.

Da mit diesen Sensoren die Masseanlagerung von Molekülen an eine Beschichtung — und damit die chemische Wechselwirkung selbst — direkt beobachtbar ist, erlaubt dieses Meßverfahren die Detektion einer nahezu beliebigen Vielzahl von gasförmigen Analyten, sofern eine Beschichtung gefunden werden kann, die

mit dem betreffenden Analyten selektiv wechselwirkt. Im Rahmen des Projektes Mikrosystemtechnik fanden nun solche Analyten besonderes Interesse, die mit anderen chemischen Mikrosensoren nur schwer einer qualitativen und quantitativen Bestimmung zugänglich sind: Gasförmige oder leicht flüchtige organische Stoffe, wie verschiedene Kohlenwasserstoffe (Hexan, Octan, Dekan, versch. Kraftstoffe), Alkohole (Methanol, Ethanol), halogenierte Kohlenwasserstoffe (CKW's, FCKW's) und Aromaten (Benzol, Toluol). Für die genannten Verbindungen existiert hinsichtlich des Analysebedarfs ein sehr großes kommerzielles Interesse und hinsichtlich der Analysetechnik eine große Vielfalt von möglichen Reagenzien, die sich als Material für eine Sensorbeschichtung eignen, indem sie sich als dünne Sorptionsfilme auf einem SAW-Bauelement abscheiden lassen. Prädestiniert dafür sind spezielle Polymere, die sich durch folgende Eigenschaften besonders auszeichnen:

1. Einfache Beschichtungstechnik durch Spincoating- oder Spraying-Verfahren
2. Ausbilden stabiler, gut haftender Schichten
3. Hohe Diffusionsgeschwindigkeiten für die nachzuweisenden Moleküle
4. Schwache Bindung des Analyten an die Polymatrixmer

Punkt 3 garantiert eine schnelle Absorption bzw. Desorption des Analyten und damit kurze Ansprechzeiten; Punkt 4 einen reversiblen Sorptionsprozess, welcher bei sinkender Analytkonzentration in der Gasphase überhaupt erst eine Desorption des in der Beschichtung gelösten Analyten ermöglicht. Dies ist die unabdingbare Voraussetzung für einen chemischen Online-Sensor, der zu jedem Zeitpunkt die auf ihn einwirkende Analytkonzentration widerspiegeln soll. Verändern sich die Konzentrationsverhältnisse in der Gasphase, so ändert sich die Konzentration des physikalisch gelösten Analyten in der Beschichtung entsprechend. Nach einer gewissen Ansprechzeit kommt es zu einem dynamischen Sorptionsgleichgewicht (gleiche Ab- und Desorptionsraten) und damit zu einem zeitlich konstanten Sensorsignal.

Das Sorptions- und Lösungsverhalten des Analyten wird durch die Stärke der verschiedenen physikalisch-chemischen Wechselwirkungen zwischen Analyt und Polymer bestimmt. So weisen auch konventionelle Polymere eine gewisse Selektivität hinsichtlich verschiedener organischer Komponenten auf [4]. Dies reicht jedoch nicht aus, um mit einer einzelnen Dual-Delay-Line-Konfiguration eine selektive Detektion eines Einzelstoffes durchzuführen. Da jedoch jedes Polymer eine zumindestens unterschiedliche Sensitivität für verschiedene Gaskomponenten aufweist, lassen sich durch Kombination mehrerer Sensoren mit jeweils unterschiedlichen Polymerbeschichtungen Sensitivitätsmuster gewinnen, die sehr wohl charakteristisch für den betreffenden Analyten sind. Solch ein Muster stellt gewissermaßen ein

spektrales Sensorsignal dar und kann wie ein optisches Spektrum durch die hierfür entwickelten statistischen Verfahren ausgewertet werden. In Betracht kommen sogenannte chemometrische Methoden, wie beispielsweise der sogenannte PLS-Algorithmus, der bereits als fertiges Softwarepaket zur Verfügung steht. Eine weitere Möglichkeit Signalmuster auszuwerten, ist der Einsatz von neuronalen Netzen, welche als Softwareprogramme in gewisser Weise die Arbeitsweise unseres Gehirns simulieren. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt im Verarbeiten auch nichtlinearer Sensorantworten, während die chemometrischen Algorithmen auf lineare Sensorkennlinien beschränkt bleiben. Mit diesen Auswertemethoden und mithilfe mehrerer unterschiedlich beschichteter, "semiselektiver" SAW-Sensoren ist es möglich, eine qualitative und quantitative Bestimmung eines organischen Gases oder gar Gasgemisches durchzuführen.

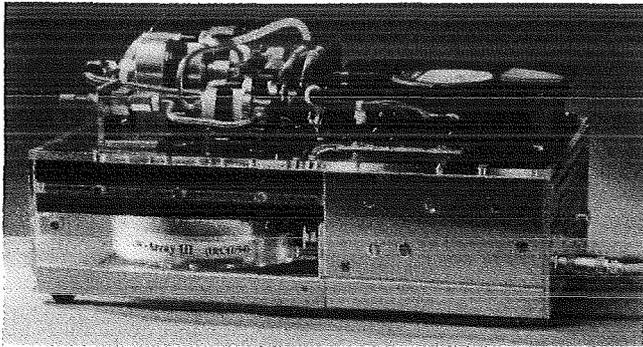


Abb. 2: Gesamtaufbau des Mikrosystems. Links unten der Sensorkopf, der das SAW-Sensorarray enthält. Rechts unten befindet sich die gesamte elektronische Signalaufbereitung, Messwerterfassung und Arraysteuerung. Oben links, das Gasfluid-System zur Beprobung, darunter der Rippenkühlkörper als Systemträger mit Lüftereinheit zur Wärmeabfuhr der Temperaturregelung.

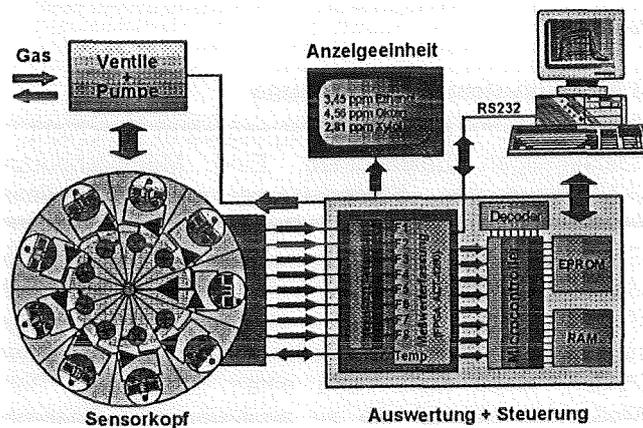


Abb. 3: Gesamtkonzeption des analytischen Mikrosystems mit SAW-Sensorkopf, dem Signalaufbereitungs- und Meßwerterfassungsmodul (MEM), der Auswerte-, Steuer- und Anzeigeeinheit. Der eigentliche Sensorkopf ist radial aufgebaut, enthält 8

OFW-Sensoroszillatoren und einen gemeinsamen Referenzoszillator. Mithilfe von 8 Mischern entstehen jeweils Mischfrequenzen im Bereich bis 10 MHz, welche als eigentliche Sensorsignale dem MEM zugeführt werden.

3. Das im IRCh entwickelte SAW-Sensorsystem

IRCh hat in der Zusammenarbeit mit HPE ein kompaktes analytisches Mikrosystem zur Detektion organischer Gase und Gasgemische auf der Basis von SAW-Bauelementen entwickelt. Es handelt sich um eines der sechs Demonstratorprojekte, die im Rahmen des Projektes Mikrosystemtechnik bis Ende 1995 ein kommerziell verwertbares Produkt vorstellen sollten. Es arbeitet vollautomatisch, d. h. es nimmt selbständig Gasproben, analysiert deren Zusammensetzung sowohl qualitativ als auch quantitativ und versetzt sich durch einen Spülvorgang selbsttätig wieder in den Ausgangszustand. Abbildung 2 zeigt ein Photo des funktionsfähigen Mikrosystems, das ein Größe von 25×15×10 cm besitzt und Abbildung 3 den konzeptionellen Aufbau, der aus einzelnen Funktionsgruppen besteht, die im folgenden näher erläutert werden.

3.1 Sensorkopf

Kernstück des Mikrosystems ist ein radial aufgebautes Array aus 9 SAW-Sensoren, das inklusive der gesamten elektronischen Beschaltung in einem kompakten, HF-dichten Gehäuse ($\varnothing=108\text{mm}$) untergebracht ist. Einer der darin angesteuerten Sensoren bleibt unbeschichtet und dient als gemeinsame Referenz für die restlichen acht Sensoren, die jeweils mit unterschiedlichen Polymeren beschichtet sind. Jeder SAW-Sensor ist jeweils Teil eines HF-Oszillators, der separat in einer Kammer des Gehäuses untergebracht ist. Durch diese Maßnahme ist eine ausreichende HF-Abschirmung der SAW-Oszillatoren gegenseitig wie auch nach außen hin gewährleistet. Ebenfalls in diesem Gehäuse untergebracht ist die gesamte Frequenzmischung, die mit dem gemeinsamen Referenzsignal acht Differenzfrequenzen erzeugt.

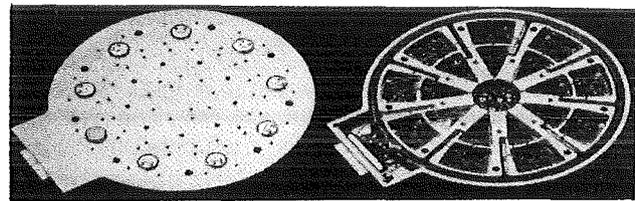


Abb. 4: Der geöffnete radiale Sensorkopf. Zu erkennen sind links acht OFW-Sensoren (ohne Deckel) und der gemeinsame Referenzsensor (mit Deckel); rechts die Unterseite mit 19 abgeschirmten Kammern für die HF-Oszillatoren und -Mischer in SMD-Technik.

Alle HF-technischen Funktionen des Mikrosystems sind somit innerhalb des Sensorkopfes realisiert, ein wichtiger Aspekt für die Praxistauglichkeit eines solchen Systems. Die radiale Anordnung der Sensoren im Array ermöglicht eine ebenfalls radiale Zuführung des Analytstromes im Gehäusedeckel, so daß die Sensoren simultan mit dem Analytstrom beaufschlagt werden können. Dadurch lassen sich qualitative Analysen bereits in der Anstiegsphase, weit vor dem Einstellen des jeweiligen dynamischen Reaktionsgleichgewichtes, machen. Abbildung 4 zeigt zwei Ansichten dieses Sensorkopfes. Der hier nicht gezeigte Deckel enthält neben den radialen Gaszuführungen noch die Kammern zur Aufnahme der einzelnen SAW-Sensoren. Der Leistungsbedarf des gesamten Kopfes ist sehr gering und liegt bei 2W. Dieser Wert garantiert zum einen eine geringe Wärmeabfuhr und damit eine gute Thermometrie der SAW-Sensoren im Array, zum anderen einen netzunabhängigen Betrieb beispielsweise bei Schadstoffmessungen in der Umwelt.

3.2 Verwendete SAW-Sensoren

Im Sensorkopf kommen im allgemeinen handelsübliche SAW-Resonatoren von den Firmen Siemens oder Murata (Japan) zum Einsatz. Üblicherweise dienen diese Bauelemente zur elektronischen Telemanipulation (Garagentüröffner und andere Funkfernsteuerungen) und werden in großen Stückzahlen produziert. Sie weisen eine Resonanzfrequenz von 433,92 MHz auf und werden von uns zum Stückpreis von 4 DM in einem standardisierten Gehäuse (TO39, $\varnothing = 8$ mm) bezogen. Die Modifikation zum SAW-Sensor erfolgt im IRCh, indem der Gehäusedeckel jeweils entfernt und die Sensoren mit chemisch sensitiven Schichten versehen werden. Wie bereits erwähnt, geschieht dies — je nach Erfordernis — mit dem Spincoating- oder Spraying-Verfahren, indem eine Polymerlösung mit einem organischen Lösungsmittel angesetzt und entsprechend auf die Sensoren aufgetragen wird. Das anschließende Verdunsten des Lösungsmittels hinterläßt einen dünnen Polymerfilm, dessen Schichtdicke durch Variation der Auftragparameter, wie Rotationsgeschwindigkeit, Aufsprühdauer, Konzentration der Ausgangslösung, beliebig einstellbar ist.

3.3 Meßwerterfassung

Aufgrund des kompakten Aufbaus des Sensorkopfes gelangen lediglich acht "niederfrequente" Differenzfrequenzen im Bereich von 0 – 10MHz über einen 15-poligen Sub-D-Stecker an die Außenwelt, wo die Verarbeitung der Meßwerte stattfindet. In der Zusammenarbeit zwischen IRCh und HPE wurde hierfür ein kompaktes Meßwerterfassungsmodul (MEM) entwickelt, das die gesamte Signalaufbereitung, Messwerterfassung und -weitergabe sowie die Arraysteuerung übernimmt. Unter Zuhilfenahme modernster Technologien konnte das MEM auf einer Größe von nur 60×40 mm verwirklicht werden. Es besteht im Wesentlichen aus

zwei Einheiten, einem *Sinus-TTL-Wandler* und einem "*Free Programmable Gate Array*" (FPGA). Ersterer bringt die sinusförmigen Sensorsignale auf TTL-Pegel und besteht aus einem speziell hierfür entwickelten 8-kanaligen mikroelektronischen Modul das bei HPE in Dickfilmtechnik aufgebaut wurde. Mithilfe der zweiten Einheit, dem FPGA, werden die Signale hiernach digital gezählt. Das FPGA verkörpert eine neuartige, frei programmierbare ASIC-Technologie, die eine Realisierung aller für die Frequenzzählung erforderlichen Funktionen samt Temperaturerfassung und Ventilsteuerung durch einen einzigen Chip (Typ ACT1280 der Firma Actel) ermöglicht. Bei HPE programmiert beinhaltet es nicht nur das aufwendige 8-kanalige Zähler/Timer-System einschließlich zwei weiteren 16Bit-Systemen für die Temperaturerfassung, sondern auch noch die Befehlsdekodierung für die Ventilsteuerung und eine serielle Kommunikationsschnittstelle zum Hostrechner, die eine Übertragungsgeschwindigkeit von 19,2 kBaud erreicht. Die eingehäuste Fläche dieses Chips beträgt nur 25mm×25mm, der Leistungsverbrauch ca. 250mW.

3.4 Thermometrie

Das Mikrosystem enthält neben der HF-Elektronik im Sensorkopf und der Meßwerterfassung noch eine dritte elektronische Komponente: die Temperaturregelung. Mithilfe eines kontinuierlichen PI-Reglers werden fünf Peltier-Elemente angesteuert, die sich zwischen dem Sensorkopf und einem Rippenkühlkörper befinden. Die Analysentemperatur des Sensorarrays läßt sich damit von -10°C bis +80°C einstellen, die Regelschwankungen liegen unter 0.01°C/min. Die von den Peltierelementen erzeugte Abwärme wird via Rippenkühlkörper und geregelter Lüfter an die Umgebung abgegeben. Der Rippenkühlkörper (schwarz, siehe Abb. 2) dient gleichzeitig als Systemträger für alle Komponenten des Mikroanalysesystems. Bei der Einstellung eines Temperatursollwertes bei Umgebungstemperatur beträgt der Gesamtleistungsverbrauch des Mikrosystems etwa 6W.

3.5 Fluidsystem zur Beprobung

Die Beprobung des Mikroanalysesystems geschieht im selbständigen Batchbetrieb. Eine Membranpumpe (KNF-Neuberger, Förderleistung max. 500ml/min) fördert kontinuierlich einen Probegasstrom über den Sensorkopf. Der Probegasstrom wird im Deckel des Sensorkopfes temperiert und radial auf die einzelnen Sensorkammern verteilt. Die im Fluidsystem enthaltenen 3-Wege-Ventile (Hersteller ASCO) definieren zwei Zyklen, einen Meß- und einen Spülzyklus. Beim Meßzyklus gelangt die zu analysierende Gasprobe über ein Staubfilter zum Sensorkopf und wird nach dem Passieren der Pumpe an die Umgebung abgegeben. Beim Spülzyklus wird die im System befindliche Gasmenge im Kreis gepumpt und zusätzlich über einen Aktivkohlefilter geleitet. Das Filter befreit den Gasstrom

vom Analyten, so daß bei den Sensoren die Desorption einsetzen kann. Nach einer gewissen Einstellzeit (Größenordnung einige Minuten) zeigen die Sensoren eine Referenzkonzentration an, die als Basislinie zur Auswertung dient. Die Zeiteinteilung von Meß- und Spülzyklus (typischerweise 1 – 5 Minuten) sowie die Gesamtzahl der Zyklen kann durch die Softwaresteuerung beliebig vorgegeben werden.

3.6 Auswertung

Die interaktive Ablaufsteuerung, die arithmetische Bearbeitung der Meßdaten und deren Darstellung werden über die Kommunikationsschnittstelle im FPGA (RS232) von einem IBM-kompatiblen Rechner unter MS-DOS ausgeführt. Die chemometrische Auswertung bzw. die Mustererkennungsverfahren sind ebenfalls auf dem Rechner implementiert und können je nach Meßaufgabe angepaßt werden. Auf diesem Weg ist eine künftige Vernetzung mehrerer SAW-Sensorsysteme unter der Verwendung eines zentralen Hostrechners ohne weiteres möglich. Durch die zunehmende Praxisorientierung und der Festlegung auf konkrete Anwendungen kann bis Ende dieses Jahres die Verlagerung und Integration der externen Recheraufgaben in ein Modul innerhalb des SAW-Mikrosystems erfolgen. Diese Version enthält einen modul-internen On-Board-Microcontroller, der neben der Systemsteuerung und Ansteuerung einer integrierten Anzeigeeinheit die Rechnerleistung für die Mustererkennung übernehmen wird. Hierdurch wird eine gewaltige Datenreduktion Vorort erzielt. Optional läßt sich das System mithilfe eines PC zusätzlich überwachen, wobei auch weiterhin ein Online-Monitoring der gewonnenen Meßdaten möglich sein wird.

4. Meßbeispiele, Ergebnisse und Diskussion

Für erste Tests des Mikrosystems wurde ein Schichtsystem ausgewählt, das bereits aus früheren Untersuchungen [5 - 7] bekannt war. Hauptaugenmerk wurde dabei auf eine bestmögliche Unterscheidbarkeit einer möglichst großen Anzahl von Analyten gelegt, was sich durch eine gezielte Auswahl von Polymeren bewerkstelligen läßt. Kriterium für diese Auswahl ist eine maximale Variation der physikalisch-chemischen Parameter (s.o.) der ausgesuchten Schichtsubstanzen. Um die erzielt Selektivität der erhaltenen Sensorsignale zu zeigen hat sich die Darstellung in Form von Netzdiagrammen am besten bewährt. Hierbei werden die normierten Signale der einzelnen Sensoren auf jeweils acht sternförmig angeordnete Achsen aufgetragen. Das sich daraus ergebende Polyeder kann als Signalmuster vom menschlichen Gehirn am Besten erfaßt und differenziert werden. Ebenso läßt sich damit die Funktion des in der entwickelten Steuer- und Auswertesoftware implementierten neuronalen Netzes veranschaulichen.

4.1 Ansprechzeiten

Die Ansprechzeiten des Sensorsystems kann nun anhand der Abb. 5–6 demonstriert werden. Es handelt sich um eine rein qualitative Meßreihe, die mit dem ersten Aufbau der Gasfluidik entstanden ist. Unbeabsichtigt enthielt es zunächst ein Totvolumen, mit dessen Hilfe jedoch hier sehr schön die Leistungsfähigkeit des SAW-Mikroanalysesystems gezeigt werden kann. Die in der Abb. 5 dargestellten Sensorsignale zeigen den zeitlichen Verlauf von drei aufeinander folgenden Beprobungen mit den Analyten, Ethanol und Oktan. Allerdings erkennt man nur bei der ersten Beprobung einen kontinuierlichen Anstieg der Sensorsignale. Die beiden darauffolgenden Beprobungen zeigen in den ersten 10 – 50s deutliche Peaks, die nicht dem erwartenden Signalverlauf entsprechen.

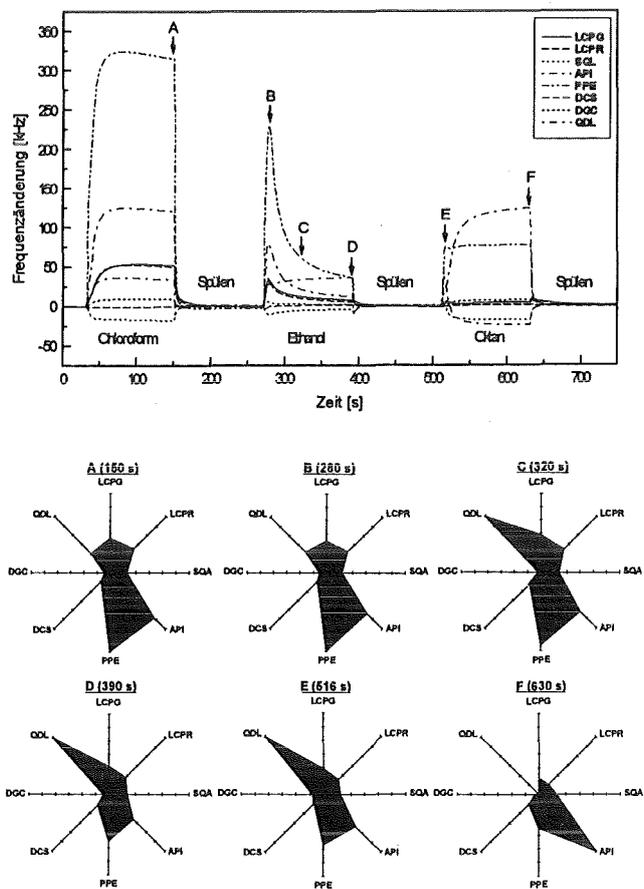


Abb. 5 und 6: Erläuterungen siehe Text im Kap. 4.1.

Erst am Ende der jeweils dargestellten Beprobungsphasen entsteht das für die jeweiligen Analyten typische Signalverhalten. Abbildung 6 zeigt sechs Netzdiagramme, die zu verschiedenen Zeitpunkten der obigen Messung aufgenommen worden sind. Muster A zeigt das für dieses Schichtsystem typische Muster für Chloroform, das ab etwa der 5. Sekunde nach Beginn der Beprobung stabil bleibt. Die Muster B, C und D sind jeweils Schnappschüsse zu verschiedenen Stadien der zweiten Beprobung mit Ethanol. Muster B entspricht dem

Peakmaximum und zeigt beinahe exakt das aus Diagramm A bekannte Chloroformmuster! Muster C wurde in der Mitte und Muster D am Ende der Ethanolbeprobung erzeugt. Augenscheinlich ist im Fluidsystem durch ein Totvolumen (inzwischen beseitigt) eine hohe Chloroformkonzentration von der vorigen Beprobung zurückgeblieben, die diesen Signalpeak verursachte. Mit fortschreitender Analysedauer dominiert Ethanol zunehmend, so daß über verschiedene Mischstadien (Muster C) das reine Ethanolmuster in Muster D zu sehen ist. Desgleichen bei der darauffolgenden Beprobung mit Oktan: Muster E zeigt nach den ersten 3 Sekunden noch das Ethanolmuster (!), wonach sich etwa nach einer Minute ein stabiles Oktanmuster (Muster F) ergibt.

4.2 Signalmuster und Selektivität

Abbildung 7 zeigt eine Auswahl einiger Signalmuster, die mit einem weiter optimierten Schichtsystem erzeugt wurden. Hauptinteresse lag hier wieder in einem größtmöglichen Informationsgehalt der Muster. Eine nähere Betrachtung zeigte, daß hierfür sechs Schichten ausreichen, falls keine Störeinflüsse interferierender Gase zu berücksichtigen sind. Künftige Untersuchungen werden zeigen, in welchem Maße diese Stoffe auch innerhalb extremer Mischungen unterscheidbar bleiben.

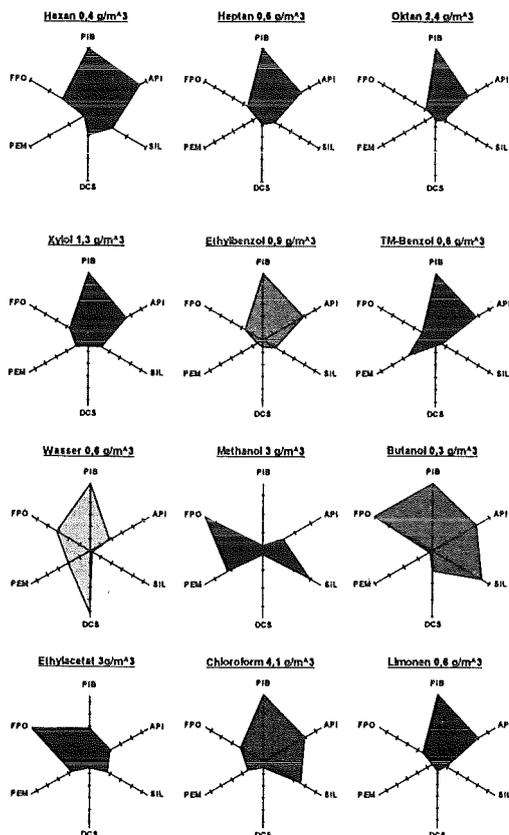


Abb. 7: Charakteristische Signalmuster verschiedener Analyten als Netzdiagramme aufgetragen. Deutlich ist die gute Unterscheidbarkeit der Muster auch innerhalb chemisch homologer Reihen zu erkennen.

Lösungsmittel	Konzentration		sensitivste Schicht	MAK-Werte	
	mg/m ³	ml/m ³		mg/m ³	ml/m ³
Benzol	18	5.4	Polyisobutylene	-	-
Chloroform	21	4.2	Polyisobutylene	50	10
Ethylacetat	14	3.7	Fluoropolyol	1400	400
Methanol	3.3	2.3	Polyphenylether	260	200
Okatan	2.9	0.6	Polyisobutylene	2350	500
Wasser	6.9	9.1	Squalan	-	-
Xylol	5.2	1.1	Apiezon	440	100
Benzol	4.8	1.4	Neuer Sensortyp	-	-
Xylol	0.5	0.1	Sensortyp	440	100

Tab.1: Aktuelle Nachweisgrenzen des Systems bestimmt nach DIN 32645/1. Die verbesserten Werte für Benzol und Xylol sind mit einem anderen Sensortyp entstanden, der andere SAW-Moden nutzt.

4.3 Nachweisgrenzen

Die Nachweisgrenzen des Systems für einige Reinstoffe als Vertreter von Substanzklassen sind in der Tabelle 1 gezeigt. Bestimmt nach DIN 32645/1 befinden sie sich durchweg unterhalb der Werte für die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK). Selbstverständlich sind die hier gezeigten Werte von dem aktuellen Entwicklungsstand sowie von dem jeweils ausgewählten Schichtsystem abhängig und daher nur als grober Anhaltspunkt zu betrachten.

5. Resümee

Das SAW-Mikroanalytensystem liegt als voll funktionsfähiges Mikrosystem vor und zeigt bereits im Stadium eines Prototyps eine enorme Leistungsfähigkeit, die sich durch folgende Punkte kurz zusammenfassen lassen:

- Große Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an die analytische Aufgabe
- Hohe Analysengeschwindigkeit, qualitative Analysen im Sekundenbereich
- Leichter, transportabler und robuster Aufbau des Gesamtsystems
- Niedriger Gesamtleistungsverbrauch von nur 6W im Normalbetrieb

Die bislang erzielten Ergebnisse weisen auf eine ausgezeichnete Qualifikation des Sensorsystems sowohl für die Schadstoffanalytik in der Umwelt als auch für Anwendungen am Arbeitsplatz hin. Die Fähigkeit der schnellen Online-Analyse erscheint insbesondere für die chemischen Prozesskontrolle als sehr vielversprechend und könnte dort neuartige Verfahrens- bzw. Produktionstechniken ermöglichen. Ein konkretes Interesse der Industrie zur kommerziellen Umsetzung des Systems liegt bereits im Rahmen einer Entwicklungskooperation seit 1. April 1995 vor.

Literatur

- [1] G. Sauerbrey: Z. für Physik, 155(1959), 206-222.
- [2] H. Wohltjen: Sens. and Act., 5 (1984), 305-325.
- [3] H. Wohltjen, R. Dessy: Analytical Chemistry 51(1979), 1458-1475.
- [4] J. W. Grate, M. H. Abraham: Sensors and Actuators B, 3(1991), 85-111.
- [5] J. Reichert, W. Coerdts, M. Rapp, H. J. Ache: Eurosensors VI, 5.-7. Oct. 1992, San Sebastian, Spanien.
- [6] M. Rapp, M. Balzer, W. Coerdts, O. Fromhein, T. Kühner, J. Reichert, A. Voigt: 1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik 23.-24. Sept. 1993, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5238.
- [7] M. Rapp, B. Böß, A. Voigt, H. Gemmeke, H. J. Ache: Fresen. J. Anal. Chem. 352 (1995): 699 – 704.

ELMAS - ein modulares elektrochemisches Mikroanalyzesystem

W. Hoffmann¹⁾, R. Rapp¹⁾, W. Bier²⁾, M. Bruns¹⁾, B. Büstgens²⁾, B. Deimling⁵⁾, H. Eggert³⁾,
K. H. Freywald⁶⁾, O. Fromhein⁵⁾, W. Keller²⁾, K. Lindemann³⁾, D. Maas²⁾,
R. Ruprecht⁴⁾, W.K. Schomburg²⁾, D. Seidel²⁾, D. Stolze⁷⁾, W. Süß²⁾

¹⁾Institut für Radiochemie

²⁾Institut für Mikrostrukturtechnik

³⁾Institut für Angewandte Informatik

⁴⁾Institut für Materialforschung III

⁵⁾Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik

⁶⁾sigma electronic Erfurt

⁷⁾Centrum für intelligente Sensorik Erfurt

Zusammenfassung

Als Beitrag zur Entwicklung von μ TAS (Micro Total Analysis Systems) wurde ein mikroanalytisches System zur Bestimmung der Ionenkonzentration in Lösung konzipiert und realisiert, das insbesondere Funktionen der Selbstüberwachung und Selbstkalibrierung zur Verbesserung der Zuverlässigkeit der chemischen Analyse nutzt. Verschiedene Mikrotechniken wurden eingesetzt für den modularen Aufbau von zwei Basiseinheiten: einer Sensor-Aktor-Einheit und einer elektronischen Controller-Einheit. Als Sensoren dienen ionensensitive Feldeffekttransistoren (ISFET), die in einer Mikrodurchflußzelle angeordnet sind. Die Sensoren werden alternierend mit Analyt- und Kalibrierlösung beaufschlagt, wobei der Medientransport mit Hilfe von Mikropumpen erfolgt. Mikropumpen, Mikrodurchflußzelle sowie ein Vorratsgefäß für die Kalibrierlösung sind aus Kunststoff gefertigt. Eine stapelförmige Anordnung dieser Komponenten führt zu einem kompakten Aufbau mit kleinen Gesamtabmessungen. Die prinzipielle Funktion des Mikrosystems wurde demonstriert. Es wurden bei geringem Lösungsverbrauch kurze Meßzyklen erhalten. Eine Palette von Mikrosensoren dient der Systemanpassung an spezifische Applikationen.

1. Einleitung

Eine neue Generation von chemischen Analysegeräten kündigt sich an, sog. " μ TAS" (Micro Total Analysis Systems) [1], die zu einer wesentlichen Verbesserung der Leistungsfähigkeit der chemischen Analytik beitragen soll. Angestrebt wird die Integration aller Komponenten eines komplexen chemischen Analysators in miniaturisierter Form in ein Meßsystem. Dieses System kann alle für eine chemische Analyse notwendigen Funktionen von der Probenaufnahme und Konditionierung über die Signalerfassung mittels Sensoren bis hin zur Signalverarbeitung und Signalanzeige ausführen. Dadurch soll u.a. eine Verringerung im Chemikalien- und Energieverbrauch sowie eine Kostenminimierung bei der Geräteherstellung und -wartung erreicht werden. Schnelle Analysen kleiner Volumina werden erwartet. Durch integrierte Kontrollfunktionen kann die Zuverlässigkeit der chemischen Analyse verbessert werden - ein Problem, das zur Zeit noch die breite Anwendung von (diskreten) chemischen Mikrosensoren erschwert [2]. Zukünftige Einsatzgebiete derartiger Mikrosysteme sind die medizinische Diagnostik sowie

die Analytik im Umweltbereich mit einem großen Bedarf an zuverlässigen autarken Meßsystemen für Überwachungsaufgaben.

Im Rahmen des Projektes Mikrosystemtechnik im Forschungszentrum Karlsruhe wurde als ein Demonstrator für μ TAS die Entwicklung eines elektrochemischen Mikroanalyzesystem (ELMAS) initiiert [3], an dem Partner aus verschiedenen Bereichen der Mikrosystemtechnik des Forschungszentrums und der Industrie interdisziplinär zusammenarbeiten.

2. ELMAS-Konzept

ELMAS vereint wesentliche Komponenten der Mikrosystemtechnik - elektrochemische Mikrosensoren, mikrofluidische Aktoren und Mikroelektronikbauelemente - zu einem System mit elektronischen und chemischen Kontrollfunktionen (Abb. 1).

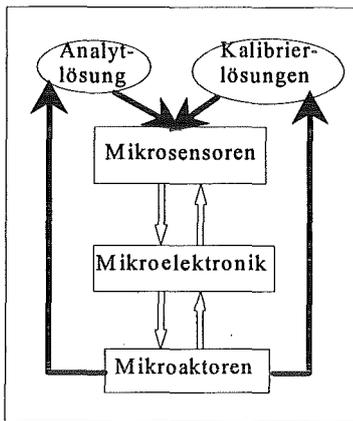


Abb. 1 : ELMAS-Konzept

Die Signalerfassung bei ELMAS basiert auf elektrochemischen Mikrosensoren, die das chemische Signal "Ionenkonzentration in der Lösung" direkt in ein elektrisches Signal wandeln. Aufgrund dieses Meßprinzips und der Präparation mit den Methoden der Halbleiterindustrie sind sie für die Systemintegration prädestiniert [4]. Ein weiterer Vorteil elektrochemischer Sensoren besteht in der Kontrolle der elektronischen Funktion durch elektrische Testsignale. Die chemische Sensorfunktion wird durch Rekalibrieren getestet, d. h., durch die alternierende Zufuhr von Analyt- und Kalibrierlösung zu den Sensoren. Dadurch ist es möglich, das Driftverhalten der Sensoren zu verfolgen und gegebenenfalls zu kompensieren. Für den Medientransport werden Mikroaktoren genutzt. Die Aktoren werden ebenso wie die Signalerfassung mit Hilfe mikroelektronischer Komponenten gesteuert.

3. ELMAS-Aufbau und Funktionsweise

ELMAS besteht aus einer Sensor-Aktor-Einheit und einer Controller-Einheit, die jeweils stapelförmig angeordnete Module enthalten (Abb. 2).

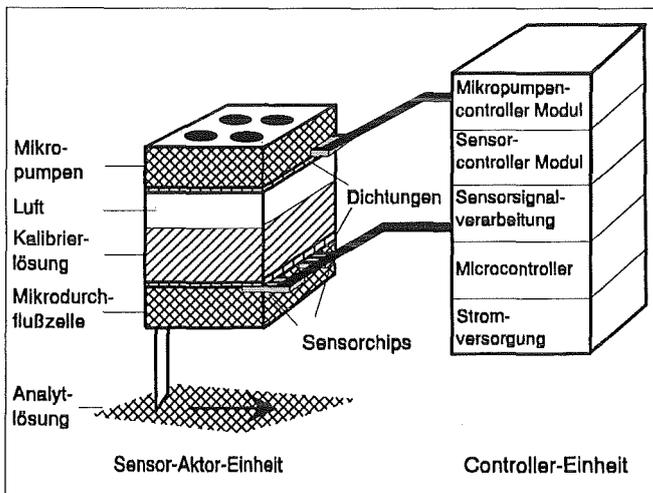


Abb. 2 : ELMAS-Aufbau, schematisch

Als elektrochemische Mikrosensoren sind ionensensitive Feldeffekttransistoren (ISFET) in einer Mikrodurchflußzelle in der Sensor-Aktor-Einheit enthalten. Die ISFETs werden abwechselnd über eine Kanüle mit dem Analyt aus einer strömenden Probelösung und mit Kalibrierlösung aus einem Vorratsgefäß in Kontakt gebracht. Die Mikrodurchflußzelle kann bis zu 6 Sensoren aufnehmen, wobei ein mäanderförmiger Kanal jeweils 3 Sensoren am Eingang bzw. Ausgang der Mikrozeile trennt, die damit als Meßsensoren (alternierender Kontakt mit Probe und Kalibrierlösung) bzw. Referenzsensoren (ständiger Kontakt mit Kalibrierlösung) dienen [3].

Der Lösungstransport erfolgt indirekt über ein Luftpuffervolumen mittels Mikropumpen, die für die Förderung von Gasen geeignet sind. Damit entfällt die kritische blasenfreie Befüllung von Flüssigkeitspumpen ebenso wie die Gefahr der Kontamination und Korrosion der mikromechanischen Pumpenbauteile durch die Lösungen.

Abb. 3 zeigt den modularen Aufbau der Sensor-Aktor-Einheit im Modell. Die Abmessung der Grundfläche der Sensor-Aktor-Einheit beträgt 20 x 20 mm². Die Höhe wird wesentlich durch die Größe des Vorratsgefäßes für die Kalibrierlösung bestimmt, die wiederum durch die Anzahl der möglichen Kalibrierungen des Systems vorgegeben ist.

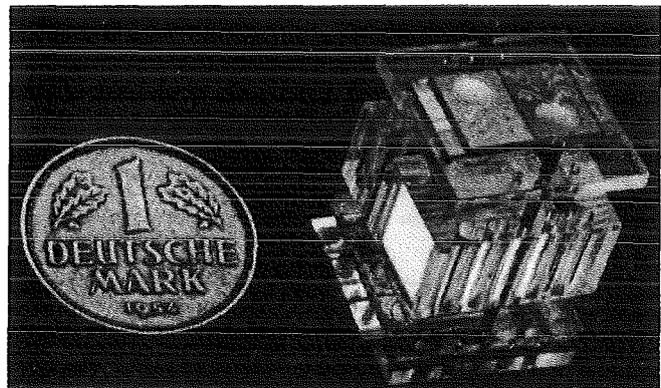


Abb. 3 : Modell der Sensor-Aktor-Einheit

Die Controller-Einheit enthält Module für die Kontrolle und Verarbeitung der Sensorsignale, für die Ansteuerung der Mikropumpen und für das Systemmanagement.

Der durchgehend modulare Aufbau von ELMAS bietet aufgrund der Kompatibilität bzw. Austauschbarkeit der Komponenten wichtige Vorteile:

- Flexibilität in der Applikation durch Anpassung an diverse Meßaufgaben,
- Austauschbarkeit defekter Teile (insbesondere in der Entwicklungsphase wichtig!),
- Integration von Komponenten anderer Mikrosysteme in ELMAS bzw. Nutzung von ELMAS-Komponenten in anderen Systemen.

4. Die ELMAS-Komponenten

4.1 Sensorchips

Als Basissensor für ELMAS wurde eine pH-sensitive Transistorstruktur entwickelt (Abb. 4), die in einer Produktionslinie für MOS-Standardbauelemente gefertigt wird [5].

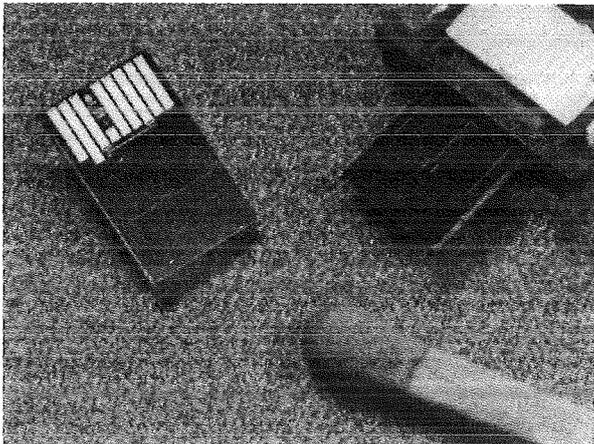


Abb. 4. : ISFET-Chip und Kontaktbereich mit Mikrosteckverbinder (Chipgröße $5 \times 8 \text{ mm}^2$)

Als ionensensitive Membran fungiert eine Siliciumnitridschicht im Bereich des Transistorgates, die im Kontakt mit dem wäßrigen Medium als Meßsignal ein vom pH-Wert abhängiges Phasengrenzpotential liefert. Die Sensitivität beträgt ca. 55 mV/pH im pH-Bereich von 1 bis 11. Damit ist der Basissensor direkt für viele Anwendungen nutzbar.

Die Ionensensitivität und die Ionenselektivität des pH-ISFETs kann durch zusätzlich über der Siliciumnitridschicht angeordnete Dünnschichten modifiziert werden. Eine Schwerpunktaufgabe ist die Entwicklung solcher Schichten auf der Basis anorganischer Verbindungen: Silikatgläser für den Nachweis von Alkaliionen, Halogenide für die Halogenidionen-Bestimmung und Chalkogenide für den Schwermetallionen-Nachweis. Diese Materialien haben sich bisher in der elektroanalytischen Anwendung bei ionenselektiven Makroelektroden bewährt, wo sie als Gläser oder Preßlinge zum Einsatz kommen. Umfangreiche technologische Untersuchungen zu physikalischen Vakuumdepositionsverfahren (Aufdampfen, Magnetronputtern), haben zu Sensorprototypen für Iodionen [6], Natriumionen [7] und Kupferionen [8] geführt. Die jeweils erreichten Ionensensitivitäten und Ionenselektivitäten entsprechen denen der kommerziellen ionenselektiven Makroelektroden. Die Lebensdauer der Mikrosensoren beträgt durchschnittlich drei Monate.

Das Layout des Sensorchips (Abb. 4) gestattet eine vereinfachte Montage. Der relativ groß gewählte Abstand zwischen sensitiver Gatefläche und Chiprand bzw. Kontaktbahnen ($2,0 \text{ mm}$) gestattet eine sichere

Abdeckung (Isolation) des Chips außerhalb der sensitiven Fläche. Die Größe der Kontaktbahnen für die elektrischen Anschlüsse ist an das Rastermaß eines miniaturisierten Flachbandkabels angepaßt, das durch anisotrope Leitklebetechnik verbunden wird. Dadurch kann eine mehrkanalige elektrische Kontaktierung erfolgen. Für schnelle Chiptests können miniaturisierte elektrische Steckverbinder genutzt werden.

Zusätzlich zu diesen ISFET-Sensoren wurden einfache Strukturen von ionenselektiven Elektroden entwickelt. Zur Signalableitung wurden Silber-Dickschichtelektroden auf Keramiksubstraten (Größe $5 \times 8 \text{ mm}^2$) präpariert. Sie dienen als Substrate für die Präparation von Sensoren für Kalium-, Calcium- und Nitrationen auf der Basis von organischen ionensensitiven Substanzen, die in einer Polymermatrix eingebettet sind [9]. Sie können alternativ zu den ISFET-Chips in ELMAS eingesetzt werden.

4.2 Mikrodurchflußzelle

Die Anordnung der Sensorchips in der Mikrodurchflußzelle garantiert den definierten Lösungskontakt (Abb. 5).

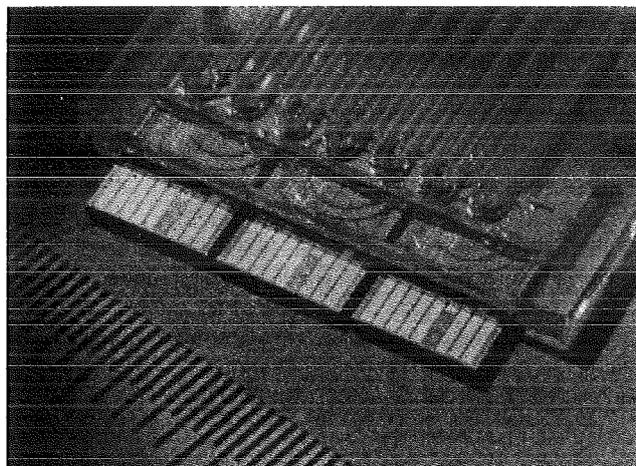


Abb. 5. : Mikrodurchflußzelle mit ISFET-Sensorchips

Die Herstellung des mäanderförmigen Fließkanals (Querschnitt $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$) in PMMA erfolgt analog zur Fertigung der Mikropumpenkammern im Spritzgußverfahren. Eine auf die Kanalstruktur geklebte Deckplatte enthält Öffnungen zum Anströmen der sensitiven Flächen der Sensorchips. Strömungsbarrieren im Kanal dienen der optimalen Lösungsanströmung der Sensoren. Vorteilhaft ist die Transparenz der Zelle, die eine gute Kontrolle des Lösungstransportes ermöglicht.

4.3 Mikropumpenarray

Unter Nutzung der Spritzgußtechnologie, der Membrantechnik und einer speziellen Klebetechnik wurde der Prototyp einer Mikromembranpumpe aus Kunststoff entwickelt [10], die zur Förderung von Gasen mit Fluß-

raten von typischerweise ca. 200 $\mu\text{l}/\text{min}$ dient. Da bei der Fertigung im Batchverfahren mehrere Pumpen gleichzeitig erzeugt werden können, wurde für ELMAS ein Array bestehend aus vier Pumpen entwickelt. Davon werden jeweils zwei Pumpen parallel betrieben, so daß eine erhöhte Systemsicherheit erreicht wird. In Abb. 6 erkennt man die spiralförmigen Heizwendeln des elektro-thermopneumatischen Antriebes sowie die seitlich liegenden Öffnungen für die fluidische Kontaktierung und für die mechanische Positionierung des Pumpenarrays in der Sensor-Aktor-Einheit.

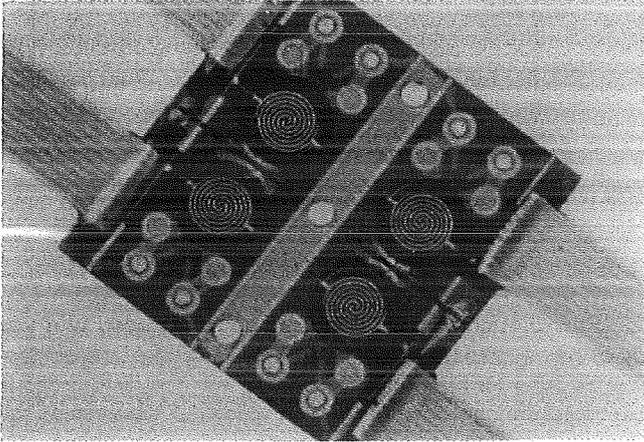


Abb. 6. : Mikropumpenarray

4.4 Controller-Einheit

Die Controller-Einheit besteht aus 5 Platinen, die über ein Steckersystem miteinander verbunden sind. Kernstück der Einheit ist ein Siemens SAB 80C166 Mikrocontroller. Desweiteren enthält sie Platinen für die Pumpenansteuerung, für die Sensor-Signalerfassung, für die elektronische Kontrolle der Sensorfunktion sowie für die Steckerverbindungen. Sie wird über ein 12 V Netzteil betrieben und verfügt über eine serielle Schnittstelle zur Kommunikation mit einem übergeordneten Rechner. Für die Steuerung und Visualisierung der Systemabläufe sowie die Datenauswertung und Archivierung wurden Softwareprogramme entwickelt [11].

5. System

Die Montage der Sensor-Aktor-Einheit erfolgt durch Stapelung der oben beschriebenen Komponenten sowie eines mechanisch aus PMMA gefertigten Vorratsgefäßes für die Kalibrierlösung. Der Stapel wird in ein Metallgehäuse geklemmt, wobei Silikonmembranen als Dichtungen dienen. Abb. 7 zeigt die montierte Sensor-Aktor-Einheit. Erkennbar sind auch die miniaturisierten Flachbandkabel zur elektrische Kontaktierung der Sensoren und Mikropumpen.

Die Sensor-Aktor-Einheit und die Controller-Einheit wurden auf eine Plexiglasplatte montiert (Abb. 8). Zur

Demonstration der Probenahme aus einer fließenden Lösung befindet sich unter der Platte ein Kanal, in dem Analytlösung strömt.

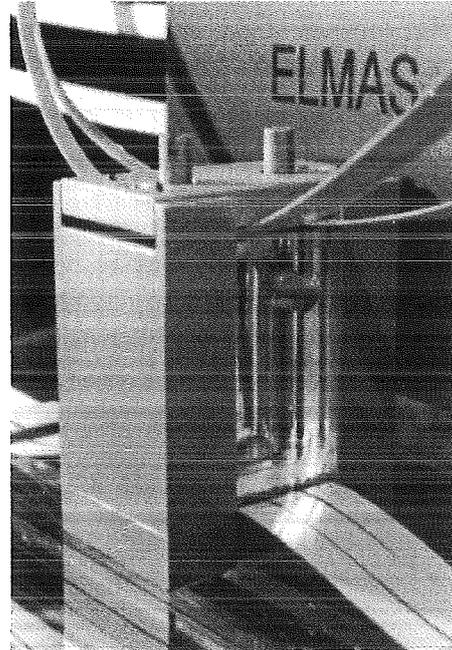


Abb. 7. : Sensor-Aktor-Einheit

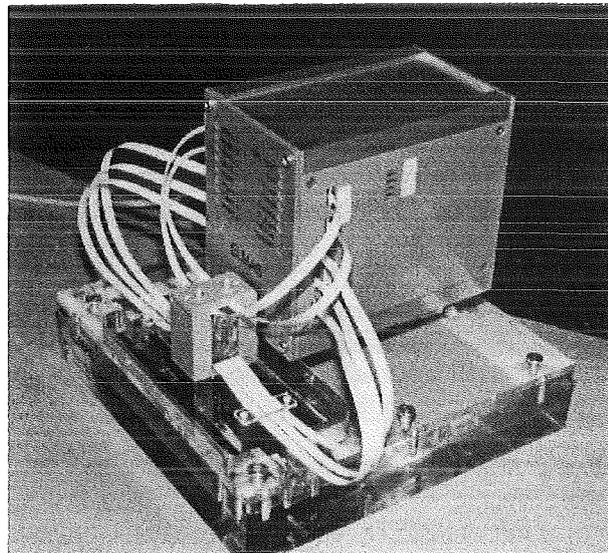


Abb. 8. : ELMAS Demonstrationsmodell

Beispielhaft zeigt Abb. 9 eine Meßkurve bei alternierender Beaufschlagung des Mikrosystems mit Analytlösung (pH 5) und Kalibrierlösung (pH1).

Erkennbar ist eine schnelle Signalantwort des Meßsystems auf Änderungen des pH-Wertes, bedingt durch das schnelle Ansprechen der pH-ISFETs und durch die Minimierung der Volumina innerhalb des Mikrokanalsystems. Die Meßsignale sind dabei proportional zum pH-Wert der Analytlösung, wie erste Versuche bei Variation des pH-Wertes demonstrieren (Abb. 10).

Mit dem realisierten ELMAS-Aufbau wurden bei einem Analyt- und Kalibriervolumen von 50 μl bzw. 100 μl minimale Meßzyklenzeiten von ca. 20 Sekunden erreicht.

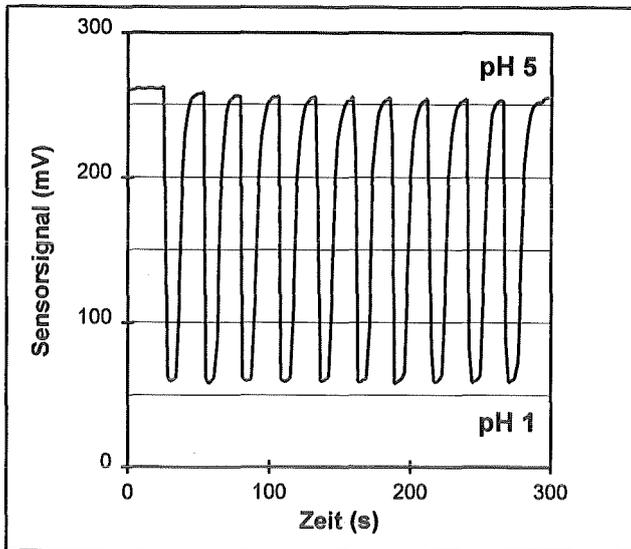


Abb. 9.: Meßsignal bei Wechsel der pH-Pufferlösung zwischen pH 5 und pH 1

6. Zusammenfassung und Diskussion

Als ein Schritt hin zu weitgehender Miniaturisierung in der chemischen Analytik wurde ein Meßsystem für die Ionenanalytik entwickelt, das auf elektrochemischen Sensoren zur Signalwandlung und in Kunststoff gefertigten Fluidikkomponenten basiert. Der Einsatz von Kunststoffen für die mikrofluidischen Komponenten erlaubt eine visuelle Kontrolle des Medientransportes. Die Herstellung in Spritzgußtechnologie eignet sich für eine Massenproduktion. Die elektronischen Komponenten wurden zur Demonstration der Funktion des Systems zunächst in konventioneller diskreter Bauweise ausgeführt. Auch hier kann eine Miniaturisierung erfolgen, wie das Beispiel eines Hybridaufbaues für die Pumpenansteuerung belegt [12].

Durch die Anwendung fortgeschrittener Mikrosystemtechniken gelang es, die Sensor- und Aktor-Module extrem zu miniaturisieren. Bis zu sechs Sensorchips in einer Mikrodurchflußzelle und ein Pumpenarray mit vier diskret steuerbaren Mikropumpen konnten in einem Volumen von jeweils $20 \times 20 \times 1,5 \text{ mm}^3$ komprimiert werden. Die Gesamtgröße der Sensor-Aktor-Einheit wird damit hauptsächlich durch das Volumen des Vorratsgefäßes für die Kalibrierlösung bestimmt. Denkbar ist auch eine Kombination bestehend nur aus Mikrodurchflußzelle und Pumpenarray des ELMAS, die flexibel an diverse Kalibriergefäße und Kanalsysteme zur Probenahme angepaßt werden kann und die dann eine Größe von nur $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ aufweist.

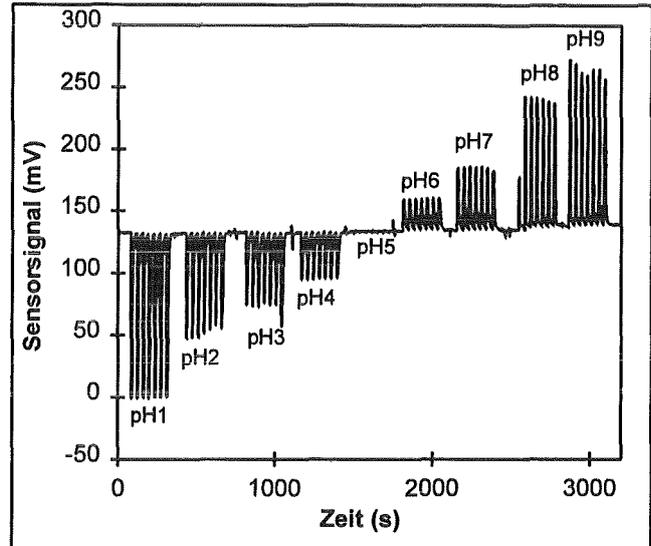


Abb. 10.: Meßsignale bei Variation des pH-Wertes des Analyten; Kalibrierlösung pH 5

Diese extreme Miniaturisierung führt bei geringem Lösungsverbrauch zu schnellen Analysenzyklen, wie sie für eine quasikontinuierliche Analyse bei schnellen chemischen Reaktionen erwünscht ist. Die Möglichkeit der Selbstkalibrierung sowie weitere elektronische Überwachungsfunktionen der aktuellen Leistungsparameter der elektrochemischen Sensoren sind Meilensteine auf dem Weg zu einer verbesserten Zuverlässigkeit der chemischen Mikrosensoren.

Mitbestimmend für zukünftige Applikationen ist die Verfügbarkeit einer Palette von Sensoren unterschiedlicher Sensitivität und Selektivität. Elektrochemische Mikrosensoren, die mit Hilfe von etablierten Dünnschichttechniken für die jeweilige Anwendung "maßgeschneidert" werden können, sind dabei aussichtsreiche Komponenten für die Systemintegration.

Der insgesamt modulare Aufbau des Systems sowie die Standardisierung der fluidischen und elektrischen Schnittstellen ermöglicht auch die Kombination von ELMAS-Komponenten mit anderen Mikrokomponenten. So kommen die Pumpenmodule inzwischen auch in einem optischen Schadstoffanalysator zum Einsatz [12]. Dies zeigt, daß eine schnelle und flexible Anpassung an die jeweilige Meßaufgabe möglich ist und komplexe Mikrosysteme für die Anwendung in der Medizin und Umweltanalytik aufgebaut werden können.

Literatur:

- [1] A. van den Berg, P. Bergveld (edit.): Proceed. of the Micro Total Analysis Systems Workshop Twente, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 1994

- [2] R. S. Muller, R. T. Howe, S. D. Senturia, R. L. Smith, R. M. White (edit): *Microsensors*; IEEE Press, New York, 1990
- [3] W. Hoffmann, H. Eggert, W. K. Schomburg, D. Seidel: *Elektrochemisches Mikroanalysensystem für die Ionometrie von Flüssigkeiten*, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5238 (1993)
- [4] W. Göpel, T.A. Jones, M. Kleitz, J. Lundström, T. Sayama (edit.): *Chemical and Biochemical Sensors, Part I*, Verlag Chemie, Weinheim, New York, Basel, Cambridge, 1991
- [5] W. Hoffmann, R. Rapp, H. J. Ache, D. Stolze, D. Neuhaus, D. Hofmann, K. H. Freywald: *Modular Potentiometric Measuring System for the Development and Comfortable Testing of Miniaturized Ion Sensors*, in [1], 219
- [6] M. J. Schöning, M. Bruns, W. Hoffmann, B. Hoffmann, H. J. Ache: *Iodide ion-sensitive field effect structures*, *Sensors and Actuators B*, 15-16 (1993) 192
- [7] R. Becht, M. Bruns, W. Hoffmann, H. J. Ache: *Sodium Ion Sensitive Membranes for Microsensors Fabricated by R. F. sputtering technique*, Abstract of 44th ISE Meeting, Berlin, 1993, 199
- [8] E. Bychkov, M. Bruns, H. Klewe-Nebenius, G. Pfennig, W. Hoffmann, H. J. Ache: *Copper(II)ion-selective thin films for chemical microsensors based on sputtered copper-arsenic-selenium glass*, *Sensors and Actuators B*, 24-25 (1995) 738
- [9] A. Spickermann, H. Müller: *Anwendung von Photopolymeren zur Präparation von Matrixmembran-Mikroelektroden*, Abstract Anacon '95, Schliersee, 1995
- [10] B. Büstgens, W. Bacher, W. Bier, R. Ehnes, L. Keydel, D. Maas, R. Ruprecht, W.K. Schomburg: *Micromembrane Pump Manufactured by Molding*; Proceed. of the 4th internat. Conf. On New Actuators, Actuator '94 Bremen, 1994, 86
- [11] W. Süß, H. Eggert, M. Gorges-Schleuter, W. Jakob, W. Hoffmann: *Modelling of a microsystem for the detection of ions in fluids*, 2nd Ann. Int. i-Logix Conf., Burlington, 1993
- [12] J. Mohr, B. Büstgens, C. Müller, M. Steppudat, D. Radloff, J. Reichert, S. Schoof, O. Fromhein, T. Kühner: *Optochemisches Mikroanalysensystem für die Umweltüberwachung*, 2. Statuskolloquium Mikrosystemtechnik, Karlsruhe, 1995, dieser Tagungsband

Experimenteller Telemanipulator für die minimal invasive Chirurgie

U. Voges¹⁾, P. Dautzenberg²⁾, U. Kühnapfel¹⁾, B. Neisius²⁾, M. Schmitt¹⁾,
R. Trapp²⁾, Th. Vollmer¹⁾

¹⁾ Institut für Angewandte Informatik (IAI)

²⁾ Hauptabteilung Ingenieurtechnik (HIT)

Zusammenfassung

In der Chirurgie geht beim Übergang von der offenen zur minimal invasiven Operation die räumliche Sicht, die freie Beweglichkeit und das Tastgefühl für den Chirurgen verloren. Um hierbei Abhilfe zu schaffen, wurde ein experimenteller Telemanipulator entwickelt, der neben der Rückgewinnung der räumlichen Sicht durch den Einsatz vom 3D-Endoskop eine erhöhte Beweglichkeit im Operationsgebiet durch ein flexibles Instrument gestattet. Der MIC-Telemanipulator ARTEMIS mit seinen Hauptkomponenten Bediensystem, Steuerungssystem und Arbeitssystem wird beschrieben. Ebenso wird auf den separaten MIC-Trainer eingegangen. Die Vermarktung von Einzelkomponenten hat bereits begonnen. Eine ausführliche Evaluierung des experimentellen MIC-Telemanipulators ist im Gange und Voraussetzung für die weitere Entwicklung, die neben der Anpassung an die klinischen Notwendigkeiten auch die Integration von Sensorik und Aktorik für das Tastgefühl vorsieht.

1. Aufgabenstellung

In der minimal invasiven Chirurgie (MIC) gehen dem Chirurgen gegenüber der offenen Operation einige Fähigkeiten verloren:

- die räumliche Sicht fehlt, da der direkte Blick auf das Operationsgebiet nicht mehr möglich ist.
- die Bewegungsmöglichkeiten sind eingeschränkt, da mit langen starren Instrumenten durch kleine Öffnungen gearbeitet wird; außerdem ist eine derartige Instrumentenhandhabung schwierig und wenig intuitiv.
- der direkte Zugriff auf das Gewebe und die Organe mit den Fingern ist nicht mehr möglich, und damit ist das Tasten und Fühlen verloren gegangen.

Es soll gezeigt werden, daß durch den Einsatz von Telepräsenz- und Telemanipulationstechniken dieser Verlust wettgemacht wird und der Chirurg außerdem in die Lage versetzt wird, die Qualität, die Effizienz und die Einsatzmöglichkeiten minimal invasiver Eingriffe im Vergleich zur manuellen Arbeitsweise zu steigern und das Operationsrisiko zu verringern. Dies soll zunächst für das Anwendungsgebiet "Laparoskopie", die endoskopische Chirurgie des Bauchraums, am Pelvitainer demonstriert werden.

2. Entwicklungsziel

Ziel der Entwicklungsarbeiten der vergangenen Jahre war es, ein integriertes System, bestehend aus einem ergonomischem MIC-Arbeitsplatz (Mensch/Maschine-

Interface, MMI), einer Arbeitseinheit mit chirurgischem Effektor und einem Endoskop-Führungssystem mit 3D-Video-Endoskop zu realisieren.

Über Schnittstellen zum Einlesen von Modell- und Tomographiedaten soll ein ebenfalls integrierter graphischer Simulator Modelle des Bauchraumes und der chirurgischen Effektoren in realistischer Darstellung erzeugen. Dadurch soll die Darstellung von Operationsvorgängen in Realzeit für Trainingszwecke und zur Operationsvorbereitung ermöglicht werden. Außerdem soll der Chirurg während der Operation einen zusätzlichen Überblick über die Lage der einzelnen Instrumente zueinander erhalten (Monitoring).

Das für die Integration des Gesamtsystems verantwortliche Steuerungskonzept soll so strukturiert sein, daß es die bedarfsorientierte Zuordnung von Eingabeeinheit und Arbeitseinheit während der Operation nach dem Universalmaster-Konzept zuläßt. Dies soll es ermöglichen, daß von ein und demselben Eingabegerät (Master) kinematisch unterschiedliche Arbeitseinheiten gesteuert werden können.

Die einzelnen Einheiten (Bediensystem, Arbeitseinheiten, MMI) sollen über eine standardisierte, flexible Verkabelung miteinander vernetzt sein, um die Übertragung von multimedialer Information (Steuerdaten, Audio, Video) zwischen den einzelnen Einheiten zu unterstützen.

3. Ausgangssituation

Im klinischen Einsatz befinden sich zur Zeit Geräte und Instrumente, die bei minimal invasiven chirurgischen Eingriffen ausschließlich die manuelle Arbeitsweise des Chirurgen unterstützen und den Wirkungsbereich innerhalb des Körpers stark einschränken. Z. T. tragen rein mechanische Haltevorrichtungen zur Entlastung des Assistenzpersonals und des Chirurgen bei, so daß sich dieser auf das in der Regel beidhändige manuelle Arbeiten konzentrieren kann. So muß bei der Laparoskopie z. B. der Bauchdurchstichpunkt als invarianter Punkt querkräftfrei gehalten werden und darf nicht als Hebellager für das Instrument benutzt werden. Das führt dazu, daß z. T. beidhändiges Arbeiten mit nur einem Instrument erforderlich ist. Diese Arbeitsweise erfordert extremes handwerkliches Geschick des Chirurgen; starre Instrumente, unergonomische Arbeitshaltung und nicht optimal eingestelltes Sichtfeld des Video-Endoskops erschweren die Arbeit und beeinflussen somit die Qualität des Operationsergebnisses und letztlich das Operationsrisiko [1].

Ähnlich gelagerte Problemstellungen im technischen Bereich führten zur Entwicklung von sogenannten Telepräsenzsystemen, die es dem Menschen möglich machen, in unzugänglichen Räumen zu agieren. Derartige Systeme waren im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt worden und beinhalten als wesentliche Komponenten Telemanipulations- und Sichtsysteme.

Beide Systemkomponenten arbeiten mit computerbasierter Steuerung/Regelung, die u. a. ein automatisches Kamera-Tracking (Kamera verfolgt automatisch den Effektor der Arbeitseinheit), die Bedienerführung über Bildschirmgraphik und die schritthaltende Überprüfung von Sicherheitskriterien ermöglicht. Zusätzlich verfügen die Telemanipulatorsteuerungen über rechnerunabhängige Sicherheitseinrichtungen, die das Risiko auch bei Rechnerausfall auf ein Minimum reduzieren. Die Realisierung der oben genannten Entwicklungsziele wird insbesondere durch das Steuerungskonzept MONSUN (Manipulator CONTROL System Utilizing Network Technology) unterstützt; MONSUN definiert eine offene Systemarchitektur, die es ermöglicht, Arbeitseinheiten, graphische Überwachungssysteme, Sichtsysteme und Benutzer-Interfaces mit integrierten Eingabegeräten (Master-Manipulatoren) bedarfsorientiert miteinander zu kombinieren und kommunizieren zu lassen.

Das graphische Simulationssystem KISMET (Kinematical Simulation, Monitoring and Off-line Environment for Telerobotics) zur Simulation von dynamischen Vorgängen auf der Basis von CAD-Modellen war für die Anwendung in der Kerntechnik

entwickelt worden. Es wurde für den Einsatz in der Medizintechnik angepaßt.

4. Entwicklungsstand

Auf der Basis umfangreicher Voruntersuchungen (Systemanalyse MIC-OP [1], Vorversuche zur Teleoperation mit dem existierenden Telepräsenzsystem DISTEL [2] und Simulationsuntersuchungen mit dem graphischen Modellierungssystem KISMET [3]) wurden erste Anforderungsspezifikationen für Arbeitseinheiten, Endoskop-Führungssystem, Bedieneinheiten und MMI abgeleitet, die jedoch nicht vollständig sind und nur schrittweise anhand von Erfahrungsauswertungen aus Experimenten mit prototypischen Systemen komplettiert werden können [4].

Entsprechend ist das Ende 1995 realisierte System ARTEMIS (Advanced Robotics and TELEmanipulator System for Minimally Invasive Surgery) ein Funktionsmuster, das die prinzipiellen Möglichkeiten der Telepräsenztechnik für die Minimal Invasive Chirurgie zu demonstrieren gestattet und zur Vervollständigung der Anforderungsspezifikationen herangezogen werden soll.

ARTEMIS stellt eine Übernahme und Adaption des Telemanipulationskonzepts und des Telepräsenzsystems aus früheren Entwicklungen dar. Die Kinematiken der Arbeitseinheiten wurden aus sicherheitstechnischen Gründen so entwickelt, daß der invariante Punkt mechanisch querkräftfrei gehalten wird. Weitere realisierte Sicherheitskomponenten sind eine rechnerunabhängige programmierbare Überwachung sowohl des gesamten Steuerungssystems als auch der einzelnen Achsen, u. a. durch redundante Positions- und Geschwindigkeitsmessung.

Der Hardware des Steuerungssystems von ARTEMIS liegt eine auf Flexibilität, Modularität und Erweiterbarkeit ausgelegte Konzeption zugrunde. Der Einsatz von zusätzlicher Sensorik und Feldbus ist leicht möglich. Die Software ist weitgehend in einer objektorientierten Programmiersprache verfaßt, beinhaltet ein modulares und erweiterbares Steuerungskonzept und ist auf andere Betriebssysteme adaptierbar. Die MONSUN-Fähigkeit der einzelnen Komponenten stellt ein wesentliches Merkmal dar, damit eine offene Kommunikation zwischen ihnen möglich ist.

Die Umsetzung des Universalmaster-Konzepts, d. h. daß die Kinematik von Bedieneinheit (Master) und Arbeitseinheit (Slave) nicht übereinstimmen muß und mit einem Master kinematisch unterschiedliche Slaves bedient werden können, ist eine wesentliche Eigenschaft von ARTEMIS.

Die Hauptkomponenten von ARTEMIS sind (vgl. Abb. 1):

- das Bediensystem,
- das Steuerungssystem und
- das Arbeitssystem.

Sie werden im folgenden detaillierter beschrieben.

- der graphischen Bedienoberfläche, auf der die Zustandsübersichten über die einzelnen Systeme zur Verfügung gestellt werden sowie die verschiedenen Geräte eingestellt werden können, und
- dem graphischen Simulationssystem (KISMET), mit dessen Hilfe der Chirurg z. B. ein aktuelles synthetisches Bild von der Lage der Instrumente und Organe erhalten kann.

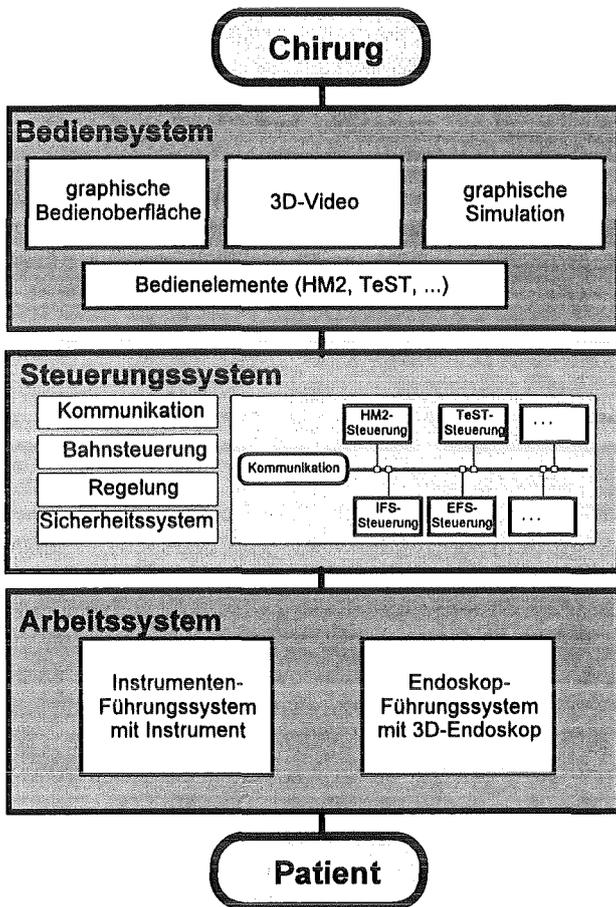


Abb. 1: Struktur von ARTEMIS

4.1 Das Bediensystem

Durch den Einsatz eines Telemanipulationssystems wird der Chirurg seinen Arbeitsplatz vom Operationstisch wegverlagern. Damit einher geht die Notwendigkeit, einen neuen Arbeitsplatz einzurichten, von dem aus der Chirurg nicht nur die einzelnen Instrumente und Geräte bedienen kann, sondern auch den Patienten immer noch im Blickfeld hat. Daher wurde ein Bediensystem entwickelt, das diesen Anforderungen genügt. Das Bediensystem als Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMI) besteht aus

- der eigentlichen Bedieneinheit, dem Master (HIT-Master-2 bzw. TeST), mit dem der Chirurg das Instrumentenführungssystem inkl. Instrument steuert oder auch das Endoskop führt,
- dem 3D-Videoschirm für das Endoskopbild,

Neben den Bedieneinheiten, den Mastern, zur Steuerung der chirurgischen Instrumente sind weitere Eingabegeräte als Bedienelemente vorhanden, die für die Endoskop-Führung verwendet werden können oder auch für die Bedienung der graphischen Bedienoberfläche. So ist die Spracheingabe oder ein Fußpedal für die Endoskop-Führung vorgesehen, und ein weiteres Fußpedal erlaubt analog zu einer Computermaus das Navigieren durch die Benutzermenues der graphischen Bedienoberfläche.

Auf einem großen Bildschirm wird das Endoskopbild in 3D-Qualität bereitgestellt [5]. Parallel zu diesem 3D-Bild kann ein kleineres 2D-Bild in die graphische Bedienoberfläche integriert werden.

Das graphische Realzeit-Simulationssystem KISMET dient sowohl als Monitoring-Einheit, d. h. es zeigt das Bild einer virtuellen Kamera von den Instrumenten, wie auch als virtuelle Arbeitseinheit. Damit ist die Simulation einer Operation möglich: unterschiedliche Operationsabläufe mit Interaktion der verschiedenen Instrumente können in simulierter Umgebung, aber mit echter Bedienung der Instrumente durchgespielt werden.

4.2 Das Steuerungssystem

Das Steuerungssystem sorgt für die Kooperation zwischen dem Bediensystem auf der einen Seite und dem Arbeitssystem auf der anderen, und zwar unabhängig davon, welche Bedieneinheit als Master mit welcher Arbeitseinheit als Slave gekoppelt ist. Hier ist das Universalmasterprinzip realisiert. Die Kinematik von Master und Slave kann unterschiedlich sein. Es können verschiedene Steuerungsverfahren (z. B. Weltkoordinaten, Bildschirmkoordinaten) und Funktionen (wie Skalierung und Indexing) ausgewählt werden.

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Einheiten ermöglicht einen Daten- und Informationsaustausch, so daß nicht nur das Monitoring, sondern auch Funktionen wie Kameratracking realisiert wurden.

Vorgegebenen Bahnen können nachgefahren werden, so daß einige Grundfunktionen halbautomatisch realisiert werden können. Hierzu zählt z. B. das

Herausfahren der Instrumente wie auch beim Endoskop das Anfahren von vorgegebenen Positionen. Die Regelung von Lage, Geschwindigkeiten und Kräften erfolgt auf Gelenkebene, und die Kompensation von Kräften und Verlusten, z. B. durch Reibung, ist realisiert.

Die Sicherheit des gesamten Systems wird auf verschiedenen Ebenen gewährleistet. In die Hardware sind spezielle Karten integriert, die alle Motoren und Sensoren, die z. T. redundant ausgelegt sind, überprüfen und Fehler somit rechtzeitig erkennen und zu einem Abschalten des Systems führen. Neben dieser hardwareseitigen Sicherheit werden zusätzlich in der Software umfangreiche Überprüfungen vorgesehen, die dazu führen, daß das Telemanipulations-system keine unvorhergesehenen und ungewollten Aktionen macht.

4.3 Das Arbeitssystem

Das Arbeitssystem ist am Operationstisch angebracht und beinhaltet

- das Instrumenten-Führungssystem (IFS) TISKA mit einem integrierten auswechselbaren Instrument (wahlweise z. B. ein starres oder ein flexibles Instrument mit unterschiedlichen Effektoren),
- das Endoskop-Führungssystem (EFS) ROBOX mit einem 3D-Endoskop.

Anstelle des Endoskop-Führungssystems ROBOX mit dem integrierten 3D-Video-Endoskop kann auch das Endoskop-Führungssystem FIPS mit einem 2D-Video-Endoskop eingesetzt werden, das derzeit allerdings noch nicht monsunfähig ist, sondern über eine spezielle Steuerungsvorrichtung verfügt.

Instrumenten-Führungssystem und Endoskop-Führungssystem sind Telemanipulatoren, die über in den Arbeitsplatz integrierte Eingabegeräte vom Chirurgen geführt werden. Zur mechanischen Garantie des Bauchdurchstichpunktes als invarianten Punkt haben die Telemanipulatoren aus Sicherheitsaspekten eine zwangsgeführte Kinematik.

In Abb. 2 ist das Arbeitssystem am Operationstisch zu sehen: auf dem Operationstisch steht als künstlicher Bauch ein sogenannter Pelvitainer, und am OP-Tisch sind das IFS TISKA und das EFS ROBOX befestigt. Das Instrument und das 3D-Endoskop ragen in den Pelvitainer hinein. An der Wand ist das 3D-Endoskopbild zu sehen.

4.4 Die Integration

Um die Integration zu ermöglichen, haben die einzelnen Komponenten von Bediensystem und

Arbeitssystem jeweils eine monsun-kompatible Schnittstelle. Damit kann das Kommunikationssystem für den monsun-konformen Informationsaustausch zwischen den verteilten Steuerungseinheiten des ARTEMIS-Systems sorgen.

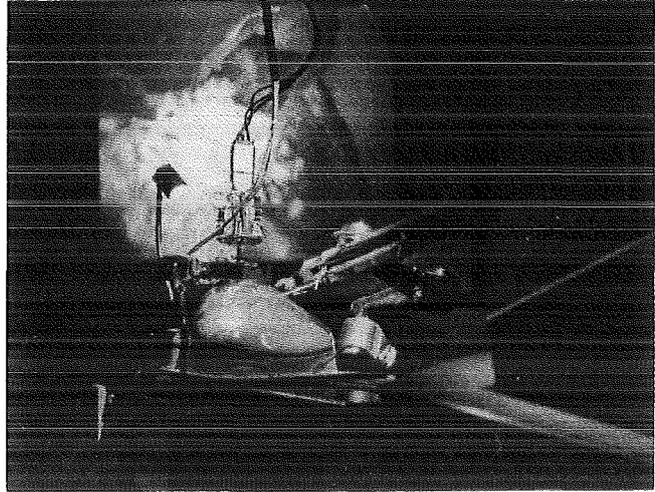


Abb. 2: ARTEMIS-Arbeitssystem

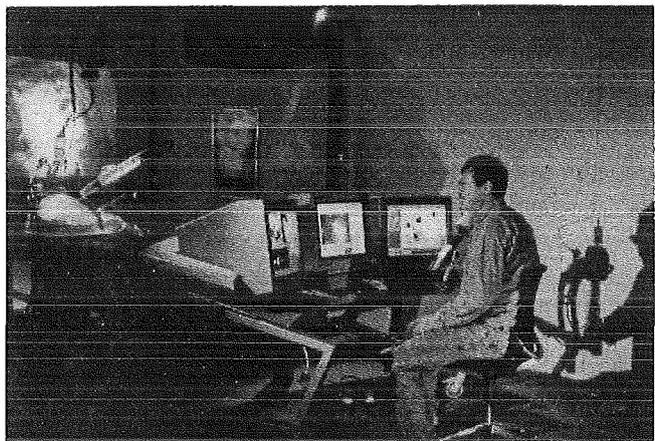


Abb. 3: Experimenteller Gesamtaufbau von ARTEMIS

Abb. 3 zeigt den derzeitigen Experimentalaufbau im Forschungszentrum. Am Operationstisch sind das Instrumenten-Führungssystem TISKA und das Endoskop-Führungssystem ROBOX mit einem Pelvitainer zu sehen, im Hintergrund die Leinwand mit dem 3D-Endoskopbild. Im Vordergrund sitzt die Bedienperson am Bedienpult und führt mit einer Hand den HIT-Master-2 (dessen Schatten an der Wand die Kinematik verdeutlicht). Auf den drei Bildschirmen sind

- links die allgemeine Gerätesteuerung (für Insufflator, HF-Gerät, Videogerät, etc.) sowie Röntgenbild o. ä.,
- in der Mitte das 2D-Endoskopbild mit zusätzlicher Information über die Einstellungen von Master und Slave, sowie
- rechts die KISMET-Monitoring-Einheit zu sehen.

Master (Bedieneinheit) und Slave (Arbeitseinheit) verfügen über ihre jeweilige zugeordnete Steuerung; die Kommunikation dieser Steuerungskomponenten untereinander erfolgt über die o. g. standardisierte Kommunikationsschnittstellen unter Verwendung eines LAN (Local Area Network). Das LAN unterstützt die Übertragung multimedialer Informationen zwischen Arbeitseinheiten und MMI (Steuerdaten, Audio, Video).

4.5 Der MIC-Trainer

Der MIC-Trainer ist eine weitere Komponente des Systems, die aber eine eigenständige Einheit darstellt. Es handelt sich hierbei um die Kombination einer dem Pelvitainer ähnlichen Bedieneinheit mit dem Simulationssystem KISMET. Ziel dieses Systems ist es, für den lernenden MIC-Chirurgen eine Übungs-umgebung bereitzustellen, die ohne echte Organe auskommt, aber dennoch sehr realitätsnah z. B. die Gallenblasenentfernung zu trainieren gestattet [6].

Dazu wurde auf der Eingabeseite eine Trainingsbox entwickelt, die äußerlich die gewöhnlichen Instrumentengriffe sowie ein Endoskop zeigt, im Inneren aber keine Effektoren, sondern Sensoren besitzt, die die entsprechenden Informationen über die Stellung der Instrumente und die Aktionen an das Simulationssystem KISMET weiterleitet.

KISMET berechnet die Auswirkungen der Aktionen auf die Organe und das Gewebe und zeigt auf dem Monitor in Realzeit das simulierte Innenbild des Bauches. Dabei besitzen die Organe Elasto-Dynamik, d. h. die Verformungen, die durch die Eingriffe mit den Instrumenten verursacht werden, sind auf dem Bildschirm realitätsnah sichtbar. So kann das komplette Herauslösen der Gallenblase geübt und dargestellt werden. Das Durchtrennen von Gefäßen sowie das Setzen von Clips ist ebenfalls möglich.

5. Wirtschaftliche Anwendung des MIC-Teleskopmanipulators und seiner Komponenten

Mit einer klinischen Erprobung des integrierten Gesamtsystems ist nicht vor 1998 zu rechnen, da noch umfangreiche Anpassungsarbeiten im vorklinischen Einsatz durchgeführt und in Experimenten verifiziert werden müssen. Das derzeitige System ist zwar für die Laparoskopie, insbesondere die Gallenblasenoperation ausgelegt. Der hierbei erzielbare wirtschaftliche Nutzen wird aber gering sein. Die gewonnenen Erfahrungen sollen aber dazu genutzt werden, andere Operationsgebiete für die minimal invasive Chirurgie zu erschließen, die bislang mit der herkömmlichen MIC-Technik wegen der Nachteile der MIC-Operation gegenüber der offenen Operation nicht realisierbar waren. Da die Teleskopmanipulation diese Nachteile

beseitigen soll, können hier neue Möglichkeiten erschlossen werden.

Einzelkomponenten und Subsysteme von ARTEMIS sind zum Teil schon als produktnahe Prototypen verfügbar oder werden bereits über Lizenznehmer vermarktet. So gibt es für folgende Entwicklungen Lizenznehmer:

- 3D-Video-Endoskop,
- manuelles Endoskop-Führungssystem ROBOX,
- angetriebenes Endoskop-Führungssystem FIPS,
- Modellierungssystem KISMET,
- diverse Haltesysteme, abgeleitet aus dem mechanischen TISKA-Aufbau,
- diverse chirurgische Effektoren.

Weitere Lizenzvereinbarungen sind in Vorbereitung, so z. B. zum Thema Ein-Kamera-3D-Video-Endoskop.

Weiterhin besteht eine Kooperation in bezug auf die Integration des Teleskopmanipulationssystems in den Operationssaal, insbesondere bezüglich der Ankopplung an den Operationstisch.

6. Perspektive

ARTEMIS in seiner derzeitigen Realisierung bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Aspekte zu demonstrieren und zu evaluieren. Dazu zählen

- die Teleskopmanipulation: auch über größere Entfernungen zwischen Bediensystem als Master und Arbeitssystem als Slave ist eine Operation möglich.
- das Universalmasterprinzip: Master und Slave können unterschiedliche Kinematiken haben.
- die Ergonomie: verschiedene Handgriffe an der Bedieneinheit können wahlweise genutzt werden.
- das Instrument: flexibles und starres Instrument mit unterschiedlichen Effektoren können eingesetzt werden.
- das Bedienkonzept: für die Endoskop-Führung stehen unterschiedlichste Eingabeeinheiten zur Verfügung.

Das in ARTEMIS realisierte und hier demonstrierte Systemkonzept für den zukünftigen MIC-OP wird einer gründlichen Erprobung und Evaluierung mit dem Ziel einer vollständigen Abdeckung aller Anforderungen aus dem Bereich der laparoskopischen Chirurgie unterzogen werden.

Weiterentwicklungen gehen u. a. in Richtung auf eine verfeinerte Kraftreflexion bis hin zur Ermöglichung des feinfühligsten Tastens. Unterschiedliche Bedienkonzepte sollen experimentell erprobt werden. Die Realisierung der Zwei-Hand-Bedienung ist eine weitere Forderung der Chirurgen. Fernerhin soll ein Chirurgen-Informations- und Konsultationssystem in das Konzept integriert werden.

Wenn es gelingt nachzuweisen, daß mit ARTEMIS MIC-Eingriffe bei vergleichbaren Kosten besser und sicherer als mit der manuellen Arbeitsweise durchgeführt werden können, ist das gesteckte Ziel erreicht.

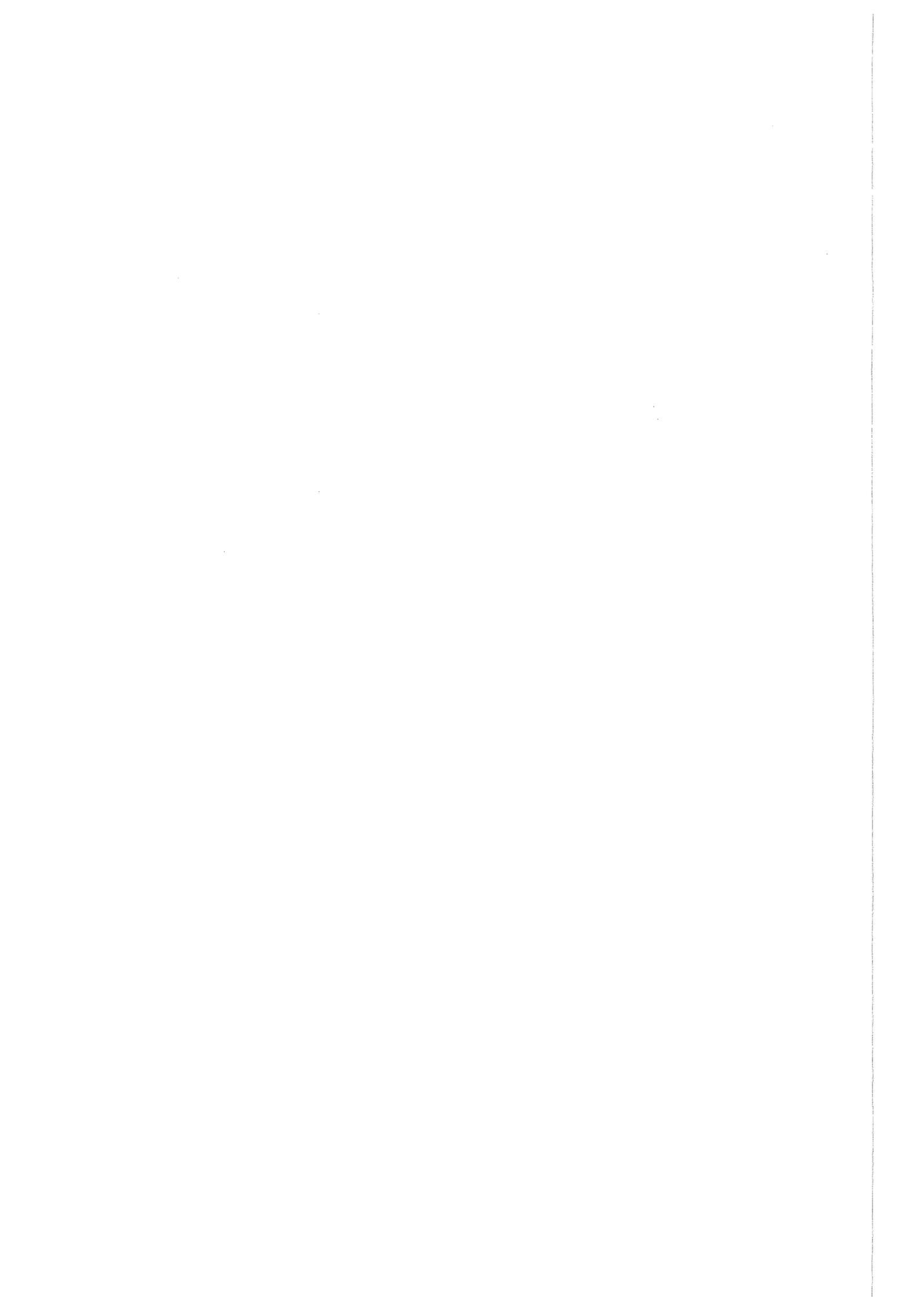
Berücksichtigt man die Vermarktung von "Spin-Off"-Entwicklungen aus dem Umfeld von ARTEMIS, so kann der Demonstrator bereits zum jetzigen Zeitpunkt als Erfolg gewertet werden.

7. Danksagung

Der hier beschriebene Demonstrator „Experimenteller Telemanipulator für die minimal invasive Chirurgie“ wäre nicht in der zur Verfügung stehenden Zeit zu dem geworden, was jetzt zu sehen ist, wenn nicht eine ganze Reihe von Personen bei der Erstellung mitgewirkt hätten. Neben unseren Kollegen im IAI und HIT sind die Mitarbeiter von HVT/HTL zu erwähnen, von denen u. a. die wesentlichen Teile der mechanischen Komponenten gefertigt wurden. Außerdem wurde dieses Projekt in enger Kooperation mit der Universität Tübingen, Sektion für minimal invasive Chirurgie (Prof. Bueß) durchgeführt. Die häufigen Diskussionen der medizinischen Anforderungen an das Telemanipulationssystem mit unseren Tübinger Partnern hat maßgeblichen Anteil an der Realisierung von ARTEMIS.

Literatur:

- [1] Voges, U., Schmitt, M.: Ist-Analyse vom Einsatz der minimal invasiven Chirurgie (MIC) im Operationssaal. Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1994.
- [2] Breitwieser, H., Müller, W., Schmitt, M.: DISTEL used as an Experimental Setup for Requirements Specification for a MIC-Telemanipulator System. CEAES, Köln, Juni 1993.
- [3] Kühnapfel, U., Neisius, B.: CAD-modellbasierte, graphische Echtzeit-Computersimulation für die endoskopische Chirurgie. KfK Nachrichten, Jahrgang 25, Heft 4, 1993, 201-206.
- [4] Holler, E., Englert, M., Neisius, B., Trapp, R.: Telepräsenzsysteme für die minimal invasive Chirurgie. KI 1994, 3: 33-41.
- [5] Becker, H., Melzer, A., Schurr, M.O., Bueß, G.: 3-D Video Techniques in Endoscopic Surgery. Endoscopy 1992, 25: 40-46.
- [6] Kühnapfel, U., Krumm, H.G., Kuhn, C., Hübner, M., Neisius, B.: Endosurgery Simulations with KISMET: A Flexible Tool for Surgical Instrument Design, Operation Room Planning and VR Technology based Abdominal Surgery Training. Virtual Reality World '95, Computerwoche Verlag München, 165-171.



Medizintechnik



Operationssysteme für die minimal invasive Chirurgie

Elmar Holler

Institut für Angewandte Informatik

Zusammenfassung

Das im Forschungszentrum Karlsruhe als Pilotsystem realisierte chirurgische Telemanipulatorsystem ARTEMIS ist ein erster wichtiger Meilenstein auf dem Weg zum "Operationssystem der Zukunft" für die minimal invasive Chirurgie, wenn unter Operationssystem die vollständige Integration der medizingerätetechnischen Einrichtung des Operationssaales einschließlich des OP-Tisches mit dem telechirurgischen System verstanden wird. Die Schritte zum Operationssystem für die minimal invasive Chirurgie werden durch die informationstechnische Gestaltung von ARTEMIS als "offenes, erweiterbares System" erleichtert. Die hierfür erfolgte Einführung von Standardschnittstellen muß jedoch auch auf die gerätetechnischen und mechanischen Schnittstellen ausgeweitet werden. Die Standardisierung darf jedoch nicht bei den Schnittstellen stehenbleiben, sondern muß auf ganze Komponenten ausgedehnt werden. Die Einführung standardisierter Kinematik-Baugruppen für Telemanipulatoren und Roboter im Operationssaal ("Service-Roboter für den OP") wäre ein Schritt, der einen wesentlichen Beitrag zur Kostenreduktion bei künftigen OP-Systemen leisten könnte.

1. Einführung

Die Vor- und Nachteile der minimal invasiven Chirurgie (MIC) gegenüber der offenen Chirurgie sind bekannt und wurden in der Vergangenheit vielfach diskutiert (vgl. auch [1]). Operationssysteme für die minimal invasive Chirurgie sollen durch die Einbringung von Telepräsenz- und Telemanipulationstechniken in den MIC-OP dem Chirurgen künftig wieder die Qualitäten der offenen Chirurgie erschließen: freie stereoskopische Sicht auf das Operationsfeld, Tastgefühl, Gefühl für die ausgeübten Kräfte, feinfühliges Arbeiten. Und darüber hinaus: bequemes Arbeiten in ergonomisch günstiger Position, Herausfiltern des Tremors der Hand, größere Sicherheit, bessere Arbeitsqualität. Im Mittelpunkt steht der Mensch: der Patient und auch der Chirurg. Daß diese Möglichkeiten prinzipiell unter Einsatz der System- und Informationstechnik verwirklicht werden können, zeigt der im Rahmen des Projektes Mikrosystemtechnik realisierte Demonstrator ARTEMIS (Advanced Robot and Telemanipulator System for Minimally Invasive Surgery). Im folgenden sollen, ausgehend von den in ARTEMIS als grundsätzlich machbar aufgezeigten Anforderungen, die nächsten Schritte diskutiert werden, die zum „Operationssystem der Zukunft für den MIC-OP“ führen.

2. Stand der Technik

Mit ARTEMIS ist es erstmals gelungen, einen integrierten Ansatz für die Nutzung aktueller Telepräsenz- und Telemanipulationstechniken im MIC-OP zu demonstrieren: Manipulatorsysteme für die Führung des chirurgischen Effektors und des 3-D-Videoendoskops wer-

den über das neue informationstechnische Steuerungskonzept MONSUN (Manipulator CONTROL Utilizing Network Technology) mit dem multimedialen Bediener-Interface MMI (Man Machine Interface), den darin für die Manipulatorführung integrierten Eingabegeräten und einem graphischen Simulator zu einem offenen und erweiterbaren Gesamtsystem verbunden [2]. Offen heißt hier, daß durch standardisierte Schnittstellen die Erweiterung des Systems um zusätzliche Arbeitsgeräte (Telemanipulatoren) und Eingabegeräte (Master-Manipulator, Spracheingabe, Joy-Stick, Pedal, Maus, sensorbasierte Führungssysteme) erleichtert wird, sofern die hinzukommenden Systemkomponenten ebenfalls über diese Standardschnittstelle verfügen. Diese „Offenheit“ des Systems, bisher auf informationstechnische Aspekte beschränkt, wird in MONSUN durch die Partitionierung der Steuerungsfunktionen und die Zuordnung dieser Partitionen zu den respektiven Systemkomponenten (Arbeitseinheiten, Eingabegeräte, MMI) erreicht: alle Komponenten der so entstehenden „Verteilten Manipulatorsteuerung“ kommunizieren über Standard-Kommunikationsschnittstellen (ETHERNET-LAN) unter Verwendung von standardisierten Nachrichten, deren Semantik auf die Manipulatorsteuerungsaufgabe zugeschnitten ist (Abb. 2.1). Dies ermöglicht auch die Integration virtueller Komponenten: so wird es in ARTEMIS möglich, unter Verwendung graphisch modellierter Arbeitseinheiten in einer ebenfalls graphisch modellierten Operationsumgebung MIC-Eingriffe zu simulieren; dies ermöglicht zum einen, MIC-Operationen mit ARTEMIS zu trainieren und zum anderen, Operationen vorzubereiten und kritische Situationen durchzuspielen.

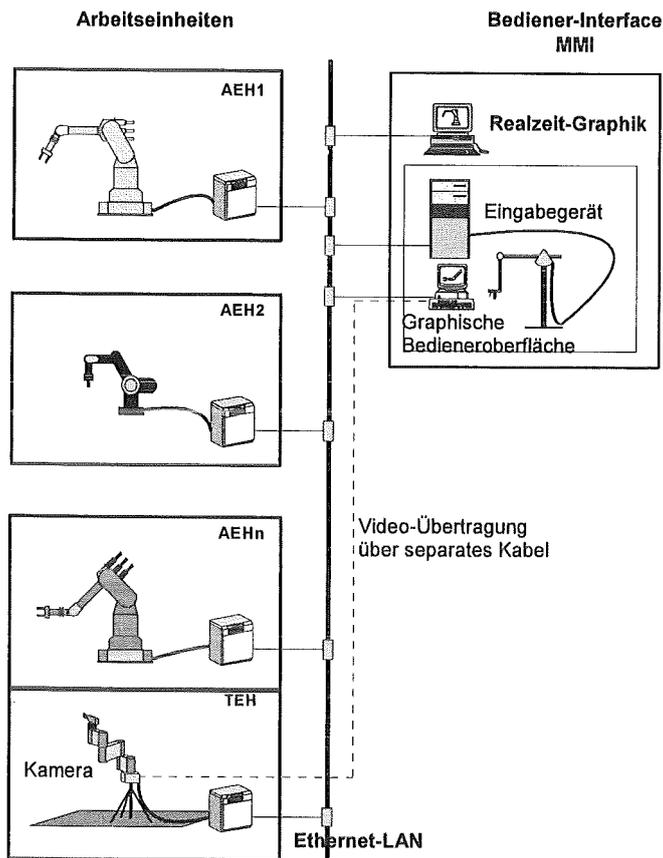


Abb. 2.1 : MONSUN-Konzept zur Steuerung von Manipulatoren und Robotern über ein lokales Kommunikationsnetz (LAN)

3. Von ARTEMIS zum Operationssystem

Im derzeitigen Stand der Entwicklung ist ARTEMIS ein noch nicht in die OP-Umgebung optimal eingebettetes System. Es fehlt die Integration der bereits im derzeitigen (konventionellen) MIC-OP vorhandenen Geräte, wie Lichtquellen, Insufflatoren, Koagulatoren, etc. und des zentralen Objektes im OP-Raum, des OP-Tisches. Während beispielsweise das Systemkonzept OREST (Abb. 3.1. [3]) schon einen Weg für die Geräteintegration im derzeitigen MIC-OP aufzeigt, ist die Integration von OP-Tisch und Telemanipulationssystemen noch weitgehend Neuland. Die Anforderungen an eine derartige Integration können jedoch präzisiert werden: der OP-Tisch muß in die Lage versetzt werden, die Telemanipulator-Arbeitseinheiten stabil und in der Grundposition justierbar aufzunehmen. Mehr noch als die problemlose Anbringung der Manipulatoren an, neben oder über dem OP-Tisch muß es möglich sein, diese Geräte im Falle des Auftretens von Komplikationen innerhalb kürzester Zeit aus der unmittelbaren OP-Tisch-Umgebung zu entfernen. Dies erfordert eine entsprechende Umgestaltung des OP-Tisches und seiner Umgebung.

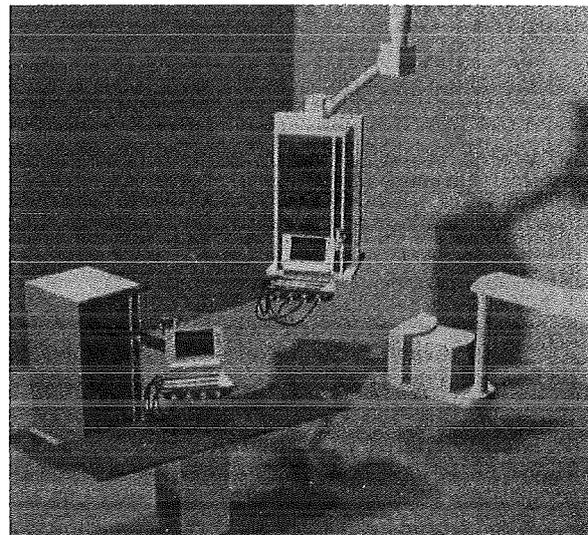


Abb. 3.1 : OREST-Systemkonzept für die Geräteintegration im OP (Quelle: DORNIER Medizintechnik und Universität Tübingen)

Ein weiterer, in ARTEMIS noch nicht berücksichtigter Aspekt ist der der Standardisierung der mechanischen und gerätetechnischen Schnittstellen wie auch der Aspekt der Standardisierung von Baugruppen für Manipulatoren.

Während ersteres eine konsequente Erweiterung des Konzeptes des „Offenen Systems“ darstellt (s.o.) ist die Einführung standardisierter Manipulatorbaugruppen der einzige, zu einer Kostenreduktion führende Weg: Baugruppenkonzepte, wie bereits bei Manipulatoren und Robotern für technische Anwendungen praktiziert, machen es möglich, an nahezu alle Anforderungen anpaßbare Kinematiken kostengünstig zu realisieren (vgl. Abb. 3.2).

Aus diesen Baugruppen könnten beispielsweise Endoskopführung, Instrumentenführung und Manipulatoren/Roboter für den Einsatz bei Hüftgelenksoperationen und Prostata-Resektionen aufgebaut werden. Im Gegensatz zu den bei industriellen Applikationen einsetzbaren kinematischen Baugruppen mit integrierten Antrieben werden jedoch für den Einsatz im MIC - OP Manipulator-Baugruppen benötigt, die durch extrem geringe Abmessungen und Antriebe hoher Leistungsdichte gekennzeichnet sind.

Eine weitere Anleihe aus der industriellen Robotik bietet sich an, um den Wechsel oder Austausch des chirurgischen Effektors (Faßzange, Schere, Nähmaschine, Endoskop) für den Chirurgen zu erleichtern: aufgebaut in Analogie zu einem Werkzeugwechselsystem (Abb. 3.3) könnte ein Instrumentenwechselsystem mit Instrumenten-Magazin den automatischen Instrumentenwechsel möglich machen.

Gleiche Kinematik bei Endoskop und Instrumentenführung würden dann auch den problemlosen Positionstausch zwischen Endoskop und Instrument (erforderlich bei einigen laparoskopischen Eingriffen) zulassen.

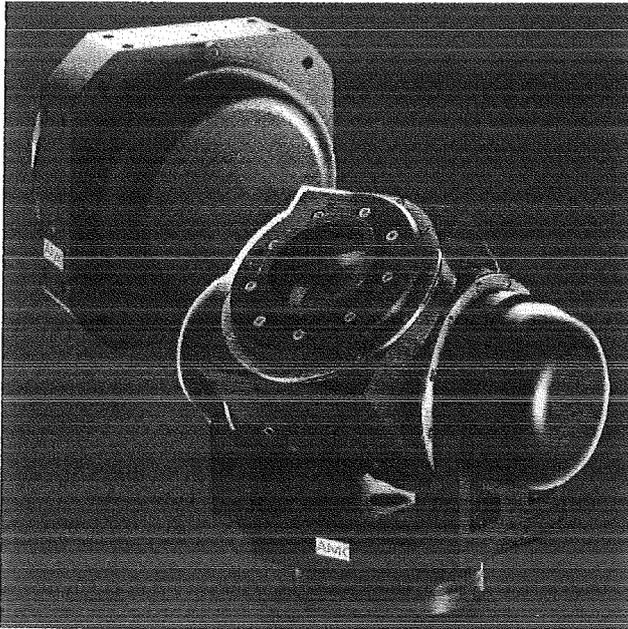


Abb. 3.2 : Baugruppen für Manipulatoren und Roboter: Einfachgelenk (li.) und Doppelgelenk (re.). Aus diesen Baugruppen lassen sich nahezu alle gängigen Knickarm-Kinematiken aufbauen. (Quelle: AMK)

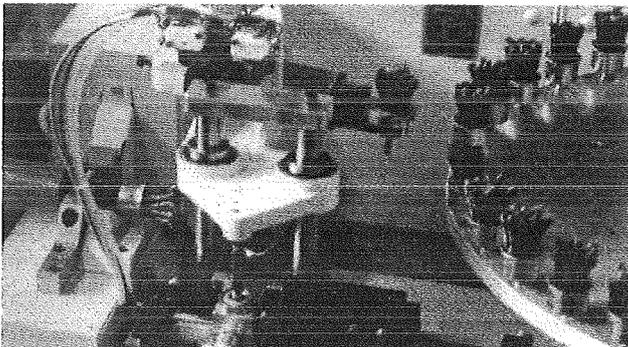


Abb. 3.3 : Werkzeugwechselsystem mit Werkzeugmagazin für Industrieroboter (Quelle: FEIN)

4. Informationstechnik für MIC - OP Systeme

Ohne die Informationstechnik sind systemtechnische Lösungen für den MIC - OP nicht denkbar:

- ARTEMIS zeigt die effiziente Realisierung der Steuerungs- und Regelungssoftware auf realzeitfähigen Rechnern unter Anwendung des Konzeptes für offene Systeme "MONSUN".
- Das in ARTEMIS zum Einsatz kommende Realzeit-Graphiksystem KISMET ermöglicht die Simulation von chirurgischen Eingriffen, wobei die anatomische Modellierung des Arbeitsraumes unter Rückgriff auf multimodale Bilddaten erfolgen kann.
- Die sichere Bedienung der komplexen Funktionalität des Operationssystems ARTEMIS wird durch Bedienungsführung mittels graphischer Bedienoberflächen gewährleistet.

Künftige Erweiterungen von ARTEMIS zu einem MIC-OP-System der Zukunft können auf dieser Basis auf-

bauen: die Erweiterung des MONSUN-Steuerungskonzeptes um die Fähigkeiten des automatischen Instrumentenwechsels können auf bereits realisierten Bausteinen für den Automatikbetrieb von Telemanipulatoren implementiert werden.

Zur Erleichterung der Orientierung des Chirurgen bei komplexen Eingriffen kann das Echtzeitgraphiksystem um Navigationshilfen erweitert werden. Dazu wird dem Bild des 3-D-Videoendoskops bzw. -Mikroskops ein durch Segmentierung der aus bildgebenden Verfahren stammenden Daten gewonnenes Bild überlagert.

Die Erweiterung des in ARTEMIS implementierten Kommunikationskonzeptes für MONSUN in Richtung Breitbandkommunikation wird es in absehbarer Zeit möglich machen, sowohl die Übertragung audiovisueller Daten für die Audio/Video-Beobachtung als auch die Übertragung digitaler Meßwerte und Steuerdaten über ein- und dasselbe Kommunikationsmedium zu realisieren (z.B. über ein Glasfaserpaar). Dies wird nicht nur die Installation ARTEMIS-ähnlicher Systeme in Kliniken erleichtern, sondern auch die Möglichkeiten telemedizinische Konsultation bei operativen Eingriffen eröffnen.

5. Ausblick

Operationssysteme für die minimal invasive Chirurgie müssen die Qualität der Arbeit des Chirurgen bei gleichzeitiger Minimierung des Risikos für den Patienten sichtbar anheben. Bis dieser Anspruch erfüllt werden kann, ist noch umfangreiche Entwicklungsarbeit zu leisten. Das Forschungszentrum Karlsruhe verfolgt, ausgehend von dem mit ARTEMIS dokumentierten Entwicklungsstand, zwei parallele Wege, um hierbei erfolgreich zu sein:

Gemeinsam mit kompetenten industriellen Partnern werden die Integrations- und Standardisierungsaspekte verfolgt. Im Rahmen eines europäischen Projektes werden mit internationalen Partnern, zu denen sowohl klinische Anwender als auch Industriefirmen aus den Gebieten Medizingerätetechnik und Informationstechnik gehören, die technischen Voraussetzungen zur informationstechnischen Integration der Operationssysteme in regionale und überregionale Verbundsysteme für telemedizinische Konsultation untersucht.

Literatur:

- [1] Voges, U. et al.: Telemanipulator für die minimal invasive Chirurgie, Forschungszentrum Karlsruhe, dieser Tagungsband
- [2] Holler, E., Breitwieser, H.: Telepresence Systems for Application in Minimally Invasive Surgery. Proceedings of Medicine Meets Virtual Reality II. San Diego, 1994
- [3] Schurr, M.O., Buess, G.: OREST II - Ergonomic Workplace and Systems Platform for Endoscopic Technologies, Endoscopic Surgery and allied Technologies, No.4, Vol.3, Aug.1995, p. 193

Instrumente und Führungssysteme für die endoskopische Chirurgie

R. Trapp, B. Neisius, B. Kneifel, M. Selig

Hauptabteilung Ingenieurtechnik

Zusammenfassung

Der Trend in der endoskopischen Chirurgie geht zu vielseitig einsetzbaren und intelligenteren Instrumenten, die eine Reduzierung der Operationskosten bei gleichzeitiger Erhöhung der Operationsqualität ermöglichen. Die zur Zeit verfügbaren starren Instrumente beschränken die Bewegungsfreiheit und ermöglichen somit kein optimales Operieren. Komplexe Aufgaben, wie z. B. das Anbringen einer endoskopischen Naht, erfordert hohe Geschicklichkeit und ist zeitaufwendig. Um Abhilfe zu schaffen, wurde ein endoskopisches Nähgerät entwickelt und im Tier- und Human- OP mit großem Erfolg erprobt. Um das Personal von Routinearbeiten, wie beispielsweise das Hochhalten von Organteilen sowie das Halten und Positionieren der endoskopischen Kamera zu entlasten, wurden universell einsetzbare Führungssysteme entwickelt.

1. Einleitung

Seit über 20 Jahren werden in der Hauptabteilung Ingenieurtechnik (HIT) Master-Slave-Manipulatoren und Geräte für die Handhabungstechnik entwickelt. Aufbauend auf diesen Erfahrungen wurde 1990 ein Kooperationsvertrag mit der Chirurgischen Klinik der Universität Tübingen und 1994 mit der LVA-Klinik Schillerhöhe in Gerlingen abgeschlossen. Ziel dieser Kooperationen sind zunächst die Verbesserung bestehender Geräte sowie die Neuentwicklung zukunftsweisender Instrumente und Geräte, um somit die Operationskosten zu senken und die Qualität der Operation zu erhöhen.

Im einzelnen wurden folgende Entwicklungen durchgeführt:

- Instrumentenentwicklung
 - Nähinstrumente
 - Kombinationsinstrumente
 - Clip und Clipzangen
 - Gewebeextraktoren
 - Instrumententräger für Ultraschalldiagnostik
 - Tastsensorsysteme
 - Klammernahtgerät
 - steuerbare Applikatoren für Laser/Wasserstrahl
 - mechanisch und elektrisch steuerbare Greifer und Führungsinstrumente
- Geräteentwicklung
 - Halte- und Führungssysteme
 - MIC-Trainer mit integrierter Sensorik und Aktorik
 - Teststand zur Darstellung von Sensorsignalen
 - Kraft-Momenten-Sensor

- Grundlagenentwicklungen
 - Regelungstechnik
 - a) Modellbildung und Simulation
 - b) Kompensation von Reibung und Lose
 - c) Kompensation der elastischen Verformung
 - d) Entwicklung alternativer Regelungsverfahren
 - Reinigung und Sterilisierung

Die langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Handhabungstechnik sowie die enge Kooperation mit Kliniken und Industriefirmen, ermöglicht es, neue zukunftsweisende Herausforderungen zügig und erfolgreich anzugehen. Langfristiges Ziel ist die Entwicklung eines Teleskopmanipulators [1,2], der die Vorteile der offenen Chirurgie mit denen der endoskopischen Chirurgie verbindet.

2. Instrumentenentwicklungen

Kaum eine Operationsmethode hat die Chirurgie in solchem Maße verändert wie die endoskopischen Verfahren. Die Größe der Zugänge in den Körper ist auf wenige Millimeter begrenzt. Dies ist eine Herausforderung immer neue komplexere Instrumente zu entwickeln. Gleichzeitig darf der Aspekt der einfachen Reinigbarkeit und Sterilisierbarkeit nicht vergessen werden.

2.1 Multifunktionales Instrument

Um die einzelnen Phasen einer endoskopischen Operation zu bewältigen, benötigt der Chirurg eine Vielzahl von verschiedenen Instrumenten. In der Hauptabteilung Ingenieurtechnik werden solche Instrumente nach den Anforderungen der Chirurgen neu- bzw. weiterentwickelt.

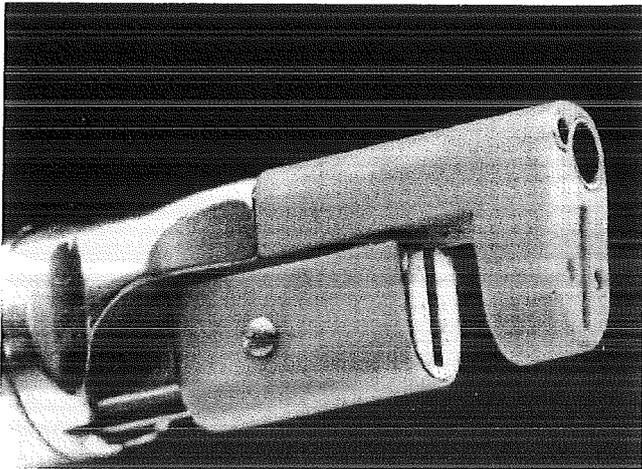


Abb. 1: Effektor des Multifunktionsinstrumentes

Das Multifunktionsinstrument (Abb. 1) vereint in sich die Grundfunktionen Absaugen, Spülen, Koagulieren und Schneiden. Durch die Kombination von Einzelfunktionen in ein Instrument wird die Notwendigkeit des häufigen Instrumentenwechsels eingeschränkt.

Das Instrument erlaubt die bipolare Koagulation des Gewebes und das präzise Durchtrennen in der Mitte der koagulierten Zone mit Hilfe einer eingebauten mechanischen Schneide. Zusätzlich sind ein Absaug- und ein Spülkanal auf der Stirnseite der Koagulationszange angeordnet. Durch den Einsatz des multifunktionalen Instrumentes wird ein zeitraubender Instrumentenwechsel vermieden und eine zügige und sichere Präparation ermöglicht. Das Multifunktionsinstrument ist leicht demontierbar, so daß eine zuverlässige Reinigung und Sterilisation gewährleistet ist.

2.2 Axiales Nahtgerät

Durch die eingeschränkte Bewegungsfreiheit in der minimal invasiven Chirurgie wird das Nähen erschwert. Die in der klassischen Chirurgie ausgeführten Bewegungen sind mit endoskopischen Instrumenten nicht oder nur unzureichend ausführbar. Das Nähen erfordert deshalb vom Chirurgen große Erfahrung und viel Geschick. Zu seiner Unterstützung wurde ein neuartiges Nahtinstrument (Abb. 2) entwickelt.

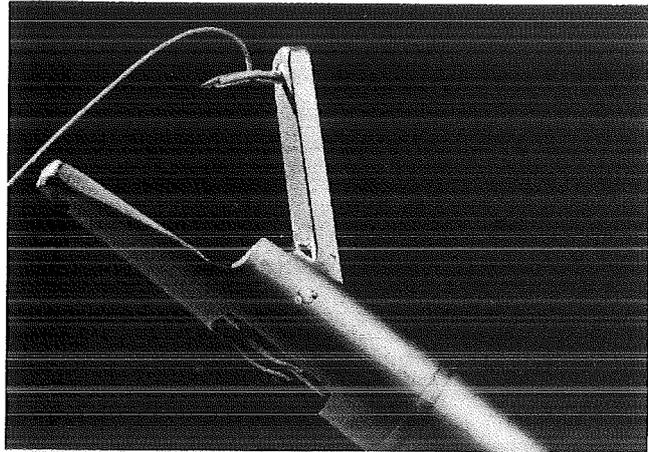


Abb. 2: Axiales Nahtgerät

Eine spezielle Nadel, die an beiden Enden konisch angespitzt ist und den resorbierbaren Faden in einer zentralen Querbohrung trägt, wird während des Nähvorgangs zwischen entsprechend ausgebildeten Backen hin und her übergeben, ähnlich einem Webschiffchen. Der Effektor des Instrumentes wird von einem starren und einem beweglichen Maulteil gebildet. Die formschlüssige Klemmung der Nadel erfolgt wechselseitig automatisch mit der Betätigung des Griffes.

Intrakorporale Knoten können mit dem Instrument ebenfalls gefertigt werden. Das Nahtinstrument gibt es in verschiedenen Ausführungen. Die Nadel wird in einer Konstruktion parallel zur Instrumentenlängsachse geführt, bei einer anderen Ausführung senkrecht zu dieser. Bei dieser Ausführung ist die Nadel gebogen (Abb. 2). Die Nadel kann sowohl einen runden als auch einen dreieckigen Querschnitt haben. Die Qualität des Stichkanals ist vergleichbar mit herkömmlichen Nahttechniken. Im Phantom- und Tierversuch wurde das Instrument erfolgreich getestet. Ein Lizenznehmer ist gefunden.

2.3 Steuerbarer Instrumententräger für die laparoskopische Ultraschalldiagnostik

Zur Verbesserung der intrathorakalen Diagnostik, insbesondere zur Beurteilung tiefer gelegener Strukturen, wurde ein steuerbarer Instrumententräger für die Ultraschalldiagnostik entwickelt und erprobt (Abb. 3). Mit ihm ist es möglich, eine Ultraschallsonde in die Brusthöhle einzuführen und an das zu untersuchende Organ anzulegen.

Die erste Ausführungsform besteht aus einem stufenlos abwinkelbaren distalen Ende zur Aufnahme der Micro-Convex Ultraschallsonde der Firma Picker, einem Hohlenschaft, in den das Sondenkabel eingelegt wird und einem Bediengriff. In den Bediengriff integriert ist ein elektromotorischer Antrieb, mit dessen Hilfe das distale Ende stufenlos um bis zu $\pm 90^\circ$ abgewinkelt werden kann.

Für die Reinigung bzw. Sterilisation können sowohl die Ultraschallsonde als auch der Antrieb vom Instrumententräger getrennt werden.

Durch diese Neuentwicklung wird eine hochauflösende endoskopische, laparoskopische und minimal invasive intraoperative Ultraschalldiagnostik möglich, denn erst die direkt auf dem Gewebe aufliegende Ultraschallsonde liefert die Echomuster, die für eine differenzierte Diagnostik erforderlich sind. Der Instrumententräger, der von einem Lizenznehmer auf dem Markt angeboten wird, wurde inzwischen vielfach zur Lokalisation intrapulmonaler und mediastinaler Tumoren erfolgreich eingesetzt [3].

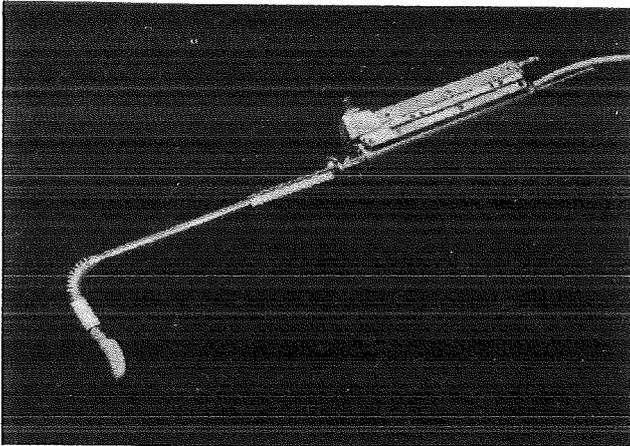


Abb.3 : Steuerbarer Instrumententräger für die laparoskopische und thorakoskopische Ultraschalldiagnostik

2.4 Tastsensorsystem zur Übertragung eines Palpationsbefundes von inneren Organen bei endoskopischen Operationen

Bei endoskopischen Operationen im Brustkorb oder im Bauchraum muß beim heutigen Stand der Technik der Verlust des Tastsinns als wesentlicher Nachteil akzeptiert werden. Ziel dieser Entwicklung ist, die Nachteile dieser Operationstechnik durch technische Innovation auszugleichen.

Obwohl vor jeder Operation durch bildgebende Verfahren versucht wird, die Verhältnisse im Körperinneren wiederzugeben, ist der Tastsinn des Operateurs noch immer das maßgebende diagnostische Hilfsmittel mit der besten Sensibilität und vor allem hat der Chirurg gelernt, sich durch das Austasten des zu operierenden Organs und seiner Nachbarschaft ein „Bild“ des Operationsfeldes zu verschaffen.

Ziel der Entwicklung ist es, für die endoskopischen Operationen Instrumente verfügbar zu machen, mit denen das Tasten als diagnostisches Hilfsmittel wieder zur Verfügung steht.

Als ersten Schritt gilt es, einen instrumentellen Ersatz für die direkte manuelle Palpation innerer Organe zu schaffen. Die Vorstellung dabei ist, daß man sich die Transformation TASTSINN - SEHSINN zunutze macht, um Konsistenzunterschiede im Gewebe darzustellen.

Das Tasten erfolgt durch Überstreichen des zu untersuchenden Gewebes mit fächerförmig am distalen Ende des Instrumentes angeordneten Tastarmen. Dabei wird die Verbiegung der Tastarme über Dehnungsmeßstreifen erfaßt und nach entsprechender elektrischer Verarbeitung dem Chirurgen auf dem Monitor als Balkendiagramm angezeigt. In einer zweiten Stufe soll dann das TASTEN in einer Master-Slave-Technik realisiert werden.

2.5 Klammernahtgerät für die Minimal Invasive Chirurgie

Das sich in der Entwicklung befindliche Klammergerät dient dem luft- und blutdichten Verschuß verschiedener Körpergewebe mit Hilfe von resorbierbaren Verschußeinheiten. Das Neuartige dabei ist, daß bogenförmige Nähte möglich sind und auch in bisher nicht zugänglichen Körperhöhlen Klammernähte gesetzt werden können.

2.6 Steuerbarer Applikator für die Wasserstrahl-Laser-Technik

Entwickelt wurde ein Laserapplikator für die offene und endoskopische Chirurgie, der das Laserlicht in einen Wasserstrahl einkoppelt und so im „Pseudo“-Non-Kontakt-Mode arbeitet. Im Kontakt-Mode verhindert das Wasser die Verklebung der Faser. Die Schnitte haben nur noch eine schmale Koagulationszone. Ungewünschte Karbonisation tritt dadurch nicht mehr auf. Bare-fiber und Applikator sind sterilisierbar. Positionierung der Faserspitze erfolgt durch das steuerbare distale Ende.

2.7 Instrumente für die endoskopische Bandscheiben-Chirurgie

Diese Instrumente erlauben eine monoportale, perkutane Bandscheiben-Chirurgie. Das Neue ist, daß ein Mikroendoskop, bestehend aus Bild- und Lichtleiter, Arbeits-, Spülkanal, durch eine von außen abwinkelbare Führungshülse innerhalb der Bandscheibe auf das Ziel ausgerichtet, fixiert und auf bestmögliche Wirkung der Laserfaser und auf optische Kontrolle des Einsatzgebietes eingestellt werden kann (Abb. 4).

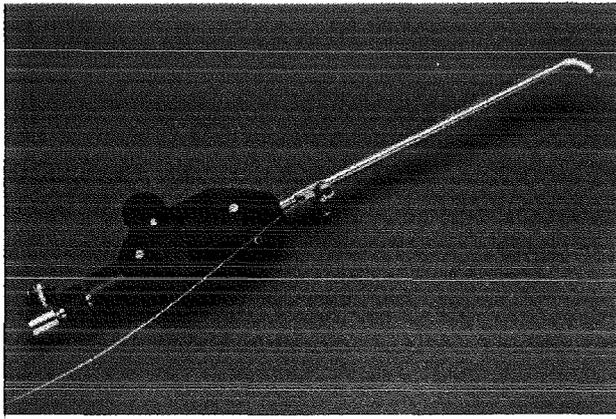


Abb. 4: Instrumententräger für die endoskopische Bandscheiben-Chirurgie

2.8 Applikator zum Legen von resorbierbaren Einzelkopfnähten

In der endoskopischen Chirurgie verlangt das Nähen von Inzisionsrändern mit Nadel und Faden wegen der eingeschränkten Bewegungsfreiheit in den Trokarhülsen oder Arbeitskanälen vom ausführenden Operateur große Geschicklichkeit. Ist das Halten und Führen der Nadel mit den entsprechenden langen Faßzangen und das zielgenaue Durchstechen der zu fixierenden Geweberänder schon schwierig und zeitaufwendig, so gilt dies erst recht für die intra- oder extrakorporale Knotenbildung.

Deshalb wurde ein Applikator speziell für das Legen von resorbierbaren (oder auch nicht resorbierbaren) Einzelkopfnähten bei endoskopischen Operationen konstruiert. Das Gerät zur Anwendung in 5mm Trokarhülsen hat sowohl eine nadelbestückte Zangenbacke zum Greifen und Approximieren der Inzisionsränder als auch einen in die Backen eingelegten, mit Verschlusssteilen versehenen Faden. Nach dem Aufladen beider Wundränder auf die Nadel wird der Fadenverschluß im Stichkanal verriegelt und damit nach Entfernen des Instrumentes eine permanente Fixierung des vom Faden umfaßten Gewebes erreicht. Der Applikator vereinfacht den Nähvorgang ganz erheblich und vermeidet jeden Abfall in Form von Nadeln und Fadenresten. Die vollständige Zerlegbarkeit ohne Benutzung von Werkzeugen trägt dem Wunsch nach leichter Reinigung und Sterilisierung des Instrumentes Rechnung.

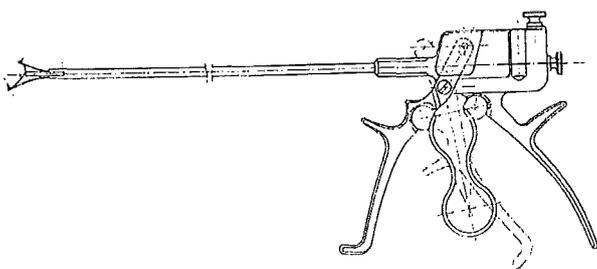


Abb. 5: Applikator zum Legen von resorbierbaren Einzelkopfnähten

3. Entwicklung von Halte- und Führungssystemen

Bei minimal invasiven chirurgischen Eingriffen orientiert sich der Chirurg mit Hilfe des Endoskopes am Monitorbild. Die zur Operation notwendigen Instrumente und Endoskope werden durch Trokare in den Bauchraum des Patienten eingeführt.

Monotone Routinearbeiten wie beispielsweise das Hochhalten von Organteilen oder Gewebestrukturen sowie das Halten und Positionieren des Endoskopes während der Operation führen zu hohen physischen Belastungen des OP-Personals.



Abb. 6: Erprobung von Halte- und Führungssystemen im Human-OP

Der mechanische Aufbau der Halte- und Führungsgeräte (Abb. 6) ist so gestaltet, daß die Geräte am OP-Tisch einfach einzurichten und an die herkömmlichen Trokare schnell an- und abzukoppeln sind.

Die konzipierte Kinematik läßt eine Verstellung des „gefesselten“ Trokares und damit der Instrumente und Optiken nur um den sogenannten „invarianten Punkt“, der in der Bauchdecke des Patienten liegt, zu.

Mit dieser Technik ist eine mechanische Zwangsführung der Instrumente gewährleistet, die eine Querkraftwirkung des Trokars auf die Bauchdecke des Patienten verhindert.

Die Geräte können von Hand, dabei werden die Haltekräfte durch mechanische bzw. elektromechanische Bremsen aufgebracht, oder elektromotorisch mittels Bedienelemente, verstellt werden. Die Bedienelemente können z.B. am Arbeitsinstrument des operierenden Chirurgen so angebracht sein, daß er eine Neupositionierung des Endoskopes oder des Halteinstrumentes ausführen kann, ohne das Arbeitsinstrument aus der Hand zu legen. Beim Wechsel des Arbeitsinstrumentes wird auch das Bedienelement auf einfache Weise an das Arbeitsinstrument befestigt.

Diese Systeme führen somit zu Kosteneinsparung, da der Chirurg ohne Assistenten operieren kann und daß bei einem Wechsel der Optik oder der Instrumente die Trokarhülsenposition beibehalten wird, so daß das gleiche Objekt im Inneren wieder angefahren werden kann.

Literatur:

[1] Neisius B., Dautzenberg P., Trapp R.: „Robotic Manipulator for Endoscopic Handling of Surgical Effectors and Cameras,, , Proc. First International Symposium on Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, Pittsburgh, Sept. 1994

[2] Holler E., Trapp R.: Ein experimenteller Telemanipulator für die Minimal-Invasive Chirurgie, 1. Statuskolloquium des PMT, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr.5238

[3] Friedel G. et al.: Use of intrathoracic ultrasonography in the thoracoscopic localization and resection of pulmonary tumours, Minimally Invasive Therapy, 1994, Heft 3

Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik zur Herstellung von Mikrokomponenten für einen Herzkatheter

U. Wallrabe, J. Fahrenberg, U. Gebhard, J. Mohr, P. Ruther, A. Ruzzu

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Im Rahmen des ESPRIT-Projektes IMICS werden Mikrokomponenten zur Integration auf einem Herzkatheter entwickelt. Dies sind ein rotierender und ein oszillierender Antrieb für ein Schneidwerkzeug sowie ein Positioniersystem zur Ausrichtung der Katheterspitze vor Ort. Um die medizinische Verträglichkeit zu ermöglichen, wird in allen Fällen ein fluidisches Aktorprinzip gewählt. Daher wird der rotierende Antrieb mit einer Mikroturbine und der oszillierende mit einem hydraulischen Linearaktor realisiert. Zur Ansteuerung des Linearaktors wird ein ebenfalls integrierbarer fluidischer Oszillator entwickelt. Wesentlicher Bestandteil des Positioniersystems ist ein Mikroventilsystem bestehend aus drei Einzelventilen, das das Füllen mehrerer Ballons auf der Katheterspitze regelt. Alle vorgestellten Komponenten werden mit LIGA-Technik und der Methode der Mechanischer Mikrotechnik hergestellt.

1. Einleitung

Eine der häufigsten vorzeitigen Todesursachen in den Industrienationen ist der Herzinfarkt. Er wird i.a. durch eine Sauerstoffunterversorgung des Herzmuskels verursacht, die vor allem auf verengte Herzkranzgefäßen (Koronargefäße) zurückzuführen ist. Die Herzkranzgefäße haben maximale innere Durchmesser von ca. 3 mm und verzweigen sich zu kleineren Arterien, die in Kapillargefäße münden. Die Verengung (Stenose) der Kranzgefäße wird durch mehr oder weniger kalzifizierte Fettablagerungen (Plaque) hervorgerufen, wogegen es heute bereits mehrere Therapiemöglichkeiten gibt.

Eine sehr erfolgreiche Methode ist das Legen eines Bypasses aus körpereigenem Arterienewebe. Eine Bypassoperation verursacht jedoch hohe traumatische Schäden und erfordert einen kostenintensiven mehrwöchigen Krankenhausaufenthalt. Eine seit gut 15 Jahren alternativ angewendete Methode ist die Ballondilatation. Hierbei wird ein Herzkatheter i.a. in die Beinarterie eingeführt und durch die Aorta bis zum Herzen vorgeschoben. An der Spitze des schlauchartigen Katheters befindet sich ein länglicher fester Ballon, der in der Mitte der Stenose positioniert wird und das Gefäß im expandierten Zustand dehnt (dilatiert).

Als Alternative zur Dilatation werden Verfahren zum mechanischen Abtragen der Plaque entwickelt. Auch hierzu liegen bereits Katheter vor, die an ihrer Spitze ein rotierendes Messer oder einen Fräskopf tragen. Allen Kathetertypen ist jedoch gemein, daß der Antrieb des rotierenden Werkzeuges von außerhalb des Körpers mit Hilfe eines makroskopischen Elektromotors [1] oder einer pneumatischen Turbine [2] erfolgt. Die Rotation wird mittels einer Torsionswelle,

die durch den ganzen Katheter verläuft, nach vorne an die Spitze übertragen. Die Torsionswellen machen die Katheter verhältnismäßig steif und somit unhandlich beim Einfädeln in die Kranzgefäße. Eine weitere Methode ist der gezielte Beschuß der Ablagerungen mit Laserpulsen vor Ort. Hier besteht die Schwierigkeit u.a. in der Treffgenauigkeit, um zu vermeiden, daß die Energie des Laserstrahls an der Plaque vorbei geführt und die Gefäßwand beschädigt wird. Eine exakte Ausrichtung des Katheterkopfes innerhalb der Koronargefäße ist aufgrund der Katheterlänge von bis zu einem Meter und der Nähe des kontrahierenden Herzmuskels von außerhalb des Körpers kaum möglich.

Das Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) beschäftigt sich im Rahmen des ESPRIT-Projektes IMICS ('Integration of Microcomponents on an Interventional Cardiac Catheter System') mit der Entwicklung und Herstellung von Mikrokomponenten für einen Herzkatheter, um die oben angeführten Probleme zu lösen. Das Projekt vereinigt sieben Partner aus Industrie, Gesundheitswesen und Forschung. Die Aufgaben des IMT's sind die Entwicklung eines miniaturisierten Antriebes für ein rotierendes und ein oszillierendes Schneidwerkzeug, der in die Katheterspitze integriert werden soll, so daß auf die lange Torsionswelle verzichtet werden kann. Darüber hinaus soll ein Positioniersystem entwickelt werden, das ein radiales und ein winkliges Ausrichten der Katheterspitze gestattet.

2. Antriebe für miniaturisierte Schneidwerkzeuge

Ein in die Katheterspitze integrierter Antrieb muß medizinisch verträglich und zuverlässig sein. Aus diesem

Grunde basieren die hier entwickelten Aktoren auf der Wandlung von fluidischer Energie in kinetische Energie. Als Antriebsfluid dient sterile Kochsalzlösung, die in gewissen Grenzen problemlos in den Körper gelangen darf. Zusätzlich bietet der fluidische Antrieb relativ hohe Leistungsdichten und erlaubt somit die Erzeugung großer Kräfte.

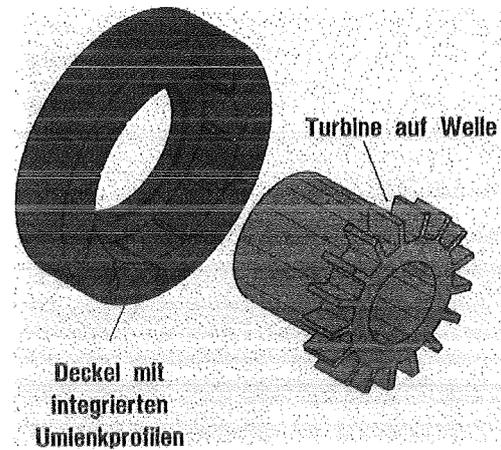
2.1 Rotierender Antrieb: Mikroturbinen

Zum Antrieb eines rotierenden Fräskopfes werden Mikroturbinen entwickelt und mit einer Kombination aus LIGA-Technik und mechanischer Mikrofertigung hergestellt. Ein Fluid überträgt Energie und Impuls an eine Turbine, wenn die Rotorblätter der Turbine und die Anströmrichtung des Fluids einen Winkel zwischen 0° und 180° miteinander einschließen. Der Impulsübertrag und folglich das erzeugte Drehmoment wachsen mit dem Sinus des Winkels sowie mit der Anströmgeschwindigkeit des Fluids. Im Falle eines vorgegebenen Flusses wächst die Anströmgeschwindigkeit umgekehrt proportional zur offenen Querschnittsfläche, durch die die Strömung tritt. Daher ist i.a. ein Winkel nahe bei 90° und eine kleine Querschnittsfläche anzustreben.

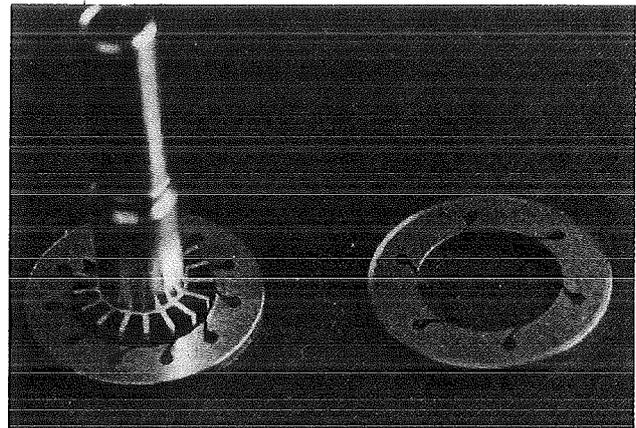
Abb.1a zeigt eine Radialturbine bestehend aus einem planaren Turbinenrotor, der auf eine Welle montiert ist, sowie eine Abdeckplatte mit eingearbeiteten düsenähnlichen Umlenkprofilen. Um einen gleichmäßigen Antrieb zu gewährleisten, sollten möglichst viele Rotorblätter mit möglichst vielen Umlenkprofilen kombiniert werden. Dabei ist zu beachten, daß die Anzahl der Rotorblätter und die der Umlenkprofile teilerfremd zueinander sind. Im gezeigten Fall weist der Rotor 17 Rotorblätter und die Umlenkplatte 11 schmale Düsenprofile auf, die eine gesamte Querschnittsfläche von $0,047 \text{ mm}^2$ haben. Das aus dem Katheter in axialer Richtung anströmende Fluid wird in der Profilplatte in radialer Richtung umgelenkt und unter einem Winkel von 60° in den Rotor eingespritzt.

Um bereits vor der Herstellung der Mikroturbinen verschiedene Turbinenlayouts hinsichtlich ihres Drehmomentes und notwendigen Versorgungsdruckes miteinander vergleichen zu können, wurden Makromodelle hergestellt und untersucht [3]. Unter Berücksichtigung von geometrischer und physikalischer Ähnlichkeit (Konstanz der Reynoldszahl) ist es möglich, Drehmoment, Drehzahl und Druckverluste etc. zu skalieren. Die Rotoren der Makromodelle (Abb.1b) haben einen willkürlich gewählten Durchmesser von 10 mm. Diese Dimensionen erlauben, daß alle Komponenten konventionell, d.h. mittels Drahterodieren fertigbar sind. Zur dynamischen Drehmomentmessung werden die Modelle mit einem hochauflösenden Drehmomentensensor verbunden. Der Sensor hat einen Meßbereich von $\pm 200 \mu\text{Nm}$ und eine Auflösung von 0,1 % [4]. Zur berührungslosen Ankopplung wird eine Wirbelstrom-

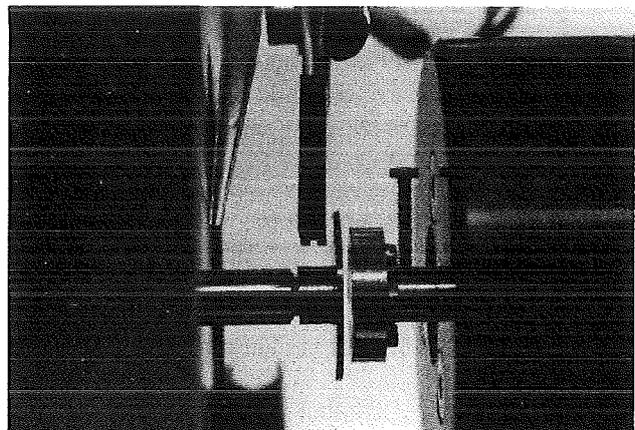
bremse verwendet. Die Drehzahlmessung erfolgt mit Hilfe einer Reflexlichtschranke, die einen Hell-Dunkel-Kontrast auf der Turbinenwelle detektiert (Abb.1c).



a: Skizze einer Radialturbine



b: Komponenten von Makromodellen



c.: Ankopplung der Turbinenwelle (li.) mit Wirbelstromscheibe an Sensorwelle (re.) mit Magnetscheibe. Über der Turbinenwelle ist die Lichtschranke zu sehen.

Abb. 1 : Radialturbine für Herzkatheter

Abb.2 zeigt das dynamische Drehmoment als Funktion der Drehzahl bei verschiedenen Durchflüssen für die Turbine aus Abb.1. Die linke und die untere Achse beschreiben die Ergebnisse, wie sie an dem Makromodell gemessen wurden. Die rechte und die obere Achse geben die skalierten Ergebnisse der entsprechenden Mikroturbine (Skalierungsfaktor 7) wieder. Das Drehmoment der Mikroturbine erreicht leicht $15 \mu\text{Nm}$ bei Drehzahlen in der Größenordnung von 3000 U/s . Dies entspricht einer Leistung von 280 mW . Der notwendige Versorgungsdruck steigt quadratisch mit dem Durchfluß an und liegt bei Raumtemperatur im Falle der Mikroturbinen zwischen 13 bar bei ca. 95 ml/min und 28 bar bei 140 ml/min .

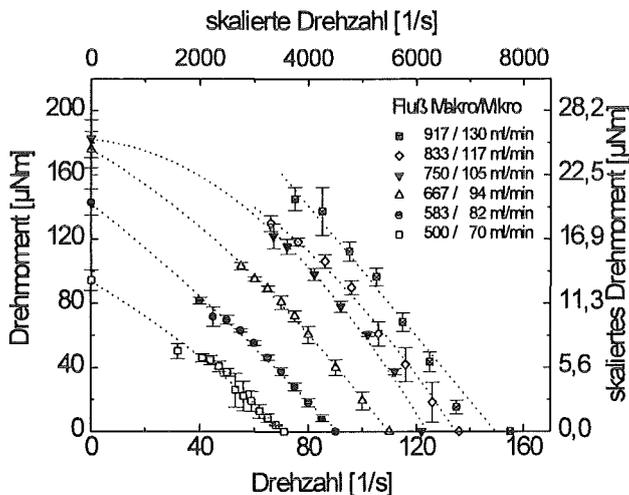


Abb.2: dynamisches Drehmoment als Funktion der Drehzahl einer Radialturbine mit 17 Rotorblättern und 11 Umlenkprofilen bei unterschiedlichen Durchflüssen

2.2 Oszillierender Antrieb: Fluidischer Oszillator und hydraulischer Mikroaktor

Der Mikroantrieb eines linearen Schneidwerkzeugs soll mit Hilfe eines hydraulischen Mikroaktors und eines fluidischen Oszillators realisiert werden [5]. Ein solcher Oszillator ebenso wie der Mikroaktor werden derzeit entwickelt und in LIGA-Technik hergestellt.

Das Prinzip eines fluidischen Oszillators wird anhand des in Abb.3 dargestellten Designs erklärt. Aus einer Versorgungsdüse tritt ein Fluidstrahl in eine Kammer aus. Er wird aufgrund des Coanda-Effekts zu einer Seite hin abgelenkt und tritt entsprechend nur aus einem der zwei Fluidausgänge aus. Über einen Rückführungskanal wird ein Teil des Fluids auf den Bereich nach der Versorgungsdüse zurückgeführt, wodurch der Strahl auf die andere Seite der Kammer umgeschaltet wird. Dieser Vorgang wiederholt sich, so daß der Strahl abwechselnd zu einem der beiden Ausgänge austritt, d. h. mit einer charakteristischen Frequenz schwingt.

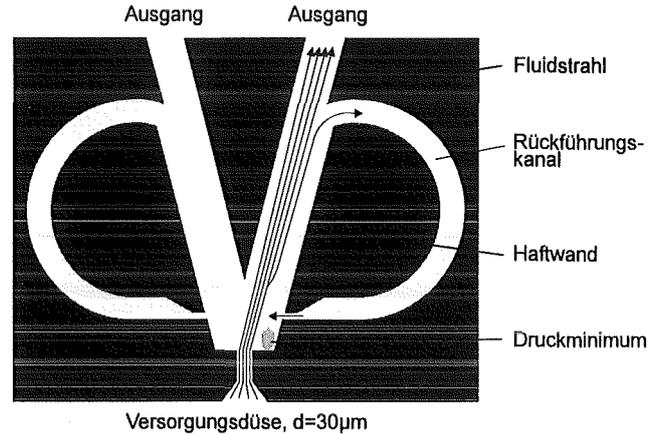


Abb.3 : Design des fluidischen Oszillators

Das dargestellte Design, das eine Düsenweite von $30 \mu\text{m}$ und eine Strukturhöhe von $250 \mu\text{m}$ hat, wurde vor der Herstellung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode unter Anwendung des Programms ANSYS/FLOTRAN numerisch untersucht [6]. Bei einem an der Versorgungsdüse anliegenden Druck von 2 bar ergibt sich eine Frequenz des Oszillators von 285 Hz . Der zugehörige Volumenstrom beträgt $0,57 \text{ l/h}$, woraus ein dynamischer Druck von $0,54 \text{ bar}$ folgt. Dieser Druck steht zum Ansteuern eines Mikroaktors zur Verfügung.

Für einen nach den Ähnlichkeitsgesetzen skalierten Oszillator (gleiche Reynoldszahl) mit 10 facher Düsenweite liefert die numerische Simulation eine Frequenz von 1 Hz . Die experimentelle Untersuchung des drahterodierten Makromodells ergibt eine Frequenz von $0,1 \text{ Hz}$, was sich mit der erhöhten Dämpfung des Oszillators durch Zu- und Abführungen im Vergleich zum simulierten Oszillator erklären läßt. Basierend auf diesen Ergebnissen soll nun ein im Design optimierter Mikrooszillator hergestellt werden.

Ein hydraulischer Mikroaktor mit integriertem Kalibriersystem ist in Abb.4 dargestellt [7]. Der Aktor besteht aus einer Aktorkammer, in der ein Fluid unter Druck gesetzt werden kann, sowie aus einem beweglichen Kolben, der durch den anstehenden Fluidruck aus der Kammer geschoben wird. Das gezeigte System besteht aus Kupfer und ist $200 \mu\text{m}$ hoch. Die Querschnittsfläche des Kolbens beträgt $450 \times 200 \mu\text{m}^2$. Der Aktor hat eine laterale Ausdehnung von ca. $2 \times 2 \text{ mm}^2$. Die Spaltbreite zwischen dem beweglichen Kolben und den Seitenwänden beträgt $1-2 \mu\text{m}$. Der Hub des Kolbens ist bei diesem ersten Design auf $50 \mu\text{m}$ beschränkt, er kann jedoch problemlos auf mehrere $100 \mu\text{m}$ erhöht werden. Um eine geschlossenen Aktorkammer zu erhalten, wird der zunächst nach oben offene Aktor mit einer Glasplatte abgedeckt, die mit dem System verklebt wird. Die im Aktor integrierte Stopfnut verhindert dabei ein Eindringen von Klebstoff in die Aktorkammer und somit ein Verkleben des Kolbens.

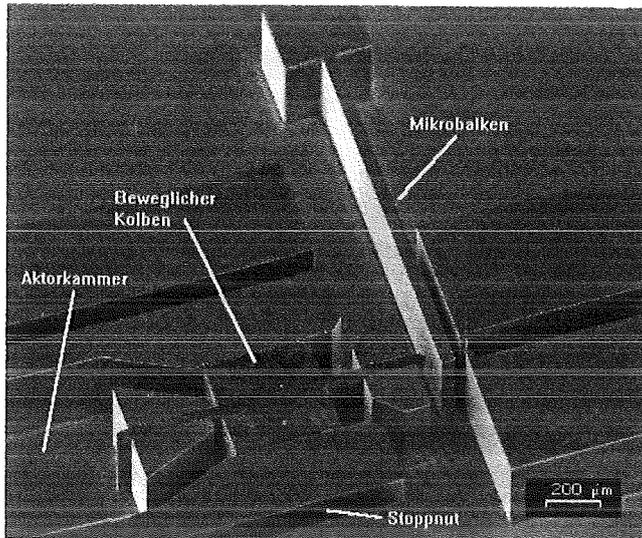


Abb.4 : REM-Aufnahme des hydraulischen Mikroaktors samt Kalibriersystem.

Die vom Aktor übertragene Kraft wird über die Verbiegung des Mikrobalkens bestimmt. Mit diesem Mikroaktor können bei externer Druckversorgung über ein Antriebsfluid Kräfte im Bereich mehrerer 10 mN übertragen werden. Das Antriebsfluid dichtet dabei den Aktor im Bereich des Kolbens ab und verringert durch Fluidschmierung die Reibung zum Substrat und den Seitenwänden. Der durch die geringe Reibung bedingte Minimaldruck zur Überwindung der Haftreibung des Kolbens liegt unter 0,02 bar. Bei Betrieb dieses Aktor mit Wasser als Antriebsmedium beträgt die Leckrate weniger als 200 µl/min bei einem Versorgungsdruck von 1 bar.

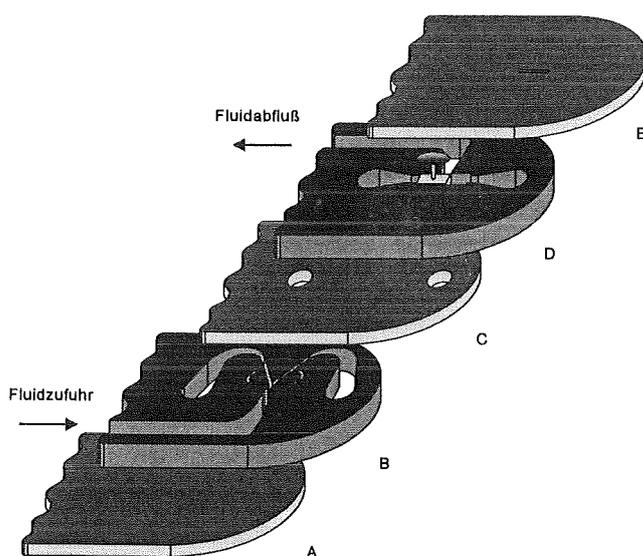


Abb.5 : Schematische Darstellung des Kombinationsdesigns von fluidischem Oszillator (Ebene B) und hydraulischem Mikroaktor (Ebene D); Ebenen A, C, E : Substrate und Deckplatte

In Abb.5 ist ein Kombinationsdesign aus Aktor und Oszillator dargestellt, wie es in LIGA-Technik hergestellt werden soll. Um die laterale Ausdehnung des Gesamtsystems gering zu halten, ist ein modularer Aufbau aus insgesamt fünf strukturierten Ebenen vorgesehen. Mit dem Ausgangsdruck des Oszillators von 0,54 bar und der Querschnittsfläche des Aktorkolbens von $450 \times 200 \mu\text{m}^2$ ergibt sich eine nutzbare Kraft von ca. 5 mN.

3. Positioniersystem

Zur Ausrichtung einer Katheterspitze wird ein Positioniersystem, wie es in Abb.6 dargestellt ist, entwickelt. Dieses besteht aus einem Mikroventilsystem, das ein zuströmendes Fluid gezielt in Mikrobällons aus Polyurethan verteilt. Durch die individuell expandierenden Ballons kann die Katheterspitze gekippt und gleichzeitig fixiert werden. Im ersten Prototyp wird ein Ventilsystem mit 3 Ventilen realisiert, an die jeweils ein Ballon angeschlossen wird. Diese Einzelventile haben einen Durchmesser von 800 µm und sind im inaktiven Zustand offen. Ohne Energieeinkopplung sind die Ballons daher gefüllt, die Katheterspitze ist positioniert. Werden die Ventile geschlossen, versiegt die Fluidzufuhr und die Ballons entleeren sich selbständig durch den Außendruck (Blutdruck).

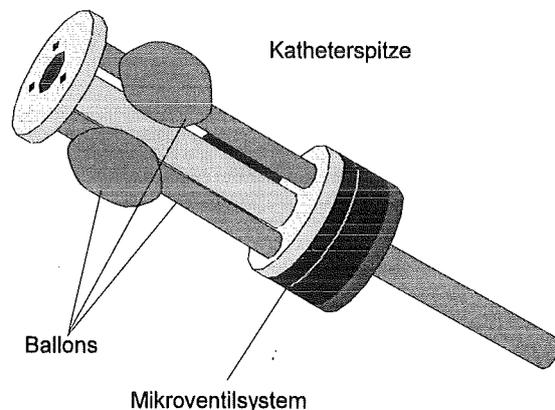


Abb.6 : Aufbau eines Positioniersystems für eine Katheterspitze. Der Durchmesser beträgt 2,5 mm.

Das Mikroventilsystem hat einen Gesamtdurchmesser von 2,5 mm und eine Höhe von ca. 1,5 mm. Das gesamte Positioniersystem besteht aus den 3 Positionierballons [8], einer Edelstahlkanüle und 6 Kunststoff-Einzelkomponenten, sog. Funktionsplättchen. Letztere werden in Heißprägetechnik hergestellt. Für die Herstellung eines mehrstufigen Formeinsatzes zum Prägen der Plättchen wurde ein Verfahren entwickelt, das Herstellungsprozesse der mechanischen Mikrotechnik mit der im LIGA-Verfahren angewandten Röntgentiefenlithografie kombiniert [9]. Mit Hilfe dieses Verfahrens werden 3-stufige Formeinsätze aus Nickel hergestellt, mit denen die Funktionsplättchen aus PMMA, PVDF oder anderen Kunststoffen geprägt werden können.

Das Mikroventilsystem ist in einen Fluid- und einen Aktorbereich geteilt. Das Aktorelement besteht aus zwei Funktionsplättchen, einer Kunststoffmembran (Polyimid) zum Verschließen der Fluidkanäle sowie drei freitragenden Heizwendeln, über welche die Ventile einzeln elektrisch angesteuert werden können. Um einen konstanten Anpreßdruck der Membran auf die Ventilsitze sicherzustellen und eine Überhitzung zu vermeiden, wird die Heizleistung über die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes der Heizwendeln elektronisch geregelt [10].

In Abb.7 ist das Fluidplättchen des Ventilsystems gezeigt. Man erkennt die Ventilsitze (kleine erhabene Ringe), Fluidkanäle (darin enthaltene Löcher), Abtrennstege (tropfenförmige Stege und Außenring) für Klebstoffbereiche und Paßstifte (erhabene Kreise).

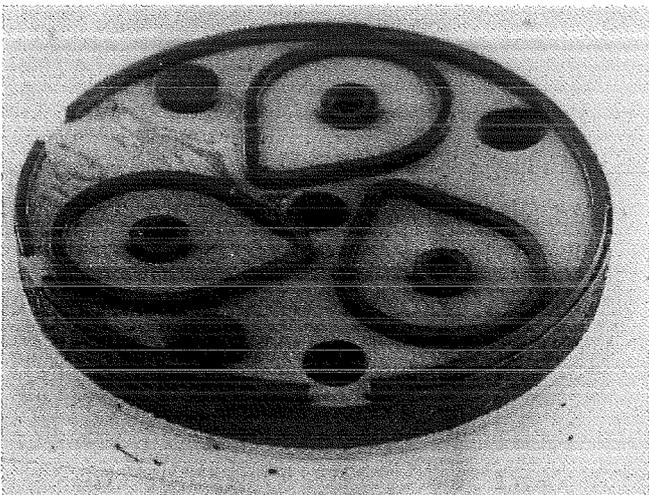


Abb.7: Fluidplättchen des Mikroventilsystems nach Bearbeitung mittels Mikromechanik und Röntgentiefenlithografie.

Beim Verbinden der Aktor- und Fluidelemente mit der Kunststoffmembran und den Heizwendeln sowie der darauffolgender Montage aller Plättchen miteinander wird mit in die Struktur integrierten Justierpaßstiften und speziell entwickelter Kapillarklebetchnik gearbeitet [11,12]. Zur Zentrierung werden die Einzel-elemente auf eine Edelstahlkanüle aufgesteckt, die gleichzeitig als Kanal für optische oder mechanische Instrumente dienen kann.

Der Nachweis des Positionierens ist mit Hilfe einer Glasfaser geplant, die durch das Zentrum des Ventilsystems geführt wird und an der Stirnseite des Katheters einen Lichtstrahl austreten läßt. Die Bewegung der Katheterspitze kann damit durch die Verschiebung des Lichtpunktes auf einem Leuchtschirm verfolgt werden. Das gezielte Verschieben der Katheterspitze durch das individuelle Ansteuern der Einzelventile stellt den Nachweis für die Funktion dieses Prototyps dar.

4. Ausblick

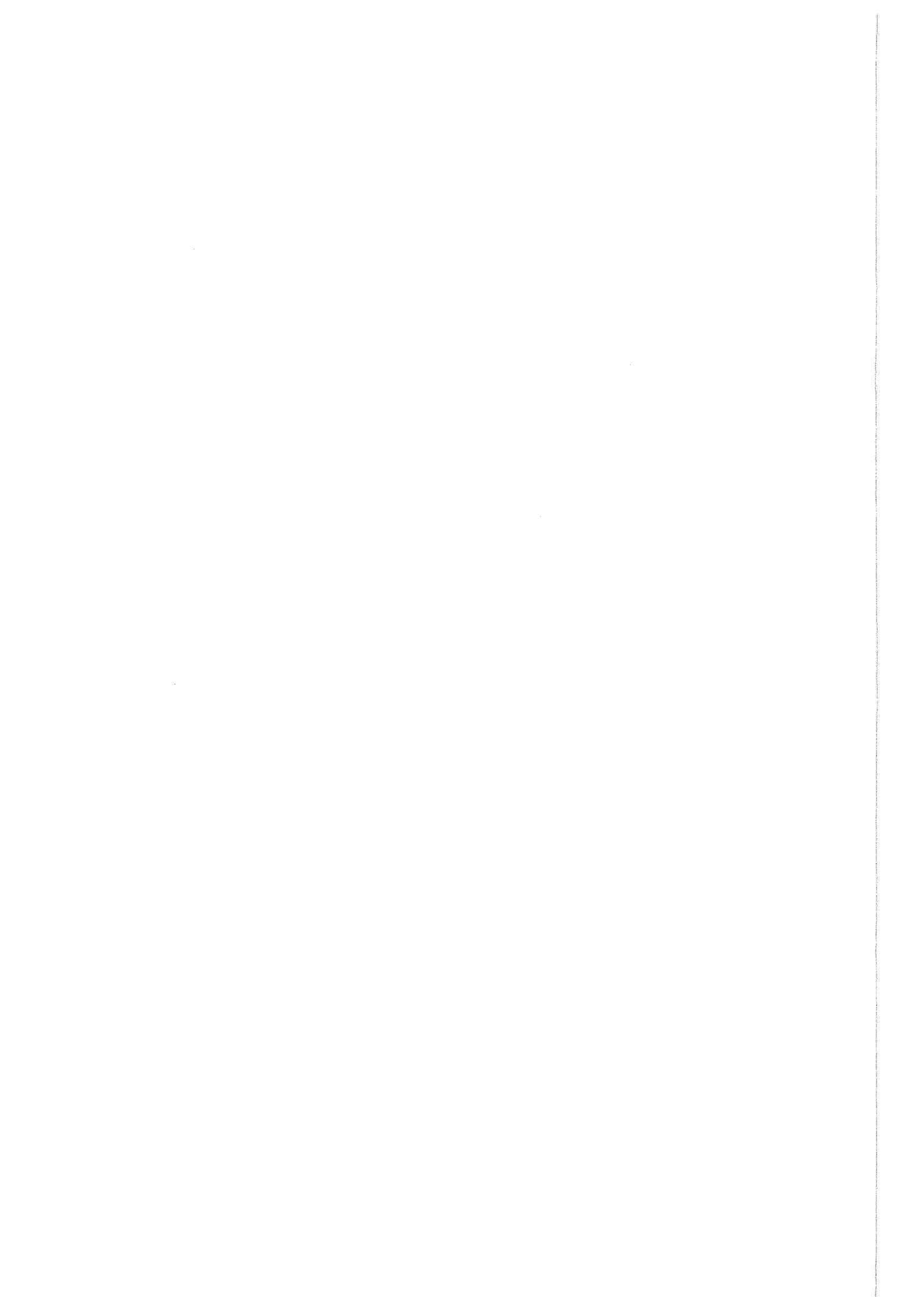
Die Entwicklungsarbeiten, die im Rahmen des IMICS Projektes begonnen wurden, stellen die Grundlage für weitere Arbeiten auf diesem Gebiet dar. In Zusammenarbeit mit der Industrie können miniaturisierte Antriebe, Schneidwerkzeuge und Positioniersysteme entwickelt werden, die nicht nur zur Behandlung von Arteriosklerose, sondern auch in anderen Bereichen der Minimal-Invasiven-Therapie eingesetzt werden können (z.B. Neurochirurgie). Ferner sind auch Anwendungen außerhalb der Medizintechnik denkbar (Mikropneumatik, -hydraulik etc.).

Danksagung

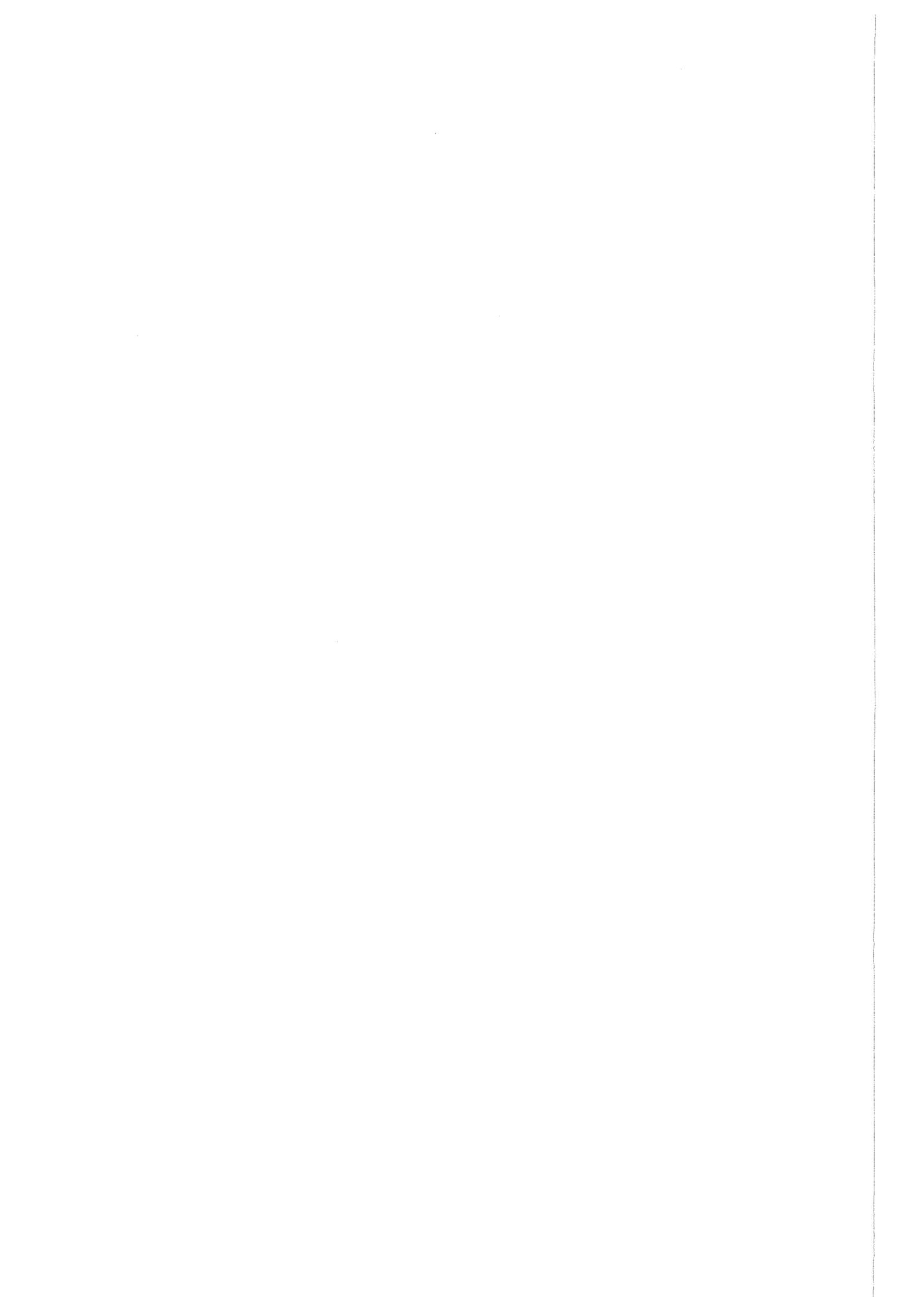
Die vorgestellten Arbeiten des IMICS-Projektes werden im Rahmen des ESPRIT-Programmes von der Europäischen Union finanziert. Wir danken unseren Projektpartnern sowie M. Schwörer für ihre Diskussionsbereitschaft und für ihre gute Zusammenarbeit mit uns.

Literatur:

- [1] T. Hinokara et al.: "Directional Atherectomy", Suppl. IV, Circulation, Vol 81 No.3, 1990, 79 - 91
- [2] P. Thorpe : „Atherectomy: Tools For Arterial Treatment“, Medical Imaging International, Jan.-Feb./1995
- [3] U. Wallrabe et al.: "Radial and Axial-Flow Microturbines Providing Power Output", Proc. Int. Symp. on Microsystems, Intelligent Materials and Robots, MIMR '95, Sendai, Japan, 1995, 49 - 52
- [4] V. Gass et al. : "Micro-torque Sensor based on Differential Force Measurement", Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems, Oiso, Japan, 1994, IEEE catalog no. 94CH3404-1, 241 - 244
- [5] U. Gebhard et al. : "A Fluidic Micro-Oscillator To Steer a Linear Tool", Proc. Int. Symp. on Microsystems, Intelligent Materials and Robots, MIMR '95, Sendai, Japan, 1995, 41 - 44
- [6] U. Gebhard et al. : "Numerical Investigation of Fluidic Micro-Oscillators", Micromechanics Europe MME'95, Kopenhagen, Denmark, 1995, 172 - 174
- [7] P. Ruther et al. : "Microtesting System made by the LIGA Process to measure the Young's Modulus in Cantilever Microbeams", akzeptiert für: 1995 ASME Int. Eng. Cong. and Exp., San Francisco, 1995
- [8] Fa. Vygon, Medical Produkte, Aachen
- [9] J. Fahrenberg et al.: "High Aspect Ratio Multi-Level Mold Inserts Fabricated by Mechanical Micro Machining and Deep Etch X-Ray Lithography", Microsystem Technology, Springer, 1995
- [10] IMS Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Duisburg
- [11] J. Fahrenberg : Dissertation, Universität Karlsruhe, 1994, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5504 (1995)
- [12] D. Maas et al. ; "Application of Adhesive Bonding for Integration of Microfluidic Components", Proc. Actuator 94, Berlin, Juni 1994, 75 - 78



Chemische Mikrosensorik



Multigassensorchip auf Metalloxidbasis für Prozeßsteuerung und Umweltüberwachung

P. Althainz und J. Goschnick

Institut für Radiochemie

Zusammenfassung

Erste Prototypen eines Gassensor-Mikrosystems sind erfolgreich erprobt worden, das auf einfache und preiswerte Analyse von Gaskomponenten in Atmosphäre angelegt ist, um in Massenprodukten einsetzbar zu sein. Der daumennagelgroße Gassensorchip basiert auf der Messung der elektrischen Leitfähigkeit von derzeit 40 Sensorelementen aus halbleitendem Metalloxid mit einer Membranbeschichtung von wenigen nm Dicke. Diese dient sowohl zur Selektivitätssteuerung am einzelnen Sensorelement wie auch als Schutz für das gasempfindliche Metalloxid. Im Gegensatz zu üblichen Gassensorfeldern dieser Art werden die Sensorelemente durch Partitionierung eines monolithischen Metalloxidfelds mit Platinelektroden erzeugt und durch inhomogene Beschichtung und/oder inhomogene Beheizung mit unterschiedlicher Gasempfindlichkeit ausgestattet. Als Metalloxide werden derzeit SnO_2 (auch mit Platindotierung) sowie WO_3 und als Membranmaterialien SiO_2 und Al_2O_3 eingesetzt. Die Auswertung des Musters der 40 Leitfähigkeitsänderungen bei Exposition mit dem Meßgas erlaubt die Erkennung von Einzelgasen aber auch Gaskollektiven wie Aromen oder Gerüche. Für diese Aufgabe wurde ein schnelles Neuronnetzprogramm entwickelt. Nachweisbar sind nahezu alle Gase außer Edelgase in kleinen Mengen. Aufgrund der Partitionierungstechnik ergibt sich eine langfristig stabile Gaserkennung. Nachweisgrenzen sind häufig besser als 1ppm. Die Ansprechzeiten sind in der Regel im Bereich von 3-30sec. Durch Ausrüstung des Chips mit einem geeigneten Metalloxid in entsprechender Dotierung sowie einer entsprechenden Membran und der Auswahl adäquater Meßbedingungen ist weitgehende Anpassung an die jeweilige Anwendung möglich. Einfache Herstellung durch reaktives HF-Sputtern und Gasphasenabscheidetechnik erlauben einfache und kostengünstige Fertigung. Ein zigarrenkistengroßes Betriebsgerät erlaubt einfache Handhabung.

1. Einleitung

Die Entwicklung eines preiswerten und gleichzeitig vielseitigen Gassensor-Mikrosystems zielt auf die einfache Bestimmbarkeit von Gaskomponenten in Atmosphäre, vor allem für die Massenanwendung. Es besteht größter Bedarf sowohl einzelne Schadstoffe als auch Gaskollektive, wie Aromen oder Gerüche, zu identifizieren und zu quantifizieren. Damit sollen Gefahrenzustände erkannt, chemische Prozeßabläufe verfolgt oder auch der Luftkomfort bewertet werden, um zu warnen oder regelnd einzugreifen [1].

Einige der zahllosen Anwendungen sind Luftqualitätsmessungen im Kraftfahrzeug oder kraftfahrzeugfrequentierten Räumen (Garagen, Tunneln, Straßenschluchten), die Leckkontrolle von Gasleitungen, die Prüfung von Lebensmitteln durch Aromamessung und die Kontrolle ihrer Zubereitung (Steuerung von Haushaltsherden oder Mikrowellengeräten), die Atemanalyse zur privaten Selbstdiagnose und Therapiekontrolle oder die Raumüberwachung mit Brandfrühmeldern zur Erkennung von Schwelbränden. Neben analytischen Leistungsanforderungen sind insbesondere für die Massenanwendung immer ein niedriger Preis und hohe Zuverlässigkeit, meist auch geringer Platzbedarf und niedriger Energieverbrauch gefragt. Dem versucht die Entwicklung des Mikrogassensorsystems zu entsprechen.

2. Aufbau und Meßprinzip

Das inzwischen patentierte Mikrosystem (siehe Bild 1) besteht aus einem Feld neuartiger mehrstufiger Sensorelemente auf der Basis von beschichteten Metalloxid-Leitfähigkeitsdetektoren [2]. Derzeit werden 40 Sensorelemente zusammen mit 2 Temperaturfühlern und 4 Heizelementen auf ca. 100 mm^2 eines oxidierten Siliziumsubstrats untergebracht.

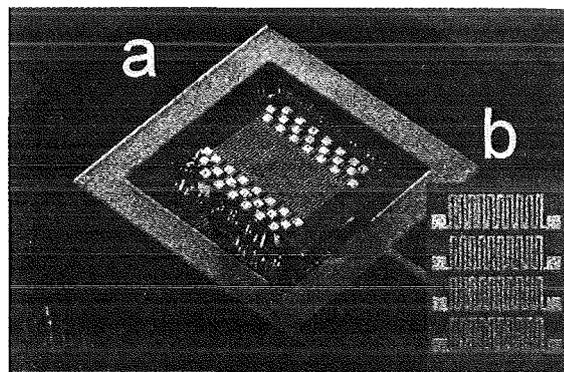


Bild 1 : a) Im Gehäuse montierter Gassensorchip. Die elektrische Kontaktierung erfolgt durch ultraschallgebondete Golddrähte. b) Die Chiprückseite ist mit vier Mäanderheizelementen aus Platin bestückt.

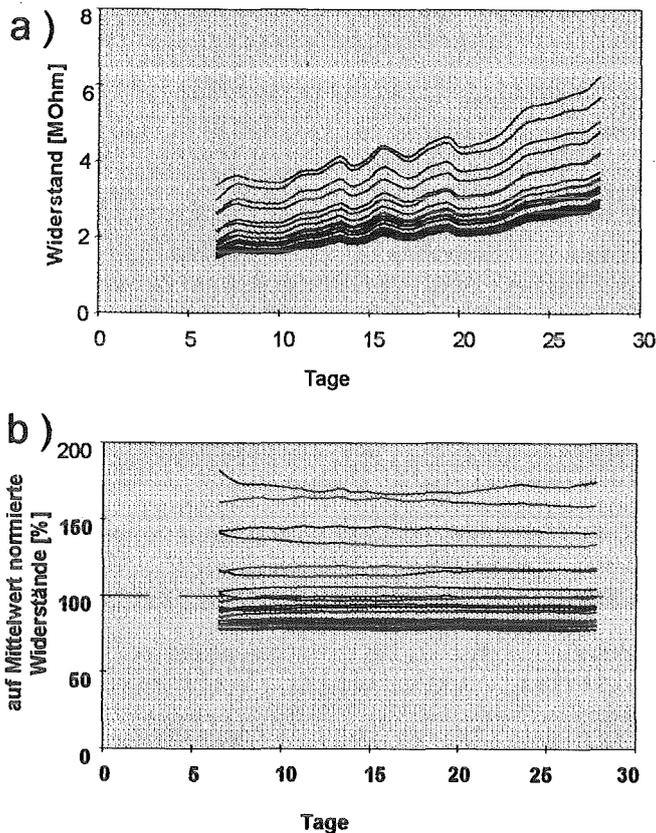


Bild 2 : Signale eines unbeschichteten SnO_2 -Chips mit 0.4% Pt-Dotierung bei Betrieb mit Temperaturgradient 240-300°C in 100% Luftfeuchte. Die Messung erfolgte erst einige Tage nach Beginn der Feuchteexposition. a) Absolute Widerstände. b) Auf Mittelwert aller Sensorelemente normierte Widerstände.

Die elektrische Leitfähigkeit gasempfindlicher halbleitender Metalloxide wird einerseits durch Störung der Bindung von Sauerstoffionen im Oberflächenbereich bewirkt. So führt bei Gegenwart organischer Gase deren Oxidation zu einer reversiblen Verringerung der Sauerstoffionen, wobei freigesetzte Elektronen die Leitfähigkeit erhöhen. Die reversible Adsorption von Elektronenakzeptoren wie NO_2 immobilisieren andererseits Leitungselektronen und setzen die Leitfähigkeit herab. Nahezu alle Gase außer Edelgasen zeigen einen Effekt, dessen Ausmaß von der Unterschiedlichkeit der Adsorption oder Reaktion der Gase bestimmt wird und dementsprechend keine große Selektivität des Ansprechverhaltens zulässt. Um dennoch hohe Selektivität zu erreichen, wird ein Feld von vielen unterschiedlichen Sensorelementen eingesetzt. Bei Änderung der Luftzusammensetzung wird ein Muster von Leitfähigkeitsveränderungen (Signalen) erhalten, daß ein ungleich höheres Informationspotential besitzt als die Einzelmessung [3].

Im Gegensatz zu üblichen Gassensorenfeldern dieser Art werden die Sensorelemente des Gassensorchips durch Partitionierung eines monolithischen Metalloxidfelds

durch parallele Platinelektrodenstreifen erhalten. Dieser Aufbau ermöglicht weitgehende Unabhängigkeit der Signalrelationen von Alterungsprozessen der Metalloxidoberfläche, was eine hohe Beständigkeit gasspezifischer Signalmuster und damit eine stabile Gaserkennung bewirkt. Um starke Veränderungen der Metalloxidoberfläche zu provozieren wurde ein nackter SnO_2 -Chip für lange Zeit in 100% feuchter Luft betrieben [4], was zu deutlichen Veränderungen der absoluten Leitfähigkeiten führte. Dennoch sorgt die Bauweise des Sensorfeldes für Konstanz der Signalrelationen wie Bild 2 zeigt.

Ein Schwerpunkt der Entwicklung bildet die wenige nm dicke Beschichtung des Metalloxidfelds, die der Steuerung des Gaszugangs zum Metalloxid dient, sowohl um die Selektivität des Nachweises zu beeinflussen als auch um den Gasdetektor zu schützen. Derzeit wird mit SiO_2 oder Al_2O_3 als Grundmaterial gearbeitet, das durch katalytische Zusätze ergänzt wird. Neben der Auswahl des Gasdetektormaterials bietet die Konfektionierung dieser Membran weitgehende Möglichkeiten, das Sensorsystem an gestellte Anforderungen anzupassen. Chemische Gasphasenabscheidung hat sich als geeignetste Herstellungsmethode dünnster Membranschichten bewährt, die zudem mit Ionenstrahlunterstützung zur lateralen Strukturierung fähig ist.

Insbesondere wurde auf der Basis dieses Verfahrens eine Technik entwickelt, die durch temporäre Einlagerung von organischem Kohlenstoff Gitterstörungen bei der Bildung der SiO_2 -Membran hervorruft. So können je nach Substrattemperatur, Art und Dauer des Ionenbeschusses der chemische Zustand und die Menge des implementierten Kohlenstoffs variiert und nach Eliminierung des Kohlenstoffs durch Tempern auf 350°C unterschiedlich sensorisch wirksame SiO_2 -Membranen erhalten werden [5]. Bei Raumtemperatur wird anfänglich viel Kohlenstoff eingelagert und führt durch die starke Gitterstörung nach Tempern zu katalytisch aktivem SiO_2 mit hoher Permeabilität. Wird dagegen schon bei hoher Temperatur deponiert, erfolgt kaum Kohlenstoffeinbau und kompakte Schichten mit weitaus geringerer Permeabilität resultieren bei gleicher Dicke, die nach Molekülgröße selektieren [6].

2. Erkennung von Gasen

Durch inhomogene Beschichtung und/oder durch inhomogene Beheizung erhalten die zunächst gleichartigen Sensorelemente unterschiedliche Gasempfindlichkeit. Dies führt bei Exposition mit kontaminierter Luft zur Ausbildung von charakteristischen Signalmustern, die sowohl ein einzelnes Gas als auch ein Gaskollektiv (Aroma) erkennen lassen. Bild 3 zeigt Beispiele für gascharakteristische Signalmuster in normierter Radialdarstellung (bezogen auf Mittel aller Sensorelemente) für die Differenzierung mit Temperaturgradienten wie auch mit Membrangradienten.

Die Auswertung einer sensorischen Messung erfolgt durch Vergleich mit Signalmustern der zu erkennenden Gase oder Kollektivkomponenten, die in einer Trainingsphase ermittelt werden. Hierfür wurde ein Neuralnetzprogramm entwickelt, das innerhalb von wenigen Sekunden den Vergleich durchführt. Wie die Untersuchung einer Reihe organischer Gase und Dämpfe zeigt, läßt sich sogar bei Anwendung der Temperaturgradientenmethode auch ohne diese Kalibrierung auf die Substanzklasse (Alkan, Aromat, Alkohol, CKW) des Analyten schließen, da die Temperaturabhängigkeit der Gasreaktivität eine klassenspezifische Größe ist [7].

3. Quantifizierung und Ansprechzeiten

Für eine Reihe überwiegend organischer Gase sind über einen weiten Konzentrationsbereich Pulsexpositionen durchgeführt worden, die sowohl die Empfindlichkeit als auch die Ansprechgeschwindigkeit der Gasedetektion zeigen.

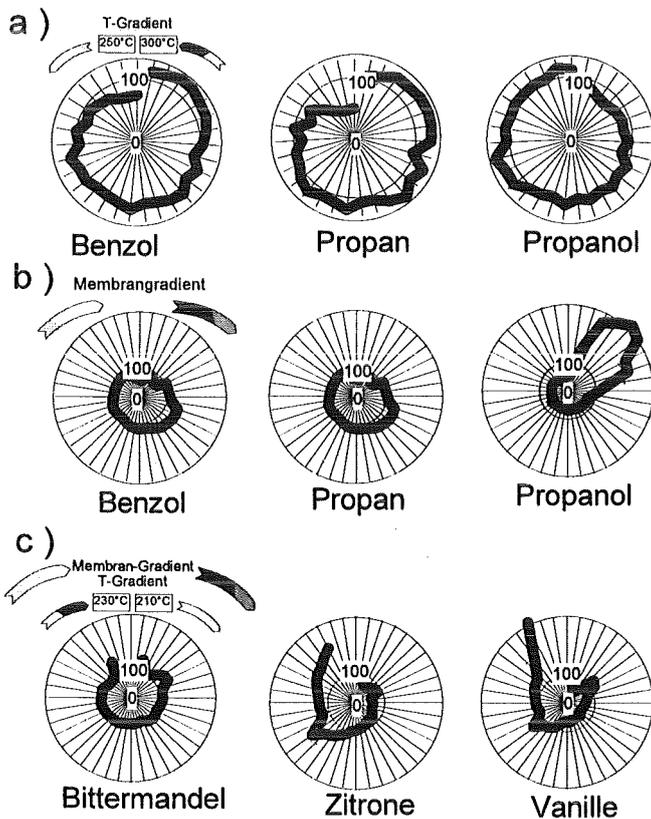


Bild 3 : Gaserkennung durch Signalmusterauswertung. Die Signalmuster sind in Form normierter Radialdarstellungen gegeben; Signale der einzelnen Sensorelemente sind auf das Mittel aller bezogen und radial aufgetragen. Der Kreis mit dem Wert 100 repräsentiert das Mittel. Signalmuster a) einzelner organischer Gase bei Differenzierung der Sensorelemente durch inhomogene Beheizung (Temperaturgradient), b) einzelner organischer Gase bei Differenzierung der Sensorelemente durch Membrandicke-Gradient und c) Differenzierung von Backaromen durch Kombination eines Temperatur- und eines Membrandicke-Gradienten.

In Bild 4 sind die relativen Leitfähigkeitsänderungen S ($=\Delta\sigma/\sigma_0$ bezogen auf Reinluft) als Funktion der Gaskonzentrationen wiedergegeben. Zur Linearisierung des Potenzgesetzes, das die Abhängigkeit der Leitfähigkeitsänderung von der Konzentration beschreibt, dient eine doppellogarithmische Darstellung. Die Empfindlichkeit zeigt sich demnach ausreichend, um die meisten Gase bis unter 1ppm nachzuweisen, da Leitfähigkeitsänderungen von 10% deutlich über dem Rauschen der Leitfähigkeitsmessung liegen.

Die Ansprechzeiten waren meist im Bereich zwischen 3 und 30 sec zu finden, wenn die Zeit bis zum Erreichen von 90% des stationären Endwerts zugrundegelegt wird. Dabei nehmen die Ansprechzeiten tendentiell mit abnehmender Konzentration und auch mit der Dicke der Beschichtung zu.

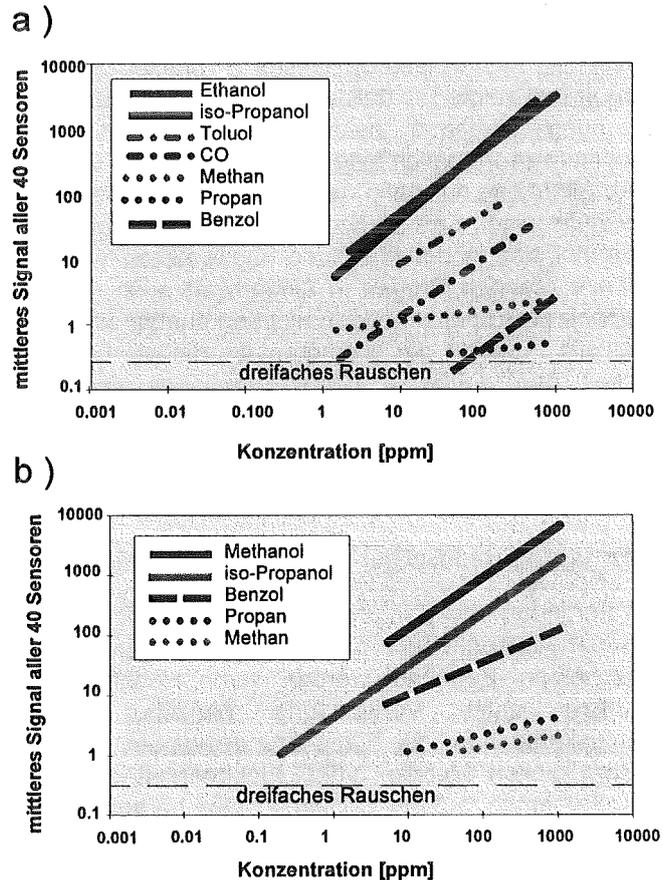


Bild 4 : Empfindlichkeitskurven für einige ausgewählte Gase in doppellogarithmischer Darstellung.. a) Gasdetektor aus reinem unbeschichtetem Zinndioxid mit Temperaturgradient 250 - 300°C. b) Gasdetektor aus Zinndioxid mit 0.7% Platindotierung und einer SiO_2 -Gradientenmembran, bei 300°C in 50% rel. Luftfeuchte betrieben.

Die Nachweisgrenzen zeigen jedoch durchaus deutliche Unterschiede. Diese Selektivität des Gasnachweises wird zuallererst vom Gasdetektormaterial bestimmt, das somit den Anforderungen der Anwendung entsprechend auszuwählen ist. So kann z.B. die geringe Empfindlichkeit des reinen SnO_2 für Benzol durch geringe Platindotierung um mehr als 2 Zehnerpotenzen erhöht werden, wie dem Vergleich von Bild 4a und 4b zu entnehmen ist. Die Erprobung von Wolframoxidchips zeigte andererseits eine viel höhere Empfindlichkeit für NO_2 als beim SnO_2 , besonders bei Temperaturen unter 300°C . Es ergibt sich sogar eine um Zehnerpotenzen höhere Empfindlichkeit von NO_2 verglichen zu organischen Gasen, sodaß sich dieser Chip für selektive NO_2 -Messungen anbietet.

Die Nachweisgrenze des einzeln in Luft vorhandenen Gases läßt sich jedoch nicht unverändert auf den Fall übertragen, wo mehrere Gase zum Signal erheblich beitragen, die nicht einem Gaskollektiv mit fixen Konzentrationsverhältnissen angehören. Die Untersuchung des Extremfalls eines besonders gut und eines deutlich schlechter nachweisbaren Gases (Propanol und Propan) in Luft zeigte [7], daß aus einem Signalmuster der Mischung durchaus beide Konzentrationen durch quantitativen Vergleich mit den Reinstoffen zu erhalten sind. Allerdings nur dann, wenn die Signalbeiträge vergleichbar sind. Das bedeutet, kleinste Mengen von Propanol sind in der Mischung nachweisbar, während kleinere Mengen Propan in Gegenwart auch nur vergleichbarer Propanolmengen nicht erkennbar sind. Hier setzt die Funktion der Membran an, die die Empfindlichkeit den gefragten Gasen anpassen kann. So konnte eine Al_2O_3 -Membran hergestellt werden, die die Empfindlichkeit des SnO_2 für Alkohole signifikant herabsetzt.

4. Fertigung und Betrieb des Gassensorchips

Die Fertigung erfolgt in drei Schritten im Rahmen einer Kleinserie ausgehend von beidseitig oxidierten 3"-Siliziumscheiben. Zunächst werden durch Hochfrequenz-Sputtern unter Verwendung einfacher Schattenmaskentechnik 26 Chip-Grundeinheiten mit ca. 100nm dicken Metalloxidfeld, Elektrodenstruktur und Heizelementen, auf der Siliziumscheibe hergestellt. Die Masken sind im Institut für Mikrostrukturtechnik mit Elektronenstrahlenschreiber strukturiert und mit einem galvanischen Verfahren angefertigt worden. Um ein Sauerstoffdefizit des deponierten Metalloxids zu vermeiden, wird das Metalloxidtarget reaktiv zerstäubt, indem eine Mischung von 20% Sauerstoff und 80% Argon als Plasmagas benutzt wird.

In einem zweiten Schritt werden die Chip-Grundeinheiten durch Laser vereinzelt und durch Ionenbeschuß 10nm zu Reinigungszwecken abgetragen. Anschließend erfolgt die Montage im Gehäuse und die elektrische Kontaktierung durch Ultraschallbonden mit Golddraht. Im letzten Schritt wird der Gassensorchip mit der

Membran ausgerüstet, die durch chemische Gasphasenabscheidung mit Ionenstrahlaktivierung erfolgt. Letztere ermöglicht die laterale Strukturgebung der Membran, da nur dort wo der Ionenstrahl das Kondensat des gasförmigen Vorläufermoleküls aktiviert, die Polymerisation zur keramischen Netzstruktur eintritt. Abschließend wird der Chip durch Tempern an Luft für 3 Tage auf etwa 300°C konditioniert.

Um den Gassensorchip mit geringem Aufwand betreiben zu können, ist in Zusammenarbeit mit der Hauptabteilung für Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (HPE) ein kompaktes Betriebsgerät in Größe einer Zigarrensachtel entwickelt worden. Gegenwärtig ermöglicht das Gerät unter Kontrolle eines schnellen Mikroprozessors die Regelung der Chiptemperatur im Zusammenwirken mit den Temperaturfühlern an der Oberfläche des Chips, die periodische sequentielle Leitfähigkeitsmessung aller Sensorelemente und die Bereitstellung der Daten nach Digitalisierung an einer seriellen Schnittstelle. Die Auswertung der Daten erfolgt dann in einem angeschlossenen PC. Die Kapazität des Prozessors ist allerdings hinreichend, um in Zukunft die gesamte gasanalytische Auswertung und eine zusätzliche Ergebnisbewertung im Betriebsgerät durchzuführen und über die Schnittstelle nur noch wenige resultierende Größen auszugeben, wie gemessene Konzentrationen oder die Präsenz von Aromen.

5. Perspektive

Die zukünftige Arbeit am Gassensorsystem wird drei Schwerpunkte haben. Die Weiterentwicklung von Gasdetektoren und insbesondere aktiven Membranen soll zu einem „Baukasten“ führen, der für verschiedenste Anwendungen die Zusammenstellung einer geeigneten Ausrüstung für anwendungsspezifische Chips ermöglicht. Die Gradientenmethode zur Signalmustererzeugung und das Musterauswertungsverfahren muß weiter ausgebaut werden, um für Multikomponentengemische möglichst viele Komponenten separat bestimmen zu können. Vor allem aber wird in Kooperation mit Anwendern der Einsatz des Gassensorchips zu erproben sein, um die Anforderungen für praxistaugliche Gassensorchips in die Entwicklung einfließen zu lassen.

6. Danksagung

Wir danken den Mitarbeitern Almut Dahlke, Steffen Ehrmann, Markus Frietsch-Klarhof und Günter Schütt für die außerordentlich engagierte Beteiligung an dieser Entwicklung. M. Bruns und S. Dosenbach sind wir für den Einsatz der Sputterverfahren zur Fertigung der Chipgrundeinheiten verpflichtet. Dem IMT danken wir für die große Kooperativität zur Herstellung der Masken. Der HPE sind wir für die effektive Zusammenarbeit bei der Entwicklung des kompakten Betriebsgeräts dankbar.

7. Literatur

- [1] W. Göpel, T. A. Jones, M. Kleitz, J. Lundström, and T. Seiyama (eds.), „Sensors a Comprehensive Survey“, Vol. 2, „Chemical and Biochemical Sensors“, Part I, VCH, Weinheim, 1991.
- [2] P. K. Clifford and D. T. Tuma, „Characteristics of Semiconductor Gas Sensors: I Steady State Response“, *Sensors and Actuators* 3, 233 (1982/83).
- [3] U. Weimar, S. Vaihinger, K. D. Schierbaum, and W. Göpel, „Multicomponent Analysis in Chemical Sensing“ in N. Yamazoe (edt.), „Chemical Sensor Technology“, Vol. 3, Elsevier, Amsterdam, 1991.
- [4] "Platindotierung von Zinndioxidschichten zur Anwendung in einem Gassensor-Mikrosystem"; F. Finsterwalder, Diplomarbeit, Fakultät Chemie, TH Karlsruhe, 1995
- [5] "Organically modified SiO₂- and Al₂O₃-Films as selective Components for Gas Sensors"; P. Althainz, A. Dahlke, M. Frietsch-Klarhof, J. Goschnick and H. J. Ache; *Physica Status Solidi (a)*; 145 (1994) 611
- [6] " Reception Tuning of Gas Sensor Microsystems by Selective Coatings"; P. Althainz, A. Dahlke, M. Frietsch-Klarhof, J. Goschnick, H. J. Ache; *Sensors and Actuators*, B24-25, (1995) 366
- [7] " Multisensor Microsystem for Contaminants in Air"; P. Althainz, J. Goschnick, S. Ehrmann, and H.J. Ache, *Sensors and Actuators*, im Druck

Integriert-optischer Sensor für die in-situ-Bestimmung organischer Schadstoffe

J. Bürck, J. Mayer, B. Zimmermann, H.-J. Ache

Institut für Radiochemie

Zusammenfassung

Es werden Arbeiten zur Entwicklung eines integriert-optischen Sensors für die Detektion unpolarer organischer Schadstoffe in Wasser beschrieben, dessen Transduktionsprinzip auf der Lichtabsorption im evaneszenten Feld beruht (IO-EFAS). Der Sensor besteht aus einer multimodigen Streifenwellenleiterstruktur, welche auf einem planaren 3"-Borosilikat-Glaswafer durch photolithographische Verfahren und thermischen Na⁺/Ag⁺-Ionenaustausch erzeugt wird und einer hydrophoben Silicon-Superstratschicht, die organische Substanzen wie z.B. Chlorkohlenwasserstoffe aus Wasser oder Luft reversibel anreichert. Das kontinuierliche Licht einer Wolframlampe wird über Fasern in die IO-Struktur ein- und ausgekoppelt und die Nahinfrarot-Absorption der angereicherten Spezies über das evaneszente Feld mit einem Diodenarray-Spektrographen gemessen. Als Sensormembranen werden Poly-methyl-phenylsiloxane mit variierender Brechzahl und unterschiedlicher Quervernetzung präpariert und getestet. Eine Abnahme der Lichttransmission aufgrund von Streulichtverlusten, verursacht durch die Bildung von "Wasser-Mikroemulsionen" in der Sensormembran in wäßrigen Lösungen, kann durch Silicon-Superstrate mit hoher Quervernetzung und Hydrophobizität weitgehend vermieden werden. Die Meßempfindlichkeit kann durch Anpassung der Superstrat-Brechzahl an die des Wellenleiters deutlich gesteigert werden. Messungen an wäßrigen und gasförmigen Trichlorethenproben wurden mit Erfolg durchgeführt und zeigten Sensitivitätssteigerungen um Faktor 32-120 pro Längeneinheit gegenüber einer faseroptischen Sensorvariante. Die kürzesten Sensoransprechzeiten (t_{90} -Werte) bei wäßrigen Trichlorethenproben liegen momentan im Bereich von 7 Minuten, können aber durch eine weitere Verringerung der Superstratschichtdicke von 30 auf etwa 10 µm noch deutlich verbessert werden.

1. Einleitung

Die Belastung von Sicker- und Abwasser aus technischen Anlagen mit organischen Substanzen wie z.B. Chlorkohlenwasserstoffen oder aromatischen und aliphatischen Kohlenwasserstoffen ist ein weltweites Problem. Infolge unzureichender Schutzmaßnahmen sind diese Substanzen vielerorts in die Umwelt gelangt und stellen dort u.a. eine Gefahr für das Grundwasser dar. Zur Emissionskontrolle in Industrieanlagen oder Überwachung von Sanierungsmaßnahmen in kontaminierten Bereichen ist eine schnelle und kostengünstige in-situ-Bestimmung des Schadstoffgehaltes z.B. in Sanierungsbrunnen oder im Prozeßabwasser notwendig.

Optische Sensoren auf dem Prinzip des evaneszenten Feldes weisen ein hohes Potential für die Überwachung von Schadstoffen bei umweltanalytischen Messungen auf. In diesem Zusammenhang wurde am Institut für Radiochemie (IRCH) des FZK ein Faseroptiksensor entwickelt, dessen Eignung zur Vor-Ort-Überwachung von organischen Schadstoffen in belasteten Wässern bei mehreren Feldexperimenten demonstriert werden konnte [1]. Hierbei zeigte sich, daß Schadstoffkonzentrationen bis in den unteren ppm-Bereich detektiert werden können. Das zur in-situ-Detektion geeignete Meßprinzip beruht auf der reversiblen Anreicherung unpolarer organischer

Schadstoffe im Polymerfasermantel des Lichtleiters und der direkten absorptionspektroskopischen Messung der eindiffundierten Spezies im evaneszenten Lichtfeld (evaneszente Feldabsorption= EFA) [2].

Ausgehend von theoretischen Überlegungen ergibt sich, daß durch eine Erniedrigung des Wellenleiterdurchmessers (beim faseroptischen Sensor 200 oder 400 µm) eine Erhöhung der EFA-Meßempfindlichkeit erzielt werden sollte. Dies läßt sich aufgrund der erhöhten Anzahl von Reflexionen und des höheren Lichtanteils im evaneszenten Feld von Multimode-Wellenleitern mit Durchmessern im Bereich von 30 - 50 µm erwarten.

Planare Streifenwellenleiter, welche im Bereich der integrierten Optik zum Einsatz kommen, bieten die Möglichkeit EFA-Sensoren mit entsprechenden Wellenleiterabmessungen durch Einsatz von Mikrostrukturtechniken weitgehend automatisiert herzustellen. Weitere Vorteile gegenüber bisherigen faseroptischen Sonden, bestehen in der bei planarer Geometrie wesentlich einfacher zu realisierenden Beschichtung der lichtführenden Struktur mit der sensitiven Membran, der höheren mechanischen Stabilität im Vergleich zu einer spiralförmig aufgespulten Faser und nicht zuletzt in der besseren Integrationsfähigkeit eines IO-Sensors in ein analytisches Mikrosystem. Zur direkten spektroskopischen Detek-

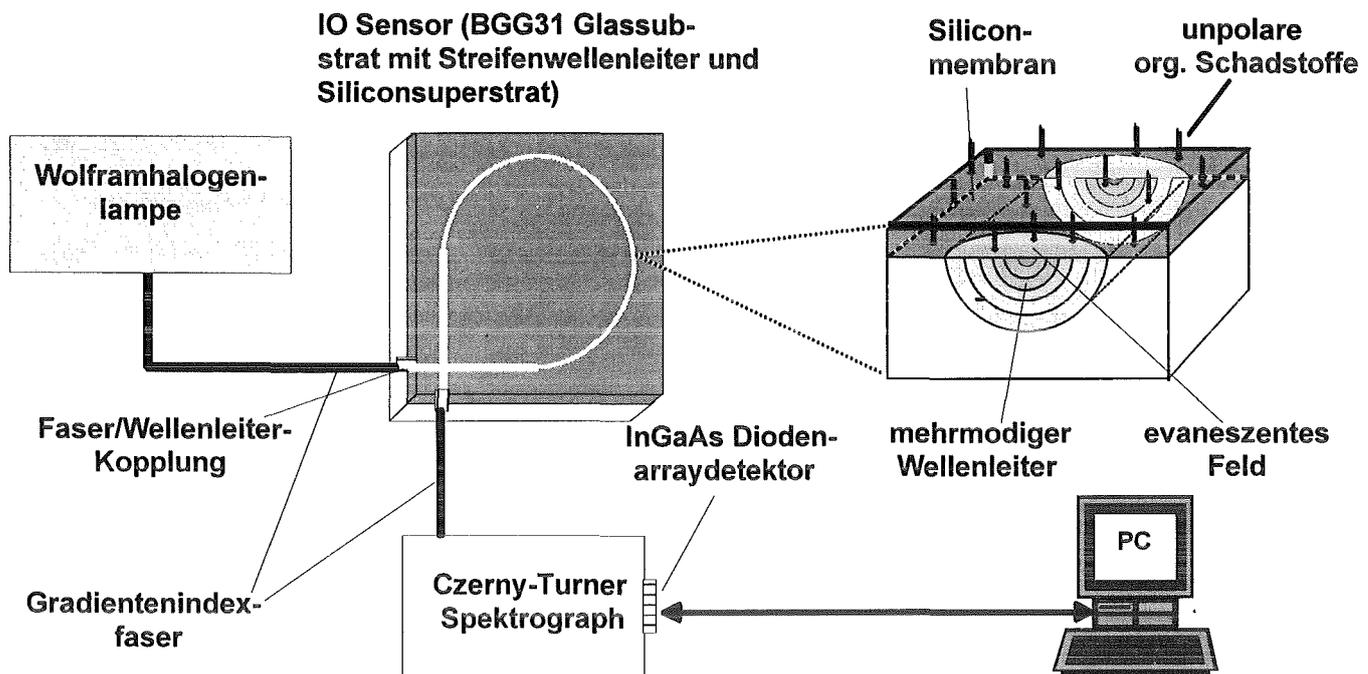


Abb. 1.: Schematische Darstellung des Meßprinzips des IO-EFA-Sensors und des Aufbaus für Absorptionsmessungen im evaneszenten Feld.

tion organischer Substanzen im evaneszenten Feld sind vor allem der Nahinfrarot- (NIR) und der Infrarot- (IR) Wellenlängenbereich geeignet. Planare Wellenleiterstrukturen für den NIR-Bereich sind u.a. durch Ionenaustauschprozesse in Borosilikatgläsern zugänglich.

Aufgrund dieser Überlegungen wird im Rahmen des Projektes Mikrosystemtechnik im FZK und in Zusammenarbeit mit der Fa. IOT, Waghäusel und der Universität Dortmund an der Entwicklung integriert-optischer EFA-Sensoren mit im Vergleich zum faseroptischen Vorgänger verbesserten Spezifikationen gearbeitet.

2. Meßprinzip und Sensoraufbau

2.1 Prinzip der evaneszenten Feldabsorption

Als Sensorprinzip wird der absorptions-spektroskopische Nachweis von Schadstoffmolekülen im evaneszenten Feld eines mit einer Polysiloxanmembran beschichteten integriert-optischen Streifenwellenleiters eingesetzt. Das Meßprinzip und der Aufbau des Sensors ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Ein Teil des Sensors bildet eine schleifenförmige, multimodige Wellenleiterstruktur, welche mittels photolithographischer Techniken und einem thermischen Ag^+/Na^+ -Ionenaustausch in einem Borosilikatglas-Substrat erhalten wird. Diese Oberflächenwellenleiter-Struktur hat einen Brechzahlgradienten

senkrecht zur Substratoberfläche, mit der höchsten Brechzahl nahe an der Oberfläche. Hierdurch und durch die kleineren Wellenleiterdimensionen gegenüber der faseroptischen Variante, wird der evaneszente Feldanteil des geführten Meßlichtes erhöht. Die sensitive Membran, welche die Wellenleiterstruktur bedeckt, besteht aus einem Siliconpolymer, welches eine niedrigere Brechzahl als der Wellenleiter aufweist. Diese Superstratschicht dient in Kontakt mit wäßrigen oder gasförmigen Medien als hydrophobe Matrix für die reversible Anreicherung unpolare organischer Substanzen. Die Hydrophobizität der sensitiven Schicht ist eine wichtige Voraussetzung um eine Anreicherung von Wassermolekülen, welche durch die stark absorbierenden O-H-Banden die Messung der Kohlenwasserstoffmoleküle stören würden, weitgehend zu unterdrücken. Der evaneszente Feldanteil der im Wellenleiter geführten Moden, welcher in die Siliconsuperstratschicht hineinragt, wechselwirkt mit den dort angereicherten organischen Spezies. Wenn Licht des NIR-Bereiches in den Wellenleiter eingekoppelt wird, kann die Lichtabsorption im Bereich der C-H Oberton- oder Kombinationsbanden für eine qualitative und quantitative Bestimmung der Substanzen genutzt werden.

2.2 IO-Wellenleiterstruktur

Das Basiselement des Sensors bildet eine multimodige Oberflächenwellenleiter-Struktur mit halbkreisförmigem Profil und einem Modenfeldquerschnitt von ca. $35 \times 20 \mu\text{m}^2$, welche durch thermischen Ag^+/Na^+ -Ionenaustausch an einem 3"-Glaswafer erhalten wird.

Als Substratmaterial wurde BGG31 Natriumborosilikatglas verwendet, welches im Bereich der Analytabsorptionsbanden eine gute Lichttransmission aufweist. Die Wellenleiterstruktur wurde mittels photolithographischer Techniken und einem bei der Fa. IOT entwickelten Ionenaustauschprozeß zur Erzeugung von Streifenwellenleitern in Glas, hergestellt [3]. Die zunächst realisierte Wellenleiterstruktur besteht aus einer 270°-Wellenleiterschleife mit 26 mm Radius, die in zwei gerade Wellenleiterabschnitte mündet, welche sich in einem Winkel von 90° schneiden. Die Gesamtlänge der Struktur beträgt 172 mm. In Abhängigkeit von den Ionenaustauschbedingungen kann die Brechzahl der Wellenleiterzone im Bereich von 1,47-1,54 (gemessen bei 589 nm) eingestellt werden. Der Ionenaustauschprozeß erfolgt durch Eintauchen des mit einer strukturierten Titanmaske beschichteten BGG31-Glassubstrates in eine AgNO_3 / NaNO_3 -Schmelze. Um eine multimodige Struktur zu erhalten, wird der thermische Na^+/Ag^+ -Ionenaustausch über einen Zeitraum von ca. 16 - 22 h bei 300 °C durchgeführt. Nach Entfernung der Titanmaske wird der Wafer auf seine endgültige Form zurechtgesägt und die Kanten mit den Wellenleitenden poliert. Die planare Wellenleiterstruktur wird an 50 μm -Gradientenindex (GI)-Fasern adaptiert, welche entweder in V-förmig gesägte Glasplättchen oder Silicium-Arrays eingelegt und verklebt werden. Die Faser-Wellenleiter-Verbindung wird nach entsprechender Justage durch Ankleben der Glasplättchen an die Polierkanten des Sensor-Wafers erhalten. Die mechanisch empfindlichen Faser-Wellenleiter-Verbindungen werden anschließend durch ein stabiles und abgedichtetes Teflongehäuse geschützt. Abb. 2 zeigt die Photographie eines konfektionierten IO-EFA-Sensors.

2.3 Sensitive Schicht

Als sensitive Schichten, welche sich zur Anreicherung unpolarer organischer Substanzen eignen, werden im IRCH vor allem Polysiloxane mit Methyl- (PDMS) und Phenylgruppen (PMPS) eingesetzt. Durch den Einbau von Phenylgruppen in das Polysiloxan-Netzwerk kann die Brechzahl des Superstrates über einen relativ weiten Bereich variiert und an die Brechzahl des Wellenleiters angenähert werden. Als Vorläufer-substanzen der Siliconmembranen wurden einerseits α - ω -Dihydroxy-poly(di-methyl-co-methyl-phenyl-siloxane), welche durch Hydrolyse entsprechender Dichlor-diorgano-silane erhalten werden [4], andererseits Vinylgruppen-haltige, Dimethyl-diphenyl-siloxan-Copolymere [5] untersucht. Die Aushärtung der flüssigen Vorläuferpolymere erfolgt über zwei verschiedene Mechanismen: Die α - ω -Dirole werden durch eine Kondensationsreaktion mit Alkoxysilanen und einem Zinnkatalysator ausgehärtet. Die Organopolysiloxane mit ungesättigten Gruppen werden mit Hilfe eines Photosensibilisators (Diethoxyacetophenon) und UV-

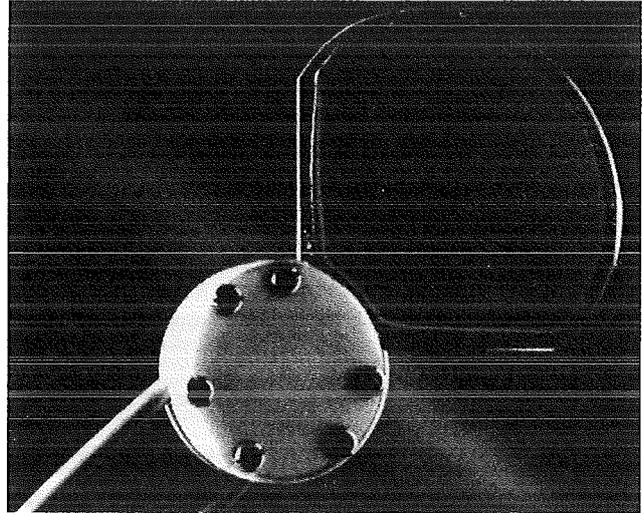


Abb. 2. : Photographie eines konfektionierten IO-EFA-Sensors; die Siliconmembran bedeckt die gesamte Waferoberfläche; die Faser-Wellenleiter-Verbindungen (Si-Arrays) werden durch ein abgedichtetes Teflongehäuse geschützt.

Bestrahlung vernetzt. Abhängig von ihrer Viskosität werden die Silicone in reiner Form oder gelöst in Toluol entweder durch einfaches Aufgießen oder durch Spray-Coating auf das in einer Vorrichtung fixierte Wellenleitersubstrat aufgebracht. Die Silicone verteilen sich aufgrund ihrer relativ geringen Oberflächenspannung relativ leicht über die gesamte Waferfläche und bilden nach einer Wartezeit von etwa einer Stunde einen gleichmäßigen Film, der anschließend vernetzt wird. Mit dieser Vorgehensweise wurden Siliconmembranen mit Schichtdicken von ca. 10-100 μm erhalten, welche je nach Vernetzungsmechanismus und Schichtdicke innerhalb von 10 Minuten bis zu 24 Stunden bei Raumtemperatur aushärten.

2.4 NIR-Spektrometer für IO-EFA Messungen

Abbildung 1 zeigt den optischen Meßaufbau für die Optimierung der Sensoreigenschaften. Das breitbandige Meßlicht einer Wolframhalogenlampe (100 W) wird über eine der GI-Fasern in den IO-EFA-Sensor eingekoppelt. Die zweite GI-Faser führt das Meßlicht zu einem Simultanspektrometer. Als dispergierendes Element im Spektrometer wird ein planares Gitter mit 300-Linien/mm verwendet, welches in einem Czerny-Turner-Aufbau angeordnet ist. Eine InGaAs-Diodenzeile mit 256 Dioden dient als Detektor, welcher im NIR-Bereich bis zu Wellenlängen um 1680 nm eingesetzt werden kann. Die Spektrographeneinheit erlaubt in der angegebenen Konfiguration eine simultane Messung von NIR-EFA-Spektren in einem Wellenlängenbereich von 120 nm. Die verwendeten Apparaturen zur Durchführung der Messungen, die Herstellung entsprechender Kalibrationsproben und

deren Validierung über eine Referenzanalyse mittels UV-Spektrometrie, sowie die Durchführung der Messungen an der Modells substanz Trichlorethen (TCE) mit IO-EFA-Sensoren sind in [4] ausführlich beschrieben.

3. Ergebnisse

3.1 Einfluß des Phenylierungsgrades der Siliconmembran auf Brechzahl und TCE-Verteilungskoeffizient

Die mittlere Eindringtiefe des evaneszenten Feldes des im IO-Wellenleiter in verschiedenen Moden geführten Meßlichtes wird in starkem Maße von der Brechzahl des Silicon-Superstrates beeinflusst. Durch geeignete Wahl der Superstratbrechzahl läßt sich die Wechselwirkung des evaneszenten Lichtfelds mit den im Superstrat angereicherten Analytmolekülen erhöhen. Um die Eindringtiefe und die Meßempfindlichkeit des Sensors zu steigern, muß die Brechzahl der Siliconschicht soweit wie möglich an die der Wellenleiterzone angenähert werden. Andererseits bewirkt eine geringere Brechzahldifferenz von Superstrat und Wellenleiter zusätzliche Lichtverluste, da hierdurch Moden höherer Ordnung ausgekoppelt werden. Die intrinsische Einfügedämpfung der untersuchten Wellenleiterstrukturen ist durch Lichtverluste bei den Faser-Chip-Verbindungen und im Wellenleiterkreisbogen, mit Werten um 14- 18 dB recht hoch. Zusätzliche Lichtverluste durch das Superstrat sollten möglichst gering gehalten werden. Daher muß bei der Annäherung der Brechzahl ein Kompromiß zwischen Empfindlichkeitssteigerung der Messung und abnehmenden Signal-zu-Rausch-Verhältnis gefunden werden.

Durch die höhere molare Refraktivität von Phenylgruppen gegenüber Methylgruppen kann die Brechzahl der präparierten Siliconmembranen über den Phenylierungsgrad im Polymeren eingestellt werden. In Abbildung 3 sind die Brechungsindexwerte für verschiedene Polysiloxane, welche im IRCH synthetisiert wurden als Funktion des molaren Phenyl-/ Methyl-Verhältnisses im ausgehärteten Polymeren aufgetragen. Durch Aushärtung geeigneter Mischungen dieser Polysiloxane läßt sich die Brechzahl im Bereich von 1,41-1,55 exakt auf einen optimalen Wert einstellen.

Darüber hinaus werden durch den Einbau von Phenylgruppen in das Polymernetzwerk auch die Anreicherungseigenschaften für unpolare organische Analyten verbessert. So erhöht sich der Verteilungskoeffizienten für die Anreicherung von Trichlorethen aus wäßriger Lösung bei einem Polymer mit einem Phenyl-/Methyl-Verhältnis von 0,67 gegenüber PDMS um Faktor 1,7. Die Trichlorethen-Verteilungskoeffizienten (K_{PW} -Werte) für die verschiedenen Polymere sind ebenfalls in Abb. 3 aufgetragen. Diese verbesserten Anreicherungseigen-

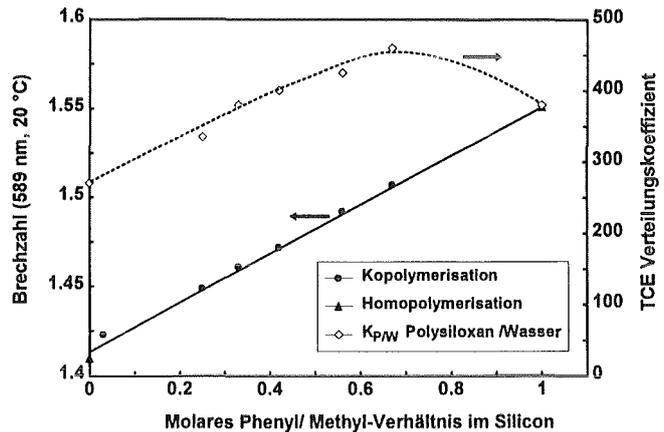


Abb. 3. : Brechzahl ausgehärteter, phenylhaltiger Polysiloxane (bei 589 nm, 20°C) und Trichlorethen-Verteilungskoeffizient (Silicon/wäßrige Phase) in Abhängigkeit vom molaren Phenyl/Methyl-Verhältnis im Polymer (Polymere dienen als Superstratschicht).

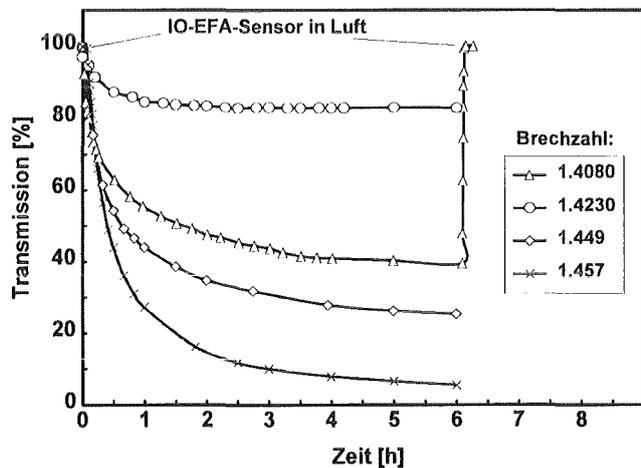


Abb. 4. : Vergleich der Lichttransmissionsverluste von IO-EFA-Sensoren in Kontakt mit Wasser; die Silicon-Superstratschichten (PDMS und PMPS) mit verschiedenen Brechzahlen wurden entweder durch Polykondensation ($n=1,408$; $1,449$; und $1,457$) oder durch UV-Polymerisation ($n=1,423$) vernetzt.

schaften phenylhaltiger Silicone für TCE werden durch die stärkeren molekularen Wechselwirkungen des Analyten mit den Phenylgruppen bewirkt und sind auch für andere unpolare Substanzen gültig [6]. Neben der Brechzahloptimierung trägt somit eine erhöhte Analytanreicherung im Polymeren ebenfalls zu einer erhöhten Meßempfindlichkeit bei.

3.2 Wasserquerempfindlichkeit von Polysiloxan-Sensormembranen

Bei IO-EFA-Messungen in wäßriger Phase können je nach verwendeter Siliconmembran Probleme mit Lichtverlusten auftreten, wenn der Sensor in Kontakt

mit Wasser kommt. Diese Lichtverluste im gesamten untersuchten NIR-Wellenlängenbereich treten bei allen bisher untersuchten Membranen auf, sie sind aber besonders groß für Silicone, welche durch Kondensationsreaktionen vernetzt werden. Diese Polymere haben einen geringen Vernetzungsgrad und besitzen darüber hinaus freie OH-Gruppen. In Abb. 4 sind die im Bereich 1580-1680 nm gemittelten Transmissionsverluste von IO-EFA-Sensoren mit verschiedenen Silicon-Superstratschichten bei Kontakt mit Wasser aufgetragen. Die Werte wurden auf die ursprüngliche Transmission in Luft (100%-Wert) normiert. Für die kondensationsvernetzten Superstratschichten ($n=1,408$; $1,449$ und $1,457$) nehmen die Transmissionswerte mit der Zeit drastisch ab und erreichen nach etwa 4-5 h lediglich noch Werte zwischen 40 und 10%. Werden die Sensoren aus der wässrigen Phase entnommen, sind durch Ausgasen der Wassermoleküle bei allen Membranen schon nach wenigen Minuten die ursprünglichen Werte wieder erreicht (gezeigt in Abb. 4 für $n=1,4080$) [7]. Diese reversiblen Lichtverluste sind bei steigender Superstratbrechzahl und höherem Phenylgehalt zunehmend stärker ausgeprägt. Mit diesen Superstraten sind bei Messungen in wässrigen Lösungen daher lange Detektor-Integrationszeiten erforderlich, die das Signal-Rausch-Verhältnis verschlechtern.

Diese extremen Lichtverluste werden hauptsächlich durch die Diffusion von Wassermolekülen in die Siliconschicht bewirkt. Obwohl die eindringende Wassermenge sehr gering ist, sind ihre Auswirkungen auf die Lichttransmission enorm. Das Wasser bildet "Mikroemulsionen" zwischen den Polymerketten, welche makroskopisch als Trübung in den Siliconpolymeren zu erkennen sind (in Luft sind diese Polymere transparent). Diese Trübungen verursachen Streulichteffekte im evaneszenten Lichtfeld und reduzieren somit die Transmission empfindlich. Daher zielen die momentanen Arbeiten dahin, hydrophobere Membranen mit geringerer Tendenz zur Stabilisierung von Wasseremulsionen zu entwickeln. Dies kann durch wesentlich stärker quervernetzte, photopolymerisierbare Silicone erreicht werden. Für die Schicht mit $n=1,423$, welche durch UV-Bestrahlung einer UV-härtenden Siliconausgangsmischung erhalten wurde, ist die Lichttransmission deutlich verbessert und die Werte gehen nur auf 85% zurück. Die verbesserte Lichttransmission dieses Sensors spiegelt sich auch im niedrigeren Rauschen der Basislinie bei den TCE-Messungen wider (vgl. Abb. 5). Dies zeigt, daß durch die Umstellung des Vernetzungsmechanismus deutliche Verbesserungen in der Wasserquerempfindlichkeit erreichbar sind und Arbeiten zur Optimierung der Membranen in dieser Richtung fortgesetzt werden müssen.

3.3 IO-EFA-Messungen wässriger TCE-Lösungen

Um das Ansprechverhalten der IO-EFA-Sensoren auf unpolare Substanzen zu testen und zu optimieren wurde Trichlorethen in wässriger Lösung als Modellsystem gewählt.

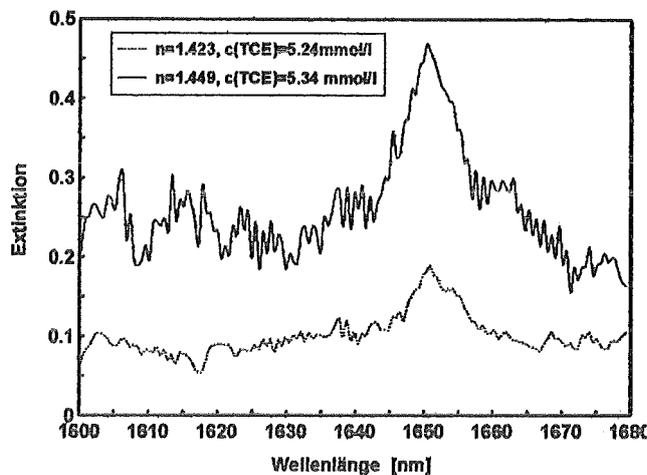


Abb. 5.: IO-EFA-Absorptionsspektren einer wässrigen TCE-Lösung gemessen mit zwei Sensoren mit unterschiedlicher Brechzahl des PMPS-Superstrates.

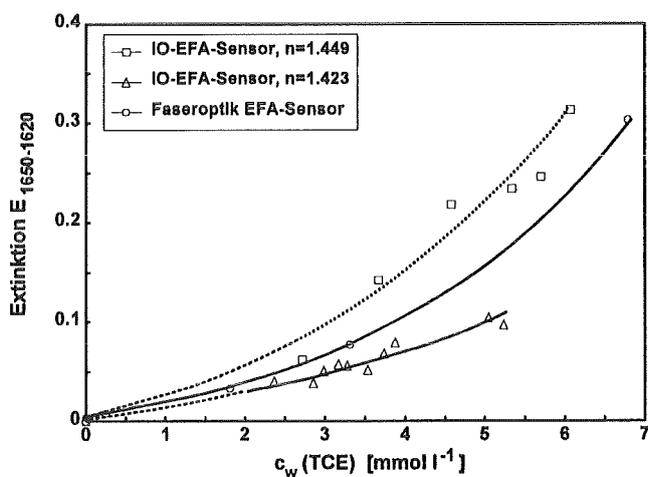


Abb. 6.: TCE-Kalibrationsfunktionen für zwei IO-EFA-Sensoren (172 mm Wechselwirkungsstrecke) mit unterschiedlicher Brechzahl und Vergleich mit der Kalibrationsfunktion für einen faseroptischen EFA-Sensor (3000 mm WW-Strecke, 400 μ m Kerndurchmesser)

Die Erhöhung der Sensitivität durch Brechzahlanpassung und eine gesteigerte Analyt-anreicherung lassen sich an Hand der Abb. 5 und 6 experimentell belegen. Abb. 5 zeigt mit dem IO-EFA-Sensor gemessene NIR-Spektren wässriger TCE-Lösungen für Silicon-Superstrate mit Brechzahlen von 1,423 und 1,449. Der Absorptionspeak der C-H-Oberton-schwingung dieses Moleküls bei 1650 nm ist in beiden

Spektren deutlich zu erkennen, jedoch ist er bei gleicher TCE-Konzentration für die Membran mit höherer Brechzahl um Faktor 2 erhöht. Der Extinktions-Offset in beiden Spektren erklärt sich aus Lichtverlusten durch Anreicherung von TCE, welches eine relativ hohe Brechzahl von 1,477 aufweist. Dieser Effekt und die bereits erwähnte Wasserquerempfindlichkeit des kondensationsvernetzenden Silicones mit Brechzahl 1,449 tragen zu dem erhöhten Rauschen im TCE-Spektrum bei, während sich die geringere Wasseraufnahme des stärker quervernetzten Silicones mit einer Brechzahl von 1,423 im reduzierten Rauschen der Basislinie bemerkbar macht. Abb. 6 zeigt einen Vergleich der Kalibrationsfunktionen von TCE-Messungen in wäßriger Phase für diese beiden IO-EFA-Sensoren und einen faseroptischen EFA-Sensor. Alle Kalibrationsfunktionen weisen bei höheren TCE-Konzentrationen positive Abweichungen von der Linearität auf. Dieser Extinktions-Offset ergibt sich aus Lichtverlusten durch die Brechzahlerhöhung bei der Anreicherung von TCE im Superstrat. Die Empfindlichkeitssteigerung um Faktor 2 bei Erhöhung der Brechzahl der Siliconmembran von 1,423 auf 1,449 ist nochmals deutlich anhand der größeren Steigung der Kurve zu erkennen. Darüber hinaus zeigt sich, daß die TCE-Extinktionswerte des IO-EFA-Sensors mit $n = 1,449$ und einer Wechselwirkungsstrecke von lediglich 172 mm, schon deutlich höher liegen als die des faseroptischen Sensors mit einer Wechselwirkungsstrecke von 3000 mm. Vergleicht man die aus diesen Messungen und weiteren Experimenten mit Silicon-Superstraten ähnlicher Brechzahl erhaltenen Sensitivitäten der integriert-optischen und faseroptischen EFA-Sensoren und normiert auf die Länge der Wechselwirkungsstrecke, so zeigt sich, daß die IO-Version bei wäßrigen TCE-Lösungen um bis zu Faktor 32 und für TCE-Messungen in der Gasphase um Faktor 120 sensitiver ist [4,5]. Dies belegt klar die eingangs postulierte Empfindlichkeitsteigerung von EFA-Messungen, durch den Einsatz integriert-optischer Strukturen mit gegenüber der Faseroptik deutlich reduzierten Wellenleiterdimensionen und Brechzahl-optimierten Superstratschichten.

Es zeigt sich aber auch, daß durch das hohe Rauschen der Basislinie bei Konzentrationen $< 2 \text{ mmol l}^{-1}$ der TCE-Peak nicht mehr aufgelöst werden kann. Daher sind die weiteren Arbeiten zur Optimierung der sensitiven Schicht auf die Präparation von Siliconmembranen mit Brechzahlen um 1,45- 1,46 und minimaler Wasserquerempfindlichkeit ausgerichtet, um Verbesserungen im Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erreichen.

Die Ansprechzeiten der IO-EFA-Sensoren für TCE in wäßriger Lösung sind stark von der Schichtdicke der Sensormembran abhängig. Während bei einer Schichtdicke von $55 \mu\text{m}$ t_{90} -Werte (Zeit um 90% des Gleichgewichtssignals zu erreichen) von 20 Minuten

erforderlich sind, werden die Werte bei $33 \mu\text{m}$ Schichtdicke schon deutlich auf ca. 7 Minuten reduziert [5]. Eine weitere Reduzierung der Membrandicke auf etwa $10 \mu\text{m}$ ist vorgesehen um noch schnellere Ansprechzeiten zu erhalten.

4. Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, daß ein integriert-optischer Ansatz zum Aufbau eines Sensors für unpolare organische Substanzen mittels Absorptionsmessungen im evaneszenten Feld eine leistungsstarke Alternative zum bereits realisierten faseroptischen EFA-Sensor ist. Er zeigt - bezogen auf die Wechselwirkungsstrecke - aufgrund seiner kleineren Wellenleiterabmessungen und dem höheren Anteil des Meßlichtes im evaneszenten Feld eine deutlich erhöhte Meßempfindlichkeit.

Um die beabsichtigte Verbesserung in den Nachweisgrenzen für relevante Schadstoffe zu erreichen, muß nun in den weiteren Arbeiten die Wellenleiterstrecke verlängert werden. Bei der nächsten Version des Sensors wird dies durch Strukturierung mehrerer Wellenleiterschleifen realisiert. Andererseits muß die sensitive Siliconmembran auf möglichst geringe Wasserquerempfindlichkeit und eine Brechzahl im Bereich von 1,45-1,46 hin optimiert werden.

Sind diese Zwischenziele erreicht, kann durch Kombination des Sensors mit der im IMT in Entwicklung befindlichen NIR/IR-Version des Mikrospektrometers und einer geeigneten miniaturisierten Weißlichtquelle ein analytisches Mikrosystem für die in-situ-Analyse im Umweltbereich aufgebaut werden.

Literatur:

- [1] Bürck J., Conzen J.-P., Klunder G., Zimmermann B., Ache H.-J.: "In-situ determination of chlorinated hydrocarbons in ground waters using a fiber optic evanescent wave sensor" in Arendt F. et al. (Hrsg.), Control and Monitoring, *Contaminated Soil '93*, Berlin, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, (1993) 917.
- [2] Bürck J., Conzen J.-P., Beckhaus B., Ache H.-J.: "Fiber-optic evanescent wave sensor for in-situ determination of nonpolar organic compounds in water", *Sensors & Actuators B* 18-19 (1994) 291-295.
- [3] Roß L.: "Integrated optical components in substrate glasses", *Glastechnische Berichte* 62 Nr.8 (1989) 285-297.
- [4] Zimmermann B.: "Herstellung, Charakterisierung und Optimierung von Siloxanpolymerbeschichtungen für optische Sensoren auf der Basis von Absorptionsmessungen im evaneszenten Feld", Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5514, Februar 1995.

[5] Mayer J., Bürck J., Ache H.-J.: "Optimization of an IO evanescent wave absorbance sensor for the determination of chlorinated hydrocarbons in water" submitted to Fresenius J. Anal. Chem. (1995).

[6] Zimmermann B., Bürck J., Ache H.-J.: "Verteilungsverhalten organischer Substanzen in Wasser/Siliconpolymer-Systemen", Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 4967, (1991).

[7] Bürck J., Mayer J., Zimmermann B., Ache H.-J.: "Integrated-optical sensor for chemical analysis based on near-infrared evanescent wave absorbance measurements", Proceedings des European Symposium on Optics for Environmental and Public Safety (SPIE), München, 19.-23. Juni 1995.

Neue Materialien für die Mikrosystemtechnik

Abformen mit ungefüllten und gefüllten Kunststoffen

R. Ruprecht¹⁾, W. Bacher²⁾, V. Piötter¹⁾, L. Schmidt¹⁾

¹⁾ Institut für Materialforschung III

²⁾ Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Zur Herstellung von Kunststoffmikrostrukturen werden am Forschungszentrum Karlsruhe in Kooperation mit Firma microParts, Dortmund, Abformverfahren weiterentwickelt. Die Kunststoffabformung von Mikrostrukturen liefert Komponenten für Mikrosysteme, beispielsweise Mikropumpen oder Mikroventile für die Analysetechnik sowie Multiplexerbausteine oder Y-Koppler für die optische Datenübertragung. Daneben werden aber auch verlorene Formen für die Herstellung von Metall- oder Keramikmikrostrukturen abgeformt.

In den vergangenen Jahren wurden einige Verfahren zur Herstellung von Metallmikrostrukturen durch Abformung und Galvanoformung entwickelt und bereits für Mikrostrukturen mit spezieller Geometrie erfolgreich eingesetzt. Diese Verfahren sind jedoch für eine Serienfertigung von Metallmikrostrukturen nur bedingt tauglich und damit weniger wirtschaftlich. Deshalb wird derzeit unter Förderung des Stifterverbandes Metalle ein Verfahren unter Nutzung der Spritzgießtechnik entwickelt, um Metallmikrostrukturen wirtschaftlich in Serie fertigen zu können. Dabei wird das Spritzgießen von Thermoplasten, die mit unterschiedlichen Gehalten an Leitruß gefüllt sind, eingesetzt, um leitfähige Mikrostrukturen abzuformen, die anschließend zu Metallmikrostrukturen, wie beispielsweise Spinddüsenstrukturen, galvanisiert werden.

1. Einleitung

Im Rahmen der Weiterentwicklung des LIGA-Verfahrens am Forschungszentrum Karlsruhe haben sich die Abformverfahren Spritzgießen, Reaktionsgießen und Prägen für die Fertigung von Kunststoffmikrostrukturen etabliert [1]. Zusätzlich wurden weitere Abformverfahren durch deren Kombinationen [13, 18] und die positionierte Abformung mit dem Ziel der quasimonolithischen Integration von Mikroelektronik und LIGA-Mikrostrukturen entwickelt [2]. Die mit diesen Verfahren verarbeitete Werkstoffpalette (PMMA, PC, POM, PA [3]) wurde in den vergangenen drei Jahren sowohl um thermisch und chemisch stabile Kunststoffe (PSU [4], PVDF, PFA [5], Silikon), als auch um gefüllte Kunststoffe (POM-C, PA12-C [6]) oder keramikgefüllte Massen [7]) erweitert. Die abgeformten Kunststoff-Mikrostrukturen aus ungefüllten Thermoplasten, Duroplasten oder Elastomeren werden beispielsweise als passive optische Mikrobau- oder Gehäuseteile für fluidische Bauteile eingesetzt. Darüber hinaus werden Mikrostrukturen aus gefüllten und ungefüllten Kunststoffen als verlorene Mikroformen für die Herstellung von Metall- oder Keramikmikrostrukturen [8, 9] verwendet.

Im folgenden werden nach der Darstellung des Standes der Abformung mit ungefüllten Kunststoffen einige Varianten des LIGA-Verfahrens beschrieben, mit denen Metallmikrostrukturen durch Galvanoformung spezieller verlorener Kunststoffformen gefertigt werden.

2. Abformverfahren für Kunststoffmikrostrukturen

Seit mehr als zehn Jahren werden am Forschungszentrum Karlsruhe das Reaktionsgießen, Warmumformen (Prägen) und Spritzgießen als Abformverfahren für Kunststoffmikrostrukturen entwickelt. Damit werden sowohl Kunststoffkomponenten für die Mikrosystemtechnik als auch verlorene Formen für die Entwicklung und Herstellung von Keramik- und Metallmikrostrukturen abgeformt.

Das Reaktionsgießen wurde bisher für die Herstellung von Haftsichten zwischen Substraten und Kunststoffhalbzeugen, beispielsweise für die Abformung auf vorstrukturierten Substraten [10], vor allem aber für die Herstellung von Mikrostrukturen aus Duroplasten [11] oder Elastomeren eingesetzt. Beim Reaktionsgießen werden die Ausgangskomponenten wie Monomere oder Monomer-Polymergemische und Zusatzstoffe gemischt in den Formeinsatz eingespritzt und meist als kalthärtende Systeme im Formeinsatz auspolymerisiert. Die Zykluszeit wird durch die Polymerisationsgeschwindigkeit bestimmt und beträgt 30 Minuten bis 3 Stunden für PMMA-Systeme. Der Maschinenaufbau ist ähnlich wie bei einer Warmumformmaschine, ergänzt durch die Mischeinheit für die Ausgangskomponenten. Die Maschinen bestehen aus jeweils einem feststehenden und beweglichen Querhaupt, zwischen denen der evakuierbare Prozeßraum eingebaut ist. Im Prozeßraum, der aus zwei horizontal liegenden, parallel angeordneten Werkzeugplatten besteht, befinden sich auf den gegenüber liegenden Werkzeugplatten der Formeinsatz bzw. die Auswerfhilfen, dazwischen der Formstoff [5, 11].

Heute wird das Warmumformen (Prägen) für die Fertigung von Produktmustern, für die positionierte Abformung [2] und für die Kleinserienfertigung von mehrschichtigen optischen Bauteilen [13] eingesetzt. Hierbei wird ein plattenförmiges Kunststoffhalbzeug nach Erwärmung auf Werkzeugtemperatur über den Schmelzpunkt des Kunststoffes durch Einprägen des Formeinsatzes strukturiert. Da Werkzeug, Formeinsatz und Kunststoffhalbzeug auf Umformtemperatur erwärmt werden müssen, beträgt die Zykluszeit beim Warmumformen heute je nach Maschinentyp und Anforderungen der zu erzeugenden Mikrostruktur 25 bis 60 Minuten.

Die kostengünstige Serienfertigung von Kunststoffmikrostrukturen geschieht vor allem durch Spritzgießen, da dieses Verfahren gegenüber den anderen beschriebenen derzeit die Abformung von Mikrostrukturen in kürzesten Zykluszeiten erlaubt. Darüber hinaus ist die Maschinen- und Werkzeugtechnik beim Mikrospritzgießen gegenüber dem Vakuumwarmumformen (Prägen) oder Reaktionsgießen in Bezug auf einen wirtschaftlichen Industrieinsatz heute am weitesten entwickelt.

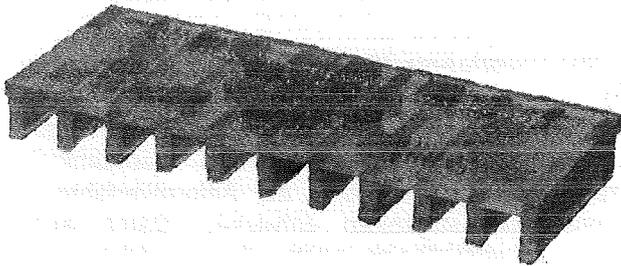


Abb. 1: PMMA-Mikrostrukturen mit Substrat, spritzgegossen aus einem mikromechanisch gefrästen Messingformeinsatz.

Im Rahmen der Arbeiten zur Verbesserung der Prozesssicherheit und Wirtschaftlichkeit des Spritzgießprozesses wurde die Zykluszeit im vergangenen Jahr um ca. 50 % reduziert für Mikrostrukturen mit Strukturhöhen von maximal 1300 μm und einem Aspektverhältnis von bis zu 5. Dazu wurden folgende Maßnahmen durchgeführt:

- Aufrüstung der vollautomatischen prozeßgesteuerten Spritzgießmaschine durch Granulatkonditionierung, -zuführung und -dosierung sowie Handhabungsgerät für die Teileentnahme,
- Optimierung der Vorlauftemperaturen in der Zweikreis-Werkzeugtemperierung,
- Verbesserungen in der Auslegung von Spritzgießwerkzeugen durch Einsatz der Softwarepakete ABAQUS und MOLDFLOW [19],
- Optimierung des Werkzeugtemperaturzyklus,
- Optimierung der Spritzparameter durch Simulation mit MOLDFLOW und Experimente [19].

Damit wurden für Mikrostrukturen aus PMMA (s Abb. 1) und POM 8 Minuten, für Pumpengehäuse (1400 Mikrogehäuse) aus PSU 9 Minuten Zykluszeit erreicht.

Das noch vorhandene Potential zur weiteren Reduzierung der Zykluszeit wird im Rahmen künftiger Arbeiten genutzt. Durch den Einsatz von Spritzgießwerkzeugen mit mehreren Formeinsätzen, die jeweils zehn bis hundert Formnester aufweisen, werden jedoch bereits heute Zykluszeiten pro Mikrostruktur erreicht, die mit denen konventioneller Spritzgießteile vergleichbar sind.

3. Komponenten für Mikrosysteme

Im folgenden werden einige Kunststoffmikrostrukturen, ihre charakteristischen Dimensionen und Werkstoffe aufgeführt, die im Berichtszeitraum durch Abformung mit ungefüllten Kunststoffen hergestellt wurden.

Die fluidischen Komponenten des elektrochemischen Mikroanalysesystems ELMAS wurden als Stapelaufbau von Kunststoffkomponenten realisiert [6]. Ein Array aus zwei Mikropumpen mit spritzgegossenen Gehäusen aus PSU ist über einem PMMA-Tank angeordnet. Darunter befinden sich ein spritzgegossenes Kanalsystem aus PMMA mit integrierten Gehäusen für die ChemFET-Sensoren. Es wurden mikrostrukturierte Folien aus Silikon im Reaktionsgießverfahren hergestellt, die zwischen die Einzelkomponenten des Stapelaufbaus als Dichtungselemente gelegt werden können. Die Mikrostrukturen wurden aus mikrogefrästen Formeinsätzen aus Messing mit minimalen Strukturbreiten von 100 bzw. 250 μm und Strukturhöhen von 50 bis 1500 μm abgeformt.

Abformbare Komponenten eines weiteren chemischen Mikroanalysesystems, des optischen Schadstoffanalytators, sind beispielsweise Mikropumpen und Mikrospektrometer. Der Spektrometerbaustein wird am Institut für Mikrostrukturtechnik in Kleinserie durch Warmumformen einer Kernschicht aus PMMA und nachfolgendes Verschweißen mit einer Mantelschicht aus einem PMMA-Copolymer mit unterschiedlichem Brechungsindex gefertigt [13]. Gleichzeitig mit dem Gitter wird der Schacht für die Einkoppelfaser und der Auskoppelbereich mit abgeformt, über die das sichtbare Licht in den Spektrometerbaustein ein- bzw. am Gitter in spektrale Bereiche mit ca. 30 nm Bandbreite zerlegt ausgekoppelt wird. Die kritischen Abmessung am ca. 6 mm langen selbstfokussierenden, 90 μm hohen Gitter sind die Gitterzähne mit 2,4 μm Zahnängen bei 200 nm Zahnstufenhöhe.

Zur Herstellung von beweglichen Mikrostrukturen, wie Beschleunigungssensoren, wird die positionierte Abformung weiterentwickelt [14]. Durch Positionieren von Formeinsätzen zu vorstrukturierten Substraten und Prägen auf diesen Substraten wurden verlorene PMMA-Strukturen von minimal 3 μm Strukturbreite mit einem Aspektverhältnis von ca. 30 abgeformt und daraus durch Galvanoformung LIGA-Beschleunigungssensoren direkt auf Leiterbahnen hergestellt.

Als Kunststoffkomponenten für ein Herzkathetersystem im Rahmen des ESPRIT-Projektes IMICS werden Gehäuse für ein Mikroventilsystem und Turbinengehäuse

aus PMMA abgeformt [15]. Das Turbinengehäuse hat mit 2,5 mm zwar relativ große Abmessungen, jedoch ist die Abformung der Gehäuseinnenteile mit 0,11 mm Wandstärke und einem Aspektverhältnis von 9 bereits anspruchsvolle Spritzgießtechnik, mit der die im Projekt beteiligten Industriepartner das Forschungszentrum Karlsruhe (IMF III) beauftragt haben.

4. Verlorene Mikroformen für Metallmikrostrukturen

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik der am Forschungszentrum Karlsruhe seit längerem entwickelten Verfahren zur Herstellung von Metallmikrostrukturen unter Einsatz von Abformverfahren und Galvanoformung geschildert und die Verfahren bewertet. Daraus ergibt sich die Motivation für die Entwicklung eines neuen Fertigungsverfahrens für Metallmikrostrukturen unter Einsatz der Spritzgießtechnik mit leitfähig gefüllten Kunststoffen und nachfolgender Galvanoformung, das im Kapitel 5 beschrieben ist.

4.1 Verfahren zur Herstellung verlorener Formen mit leitfähiger Beschichtung

Beim Verfahren zur Herstellung verlorener Formen mit leitfähiger Beschichtung wird auf eine spritzgegossene Mikrostruktur aus PMMA eine ca. 250 nm dicke leitfähige Schichtfolge aus Chrom-Gold haftfest aufgesputtert.

Bedingt durch das Beschichtungsverfahren ist die Metallschichtdicke an den Mikrostrukturwänden deutlich geringer als auf der Strukturgrundfläche und den Stirnflächen der Mikrostrukturen. Der Galvanikstart im Elektrolyten erfolgt an allen Flächen der Mikrostruktur nach Kontaktierung der leitfähigen Schicht. Deshalb wächst der galvanische Niederschlag nicht nur auf das Substrat auf, sondern auch an den Strukturwänden. Dabei besteht die Gefahr, daß bei Mikrostrukturen mit engen Gräben diese im Bereich der Strukturkanten an der Stirnfläche zuwachsen, bevor eine vollständige Formfüllung der engen Gräben vom Strukturgrund her erfolgen kann.

Dieses Verfahren wurde erfolgreich beispielsweise zur Kopie eines Messing-Mutterformeinsatzes in einen Nickel-Tochterformeinsatz für Spinddüsenstrukturen eingesetzt. Die kleinsten lateralen Maße der Metallstruktur liegen knapp über 100 µm bei Strukturhöhen von 100 bis zu 1300 µm.

4.2 Verfahren zur Herstellung verlorener Formen mit leitfähiger Substratoberfläche

Zur Herstellung einer verlorenen Mikroform mit leitfähiger Substratoberfläche wird ein plattenförmiges Halbzeug warmumgeformt (geprägt), das durch Spritz- oder Reaktionsgießen aus PMMA vorgefertigt und mit einer haftenden Metallschicht, meist aus Gold, besputtert wurde [16]. Die Schichtdicke beträgt mehr als 40 nm,

um eine ausreichende Oberflächenleitfähigkeit für die folgende Galvanoformung zu erzielen. Die Mikrostrukturierung erfolgt an der beschichteten Halbzeugoberfläche, und die unstrukturierte Restschicht des Halbzeugmaterials wird zum Substrat. Die Abformparameter werden so eingestellt, daß die leitfähige Schicht auf dem Halbzeug während dem Warmumformen überwiegend in den Bereichen der Formeinsatzstirnfläche verbleibt. Im Bereich der Mikrostrukturen hingegen reißt die leitfähige Schicht auf und die Mikrokavitäten des Formeinsatzes werden mit isolierender Formmasse gefüllt. Damit entsteht eine isolierende Kunststoffstruktur mit Kunststoffsubstrat, wobei die Substratoberfläche zwischen den isolierenden Kunststoffmikrostrukturen mit einer leitfähigen Schicht versehen ist.

Das Verfahren eignet sich nur für die Galvanoformung von Metallmikrostrukturen mit zusammenhängender Substratoberfläche, wie sie bei Metallnetzen vorliegt. Das Verfahren wurde beispielsweise für die Herstellung von Infrarot-Hochpaßfiltern für den Photometer ISOPHOT des Weltraumobservatoriums ISO eingesetzt. Diese Filter bestehen aus 180 µm dicken Kupfernetzen mit 8 µm breiten Metallstegen, die wabenförmige Lochaperturen von 80 µm Innenkreisdurchmesser umgeben [17].

4.3 Verfahren zur Herstellung verlorener Formen mit leitfähigem Substratkörper

Zwei Verfahren wurden entwickelt, mit denen verlorene Mikroformen mit leitfähigem Substratkörper gefertigt werden.

Beim ersten Verfahren besteht der leitfähige Substratkörper aus einer Metallplatte mit Löchern. Ein Reaktionsgießharz wird durch die Löcher der Metallplatte in den Formeinsatz eingespritzt [11]. Die Metallplatte dichtet den Formeinsatz an seiner Stirnfläche ab. Die Formmasse fließt von den sich verjüngenden Löchern der Metallplatte zunächst in die größeren Mikrokavitäten und von dort in die kleineren Mikrokavitäten im Formeinsatz. Nach der Polymerisation erfolgt das Entformen der Mikrostruktur durch Zug an der Metallplatte, wobei die Entformungskräfte von den sich verjüngenden Löchern in der Metallplatte auf die Kunststoffmikrostrukturen übertragen werden. Dieses Verfahren eignet sich, bedingt durch die Angußlöcher, für großflächige Mikrostrukturen und auch für kleinere Mikrostrukturen, die mit großflächigen Mikrostrukturen zusammenhängen. Da für jeden Formeinsatz und eine Serie von Abformungen eine entsprechende Anzahl von Metallplatten als leitfähige Substratkörper mit sich verjüngenden Löchern und hoher Oberflächenqualität gefertigt werden muß, ist das Verfahren nur für die Herstellung von Produktmustern wirtschaftlich einsetzbar.

Für eine wesentlich flexiblere Gestaltung besonders kleinflächiger Mikrostrukturen eignet sich das zweite Verfahren.

Zur Herstellung verlorener Formen mit leitfähigem Substratkörper wird hierbei an eine reaktions-

gegossene Mikrostruktur aus isolierendem Polymer ein leitfähiges Kunststoffsubstrat durch Warmumformen (Prägen) angeschweißt [18]. Dazu wird zunächst im Reaktionsguß die Mikrostruktur mit einem isolierenden Polymer abgeformt, wobei der Reaktionsschwund in Kauf genommen wird, damit nach der Reaktion der Formmasse zum Polymer die Formeinsatzstirnfläche keine isolierende Schicht aus Polymer aufweist. Die polymerfreie Formeinsatzstirnfläche nach der Polymerisation ist die entscheidende Voraussetzung für eine erfolgreiche Abformung und nur unter genauester Einhaltung des engen Wertebereichs der Abformparameter zu erzielen. Nach der Polymerisation erfolgt auf die Polymerstruktur im selben Formeinsatz das Warmumformen eines plattenförmigen Halbzeuges aus leitfähig gefülltem Kunststoff. Während der Warmumformung des leitfähigen Kunststoffhalbzeuges, das im Bereich der Formeinsatzstirnfläche in die Mikrokavitäten einige Mikrometer eindringt, wird der Reaktionsschwund der Polymermikrostruktur durch den leitfähigen Kunststoff kompensiert und der leitfähige Substratkörper aus Halbzeugmaterial mit der isolierenden Polymermikrostruktur verschweißt. Der Füllstoff im leitfähigen Kunststoffhalbzeug aus PMMA ist Silberpulver oder Leitruß.

Dieses Verfahren wurde bisher für die Herstellung von Metallnetzen aus Nickel, Gold und Kupfer eingesetzt. Es wurde in Konkurrenz zum Verfahren zur Herstellung von verlorenen Formen mit leitfähiger Substratoberfläche (Kap. 4.2) weniger eingesetzt. Durch die Kombination zweier Abformverfahren (Reaktionsgießen und anschließendes Warmumformen (Prägen)) ergeben sich Zykluszeiten, die nicht mit der Herstellung verlорener Formen mit leitfähiger Substratoberfläche und insbesondere nicht mit dem Stand der Technik beim Spritzgießen konkurrieren können.

5. Spritzgießen mit leitfähig gefüllten Kunststoffen

Die Spritzgießtechnik und die Galvanoformung von konventionellen Teilen sind heute gängige Massenfertigungsverfahren. Jedes dieser beiden Verfahren für sich steht in modifizierter Form bereits auch der Mikrostrukturtechnik zur Verfügung. Zur Verknüpfung dieser wirtschaftlichen Produktionsverfahren für die Fertigung von Metallmikrostrukturen wird deshalb am Institut für Materialforschung III das Spritzgießen mit leitfähigen Kunststoffen und deren nachfolgende Galvanoformung entwickelt.

5.1 Verfahren zum Spritzgießen leitfähiger verlорener Formen

Für die Serienfertigung von Metallmikrostrukturen durch Galvanoformung werden preisgünstige leitfähige verlорene Formen benötigt. Die verlорenen Formen werden durch Mikrospritzgießen mit leitfähigen Kunststoffen hergestellt. Da intrinsisch leitfähige Kunststoffe teuer und schwer verarbeitbar sind sowie eine man-

gelnde Beständigkeit im Galvanikelektrolyten aufweisen, wurde das Spritzgießen mit leitfähig gefüllten Thermoplasten untersucht. Um beim Spritzgießen die mechanische Beanspruchung der mikrostrukturierten Nickelformeinsätze möglichst gering zu halten, wurden keine Metallpulver, sondern Leitruße als Füllstoffe für die eingesetzten Thermoplaste ausgewählt.

Mit finanzieller Unterstützung des Stifterverbandes Metalle wurden deshalb zunächst Probekörper und anschließend Mikrostrukturen mit unterschiedlichen leitrußgefüllten Thermoplasten (POM, PA 12) abgeformt und anschließend in Nickel galvanisiert (s. Abb. 2, 6).

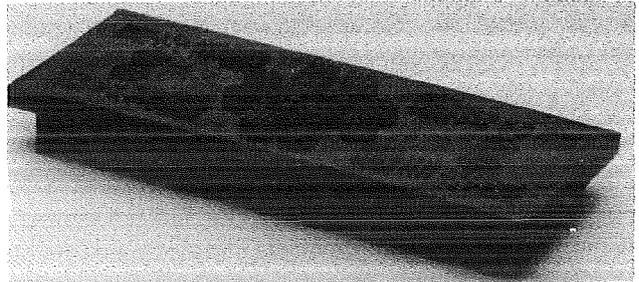


Abb. 2: Abgeformte Mikrostrukturen aus mit Leitruß gefülltem PA 12 als verlорene Form zur Galvanoformung von Spinddüsen

5.2 Spritzgießen von Probekörpern aus leitrußgefüllten Kunststoffen

Erfahrungsgemäß ist eine galvanische Abscheidung auf einem Substrat mit einem Oberflächenwiderstand von maximal ca. 1 k Ω möglich. Daher wurden die Oberflächenleitfähigkeiten der am Markt erhältlichen, mit Leitruß gefüllten Kunststoffe durch eine Recherche ermittelt und zwei Typen von Polyoxymethylen (POM) sowie eine Type Polyamid 12 mit Widerstandswerten in der genannten Größenordnung ausgewählt (s. Abb. 2). Mit diesen Materialien wurden auf der Spritzgießmaschine K50 S 2F plattenförmige Probekörper ohne Mikrostrukturen spritzgegossen. Danach wurde die Eignung der drei verschiedenen Kunststoffe für eine galvanische Abscheidung zunächst durch Messung der Oberflächenleitfähigkeit der Probekörper und deren Variation durch die Spritzparameter ermittelt. Es war festzustellen, daß bei allen drei Materialien der Oberflächenwiderstand mit steigender Einspritzgeschwindigkeit stark zunimmt (s. Abb. 3). Da die Probekörper von der dem Elektrolyten abgewandten Fläche her kontaktiert werden sollten, wurde auch der Widerstand im Kern der Probekörper bestimmt. Dazu wurden die 2 mm dicken plattenförmigen Probekörper durch Fräsen bzw. Polieren in ihrer Dicke reduziert. Es zeigte sich, daß die Leitfähigkeit im Probenkern deutlich geringer ist als an der Oberfläche, was wahrscheinlich auf Entmischungerscheinungen zurückzuführen ist (s. Abb. 5). Mit steigender Einspritzgeschwindigkeit nimmt die Leitfähigkeit der Probenoberfläche ab, so daß die POM-Teile zu einem Isolationskörper werden. Die Leitfähigkeit der oberflächennahen Schichten der Pro-

bekörper ist jedoch ausreichend, um die Galvanikstartfläche der Probekörper von der gegenüberliegenden Rückseite ausreichend kontaktieren zu können. Die besten Leitfähigkeitswerte an den Probekörpern wurden bei minimaler Einspritzgeschwindigkeit und erhöhter Werkzeugtemperatur erreicht (s. Abb. 3, 4).

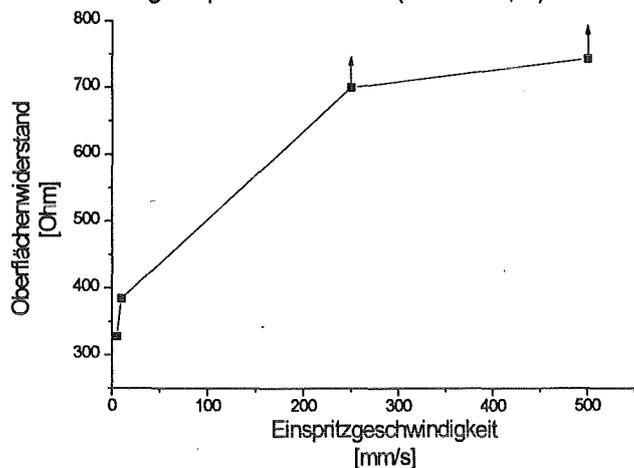


Abb. 3: Oberflächenwiderstand von spritzgegossenen Probekörpern aus PA 12 in Abhängigkeit von der Einspritzgeschwindigkeit bei einer Werkzeugtemperatur von 80°C

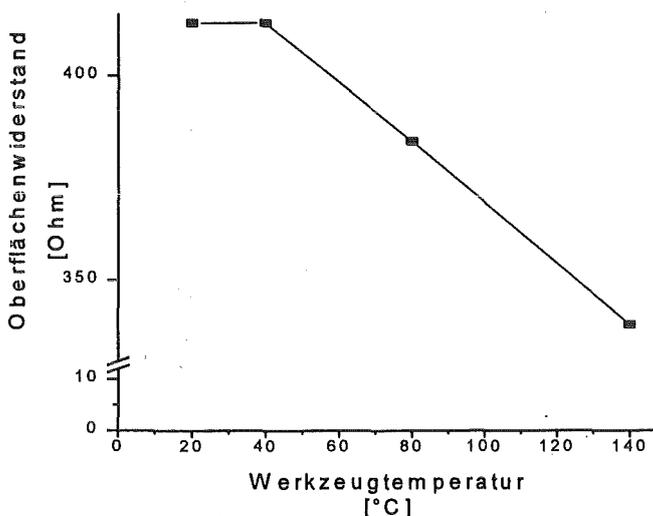


Abb. 4: Oberflächenwiderstand in Abhängigkeit von der Werkzeugtemperatur beim Spritzgießen von Probekörpern aus PA 12 bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 5 mm/s.

Erste Galvanikversuche an Probekörpern, die mit geringen Einspritzgeschwindigkeiten abgeformt wurden, brachten für das Polyamid, welches auch generell die höchsten Leitfähigkeitswerte aufwies, eine gute Galvanisierbarkeit mit hoher Startpunktdichte und ausreichender Haftung auch mehrere Millimeter dicker Niederschläge. Hingegen war bei den POM-Typen infolge des höheren Oberflächenwiderstandes nur eine galvanische Abscheidung mit geringerer Startpunktdichte und stellenweise schlechter Haftung zu verzeichnen.

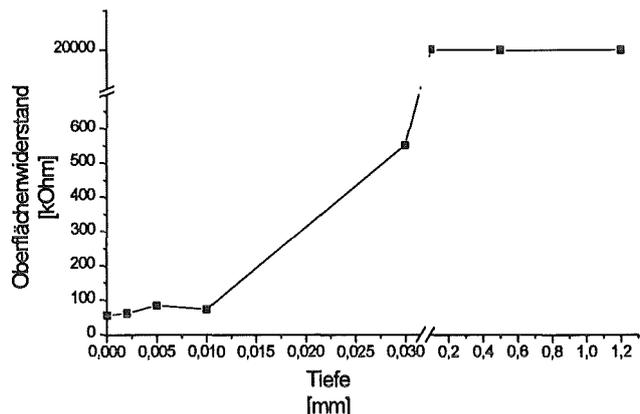


Abb. 5: Oberflächenwiderstand in Abhängigkeit von der Abtragtiefe bei Probekörpern aus POM

5.3 Spritzgießen von Mikrostrukturen als leitfähige verlorene Formen

In der Fortführung des Projektes erfolgte die Abformung von Mikrostrukturen aus leitfähig gefüllten Kunststoffen. Bei dem verwendeten Mikroformeinsatz handelte es sich um einen aus einem gefrästen Messingformeinsatz kopierten Tochterformeinsatz aus Nickel mit verschiedenen Spindüsen-Teststrukturen in Strukturgrabenbreiten von 270 μm und Strukturturen von 100 bis zu 1300 μm (s. Verfahren nach Kap. 4.1).

Die Abformung der Mikrostrukturen erwies sich trotz des Füllstoffes als unproblematisch und erforderte weder höhere Drücke (45 bar Einspritzdruck) noch längere Zykluszeiten (ca. 7 min) als das Spritzgießen ungefüllter Kunststoffe. Es wurden Widerstände auf den Substratoberflächen von 300 - 400 Ω für PA 12 und über 1 k Ω für POM gemessen.

5.4 Galvanoformung von Mikrostrukturen unter Einsatz leitfähiger verloraener Formen

Die Galvanikversuche an spritzgegossenen verlorenen Formen wurden in einem Nickelsulfamatelektrolyten durchgeführt. Der pH-Wert des Elektrolyten lag bei 3,5 bis 3,65 und die Badtemperatur betrug 52°C. Die Elektrolytzusammensetzung und die Betriebsbedingungen wurden analog [20] eingestellt.

Die galvanischen Abscheideversuche an mit unterschiedlichen Parametern spritzgegossenen Mikrostrukturen ergaben an Mikrostrukturen aus Polyamid 12, die mit geringer Einspritzgeschwindigkeit abgeformt wurden, einen guten Galvanikstart auf der Substratoberfläche und eine gute Galvanisierbarkeit. Im Gegensatz dazu war, wie erwartet, an den Mikrostrukturen aus den POM-Typen der Oberflächenwiderstand für eine galvanische Abscheidung relativ hoch, weshalb sich bereits auf der Substratoberfläche örtlich unterschiedliche Startpunktdichten und verschieden gute Haftung ergeben haben.

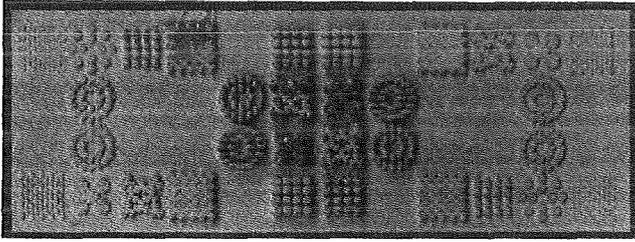


Abb. 6: Galvanischer Nickelniederschlag (Dicke: ca. 200 μm) auf einer verlorenen Form aus PA 12 zur Entwicklung von Spinndüsen aus Nickel.

6. Diskussion und Ausblick

Mit dem Spritzgießen von leitrußgefülltem Polyamid 12 und nachfolgender Galvanoformung wurde anhand der Entwicklung von Spinndüsenstrukturen aus Nickel gezeigt, daß ein serientaugliches Verfahren zur Fertigung von Metallmikrostrukturen mit einem Aspektverhältnis von bis zu 5 entwickelt wird.

Werden jedoch leitfähige Mikrostrukturen mit höherem Aspektverhältnis galvanisch abgeformt, so besteht bei engen Gräben die Gefahr, daß der Niederschlag den Graben von den Seitenwänden her verschließt, bevor vom Substrat her der Graben vollständig mit Metall gefüllt ist. Um die Entstehung dieser Lunker zu vermeiden, wird die Abformung von Mikrostrukturen mit hohem Widerstand auf leitfähigem Substrat angestrebt, um ein bevorzugtes Niederschlagswachstum vom Strukturgrund her zu gewährleisten.

Die ausgeprägte Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Einspritzgeschwindigkeit wurde nachgewiesen. Damit kann ein Leitfähigkeitsunterschied zwischen der Mikrostruktur und der Substratoberfläche erreicht und durch eine zweistufige Formfüllung während eines Spritzgießzyklus noch weiter verstärkt werden. Hierbei wird zunächst das Substrat mit möglichst geringer Einspritzgeschwindigkeit und niedrigem Druck gefüllt, um eine hohe Leitfähigkeit zu erreichen. Die Mikrostrukturen werden erst in der zweiten Phase gefüllt, in der mit hohem Druck und hoher Einspritzgeschwindigkeit eine möglichst geringe Leitfähigkeit der Mikrostrukturen erzeugt werden soll. Erste Versuche zur Realisierung der skizzierten Verfahrensführung zeigen einen Leitfähigkeitsgradienten von 2 zwischen der Substratoberfläche und der Mikrostruktur bei PA 12. Weitere Versuche sind im Rahmen eines Anschluß-Projektes geplant.

Danksagung

Wir bedanken uns recht herzlich bei unseren Kollegen für ihre Beiträge, vor allem bei IMT und HVT. Besonderer Dank gilt P. Holzer, J. Schrök, G. Schanz und A. Thies für die Mitarbeit im Rahmen des geförderten Projektes.

Weiterhin bedanken wir uns beim Stiferverband Metalle und den Firmen Degussa AG, BASF AG, Hoechst AG und Hüls AG für ihre wertvolle Unterstützung.

Literatur

- [1] W. Bacher, G. Linder, R. Ruprecht: Maschinenmarkt 99 (1993) 40-43 // 100 (1994) 34-39.
- [2] A. Both, W. Bacher, M. Hecke, K. D. Müller, R. Ruprecht, M. Strohrmann: MEMS'95, Amsterdam, NL.
- [3] F. Nöker, L. Keydel: Kunststoffe 82 (1992) 798ff
- [4] B. Büstgens, W. Bacher, W. Bier, R. Ehnes, L. Keydel, D. Maas, R. Ruprecht, W.K. Schomburg: ACTUATOR'94, Bremen, D (1994).
- [5] H. Kalb, W. Bacher, M. Harmening, R. Ruprecht: Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5596, (1995).
- [6] R. Ruprecht, W. Bacher, J. Haußelt, V. Piötter: Micromachining and Microfabr. '95, Austin, USA
- [7] R. Knitter, C. Odemer: KfK-Nachr. 4 Kernforschungszentrum Karlsruhe (1994) 240-245.
- [8] V. Piötter, R. Ruprecht, J. Haußelt, J. Schrök: Jahrbuch Oberflächentechnik (1996).
- [9] H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, W. Bauer, E. Günther, J. Laubersheimer, J. Haußelt: HARMST'95, Karlsruhe, D, (published in Microsystem Technologies).
- [10] A. Michel, R. Ruprecht, W. Bacher, M. Harmening: Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5171, (1993).
- [11] H. Vollmer, W. Ehrfeld, P. Hagmann: Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 4267, (1987).
- [12] W. Hoffmann, W. Bier, M. Bruns, O. Fromhein, K. Lindemann, D. Maas, R. Rapp, W.K. Schomburg, W. Süß, dieser Tagungsband (1995).
- [13] O. Hagena, W. Bacher, M. Hecke, J. Mohr, H. Moritz, C. Müller: dieser Tagungsband (1995).
- [14] A. Both, W. Bacher, M. Hecke, K.-D. Müller, M. Strohrmann: dieser Tagungsband (1995).
- [15] U. Wallrabe, J. Fahrenberg, U. Gebhard, J. Mohr, P. Ruther, A. Ruzzu: dieser Tagungsband (1995).
- [16] W. Bacher, H. Biedermann, M. Harmening: DE 40 10 889 C1 (1990).
- [17] R. Ruprecht, W. Bacher, P. Bley, M. Harmening, W.K. Schomburg: Jahrbuch Oberflächentechnik (1992), 394-402.
- [18] M. Harmening, W. Ehrfeld: Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 4711 (1990).
- [19] T. Hanemann, K. Müller, P. Norajitra: dieser Tagungsband.
- [20] K. Leyendecker, W. Bacher, K. Bade, W. Stark: Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5594 (1995).

Strukturieren und Fügen von Formgedächtnislegierungen mit Laserstrahlung

Andreas Schüßler

Institut für Materialforschung I

Zusammenfassung

Strukturierungs- und Fügeverfahren von NiTi-Formgedächtnislegierungen (FGL) werden für Anwendungen in der Medizintechnik und Mikroaktorik benötigt. Problematisch ist das Vermeiden von Wärme und mechanischen Spannungen beim Bearbeiten, um die Funktionseigenschaften von Miniaturkomponenten zu erhalten. Nd:YAG-Festkörperlaser bieten aufgrund ihrer Fokussierbarkeit und Wellenlänge gute Voraussetzungen zum Strukturieren und Fügen dieser Legierungen. Durch Laserfeinschneiden werden medizintechnische Komponenten und Miniaturfedern für FGL-Aktoren mit hoher Präzision hergestellt. Mittels Laserabtragen lassen sich im Submillimeterbereich präzise Formen in Oberflächen einbringen. Für das Fügen von NiTi-Legierungen wurde das Laserschweißen in Schutzgasatmosphäre entwickelt. In der Verbindungstechnik zu artfremden Werkstoffen, wie Stählen und Titan-Legierungen, kann das Laserlöten neue Alternativen eröffnen.

1. Einleitung

NiTi-Formgedächtnislegierungen finden gegenwärtig starke Beachtung in Mikroaktorik und Medizintechnik. Für Mikroaktoren sind die hohen Kräfte bzw. Stellwege interessant, beim Bau von mikrochirurgischen Instrumenten nutzt man das pseudoelastische Verhalten und die gute Biokompatibilität der Legierungen aus. Die Miniaturisierung und multifunktionalen Auslegung von endoskopischen Instrumenten und die Entwicklung von Aktorkonzepten auf der Basis von Formgedächtnislegierungen stellt sehr hohe Anforderungen an die Bearbeitung dieser Werkstoffe im Submillimeterbereich. Die Möglichkeiten zur Herstellung miniaturisierter Bauteile sind allerdings noch unzureichend. NiTi kann galvanisch nicht abgeschieden werden und über das chemische oder elektrolytische Ätzen können lediglich Aspektverhältnisse von maximal 2:1 realisiert werden. NiTi, insbesondere die pseudoelastischen Legierungen, lassen sich wegen der Rückfederung nur schwierig spanend bearbeiten. Der Eintrag von Wärme und das Entstehen hoher mechanischer Spannungen beim Bearbeiten kann die Funktionseigenschaften verändern und muß vermieden werden.

Ein Problem stellt auch das Fehlen geeigneter Fügeverfahren für NiTi-Komponenten dar. Mit den heute noch überwiegend angewendeten kraftschlüssigen Techniken, wie Quetschen, Nieten und Klemmen lassen sich nur wenige Anwendungen abdecken. Verfahren zum Kleben sind aufgrund ungenügender Langzeitsicherheit ebenfalls wenig aussichtsreich. Kommerzielle Schweißtechniken, wie das Widerstandsstoßschweißen (1,2) und Reibschweißen (3,4), sind auf einfache Geometrien und Makroabmessungen beschränkt. Beim Schweißen mit CO₂-Lasern wurden erfolversprechende Ansätze erreicht (5,6). Nachteilig sind hier die Neigung zur

Schweißnahtversprödung aufgrund einer dendritischen Erstarrungsstruktur und der Ausscheidung intermetallischer Phasen.

2. Laserfeinschneiden

Durch Laserfeinschneiden lassen sich aus NiTi-Röhrchen bzw. Folienmaterial Teile für Endoskope, Stents und Katheter, sowie für Aktoranwendungen Miniaturfedern mit definierten Kraft-Weg-Kennlinien (7) herstellen (Bild 1).

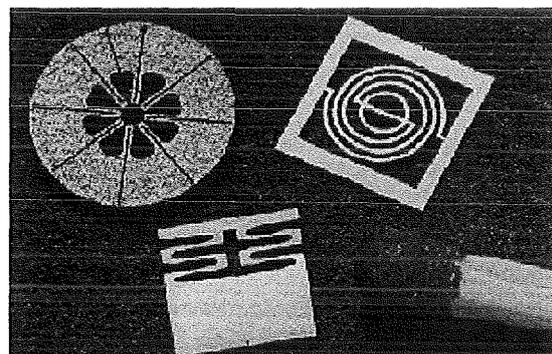


Bild 1: Miniaturfedern aus einer NiTi-FGL für Aktoranwendungen

Die starke Fokussierung des Laserstrahls auf Durchmesser um 30 μm und das Austreiben der Schmelze mit Argon-Hochdruckgas hält die thermische Belastung der Bearbeitungsflächen beim Schneiden weitaus geringer als bei spanabhebenden Verfahren. Durch kalorimetrische Messungen (Differential Scanning Calorimetry, DSC) an Miniaturkomponenten wurde nachgewiesen (8), daß beim Feinschneiden filigraner Strukturen mit lateralen Abmessungen von 100 μm der Formgedächtniseffekt erhalten bleibt.

3. Tiefenstrukturierung durch Laserabtrag

Für die Tiefenstrukturierung von NiTi wurde ein Q-switch Nd:YAG-Laser verwendet, der ausschließlich im Grundmode betrieben wurde. Der Flächenabtrag wurde durch ein zeilenförmiges Abrastern der Werkstücke mittels einer Scanneroptik erzeugt, der Abtrag in die Tiefe wurde durch einen wiederholten Flächenabtrag erreicht. Das Abtragsergebnis wird von einer Vielzahl von Parametern (Laserleistung, Frequenz, Scangeschwindigkeit, Strahlversatz, Fokusslage, Gasatmosphäre) maßgeblich beeinflusst. Diese müssen so optimiert werden, daß der Abtrag überwiegend durch Materialverdampfen erfolgt und schmelzflüssige Anteile minimiert werden.

Die erreichbare laterale Auflösung des Verfahrens liegt in Abhängigkeit von der Abtragtiefe zwischen etwa 50 und 300 μm . Weil das abgetragene Materialvolumen in Richtung des einfallenden Strahls entweicht, lassen sich hohe Aspektverhältnisse nur schwierig realisieren. Die Vorteile des Laserabtrags liegen vor allem in der hohen Flexibilität (beliebige Geometrien, allerdings ohne Hinterschneidungen) und der hohen Reproduzierbarkeit des Verfahrens. Die Abtragtiefe ist direkt von der Anzahl der Scans abhängig, wodurch sich diese definiert einstellen läßt (Bild 2).

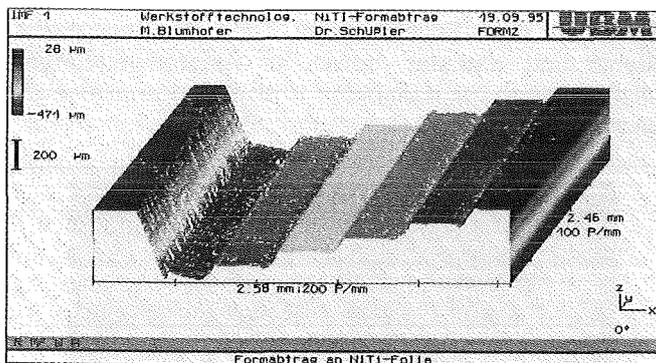


Bild 2: Oberflächenprofil des Laserabtrags an einem NiTi-Blech

Die thermische Belastung der Substrate beim Abtragsprozeß ist gering. DSC-Messungen an abgetragenen Ni₄₉Ti-Folien zeigten im Vergleich zum Ausgangsmaterial keine Änderungen in Verlauf und Form der charakteristischen Umwandlungspeaks (9). Die bearbeitete Oberfläche ist allerdings durch die Ausbildung einer etwa 5 bis 10 μm dicken Umschmelzzone gekennzeichnet, welche sich in Zusammensetzung, Struktur und Härte deutlich vom Grundmaterial unterscheidet (9).

4. Laserschweißen

Für das Verschweißen filigraner mikrochirurgischer Komponenten aus NiTi-Legierungen wurde das Fügen mit Nd:YAG-Lasern entwickelt. Die materialkundlichen Untersuchungen wurden an zwei kommerziellen binären NiTi-Legierungen (alloy BH, Fa. Raychem, USA mit 49,5 Atom% Ni und alloy SE, Fa. NDC, USA mit 51,5 Atom% Ni) durchgeführt. Das Material lag in Form gewalzter Bleche in der Stärke 0,5 mm vor und wurde vor dem Schweißen einer Glühung (Ni₄₉Ti: 400°C/20 min; Ni₅₁Ti: 550°C/5min) zur Einstellung der Funktionseigenschaften unterzogen. Eine beiderseitige Spülung der Bleche mit Argon verhinderte die Oxidation der sauerstoffaffinen Legierung beim Fügen.

Geschweißte Verbindungen der Legierung Ni₄₉Ti versagten im Zugversuch bei RT gegenüber dem Ausgangsmaterial (1200 MPa) mit einer um die Hälfte verminderten Zugfestigkeit bei 600 MPa (10). Die geringe Streuung der Festigkeitswerte ($s = \pm 18$ MPa bei $n=10$) zeigt jedoch eine hohe Reproduzierbarkeit des Fügeprozesses und läßt eine versagensichere Dimensionierung der Verbindungen zu. Für das Versagen der Verbindungen spielt der Ausscheidungszustand des Schweißgefüges die entscheidende Rolle. Beim Umschmelzen des Materials entstehen etwa 100 nm große Ti₂Ni-Teilchen, die sich bevorzugt an den Korngrenzen ausscheiden (10). Deren Festigkeit wird dadurch unter die Spannungsgrenze erniedrigt, die für eine plastische Verformung durch Versetzungsbewegung notwendig ist. Wärmebehandlungen zur Beseitigung dieses Ausscheidungszustandes führen nur bei langen Glühzeiten zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Bei 900°C und 200 Stunden gelingt eine teilweise Koagulation der Ti₂Ni-Phase, wodurch die mechanischen Kennwerte auf 720 MPa Zugfestigkeit und durch den Härteabbau auf 27% Bruchdehnung angehoben werden.

Die Untersuchung des freien Formgedächtnisses lasergeschweißter Verbindungen der Legierung Ni₄₉Ti erfolgte durch Verformung der Zugproben im martensitischen Zustand (20°C) zu unterschiedlichen Dehnungen, Entlastung und schließlich dem Aufheizen der lastfreien Proben in den austenitischen Zustand bei 120°C (Bild 3). Bei totalen Dehnungen von 3% verbleiben nach dem Aufheizen keine, bei Dehnungen bis 6% sehr niedrige irreversible Dehnungsanteile von 0,3%. Dieses Ergebnis ist mit den Werten des Ausgangsmaterials vergleichbar und belegt einen weitgehenden Erhalt des freien Formgedächtnis bei lasergeschweißten Komponenten.

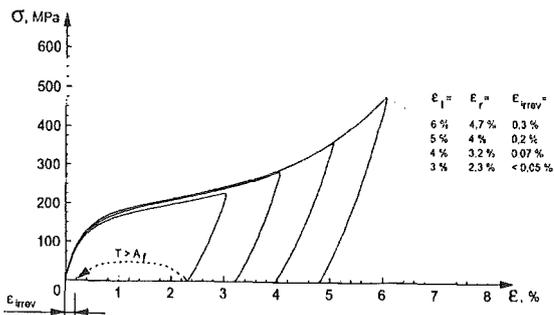


Bild 3: Freies Formgedächtnis lasergeschweißter Verbindungen der Legierung Ni₄₉Ti

Zum Spannungsaufbau im unterdrückten Formgedächtnis kann an geschweißten Verbindungen eine pseudoelastische Plateauspannung von 450 MPa über einen großen Dehnungsbereich (1,5% - 6%) eingestellt werden. Ungeachtet der gegenüber dem Ausgangsmaterial niedrigeren Festigkeitswerte bleibt also die Funktionalität lasergeschweißter Verbindungen erhalten, weil die Ausnutzung sowohl des freien als auch des unterdrückten Formgedächtnisses i.R. innerhalb von 600 MPa Festigkeit und 6% Totaldehnung erfolgt.

Geschweißte Verbindungen der Legierung Ni₅₁Ti erreichten im pseudoelastischen Zustand (20°C) mit 820 MPa eine relative Zugfestigkeit von ca. 80% in Bezug auf das Ausgangsmaterial von 1020 MPa (11). Im Gegensatz zur Ni₄₉Ti-Legierung konnten hier keine Ti-reichen Ausscheidungen an Korngrenzen oder innerhalb der Körner festgestellt werden. Die Verbindungen versagten stets ausgehend von der Schweißnahtmitte unter Bruchverzweigung und plastischer Einschnürung bei Dehnungen von etwa 8,4%.

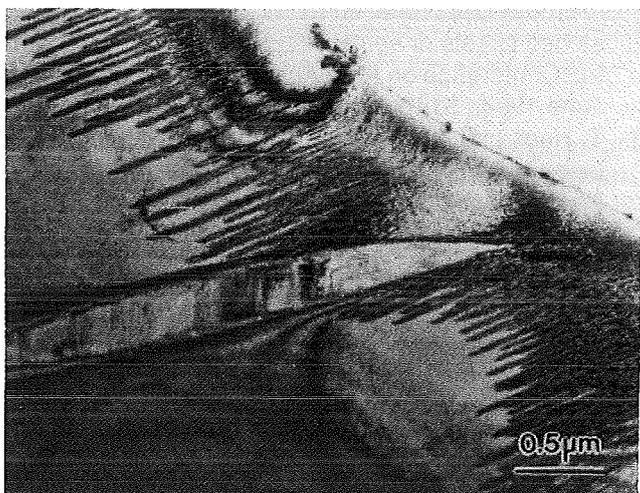


Bild 4: TEM-Aufnahme aus der Schweißnaht: Quelle: Dr. Schloßmacher, IMF I

Die Untersuchung der Mikrostruktur im Transmissions-Elektronenmikroskop zeigt an einigen Stellen im Schweißgefüge Martensitlatten (Bild 4), die erst ab etwa 360 MPa (vgl. Bild 5), entstehen können. Diese Beobachtung läßt darauf schließen, daß Spannungsspitzen im Schweißgefüge durch die Bildung des Martensits abgebaut werden können.

Das pseudoelastische Funktionsverhalten kann im gesamten elastischen Deformationsbereich von 7% unverändert genutzt werden, wie die Be- und Entlastungszyklen im Zugversuch bei einer konstanten Prüftemperatur von 20°C belegen (Bild 5). Bei Belastung erfolgte die spannungsinduzierte Martensitbildung bei einer konstanten oberen Plateauspannung von ca. 360 MPa (Ausgangsmaterial: ca. 370 MPa). Während der Entlastung erfolgte die Rückumwandlung in Austenit unter einer ausgeprägten Spannungshysterese. Nach Durchlaufen des Belastungs/Entlastungs-Zyklus blieben geringe irreversible Dehnungsanteile (ϵ_{irrev}) zurück.

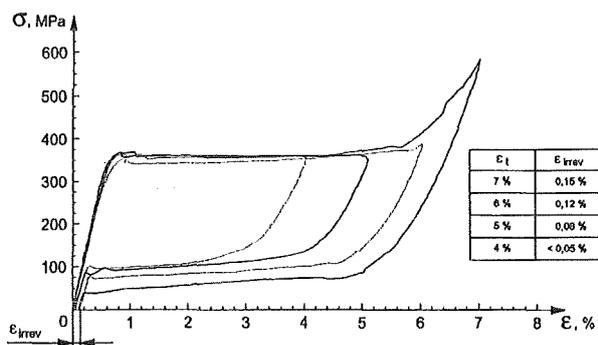


Bild 5: Pseudoelastisches Verhalten lasergeschweißter Verbindungen Ni₅₁Ti

Diese verbleibenden Dehnungen entsprechen bis zu einer Totaldehnung von 4 % denen des Ausgangsmaterials, bei größeren Totaldehnungen nimmt der verbleibende Dehnungsanteil an lasergeschweißten Verbindungen jedoch stärker zu. (Tabelle 1).

	ϵ_t	ϵ_{irrev}
Ausgangs-material	7%	0,05%
	6%	0,04%
	5%	0,03%
	4%	0,02%
geschweißte Verbindung	7%	0,15%
	6%	0,12%
	5%	0,08%
	4%	< 0,05%

Tabelle 1: Irreversible Dehnung (ϵ_{irrev}) nach verschiedenen Totaldehnungen (ϵ_t) für Ausgangsmaterial und lasergeschweißte Verbindungen

Von der Schweißnaht selbst erfolgt kein nennenswerter Beitrag zur pseudoelastischen Rückdehnung. Für den praktischen Einsatz lasergeschweißter Verbindungen stellt dies allerdings keine Einschränkung dar, denn die Funktionseigenschaften (Formgedächtnis und Pseudoelastizität) werden von gesamten Bauteil getragen. Durch die hohe Fokussierbarkeit, vor allem aber durch die hohe Einschweißtiefe beim Fügen mit Nd:YAG-Lasern gelingt es, das Materialvolumen, welches nicht zum Formgedächtnis bzw. zur Pseudoelastizität beiträgt, auf geringe Abmessungen zu beschränken. In Verbindung mit guten pseudoelastischen Dehnungswerten läßt die hohe Versagenssicherheit lasergeschweißter Komponenten der Legierung Ni₅₁Ti einen Einsatz des Fügeverfahrens in der Medizintechnik aussichtsreich erscheinen. Ein Beispiel für die Anwendung des Laserschweißverfahrens zur Herstellung mikrochirurgischen Geräts ist in Bild 6 zu sehen.

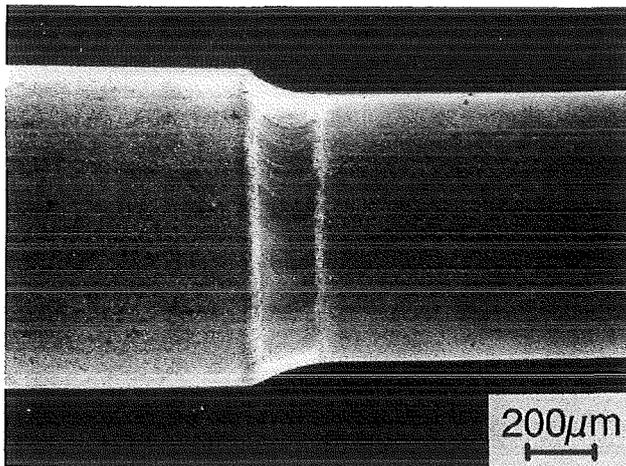


Bild 6: Mikroschweißnaht verbindet NiTi-Rohre

5. Laserhartlöten

Während artgleiche Verbindungen durch Laserschweißen hergestellt werden können, bereitet das Verbinden von NiTi mit artfremden Materialien, wie etwa rostfreien Stählen, erhebliche Probleme. Bei der metallurgischen Verbindung dieser Werkstoffe entstehen versprödet wirkende intermetallische Phasen, so daß Schmelzschweißverfahren nicht angewendet werden können. Eine Alternative bietet das Laserhartlöten, das gegenüber dem Weichlöten höhere Verbindungsfestigkeiten ermöglicht. Laserstrahlung läßt sich problemlos in entsprechende Behandlungskammern einkoppeln und besitzt den Vorteil der guten Fokussierbarkeit. Die Erwärmung der Materialien wird auf die Fügestelle beschränkt und der unerwünschte Wärmeeintrag in die Bauteile reduziert. Flußmittel, die Probleme hinsichtlich Korrosion und Biokompatibilität verursachen, lassen sich durch die Verwendung einer reduzierenden Atmosphäre oder

Vakuum vermeiden. Die Oxidfreiheit der Werkstückoberflächen ermöglicht die Benetzung durch die überwiegend eingesetzten Silberbasis-Hartlote. Die Arbeitstemperaturen gängiger Hartlote für das Verbinden von NiTi mit Stahl liegen zwischen 800 und 1000 °C. Dies erfordert eine Temperaturregelung und die Entwicklung entsprechender Bauteildesigns, um eine thermisch induzierte Gefügeschädigung der NiTi-Legierungen zu vermeiden.

Literatur

- [1] J. Beyer, P.A. Besselink, J.H. Lindenhovius: Shape memory and microstructure of welded TiNi alloy, Proc. SMA 1986 Conference, Guilin, China, 492.
- [2] J. Beyer, E.J.M. Hiensch, P.A. Besselink, Resistance Welding of TiNi-shape memory alloys, in: E. Hornbogen, N. Jost (eds.): The Martensitic Transformation in Science and Technology, DGM, Oberursel, 1989, 199-206.
- [3] T. Shinoda, T. Tsuchiya, H. Takahashi, Friction Welding of Shape Memory Alloy, Quarterly Journal of the Japan Welding Society (Feb. 1991), (1), 9.
- [4] T. Shinoda, T. Tsuchiya, H. Takahashi, Functional Characteristics of Friction Welded Near-Equiatomic TiNi Shape Memory Alloy, Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 22, No.2, October 1991, 30-36.
- [5] A. Hirose, M. Uchihara, T. Araki, K. Honda, M. Kondoh, Laser Welding of Ti-Ni Type Shape Memory Alloy, Journal of the Japan Institute of Metals (Mar. 1990) 54, (3), 262-269.
- [6] T. Araki, A. Hirose, M. Uchihara, Characteristics and Fracture Morphology of Ti-Ni Type Shape Memory Alloy and Its Laser Weld Joint, J. Soc. Mater. Sci., Jpn. (May 1989) 38, (428), 478-483.
- [7] M. Kohl, E. Quandt, A. Schüßler, R. Trapp and D.M. Allen, Characterization of NiTi shape memory microdevices produced by microstructuring of etched sheets or sputter deposited films, Proc. 4th Int. Conference on New Actuators, Bremen 15-17 June 1994, 317-320.
- [8] T. Haas und A. Schüßler, DSC-Untersuchungen an laserstrukturierten und lasergeschweißten NiTi-Formgedächtnislegierungen, Hauptversammlung der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde, Göttingen 24.-27. Mai 1994.
- [9] K.D. Skrobanek und A. Schüßler: Strukturierung von NiTi-Formgedächtnislegierungen, Laser Magazin 2-3 1994, 59-62.
- [10] P. Schloßmacher, T. Haas and A. Schüßler, Laser Welding of NiTi Shape Memory Alloys, 1st Int. Conf. on Shape Memory and Superelastic Technologies, Monterey, California, March 6-10 1994.
- [11] T. Haas, A. Schüßler, Laserschweißen von NiTi-Legierungen für medizintechnische Anwendungen, Laser Magazin 1 1995, 46-50.

Magnetostriktive, piezoelektrische und Formgedächtnis- Dünnschichtaktoren

E. Quandt, H. Holleck, F. Gugenberger, K. Seemann
 Institut für Materialforschung I

Zusammenfassung

Die zukünftige Entwicklung komplexer Mikrosysteme mit der Integration von elektronischen, optischen, sensorischen und aktorischen Bauelementen auf einem gemeinsamen Basismaterial stellt eine große Herausforderung an die Materialforschung dar. Speziell die Herstellung von Dünnschichten basierend auf den physikalischen Effekten der Magnetostriktion, des inversen Piezoeffektes und des Formgedächtnisses erscheint als interessante Möglichkeit für die Realisierung integrierbarer Mikroaktoren. Mit dem Magnetronspütern ist es einerseits gelungen, die Aktormaterialien in einem mit der Mikroelektronik kompatiblen Prozeß abzuscheiden, andererseits durch die Abschreckung aus der Gasphase metastabile Materialien mit ungewöhnlichen Eigenschaften zu synthetisieren. Durch Anwendung dieser Funktionsschichten in Biegezug- und Membraneometrie wurden Aktoren realisiert und deren Funktionsdaten durch Prozeßoptimierung und FEM-Simulation-gestützte Strukturierung entscheidend verbessert. Eine Anwendung dieser Elemente zur Realisation fluidischer Mikroaktoren (Ventile, Pumpen) ist in Arbeit.

1. Einleitung

Aktoren als Wandler elektrischer in mechanische Energie sind wichtige Komponenten für die Realisierung komplexer Mikrosysteme. Neben der Verkleinerung konventioneller Konzepte (z.B. Elektromotor) in den Mikrobereich sind in der Mikrosystemtechnik insbesondere auch Aktoren auf der Basis von Funktionsmaterialien (magnetostriktiven, piezoelektrischen oder Formgedächtniswerkstoffen), die diese Energiewandlung direkt ermöglichen, wegen ihrer

guten Skalierbarkeit von großem Interesse. Die Dünnschichttechnik zur Herstellung dieser Funktionsschichten [1] ermöglicht dabei die Integration von Aktoren in die Mikrosysteme durch prozeßkompatible Herstellungsschritte ohne Aufbau- und Verbindungstechniken in zwei möglichen Prozeßfolgen: als Ausgangsmaterial vor der Strukturierung oder als Beschichtung bereits strukturierter passiver Komponenten. Dabei ergänzen sich die verschiedenen Werkstoffe in ihrem

	Magnetostriktion	Piezoeffekt	Formgedächtnis
Werkstoffe	TbFe (TbDy)Fe SmFe	ZnO AlN (ZnAl)(ON) PZT	TiNi Ti(NiPd) TiPd
Aktor-Aufbauten	<p>Substrat magnetostriktive Schicht magnetisches Feld</p>	<p>Deckelektrode piezoelektrische Schicht Substrat U = 0 U > 0</p>	<p>T < T_{Mf} I = 0 T > T_{Af} I > 0</p>
Eigenschaften	+ kontaktlose Ansteuerung + hohe Frequenzen + große Auslenkungen + hohe Zyklenzahlen - hoher Leistungsbedarf - Feldspulenintegration	+ leistungsarme Ansteuerung + hohe Frequenzen + μ E-Kompatibilität - komplexer Aufbau - Relaxation der Effekte	+ sehr große Auslenkungen + sehr große Kräfte + μ E-Kompatibilität - schwierige Herstellung - niedrige Schaltfrequenzen - begrenzte Zyklenzahlen

Tab.1.: Vergleich der Werkstoffe, der Aktoraufbauten am Beispiel von Biegebalken sowie der wichtigsten Eigenschaften der untersuchten Funktionsdünnschichten

Anforderungsprofil durch ihre unterschiedlichen Ansteuerungen, Eigenschaften sowie Aufbauten (Tab. 1). Während diese Funktionswerkstoffe für Makrosysteme gut bekannt und weitgehend charakterisiert sind, sind für ihren Einsatz als Dünnschichtaktoren noch gezielte Materialentwicklung und -charakterisierung notwendig. Die Dünnschichttechnik bietet dabei einerseits durch die Abschreckung aus der Gasphase faszinierende Möglichkeiten, neue, als kompakte Materialien nicht herstellbare Verbindungen und Gefüge zu erzeugen, andererseits gilt es, Probleme im Hinblick auf innere Spannungen, Defektstrukturen, sowie Haftung zu lösen. Insbesondere durch Herstellung neuer metastabiler Werkstoffe wird eine bedeutende Eigenschaftsoptimierung im Hinblick auf die mikrosystemspezifischen Anforderungen erreicht.

2. Experimentelles

Die Funktionsschichten wurden durch DC- oder HF-Magnetronputtern bei verschiedenen Bedingungen (Gasdruck- und Zusammensetzung, Leistung, Biasspannung, Substrattemperatur) auf Si-, SiO₂- und diverse Metallsubstrate abgeschieden. Dabei wurden entweder eine Multitargetanordnung mit bis zu drei Elementtargets (Ø 50 mm) oder Legierungstargets (Ø 75 mm bzw. 150 mm) verwendet, wobei eine Drehteller- und Blendensteuerung mit je vier möglichen Positionen entsprechende Viellagenaufbauten ohne Bruch des Vakuums ermöglichen. Die Multitargetanordnung wird für grundsätzliche Untersuchungen zum Einfluß der chemischen Zusammensetzung auf die Schichteigenschaften eingesetzt, da sie eine Variation der Stöchiometrie zwischen 10 und 90 at% für jedes Element durch Änderung der entsprechenden Sputterleistung erlaubt [2]. Ausgehend von den mit dieser Technik erzielten Ergebnissen wurde die Zusammensetzung der Targets festgelegt, die in der Regel durch Heißpressen hergestellt wurden. Mit diesen Targets wurden die gewünschten Schichteigenschaften durch Variation der Sputterparameter optimiert. Die Schichten wurden anschließend zum Teil durch Glühungen in verschiedenen Gasatmosphären kristallisiert und konditioniert. Durch mikrostrukturelle Charakterisierung der Schichten wurde versucht, einen Zusammenhang zwischen den Schichteigenschaften und der Stöchiometrie, sowie dem Gefüge der Schichten abzuleiten. Als wesentliche Verfahren wurden Elektronenstrahlverfahren (WDX, EDX, EELS, AES) zur chemischen Analyse, Röntgenbeugung und Elektronenmikroskopie zur Gefügeuntersuchung, Differenzkalorimetrie (DSC) zur Bestimmung der Kristallisation und der Temperaturen der Phasenumwandlung sowie eine Biegebalkenmeßmethode zur Bestimmung der Magnetostriktion [3] bzw. der piezoelektrischen Konstanten eingesetzt. Die ermittelten Werkstoffdaten fließen in Finite-Elemente-Modellierungen der Aktoraufbauten ein [4].

3. Ergebnisse

3.1 Magnetostriktive Schichten

Die Gestaltmagnetostriktion ist aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften - kontaktlose Ansteuerung, Hochfrequenzbetrieb - von großem Interesse, insbesondere durch die Entdeckung der hochmagnetostriktiven SEFe₂ Laves-Phasen (Ref.) (SE=Seltene Erden) TbFe₂ und Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe₂ (Handelsname: Terfenol-D) mit positiver und SmFe₂ mit negativer Magnetostriktion. Die Entwicklung für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik - als Biegebalken- oder Membranaktoren - konzentriert sich auf die Herstellung dünner Schichten mit hoher Magnetostriktion bei kleinen Feldstärken. Für diese Anforderung werden die besten Ergebnisse mit amorphen Schichten erreicht [5]. Durch Verwendung der Multitargetanordnung konnte festgestellt werden, daß eine maximale Magnetostriktion sowohl bei positiv als auch negativ magnetostriktiven Schichten bei etwa 40 at% SE-Gehalt erreicht wird, somit bei deutlich SE-reicheren Zusammensetzungen als sie in der kristallinen Laves-Phase (33,33 at% SE-Gehalt) vorliegen. Mit entsprechenden Legierungstargets wurde der Einfluß der Herstellungsparameter auf die Schichteigenschaften untersucht [6]. Ein dominanter Einfluß wurde bei der Bias-Spannung festgestellt, die über die Änderung der Schichteigenspannung die Richtung der leichten Magnetisierung und damit der Magnetostriktion bei kleinen Feldstärken maßgeblich beeinflußt (Abb.1).

Ein Vergleich der Magnetostriktionskurven optimierter amorpher TbFe, TbDyFe und SmFe-Schichten (Abb.2) verdeutlicht ferner, daß für kleine Feldstärken (< 0.1 T) die Anisotropiekompensation durch die TbDy-Legierung analog zu Terfenol-D erhöhte Magnetostriktionswerte erbringt. Durch Kristallisation der Schichten konnte eine weitere deutliche Erhöhung der Magnetostriktion erreicht werden, allerdings ist dabei auch eine erhebliche Zunahme der Hysterese zu beobachten (Abb. 3).

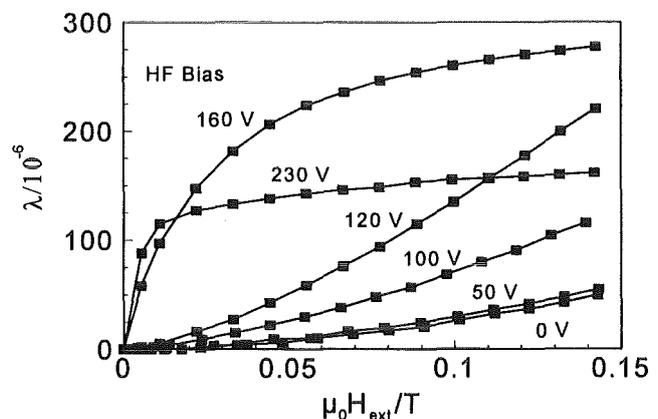


Abb.1: Magnetostriktion von amorphen TbDyFe-Schichten in Abhängigkeit der Biasspannung während der Herstellung.

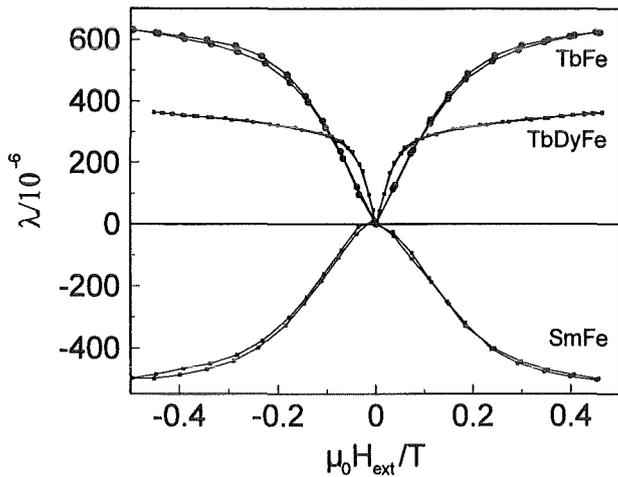


Abb. 2: Vergleich der Magnetostraktion optimierter amorpher TbFe-, TbDyFe- und SmFe-Schichten.

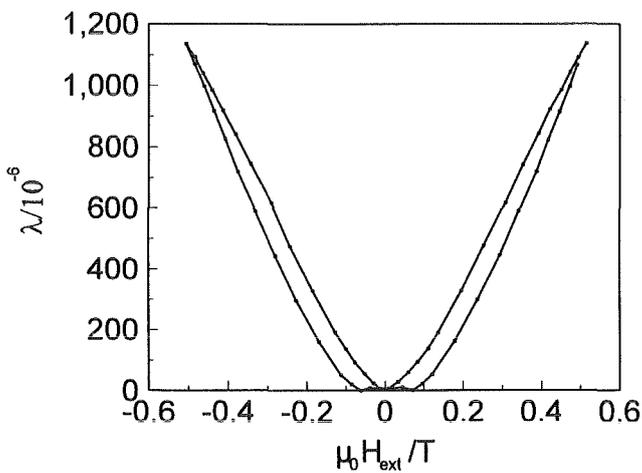


Abb. 3: Magnetostraktion einer polykristallinen TbDyFe-Schicht.

3.2 Piezoelektrische Schichten

Der inverse piezoelektrische Effekt, das heißt die Erzeugung einer mechanischen Spannung bzw. Verformung eines kristallinen Materials durch ein äußeres elektrisches Feld, ist ein wohlbekannter Aktormechanismus. Für Anwendungen in der Mikroaktorik bieten piezoelektrische Materialien aufgrund der Ansteuerung über eine elektrische Spannung eine besondere Kompatibilität zur Mikroelektronik. Bei typischerweise notwendigen Feldstärken von 10^6 V/m, und Spannungen von maximal einigen Volt, die standardmäßig in der Halbleitertechnologie vorliegen, sind Schichtdicken piezoelektrischer Elemente in der Größenordnung von einem Mikrometer erforderlich. Darauf gründet das Interesse, Dünnschicht- und Viellagentechnologien zur Herstellung von solchen Elementen einzusetzen. Neben den in der Sensorik eingesetzten ZnO- und AlN-Schichten, wurde für aktorische Anwendungen hauptsächlich Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der ferroelektrischen Schichten durchgeführt. Ferroelektrika mit Perowskitstruktur, insbesondere die Verbindung $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ (PZT) mit $x=0.48$ sind bekannt als

Materialien mit außergewöhnlich großen piezoelektrischen Konstanten (bis zu zwei Größenordnungen höher als z.B. in ZnO) [7]. Im Bereich der Dünnschichttechnik haben die Ferroelektrika eine weitere, für den Mikroelektronikmarkt herausragende Bedeutung als Material für zukünftige Speichermedien (Ferroelectric Random Access Memory = FRAM) und werden dementsprechend intensiv für diese Zwecke studiert [8].

ZnO, AlN und SiC kristallisieren jeweils in der hexagonalen Wurtzit-Struktur, haben etwa die gleichen Gitterkonstanten, unterscheiden sich aber sehr stark im Bindungstyp, der von vorwiegend ionisch (ZnO) über Mischbindung (AlN) bis hin zu vorwiegend kovalent (SiC) reicht und damit auch große Unterschiede in physikalischen und mechanischen Eigenschaften hervorruft. Durch mit PVD-Verfahren auf der Basis thermodynamischer Berechnungen [9] hergestellte metastabile Mischverbindungen dieser Materialien wird beabsichtigt, die jeweils vorteilhaften Eigenschaften der einzelnen binären Verbindungen zu vereinen bzw. neuartige Eigenschaftsprofile einzustellen.

Zunächst wurden ZnO, AlN und (Al,Zn)(N,O)-Schichten durch HF-Magnetronspütern auf geheizten Substrate (typ. 300 °C) hergestellt. Die Materialien kristallisierten mit einer starken Textur der c-Achse senkrecht zur Substratebene, also in (002)-Orientierung. Die Bestimmung der piezoelektrischen Konstante d_{31} lieferte Werte von -2.1 pC/N für AlN, -5.0 pC/N für ZnO und -4.0 pC/N für das Mischsystem (Al,Zn)(N,O) in guter Übereinstimmung mit den Werten für Einkristalle bei den binären Verbindungen (Abb. 4).

PbTiO₃ (PT) und PZT wurden mittels HF-Magnetronspütern zunächst auf Quarzglas abgeschieden, um das Wachstum der ferroelektrischen Perovskitphase als Funktion der Targetzusammensetzung und der Sputterparameter zu studieren. Substrattemperaturen oberhalb von 650° C und relativ hohe Drücke (> 1Pa) sind notwendig, um kristalline Schichten mit der Targetstöchiometrie zu erhalten. Eine alternative Möglichkeit besteht darin, das Material amorph bei Raum-

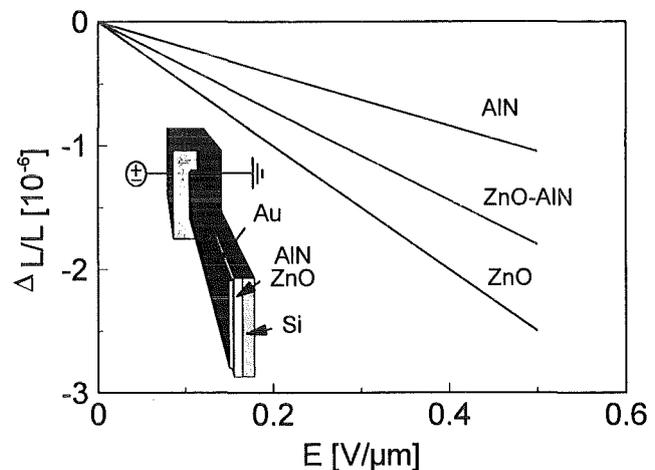


Abb. 4: Vergleich der relativen Längenänderungen piezoelektrischer Schichten in Abhängigkeit des elektrischen Feldes

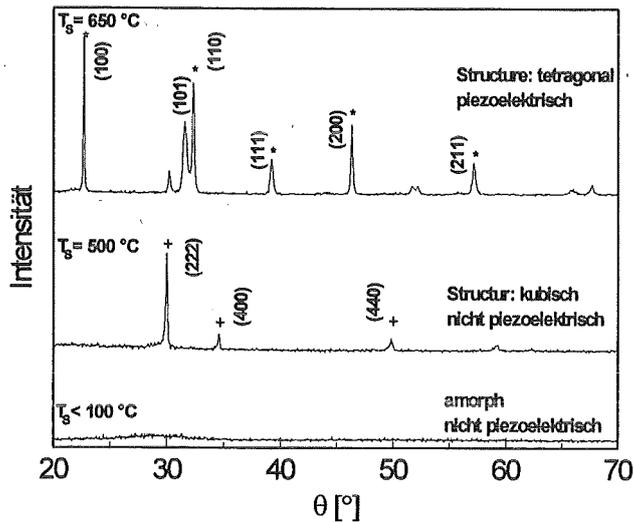


Abb. 5: Röntgendiffraktogramme von PbTiO_3 -Schichten in Abhängigkeit der Substrattemperatur.

temperatur abzuscheiden und durch eine Kristallisationsglühung bei Temperaturen um 750°C in Ar und/oder O_2 in die Perovskitphase zu überführen. Das Wachstum dieser Phase und damit auch die ferroelektrischen Eigenschaften hängen sehr empfindlich von den Metall/Metall und Metall/ O_2 -Verhältnissen ab. Eine Übertragung dieser Ergebnisse auf dünne, dotierte Siliziumsubstrate erforderte die Einbringung von Diffusionsbarrieren, um Reaktionen der Komponenten des Ferroelektrikums mit dem Silizium aufgrund der hohen Temperaturen zu verhindern. Dabei sind elektrisch leitende Barrieren und Elektrodenmaterialien (TiN , Pt/TiN , Pt/Ti , RuO_2 , Pt/RuO_2) getestet worden, die den elektrischen Kontakt zwischen leitendem Substrat und Ferroelektrikum gewährleisten. Die Wahl dieser Zwischenschicht(en) beeinflusst ebenfalls sehr stark das Wachstum und die Qualität des Ferroelektrikums.

3.3 Formgedächtnisschichten

Die Formgedächtniseffekte basieren auf der reversiblen thermoelastischen Phasenumwandlung zwischen einer Hochtemperaturphase (Austenit) und einer Tieftemperaturphase (Martensit) mit jeweils geordnetem Kristallgitter. Aufgrund der Größe des Effektes wird in technischen Anwendungen nahezu ausschließlich NiTi als Formgedächtnis (FG)-Werkstoff eingesetzt, wobei im Bereich der Kompaktwerkstoffe Applikationen dominieren, die auf der Pseudoelastizität beruhen. Dagegen werden für den Einsatz als Mikroaktoren Schichten entwickelt, die freitragend eingesetzt den hohen Kräften bei gleichzeitig großen Stellwegen und die Mikroelektronik-kompatible direkte Ansteuerung über Widerstandsheizung [10]. Bei der Herstellung der Filme wurden zwei Entwicklungsziele verfolgt, nämlich die Herstellung von Legierungen mit R-Phasenumwandlung, die sich durch eine sehr enge Hysterese auszeichnen, sowie von Legierungen mit hohen, einstellbaren Umwandlungstemperaturen. Dazu wurden

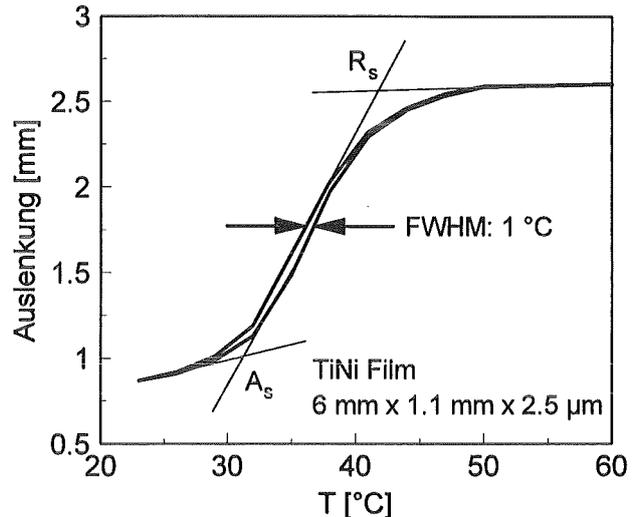


Abb. 6: Auslenkung eines FG-Biegebalkens beim Heizen und Abkühlen.

FG-Zweiwegeffekt, im Verbund mit einem Substratmaterial als Gegenfeder den FG-Einwegeffekt (sog. Zweiweg-Verhalten) aufweisen. Das wachsende Interesse an diesen Aktoren gründet sich dabei auf die Schichten zunächst durch DC-Magnetronsputtern amorph abgeschieden und anschließend im Hochvakuum kristallisiert und gegebenenfalls für den Zweiwegeffekt trainiert [11]. Für Ni-reiche TiNi-Filme konnte eine R-Phasenumwandlung mit einer Breite der Hysterese von 1°C und einer Umwandlungstemperatur von etwa 35°C hergestellt werden (Abb. 6).

Durch Substitution von Ni durch Pd konnte für verschiedene Zusammensetzungen ein großer Temperaturbereich der Phasenumwandlung abgedeckt werden, der in Tabelle 2 zusammengefasst ist. Die ermittelten Temperaturen [12] stimmen mit Literaturdaten für Kompaktmaterialien [13] gut überein und stellen die höchsten bisher realisierten Umwandlungstemperaturen für FG-Filme dar.

	$M_f / ^\circ\text{C}$	$M_s / ^\circ\text{C}$	$A_s / ^\circ\text{C}$	$A_f / ^\circ\text{C}$
TiNi	-38	7	24	32
$\text{Ti}(\text{Ni}_{0,8}\text{Pd}_{0,2})$	14	26	32	45
$\text{Ti}(\text{Ni}_{0,4}\text{Pd}_{0,6})$	179	192	203	220
TiPd	498	514	552	570

Tab. 2: Umwandlungstemperaturen verschiedener FG-Legierungen nach DSC-Messungen.

3.4. Dünnschichtaktoren

Während die Materialentwicklung im Bereich der Dünnschicht-Piezoaktoren aufgrund des komplexen Aufbaus mit Elektroden und Diffusionsbarrieren noch im Vordergrund steht, konnten bei magnetostriktiven und Formgedächtnisaktoren erste Umsetzungen in konkrete Formen von Wandlern realisiert werden. Abbildung 7 zeigt als Beispiel einen magnetostriktiven Biegebalken, der durch Einsatz der optimierten TbDyFe-Schichten (Abb. 1) bereits bei 30 mT nahezu seine maximale Auslenkung erreicht und damit hochfrequent mit konventionellen Luftspulen betrieben werden kann. Die Doppelbelichtungsaufnahme (Abb. 8) eines TiNi-Doppelbiegebalkens mit R-Phasenumwandlung (Abb. 6) verdeutlicht die große Auslenkungen von FG-Dünnschichtaktoren. Mögliche Anwendung finden diese Biegebalken-Aktoren bei denen die relative Längenänderung der Funktionsschichten abhängig vom Design, in eine Krümmung bzw. Auslenkung der Elemente umgewandelt wird, z.B. in aktiven Ventilen für

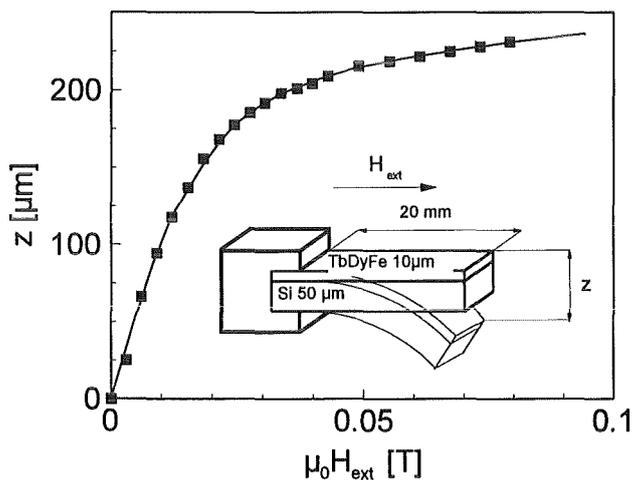


Abb. 7: Auslenkung eines magnetostriktiven Biegebalkens

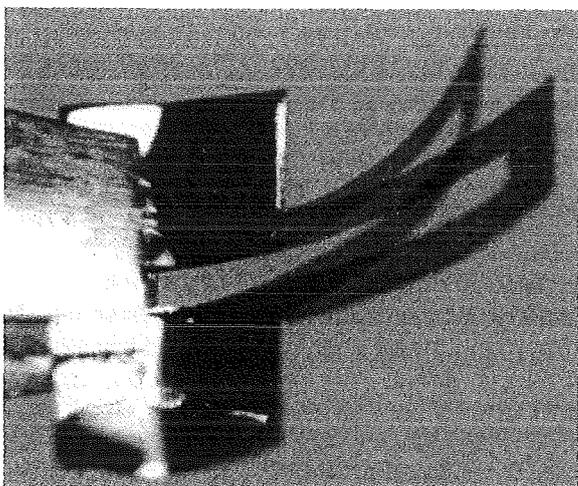


Abb. 8: Doppelbelichtungsaufnahme eines TiNi-Doppelbiegebalkens (Balkenlänge 6 mm) bei 25°C/45°C.

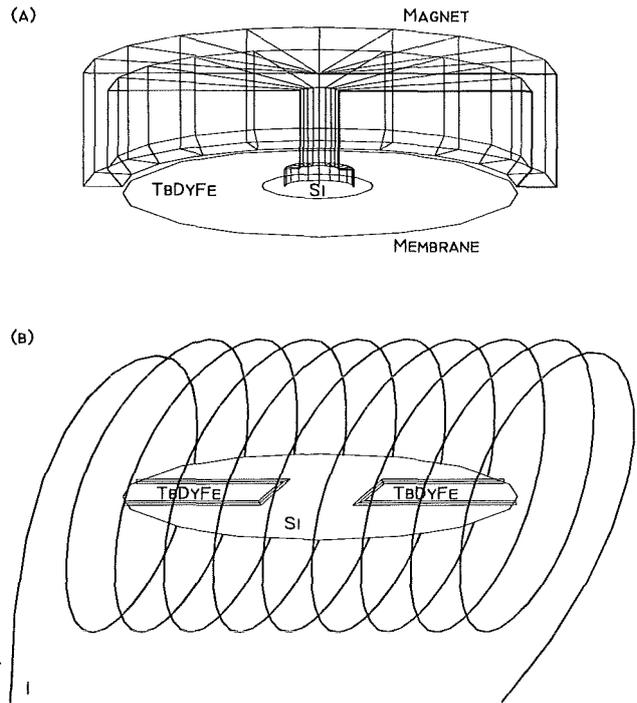


Abb. 9: Radiale (a) und lineare (b) magnetische Ansteuerung einer lateral strukturierten magnetostriktiven Membran.

Fluidsysteme [14], als Laserscanner oder Mikroschalter. Eine Reihe von Realisierungen von mikrotechnischen Komponenten für Fluidsysteme (Ventile, Pumpen) basieren auf Membranen, die entweder mit externen (z.B. elektromagnetisch) oder mikrotechnisch integrierten (z.B. elektrostatischen, thermopneumatischen oder bimetalischen) Aktoren angetrieben werden [15]. Ein neues Konzept stellt die Anregung durch Funktionsdünnschichten dar, hier zunächst realisiert für magnetostriktive Schichten. Abbildung 9 zeigt zwei prinzipielle Anordnungen der magnetischen Ansteuerung.

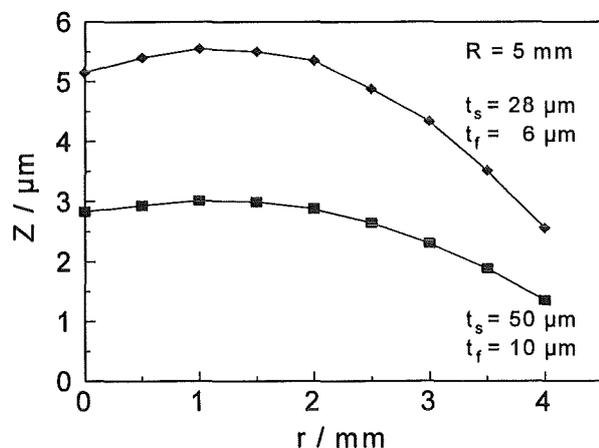


Abb. 10: Berechnete Auslenkung (FEM) zweier Membranen mit unterschiedlichen Substrat- und Schichtdicken als Funktion des Radius der nicht beschichteten Kreisfläche bei einer Magnetostriktion von $\lambda = 100 \cdot 10^{-6}$

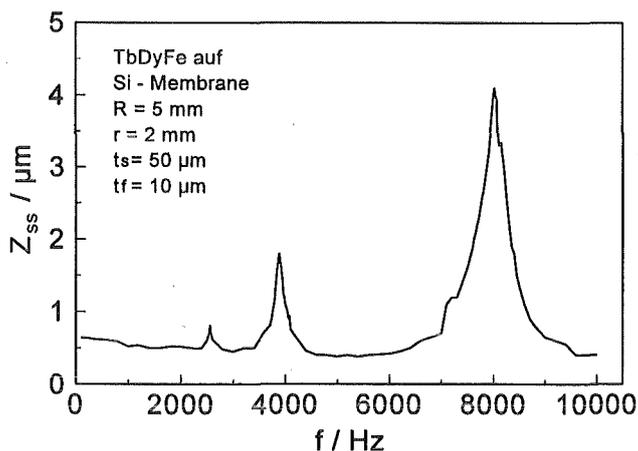


Abb. 11: Frequenzabhängige Auslenkung einer strukturierten magnetostruktiven Membran

Die Modellierung dieser Membranaktoren erfolgt mit FEM-Rechnungen, mit denen es möglich ist, die Geometrie der Beschichtung derart zu optimieren, daß maximale Auslenkungen erreicht werden. So ergibt sich ein Maximum der Auslenkung dann, wenn eine zentrale Kreisfläche einer bestimmten Größe der Membran nicht beschichtet wird (Abb.10). Das dynamische Verhalten einer Membran (Abb.11) wurde mit einem Laservibrometer untersucht. Es zeigt sich, daß unabhängig von der Lage der Resonanzen die Membran bis mindestens 10 kHz betrieben werden kann. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird z.Zt. an der Realisierung einer magnetostruktiven Membranpumpe gearbeitet.

4. Ausblick und Diskussion

Ein wichtiger Aspekt zukünftiger Arbeiten wird es sein, durch Kombination verschiedener Funktionsmaterialien, intelligente Aktoren bzw. Aktor/Sensor-Systeme (smart materials) aufzubauen, die selbstkontrolliert arbeiten, und dabei unter anderem auch Probleme wie z.B. Nichtlinearitäten zu vermindern.

Weitere Entwicklungen betreffen die Optimierung der Funktions- und der Festigkeitseigenschaften, insbesondere im Hinblick auf einen Langzeitbetrieb der Aktoren und Sensoren, sowie die Integration von Schutzschichten für den Einsatz in oxidierenden und korrosiven Medien. Hierfür bieten die vielfältigen Verfahren der Gasphasenabscheidung ausgezeichnete Möglichkeiten.

Danksagung

Die erfolgreiche Entwicklung der Aktor-Dünnschichten war nicht ohne die Mitwirkung vieler Kollegen am Forschungszentrum möglich. Besonderer Dank gilt Dr. C. Adelhelm, H. Besser, C. Halene, Dr. M. Kohl, Dr. B. Krevet, Dr. C. Kunisch, K.H. Kurz, Dr. J. Mencik, E. Nold, J. Schlegelmilch, Dr. P. Schloßmacher, Dr. A. Schüssler und Dr. A. Skokan.

Literatur

- [1] Quandt, E.; Holleck, H. (1995) Materials Development for thin film actuators, *Microsystem Technologies* 1: 178-184.
- [2] Quandt, E. (1994) Multitarget sputtering of high magnetostrictive Tb-Dy-Fe films, *J. Appl. Phys.* 75: 5653-5655.
- [3] Klokholm, E. (1976) The measurement of magnetostriction in ferromagnetic thin films, *IEEE Trans. Magn. MAG-12*: 819-821.
- [4] Quandt, E.; Seemann, K. (1995) Fabrication of Giant Magnetostrictive Thin Film Actuators, *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems MEMS'95, Amsterdam 29.1.-2.2.1995*, pp. 273-277.
- [5] Schatz, F.; Hirscher, M.; Schnell, M.; Flik, G.; Kronmüller, H. (1994) Magnetic anisotropy and giant magnetostriction of amorphous TbDyFe films, *J. Appl. Phys.* 76: 5380-5382.
- [6] Quandt, E.; Gerlach, B.; Seemann, K. (1994) Preparation and Applications of Magnetostrictive Thin Films, *J. Appl. Phys.* 76: 7000-02.
- [7] Tuttle, B.A.; Desu, S.B.; Ramesh, R.; Shiosaki, T. (Hrsg.) (1995) *Ferroelectric Thin Films IV*, *Mat. Res. Soc. Proc. Vol. 361*.
- [8] Kunisch, C.; Holleck, H. (1995) Design of piezoelectric films in the system AlN-ZnO, *Surf. Coat. Tech.* (im Druck).
- [9] Jaffe, B.; Cook, W.R., Jr.; Jaffe, H. (1971) *Piezoelectric Ceramics*, Academic Press, London
- [10] Kohl, M.; Quandt, E.; Schüßler, A.; Trapp, R.; Allen, D.M. (1994) Characterization of NiTi shape memory microdevices produced by microstructuring of etched foils or sputter deposited films, *Proc. ACTUATOR 94, Bremen, 15.17.6.1994*, pp. 317-320.
- [11] Holleck, H.; Kirchner, S.; Quandt, E.; Schloßmacher, P. (1994) Preparation and Characterization of Ti-Ni SMA Thin Films, *Proc. ACTUATOR 94, Bremen, 15.-17.6.1994*, pp. 361-364.
- [12] Moore, J.J.; Yi, H.C. (1992) Combustion synthesis of Ni-Ti-X shape memory alloys, in: *Mat. Res. Soc. Proc. Vol. 246*, pp. 331-336.
- [13] Quandt, E.; Halene, C.; Holleck, H.; Feit, K.; Kohl, M.; Schloßmacher, P. (1995) Sputter Deposition of TiNi and TiNiPd films displaying the two way shape memory effect, *Proc. Transducers'95 /Eurosensors IX, Stockholm 25.-29.6.1995*
- [14] Flik, G.; Schnell, M.; Schatz, F.; Hirscher, M. (1994) Giant magnetostrictive thin film transducers for microsystems, *Proc. ACTUATOR 94, Bremen, 15.17.6.1994*, pp. 232-235.
- [15] Shoji, S.; Esashi, M. (1994) Microflow Devices and Systems, *J. Micromech. Microeng.* 4: 157-171

Keramische Mikrostrukturen und ihre Anwendungen in der Mikrosystemtechnik

H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, W. Bauer, R. Knitter

Institut für Materialforschung III

Zusammenfassung

Der Einsatz keramischer Werkstoffe in der Mikrosystemtechnik erfordert die Entwicklung spezieller Verfahren sowohl zur Materialsynthese als auch zur Formgebung. Als aussichtsreich hat sich auf dem Gebiet der Materialsynthese der thermische Zweistufenprozeß, ausgehend von metallorganischen Flüssigprecursoren, erwiesen. Auf dem Gebiet der Mikroformgebung wurden die Verfahren Foliengießen & Prägen sowie das Schlickerpressen etabliert. Mit Hilfe dieser Verfahren ließen sich keramische Mikrokomponenten, wie mikrostrukturierte Piezoarrays, keramische Düsenstrukturen und Mikrowärmetauschermodule herstellen. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über Herstellung und Eigenschaften dieser Komponenten.

1. Einleitung

Werden innerhalb der Mikrosystemtechnik besondere Anforderungen an die Komponenten in Bezug auf thermische oder chemische Resistenz gestellt oder spezielle Eigenschaften, wie z. B. Piezoelektrizität verlangt, so können die Keramiken die Palette der bisher üblichen metallischen und polymeren Werkstoffe erheblich bereichern und damit neue Anwendungen eröffnen. Mit den materialspezifischen Vorteilen muß man jedoch auch die größeren Schwierigkeiten bei der Formgebung und insbesondere bei der Mikrostrukturierung von Keramiken in Kauf nehmen. Da die von anderen Werkstoffen bekannten, geometrieverändernden Bearbeitungsmethoden zumeist auf Keramiken nicht übertragbar sind, ist die Entwicklung spezieller Synthese- und Formgebungsverfahren notwendig, um diese neuen Einsatzmöglichkeiten zu realisieren. Die Herstellung von mikrostrukturierten Ultraschallsensorarrays, keramischen Mikrowärmetauschern und keramischen Spinndüsen sollen hier die Potentiale von keramischen Werkstoffen demonstrieren.

2. Herstellung keramischer Mikrostrukturen

Die geringen lateralen Dimensionen in den Mikrostrukturen stellen spezielle Ansprüche an die keramischen Pulver. Neben einer hinreichend kleinen Teilchengröße, die um den Faktor 10 geringer sein sollte als die kleinsten Abmessungen in der Mikrostruktur, muß bei mehrphasigen Keramiken oder bei Mischkristallsystemen hohe chemische Homogenität gewährleistet sein. Nur dann lassen sich im keramischen Bauteil gute Abformqualität und homogene Eigenschaften realisieren. Da für bestimmte Anwendungen, wie z. B. bei den Piezokeramiken, kommerzielle Pulver mit den geforderten

Eigenschaften nicht zur Verfügung stehen, wurde ein thermischer Zweistufenprozeß entwickelt, der ausgehend von organischen Precursoren über die Schritte Sprühtrocknung und Kalzination in der Wirbelschicht zu keramischen Pulvern führt, die die gestellten Anforderungen an die chemische Homogenität und Teilchengröße erfüllen [1]. Mit diesem Verfahren wurde PZT-Pulver der Zusammensetzung $Pb(Zr_{0,54}Ti_{0,46})O_3$ für das Ultraschallsensorarray hergestellt. Als Materialien für den keramischen Wärmetauscher und die Spinndüsen wurden $Y-ZrO_2/Al_2O_3$ - (Fa. TOSOH) bzw. Al_2O_3 -Pulver (Fa. ALCOA) gewählt.

Da bei Keramiken eine Bearbeitung und insbesondere eine Mikrostrukturierung nach dem Sintern wenn nicht gar ausgeschlossen so doch sehr kosten- und zeitintensiv ist, mußten Formgebungsverfahren entwickelt werden, bei denen das Ausgangsmaterial im grünen, d. h. ungesinterten Zustand möglichst in einem Schritt mit hoher Qualität strukturiert werden kann. Die anschließende thermische Verdichtung, die mit einer Schwindung verbunden ist, muß so gesteuert werden, daß die Formtreue erhalten bleibt. Als besonders geeignet haben sich hier die Verfahren **Foliengießen & Prägen** [2] und **Schlickerpressen** [3,4] gezeigt. In Abbildung 1 sind die Verfahrensabläufe schematisch dargestellt. Gemeinsam ist beiden Verfahren, daß die eigentliche Strukturierung über Abformung einer Negativform erfolgt. Dabei kann es sich um mikromechanisch bearbeitete, metallische Werkzeuge [5] oder um spritzgegossene polymere Werkzeuge handeln. Beim Foliengießen & Prägen wird das keramische Pulver in einem Lösungsmittel dispergiert, mit geeigneten organischen Additiven versetzt und zu dünnen, flexiblen Folien gegossen. Diese Folien werden mit mikrostrukturierten metallischen Werkzeugen geprägt und anschließend

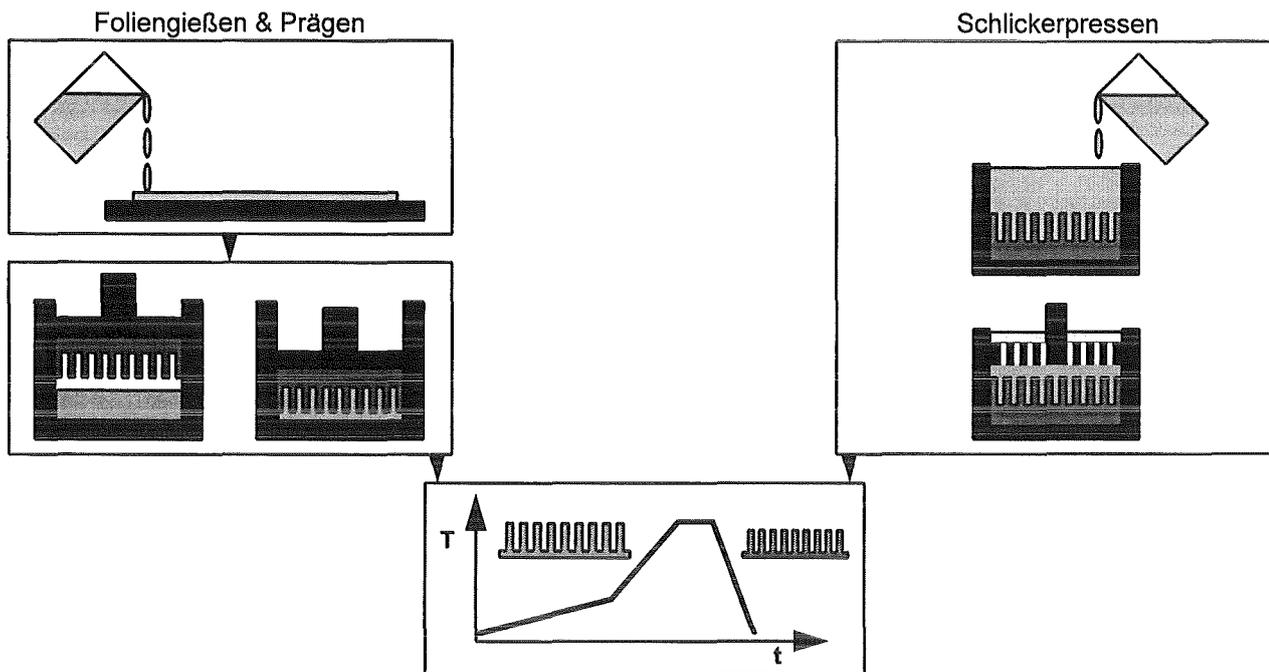


Abb. 1: Schematische Darstellung der Formgebungsverfahren Foliengießen & Prägen und Schlickerpressen.

entwacht und gesintert [6]. Beim Schlickerpressen wird ein keramischer Schlicker in einem modifizierten Preßwerkzeug komprimiert. Ein poröser Pressstempel, der gleichzeitig die Funktion eines Filters besitzt, ermöglicht es, das Dispersionsmedium abzupressen und das zurückbleibende Pulver in der Form zu verdichten. Der entstehende Preßling wird anschließend wieder von der Kunststoffform befreit und gesintert.

3. Anwendungsbeispiele

3.1 Ultraschallsensorarray

Piezoelemente auf der Basis Pb-Zr-Ti-Oxid (PZT) mit unterschiedlichen Dotierungen werden auf den Gebieten der Sensorik und Aktorik eingesetzt. Von besonderem Interesse sind hier Keramik-Polymer Piezocomposites. Hierbei sind zumeist säulenförmige Keramikkomponenten in eine Polymermatrix eingegossen (1-3 Konfiguration). Diese Composite-Strukturen weisen mehrere Vorteile auf. So lassen sich bei Optimierung des Volumenverhältnisses Polymer/Keramik hohe elektro-mechanische axiale Kopplungsfaktoren bei geringen mechanischen und dielektrischen Verlusten realisieren. Weiterhin bietet die Composite-Struktur die Möglichkeit, durch selektives Kontaktieren einzelner Säulen oder Säulenbereiche, Sensor- oder Aktorelemente der verschiedenen Geometrien nur durch die Gestaltung der Elektroden herzustellen. Die Strukturierung der Arrays erfolgt bisher zumeist durch Feinsägen der Keramik [7,8] oder durch Schlickergießen mit verlorenen Formen [9,10]. Bei weitergehender Miniaturisierung der Strukturen stößt diese Technik hinsichtlich Aufwand und Ausbeute auf ihre Grenzen. Hier bietet sich als

Alternative zu den genannten Verfahren das Foliengießen & Prägen an [11].

Zur Herstellung solcher Ultraschallsensorarrays wurde zunächst über mechanische Mikrofertigung ein Messingwerkzeug im Dreifachnutzen unter Berücksichtigung der zu erwartenden Schwindung der Keramik mit einer Strukturhöhe von 550 µm angefertigt, das die Form des gewünschten Keramikteils aufweist. Von diesem Formeinsatz wurden dann galvanisch Ni-Negativstrukturen abgeformt, die zum Prägen benutzt wurden. Diese Ni-Werkzeuge besitzen ca. 70 x 70 quadratische Sacklöcher mit einer Kantenlänge von 150 µm in einem Abstand von 100 µm. Die mit diesen Werkzeugen geprägten PZT-Folien wurden bei 1200°C gesintert und weisen danach eine lineare Schwindung von ca. 20 % auf (Abb. 2). Anschließend wurden die PZT-Strukturen in ein Polymer eingegossen, und durch Schleifen die

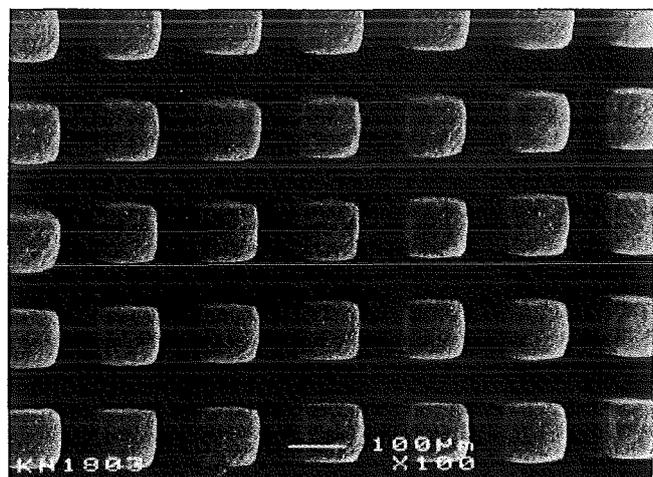


Abb. 2: PZT-Säulenarray nach dem Sintern.

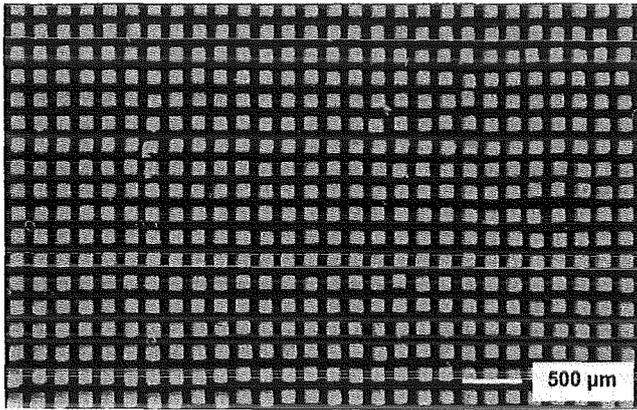


Abb. 3: PZT-Composite.

Säulen auf beiden Seiten freigelegt (Abb. 3). Nach dem Kontaktieren beider Flächen wurden diese Scheiben bei 100°C und 2 kV/mm gepolt und die piezoelektrischen Eigenschaften untersucht. Es wurden die elektromechanischen Kopplungsfaktoren in axialer und transversaler Richtung, k_t und k_p , mit Hilfe der Resonanzmethode sowie der Piezokoeffizient d_{33} , d. h. in axialer Richtung, bestimmt. Zum Vergleich sind in Tabelle 1 ebenfalls die entsprechenden Werte eines Piezokeramik-Vollkörpers sowie Literaturwerte von Composites [10,12] angegeben.

Tab. 1: Charakteristische Werte der Piezocomposites im Vergleich zu Keramik-Vollkörpern und Literaturdaten

Material	k_t	k_p	d_{33} [pm/V]
Composite IMF III	0,31	0,32	100
PZT IMF III	0,35	0,34	500
Composite [10]			
Aspektverhältnis 4	0,64		
Composite [12]			
Aspektverhältnis 4	0,70		280
Aspektverhältnis 3	0,54		

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, entsprechen die elektromechanischen Kopplungsfaktoren des Composites etwa denen des massiven Piezokörpers, während der Piezokoeffizient des Composites deutlich niedriger liegt als der der reinen Keramik. Letzteres ist auf den Dämpfungseinfluß des Polymers zurückzuführen, welches ca. 65 Vol% des Composites einnimmt. Weiterhin ist anzumerken, daß der benutzte Kunststoff nicht für die Verwendung als Vergußmasse für Piezocomposites optimiert worden ist. Vergleicht man die hier gemessenen Werte von k_t und d_{33} mit den Literaturwerten, bestehen bezüglich beider Werte noch große Diskrepanzen. Generell sind die Abweichungen der physikalischen Eigenschaften der nach dem Prägeverfahren hergestellten Piezocomposites zur Zeit noch auf Unzulänglichkeiten hinsichtlich der Kontaktierung, der Ebenheit des Arrays, sowie der Auswahl des geeigneten Polymers zurückzuführen. Jedoch markieren diese Er-

gebnisse ebenfalls das Erreichen eines wichtigen Etappenzieles im Hinblick auf die Herstellung mikrostrukturierter Piezoarrays.

3.2 Mikrowärmetauscher

Da bei den Komponenten der Mikrosystemtechnik aufgrund des hohen Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen dem Korrosionsverhalten eine besondere Bedeutung zukommt, bieten die keramischen Materialien mit ihrer hohen thermischen und chemischen Resistenz entscheidende Vorteile; insbesondere wenn Wärmetauscher mit flüssigen Medien betrieben oder an einen Einsatz als Mikroreaktor gedacht ist.

Aus Untersuchungen an metallischen Mikrowärmetauschern ist bekannt [13], daß wegen der geringen Dimensionen, nicht unbedingt die Materialien mit einer höheren thermischen Leitfähigkeit auch ein besseres Wärmeaustauschvermögen aufweisen. Als Material für den keramischen Wärmetauscher wurde daher Y-ZrO₂/Al₂O₃ ausgewählt, welches sich in früheren Untersuchungen als besonders geeignet für das Foliengießen & Prägen gezeigt hat [14], bei hohen Temperaturen einsetzbar ist und sich den meisten Medien gegenüber chemisch inert verhält. Für erste Untersuchungen wurden über die Prägetechnik mit einem metallischen Stempel in den ca. 300 µm dicken keramischen Folien Kanäle erzeugt, die Folien kreuzweise gestapelt und anschließend bei 1450°C gesintert. Abbildung 4 zeigt einen Anschlag einer solchen Probe. Deutlich erkennbar sind die in jeder zweiten Lage angeschnittenen Kanäle mit einem Durchmesser von ca. 120 µm. In einem Abstand von ca. 220 µm dazwischen liegen die in der Bildebene verlaufenden, längs angeschnitten Kanäle. In weiteren Versuchen soll versucht werden, den Abstand zwischen den Kanälen zu reduzieren und damit eine Erhöhung der Kanalanzahl zu erreichen. Eine weitere Aufgabe wird dann die Anbringung der Medienanschlüsse sein.

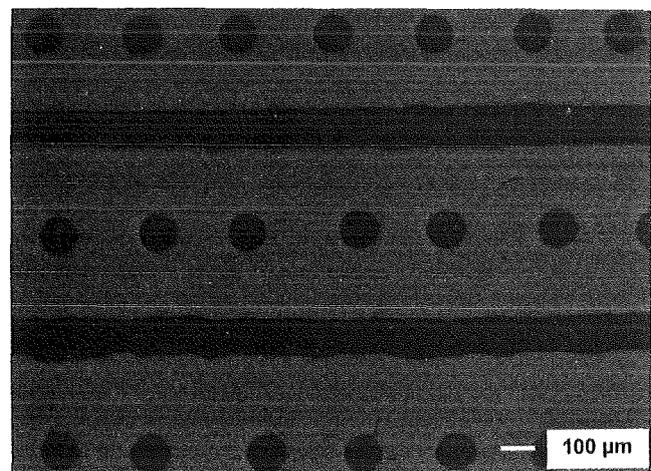


Abb. 4: Anschlag eines Kreuzstromwärmetauschers aus Y-ZrO₂/Al₂O₃.

3.3 Keramische Spinndüsen

Spinndüsen für textile Spinnverarbeitung sind Verschleißteile, die einen nicht zu unterschätzenden Kostenfaktor bei der Herstellung von Fasern darstellen, da die erodierende Wirkung der Spinnmasse bei Edelstahl oder Edelmetallen, die üblicherweise als Düsenmaterialien verwendet werden, zu relativ kurzen Düsenstandzeiten führt [15]. Der Einsatz von Spinndüsen aus Keramik ist wegen deren Verschleißfestigkeit eine wirkungsvolle Maßnahme zur Verzögerung der Düsenkorrosion und führt damit zu längeren Einsatzzeiten.

Besondere Anforderungen werden bei Spinndüsen an die Innenwandqualität und an eine exakte Kantenausprägung gestellt. Das Schlickerpressen bietet sich als keramisches Formgebungsverfahren hierfür an, da es die präzise Abformung von Wandflächen und von scharfkantigen Details ermöglicht. Al_2O_3 wurde als Werkstoff aufgrund seiner Verschleißfestigkeit und wegen seiner chemischen Resistenz ausgewählt. Aus dem Al_2O_3 -Pulver wurden konzentrierte Schlicker mit Feststoffgehalten bis zu 50 Vol% hergestellt. Diese Schlicker wurden dann durch Schlickerpressen abgeformt, wobei Gründichten von über 65 %th.D. erreicht wurden. Als Formeinsätze wurden PMMA-Plättchen verwendet, auf denen sich Vorlagen für verschiedene Düsenkonfigurationen mit vertikalen Abmessungen über 1000 μm und feinsten Strukturdetails von ca. 20 μm befanden.

Abbildung 5 zeigt ein derart durch Schlickerpressen abgeformtes Düsenloch. Bei 1450°C gesinterte Proben weisen Sinterdichten von ca. 98 %th.D. auf. Da das Formgebungsverfahren unmittelbar noch keine durchgehenden Kanäle liefert, ist es erforderlich, den Boden der Düsen nach dem Sintern abzuschleifen. Durch diesen zusätzlichen Schritt wird die Güte des Düsenlochs aber weiter verbessert, da man besonders scharfkantige, gratfreie Kapillarausgänge erhält.

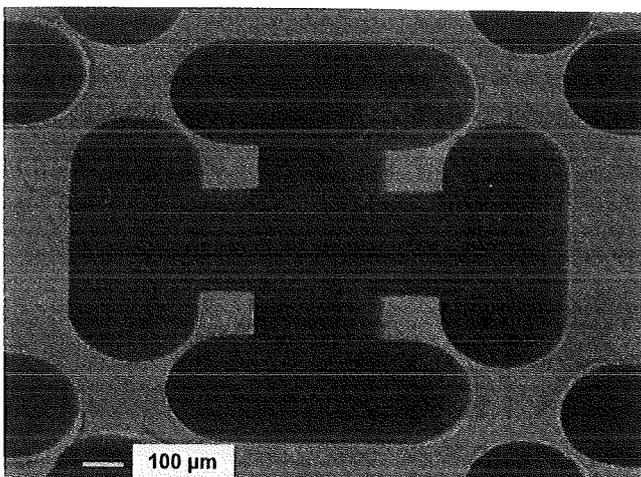


Abb. 5: Düsenstruktur aus Al_2O_3 .

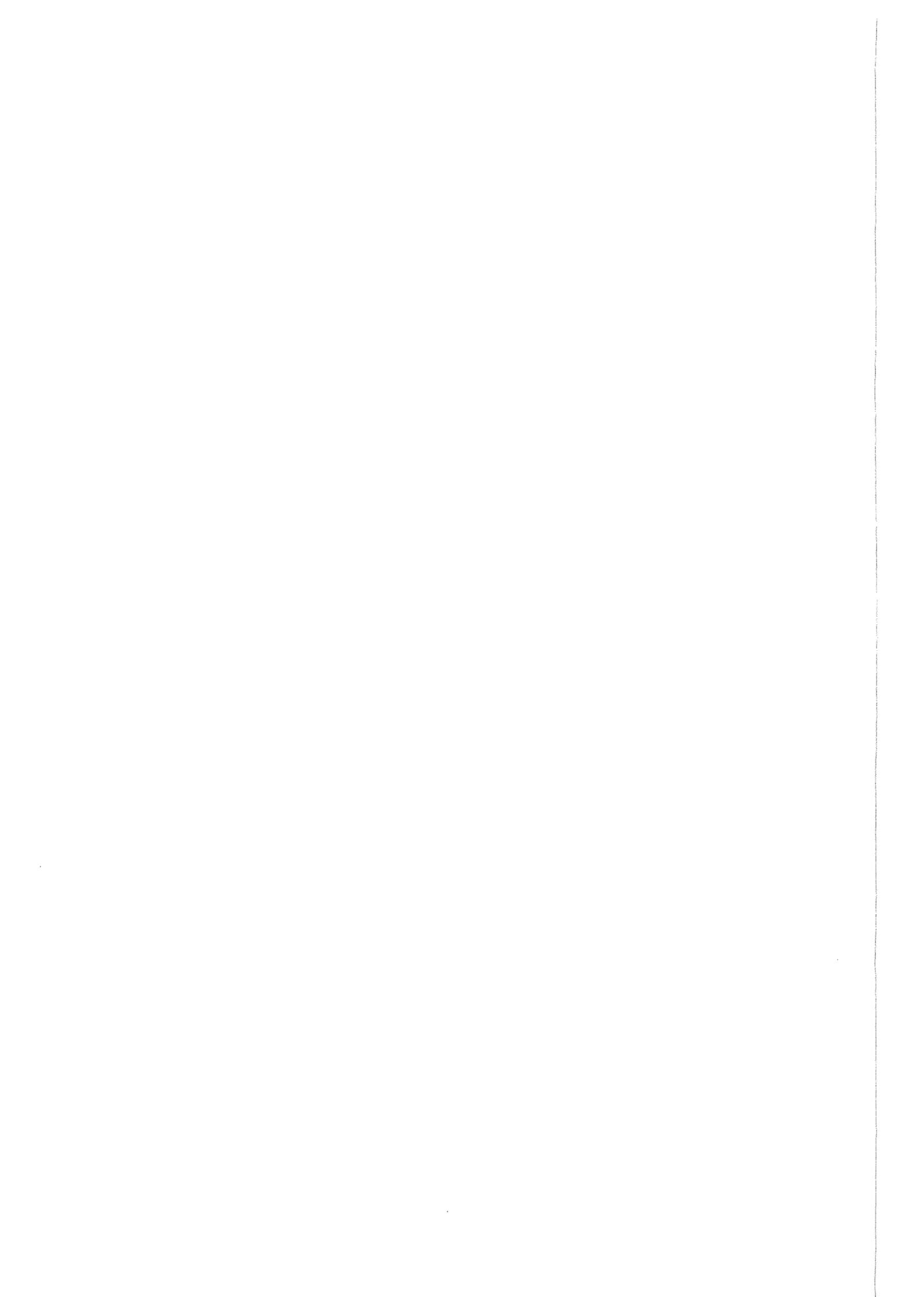
4. Ausblick

Die drei hier vorgestellten keramischen Mikrokomponenten verdeutlichen, daß es möglich ist, nach Entwicklung geeigneter Mikrostrukturierungsverfahren die gewünschten Eigenschaften keramischer Werkstoffe auch in der Mikrosystemtechnik zu nutzen. Die entwickelten Verfahren zur Materialsynthese und Formgebung sind bereits an einer Reihe von Keramiken erprobt worden und lassen sich relativ leicht auf andere Verbindungen übertragen. Sie ermöglichen die Herstellung keramischer Mikrostrukturen mit Strukturhöhen von über 500 μm und Aspektverhältnissen von bis zu 100 bei gleichzeitig hoher Formtreue und Dichte. Die vorgestellten Komponenten sind erste Beispiele für Anwendungen, bei denen der Einsatz keramischer Werkstoffe aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften der Mikrosystemtechnik neue Potentiale eröffnet.

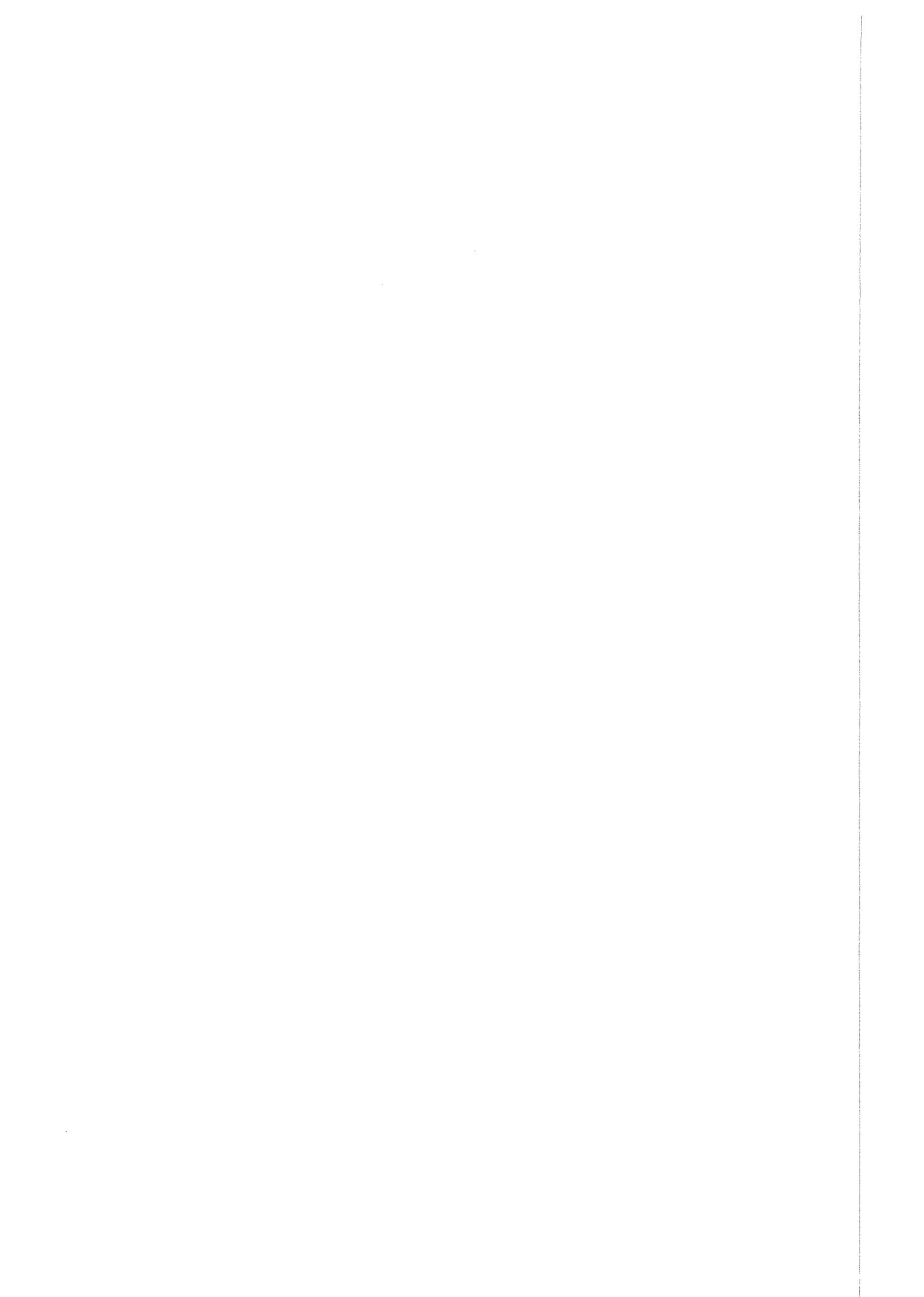
Literatur:

- [1] Günther, E.; Maciejewski, U. (1994): Thermal Two-Stage Process for Preparation of Doped LZT Ceramic Powder from Heterometallic Organocomplex Compounds. 8th Cimtec, Florence, 28.6-4.7.94.
- [2] Knitter, R.; Günther, E.; Maciejewski, U.; Odemer, C. (1994): DE 43 10 068 C1.
- [3] Nöker, F.; Beyer, E. (1992): Herstellung von Mikrostrukturkörpern aus Keramik. *Keram. Z.* 44/10, 677-681.
- [4] Ritzhaupt-Kleissl, H.-J.; Bauer, W.; Günther, E.; Laubersheimer, J.; Haußelt, J. (1995): Development of Ceramic Microstructures. HARMST'95, July 3-5, Karlsruhe, to be published in: *Microsystem Technologies*.
- [5] Bier, W.; Linder, G.; Seidel, D.; Schubert, K. (1991): Mechanische Mikrofertigung, *KfK-Nachrichten* 23, 165-173.
- [6] Knitter, R.; Odemer, C. (1994): Foliengießen und Prägen als Verfahren zur Herstellung keramischer Mikrostrukturen. *KfK-Nachr.* 4/94, 240-245.
- [7] Nakaya, C.; Takeuchi, H.; Katakura, K.; Sakamoto, A. (1985): Ultrasonics Probe Using Composite Piezoelectric Materials. *Proc. 1985 IEEE Ultrason. Symp.*, 634-636.
- [8] Smith, W. A.; Shaulov, A. A.; Auld, B. (1989): Design of Piezocomposites for Ultrasonic Transducers. *Ferroelectrics* 91, 155-162.
- [9] Bast, U.; Cramer, D.; Wolff, A. (1991): A New Technique for the Production of Piezoelectric Composites with 1-3 Connectivity. In: Vincenzini, P. (ed.) *Ceramics Today - Tomorrow's Ceramics*, pp. 2005-2015. Elsevier Science Publishers B. V.

- [10] Lubitz, K.; Wolff, A.; Preu, G. (1993): Microstructuring Technology. Proc. 1993 IEEE Ultrason. Symp., 515-524.
- [11] Knitter, R.; Günther, E.; Odemer, C.; Maciejewski, U. (1995): Ceramic Microstructures and Potential Applications. HARMST'95, July 3-5, Karlsruhe, to be published in: Microsystem Technologies.
- [12] Hirata, Y.; Okuyama, H.; Ogino, S.; Numazawa, T.; Takada, H. (1995): Piezoelectric Composites for Micro-ultrasonic Transducers Realized with Deep-etch X-ray Lithography. Proc. MEMS '95 (IEEE) , 191-196.
- [13] Bier, W.; Keller, W.; Linder, G.; Seidel, D.; Schubert, K.; Martin, H. (1993): Gas-to-Gas Heat Transfer in Micro Heat Exchangers. Chemical Engineering and Processing, Vol. 32, No. 1, 33-43.
- [14] Knitter, R.; Günther, E.; Maciejewski, U.; Odemer, C. (1994): Herstellung keramischer Mikrostrukturen / Preparation of Ceramic Microstructures. cfi/Ber. DKG 71, No. 9, 549-556.
- [15] Schwab, M. E. (1979): Spinndüsen für profilierte supermatte Polyester-Filamente. Chemiefasern/ Textilindustrie 29/81, 697-704.



Mikrooptik



LIGA-Mikrolinsen und ihre Anwendung in der Medizin- und Informationstechnik

J. Göttert¹⁾, M. Fischer²⁾, A. Müller¹⁾,

¹⁾Institut für Mikrostrukturtechnik

²⁾Aesculap AG, Tuttlingen

Zusammenfassung

Durch die Entwicklung von mikrooptischen Systemen in der optischen Signalübertragung, der optischen Sensorik, oder der optischen Bildverarbeitung für Anwendungen in Scannern, Kopieren oder der Endoskopie ist das Interesse an der Herstellung von Mikrolinsen mit definierten optischen Eigenschaften sowohl als Einzellinse als auch in einer Array-Anordnung zunehmend gewachsen. Speziell zur Herstellung von hochgeöffneten Mikrolinsen wurde ein neues Verfahren entwickelt. Durch einen kombinierten Prozeß von Röntgentiefenlithographie und Schmelztechnik werden durch Vorgabe von zylindrischen Mikrostrukturen fester Höhe Mikrolinsen mit exakt definierten Oberflächenprofilen erzeugt. Im Beitrag werden die grundlegenden Ergebnisse der Prozeßführung erläutert und die Erweiterungsmöglichkeit der Linsenherstellung durch Abformtechniken aufgezeigt. Darüber hinaus werden grundlegende optische Eigenschaften wie z.B. Brennweite und Abbildungsqualität ermittelt. Die Anwendung der Mikrolinsen wird durch Beispiele erläutert.

1. Einleitung

Die zur Herstellung von Mikrolinsen verwendeten Verfahren lassen sich grob in zwei Klassen einteilen: zum einen Schmelzverfahren, bei denen durch Aufschmelzen zylindrischer Mikrostrukturen gekrümmte Oberflächenprofile ausgebildet werden [1], zum anderen Ionenaustauschverfahren in Spezialgläsern, bei denen durch Ionendiffusion lokal Brechzahl-erhöhungen eingestellt und Linseneigenschaften definiert werden (GRIN-Linsen) [2]. Gerade die zuletzt genannte Technik wird bereits heute zur kommerziellen Herstellung von Mikrolinsen eingesetzt [3].

Bei beiden Verfahren ist das erreichbare Öffnungs-verhältnis und damit die Apertur der Optik begrenzt. So können beispielsweise mit dem Austauschverfahren Werte für die numerische Apertur von maximal 0.2 erreicht werden [2]. Um durch das Aufschmelzen photolithographisch hergestellter zylindrischer Mikrostrukturen gewölbte Profile zu realisieren, nimmt man i.d.R. ein Zerfließen der Zylinder und damit die Ausbildung flach gekrümmter Oberflächen mit entsprechend kleinen Aperturen in Kauf.

Für einige Anwendungen z.B. zum Aufbau mehrlinsige Objektive aus Mikrolinsen oder zur Kollimierung des von Laserdioden abgestrahlten Feldes sind jedoch hochgeöffnete Mikrolinsen für den Aufbau von kompakten und damit stabilen Abbildungssysteme von Interesse. Aus der Literatur sind erste Ansätze bekannt, solche Linsen durch eine Kombination von Protonenlithographie und Diffusionsverfahren herzustellen [4].

2. Herstellungsprozeß

Ein alternativer Ansatz für die Herstellung von hochgeöffneten Mikrolinsen ist in Abb. 1 skizziert [5].

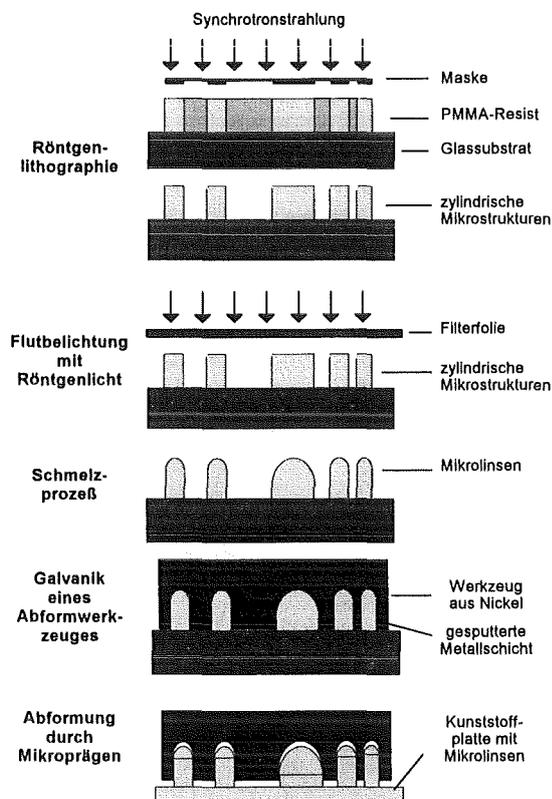


Abb. 1: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses von hochgeöffneten Mikrolinsen.

Durch Röntgentiefenlithographie wird die Absorberstruktur einer Maske in einen hochmolekularen PMMA-Resist übertragen. Nach dem anschließenden Entwicklungsvorgang erhält man zylindrische Mikrostrukturen mit den für LIGA-Strukturen charakteristischen Merkmalen wie beispielsweise glatte und senkrechte Seitenwände (Abb. 2a) [6]. Eine zweite Bestrahlung mit Röntgenlicht ohne eine Maskenstruktur führt in Abhängigkeit von der absorbierten Dosis zu einer definierten Reduktion des Molekulargewichtes in den Mikrozylindern. In einem nachfolgenden Temperprozeß bei Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur von PMMA kann unter Ausnutzung von Oberflächenspannungseffekten die Oberseite der Mikrozylindern aufgeschmolzen und gekrümmte Oberflächenprofile erzeugt werden (Abb. 2b).

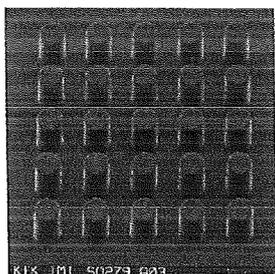


Abb. 2a: zylindrische Mikrostrukturen

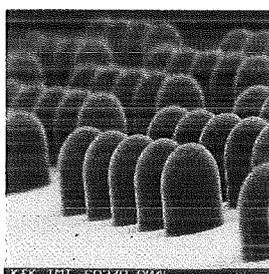


Abb. 2b: hochgeöffnete LIGA-Mikrolinsen

Von diesen primären Mikrostrukturen wird ein Abformwerkzeug erzeugt, indem zunächst ganzflächig auf das Substrat eine Metallschicht als Galvanikstartschicht aufgebracht wird und darauf die elektrische Abscheidung z.B. von Nickel erfolgt (Abb. 2c). Mit diesem Werkzeug lassen sich die einmal hergestellten Oberflächenprofile in gleichbleibender Qualität durch Mikroabformung in Kunststoffplatten übertragen (Abb. 2d). Die optischen Eigenschaften können dabei gezielt durch die Wahl des Materials oder die Restschichtdicke der Kunststoffplatte entsprechend den Anforderungen modifiziert werden.

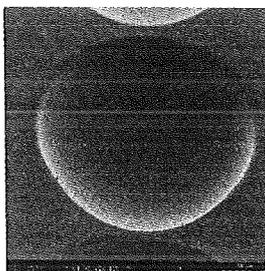


Abb. 2c: Negativform der Linse im Abformwerkzeug

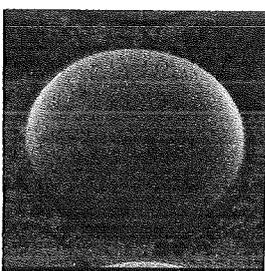


Abb. 2d: geprägte Mikrolinsen in PMMA

3. Prozeßparameter

Bei der Herstellung der primären Mikrolinsenstrukturen beeinflussen die folgenden Prozeßparameter die Form der geschmolzenen Oberflächenprofile:

- die Zylinderhöhe
- die absorbierte Dosis und
- die Schmelztemperatur.

Unter der Voraussetzung, daß beim Umschmelzprozeß keine Volumenänderung stattfindet, formt sich das Zylindervolumen V_{Zyl} allgemein in ein Kugelsegment mit dem Volumen V_{Seg} um:

$$V_{\text{Zyl}} = \pi r_{\text{Zyl}}^2 h_{\text{Zyl}} = V_{\text{Seg}} = \pi H^2 \left(R - \frac{H}{3} \right)$$

r_{Zyl} = Zylinderradius

h_{Zyl} = Höhe des Mikrozyllinders

H = Höhe des Kugelsegments

R = Krümmungsradius des Kugelsegments

Für den Spezialfall, daß die Zylinderhöhe h_{Zyl} genau $2/3$ des Zylinderradius r_{Zyl} beträgt, erhält man eine Halbkugel mit dem kleinsten Krümmungsradius $r_{\text{HK}} = r_{\text{Zyl}}$ der sich durch die Vorgabe des Zylinders realisieren läßt. Für geringere Zylinderhöhen ergeben sich prinzipiell Kugelsegmente, bei denen der Krümmungsradius R größer ist als r_{HK} , für größere Zylinderhöhen entstehen Halbkugeln auf einem Restzylinder (vgl. Abb. 2b).

Ausgehend von den Spezifikationen einer Anwendung (vgl. Kap. 5) wurden zunächst Untersuchungen durchgeführt, Kugelsegmente mit definierten Krümmungsradien bei vorgegebenem kleineren Zylinderdurchmesser durch exakte Einstellung der Resisthöhe herzustellen. Da mit diesem Ansatz keine reproduzierbaren Ergebnisse erzielt werden konnten, wurde für die weiteren Untersuchungen jeweils eine Ausgangshöhe der Zylinderstrukturen gewählt, bei der sich mindestens eine Halbkugel herstellen ließ, d.h. es wurde $h_{\text{Zyl}} \geq 2/3 r_{\text{Zyl}}$ gewählt. Für diesen Fall wurden die anderen Prozeßparameter systematisch untersucht.

Für den Wert der absorbierten Dosis ergeben sich zwei prinzipielle Randbedingungen, die das zur Verfügung stehende Dosisintervall einschränken. An Proben, die nicht flutbelichtet wurden, konnte auch für eine sehr hohe Schmelztemperatur von $T=220^\circ\text{C}$ aus den Zylinderstrukturen keine Mikrolinse geformt werden. Die Zylindern wurden nur in einem Randbereich von ca. $40 \mu\text{m}$ angeschmolzen, so daß sich speziell für größere Zylinderdurchmesser ($>100 \mu\text{m}$) keine abbildenden Eigenschaften ergaben. Bei noch höheren Temperaturen bleibt die Formstabilität und damit die definierte Vorgabe der geometrische Daten nicht mehr erhalten. Eine praktische untere Grenze ergab sich aus diesen Untersuchungen für eine minimale Dosisablagerung von 0.5 KJ/cm^3 . Eine absolut obere Dosisgrenze wird für eine absorbierte Oberflächendosis von ca. 5 KJ/cm^3 erreicht. In diesem Fall bilden sich bereits bei Schmelztemperaturen von $T=125^\circ\text{C}$ Blasen auf der Struktur Oberfläche, so daß keine einheitliche Umformung der Oberfläche möglich ist. Die praktische Obergrenze liegt bei 2 KJ/cm^3 .

Für Dosiswerte aus diesem Intervall zwischen $0.5 - 2 \text{ KJ/cm}^3$ absorbierter Dosis an der Oberfläche der Mikrozyllinder hat sich gezeigt, daß eine kleinere Dosisablagerung durch eine geringfügig höhere Schmelztemperatur kompensiert werden kann. So benötigt man zum vollständigen Umschmelzen von

1000 μm Linsen für eine Oberflächendosis von 2 KJ/cm^3 ca. 145°C, bei der niedrigeren Dosis von 0.5 KJ/cm^3 muß die Temperatur auf ca. 160°C erhöht werden. Der wesentliche Prozeßschritt ist damit das Umschmelzen. Voruntersuchungen haben gezeigt, daß eine minimale Schmelzzeit von 30 min benötigt wird, um ein für die vorgegebene Temperatur stabiles Oberflächenprofil zu erzeugen. Eine Verlängerung der Zeit auf mehrere Stunden führt zu keiner meßbaren Änderung der Strukturhöhe. Allerdings kann zum Einfluß auf das Oberflächenprofil noch keine Aussage gemacht werden.

In Abb. 3 ist als Maß für die Änderung der Oberfläche die zur Substratoberfläche gemessene Strukturhöhe als Funktion des Zylinderdurchmessers mit dem Scharparameter Schmelztemperatur dargestellt.

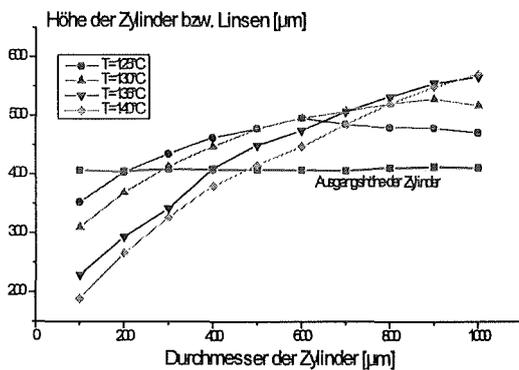


Abb. 3: Änderung der Zylinderhöhe als Funktion der Schmelztemperatur.

Entsprechend der Randbedingung einer Volumenkonstanz erwartet man ein mit dem Umformen verbundenes Höhenwachstum der Mikrostruktur. Dieser Effekt kann mit steigender Temperatur eindeutig für die größeren Zylinderdurchmesser gemessen werden, während die kleineren Linsen an Höhe verlieren obwohl sich die Oberflächenkrümmung ausbildet und abbildende Eigenschaften meßbar sind. Eine Analyse dieses Sachverhaltes ist anhand von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in den Abben. 4a-c für einzelne Linsen dieser Probe illustriert.

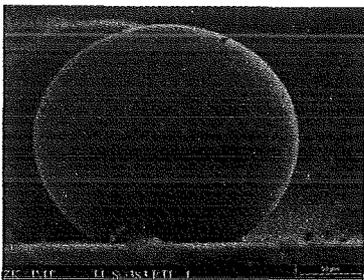


Abb. 4a:
Zylinder mit $\varnothing = 100 \mu\text{m}$, geschmolzen bei 140°C

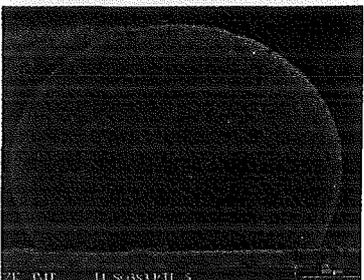


Abb. 4b:
Zylinder mit $\varnothing = 400 \mu\text{m}$, geschmolzen bei 140°C

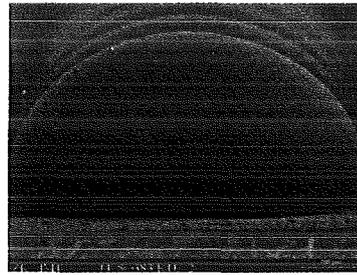


Abb. 4c:
Zylinder mit $\varnothing = 1000 \mu\text{m}$, geschmolzen bei 140°C

Während bei den großen Linsendurchmessern sich die gewünschte Halbkugel ausformt, bilden sich bei kleineren Durchmessern in Abhängigkeit von Oberflächenspannung und Volumen tropfenförmige Strukturen aus. Durch die sehr gute Haftung zum Substrat bleibt dabei die formgebende Zylinderstruktur unmittelbar am Substratgrund erhalten.

Mit Blick auf die Abformbarkeit dieser Mikrolinsen muß aus diesen Untersuchungen festgehalten werden, daß man auf einem Substrat nur Linsen mit ähnlicher Größe und Höhe fertigen kann.

Zur Charakterisierung der Oberfläche ist exemplarisch die mit einem mechanischen Tastschnittgerät vermessene Oberfläche im zentralen Bereich einer Mikrolinse mit 800 μm Durchmesser in Abb. 5 dargestellt und mit dem berechneten Profil einer idealen Kugellinse gleichen Durchmessers verglichen. Insgesamt ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der Theorie und der Messung. Die mittlere Abweichung von 0.5 μm entspricht einer Wellenlänge und ist für die geplante Anwendung ausreichend. Allerdings ist eine optisch zufriedenstellende Charakterisierung mit dieser Methode nicht möglich. Derzeit werden die Möglichkeiten interferometrischer Meßmethoden zur Profilcharakterisierung untersucht [7].

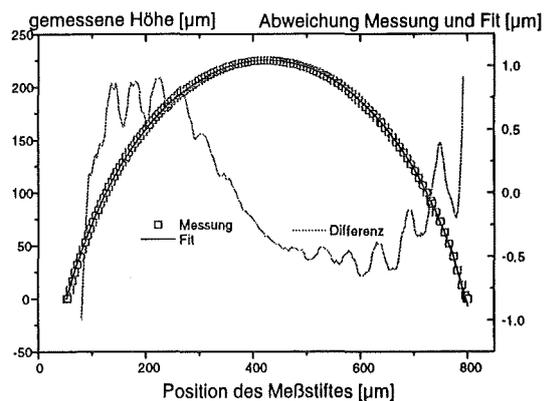


Abb. 5: Mechanisch vermessenes Oberflächenprofil einer Mikrolinse mit 800 μm Durchmesser.

4. Optische Kenndaten

4.1 Brennweite

Zur Bestimmung der Brennweite wurde der in Abb. 6 skizzierte Aufbau verwendet.

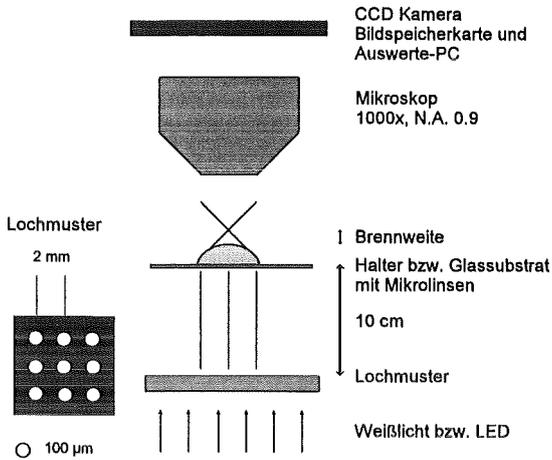


Abb. 6: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Linsenbrennweite.

Mit dem Aufbau wird das von einer Mikrolinse abgebildete Muster einer Lochplatte, die in einem Abstand von 10 cm zur Halter- bzw. Substratebene positioniert wird, in die Brennebene der Mikrolinse abgebildet. Die Brennweite wird mit einer an den Mikroskopoptisch angeschlossenen Höhenmeßeinrichtung als Abstand zwischen Scheitelpunkt und dem Punkt maximaler Fokussierung bestimmt. Mit dem angeschlossenen PC lassen sich die erzeugten Bilder weiter analysieren. Wahlweise können entweder Mikrolinsen auf dem Glassubstrat oder davon abgelöste Mikrolinsen, die auf einen Halter geklebt werden, dessen Aperturöffnungen einen im Vergleich zum Zylinderdurchmesser ca. 100 μm kleineren Durchmesser besitzen, untersucht werden.

In Abb. 7a ist ein typisches Bild des Lochmusters in der Brennebene dargestellt, Abb. 7b zeigt die Intensitätsverteilung über den Querschnitt eines abgebildeten Loches. Mit der für dieses Beispiel verwendeten Mikrolinse mit einem Ist-Durchmesser von 810 μm ergibt sich eine Brennweite von 826 μm und eine Breite der Intensitätsverteilung von 2 μm .

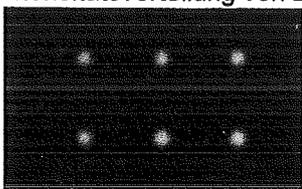


Abb. 7a: Bild des Lochmusters

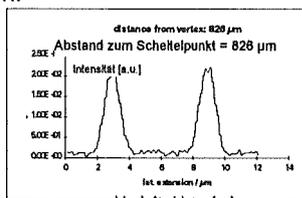


Abb. 7b: Intensitätsverteilung im Bildquerschnitt

Auf diese Art und Weise wurden unterschiedliche Mikrolinsen bezüglich ihrer Brennweite vermessen. Das Ergebnis dieser Messungen ist in Abb. 8 dargestellt und zeigt, daß für Mikrolinsen mit Durchmessern zwischen 50 μm und 1000 μm der erwartete Zusammenhang zwischen Brennweite und Krümmungsradius

besteht. Der Krümmungsradius der Linsen wurde dabei für die größeren Linsen durch die mechanische Profilmessung, im Fall der kleineren Linsen aus den Kenndaten Breite und Höhe durch Vermessen mit einem Mikroskop bestimmt. Aus der Anpassung dieser Werte nach der Linsenmacher-Formel

$$f = \frac{rHK}{n-1}$$

f = Brennweite der Mikrolinse
 n = Brechungsindex von PMMA

ergibt sich ein Wert von $n = 1.493$, der sehr gut mit den Literaturdaten für PMMA übereinstimmt.

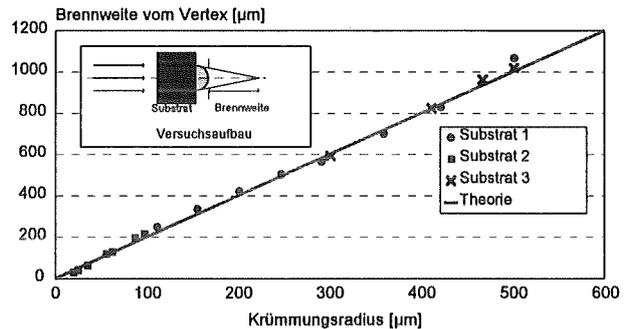


Abb. 8: Gemessene Brennweiten von halbkugelförmigen Mikrolinsen mit unterschiedlichem Krümmungsradius.

Bei der Bestimmung der Brennweiten in der anderen Linsenorientierung muß der Einfluß von Glasplatte und Höhe des Restzylinders auf die Lage der Hauptebene berücksichtigt werden. Im Rahmen der Meßgenauigkeit ergaben sich vergleichbare Werte.

4.2 Abbildungsqualität

Zur Bestimmung der Abbildungseigenschaften wurde der in Abb. 6 dargestellte Aufbau modifiziert. Anstelle des Lochmusters wurde eine Streifenmaske (Teil des USAF-Testmusters) als Gegenstand verwendet, der etwa im Abstand der zweifachen Brennweite vor die Mikrolinse positioniert wurde. Mit dieser Anordnung wird eine 1:1-Abbildung durch die Mikrolinse realisiert.

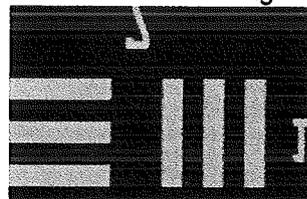


Abb. 9a: Auflösung des Mikroskopaufbaus

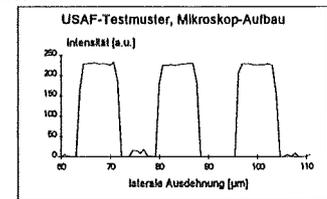


Abb. 9b: Intensitätsprofil im Mikroskop-Aufbau

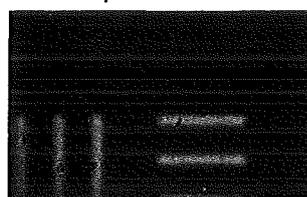


Abb. 10a: Auflösung mit Mikrolinse

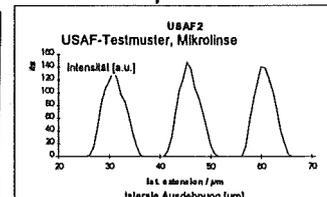


Abb. 10b: Intensitätsprofil mit Mikrolinse

In Abb. 9a ist die entsprechende Stelle des Testmusters als Photo dargestellt, die Abb. 9b gibt die mit dem Strahlanalysesystem vermessene Intensitätsverteilung wieder. Im Vergleich dazu ist in den Abb. 10a und 10b die Situation nach einer zusätzlichen 1:1-Abbildung mit der Mikrolinse wiedergegeben. In diesem Abbildungsaufbau lässt sich der 10 µm breite Strich (entspricht 50 Linienpaaren/mm) noch mit ausreichendem Kontrast übertragen. Bei kleineren Strichmustern ist die Lichtstärke so gering, daß man kein für die Kamera meßbares Signal erhält.

Eine abschließende Bewertung der Abbildungseigenschaften z.B. anhand der MTF steht noch aus und kann erst dann durchgeführt werden, wenn eine exakte, interferometrische Vermessung des Oberflächenprofils realisiert wurde [8].

5. Anwendungsbeispiel Bildübertragungssystem für die Endoskopie

Erste Anwendungen der hochgeöffneten Mikrolinsen werden derzeit im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes MINOP (Mikrosystemtechnische Komponenten für die minimal invasive neurochirurgische Operationstechnik; Förderkennzeichen 13 MV 0323) gemeinsam mit industriellen Anwendern untersucht [8]. Hier geht es um den Aufbau eines bildgebenden Systems als Teil eines flexiblen Endoskopes. Simulationsrechnungen zu den Abbildungseigenschaften des aus Polymerlinsen aufgebauten Systems haben gezeigt, daß für eine ansprechende Bildqualität, insbesondere mit Blick auf Kontrast und Auflösung, zweilinsige Abbildungssysteme mit integrierten Blenden erforderlich sind [9]. Ziel des Projektes ist es, die in Abb. 11 schematisch skizzierte Anordnung zu realisieren.

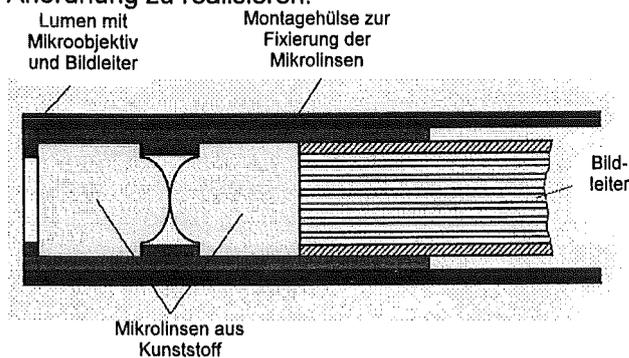


Abb. 11: Schematische Anordnung von Mikrolinsen und Bildleiter am Ende des Endoskops.

Über eine strukturierte Montagehülse werden sowohl die zwei Mikrolinsen als auch der Bildleiter fest miteinander verbunden. Die Positionierung der einzelnen Komponenten zueinander wird dabei durch die optischen Eigenschaften der Mikrolinsen und die Anforderungen an das Abbildungssystem hinsichtlich der numerischen Apertur, der Lichtstärke und dem Auflösungsvermögen festgelegt. Der Aufbau des

Systems sollte mit Blick auf die Produktion möglichst einfach und stabil sein. Dazu werden z.Z. grundsätzliche Untersuchungen zur montagegerechten Strukturierung der Außenseite der Linsen durchgeführt. Die optischen Eigenschaften eines zweilinsigen Systems aus PMMA-Mikrolinsen wurde mit dem in Abb.12 gezeigten Laboraufbau untersucht. Der Aufbau besteht aus zwei plankonvexen Linsen unterschiedlichen Durchmessers. Die größere Mikrolinse wurde vom Glassubstrat gelöst und auf dem polierten Ende des Bildleiters fixiert. Die kleinere Mikrolinse befindet sich weiterhin auf dem Glassubstrat und kann flexibel zur größeren Mikrolinse verfahren werden.

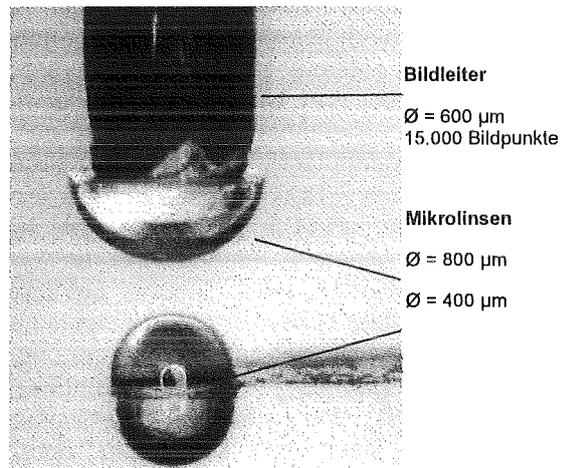


Abb. 12: Laboraufbau eines Abbildungssystems mit zwei Mikrolinsen und einem Bildleiter.

Mit dieser Anordnung wurde das USAF-Testmuster für verschiedene Gegenstandsweiten auf den Bildleiter abgebildet. Das andere Ende des Bildleiters wurde mit einem Mikroskopobjektiv (10x, N.A.=0.2) vergrößert auf eine CCD-Kamera abgebildet und auf einem Monitor dargestellt. In Abb. 13 ist das Bild des Testmusters für eine kleine Gegenstandsweite von 10 mm gezeigt. Die im mittleren Bild erkennbare Verschmierung der Kanten ist auf das Raster des Bildleiters (15.000 Pixel, Ø = 550 µm) zurückzuführen, das die Auflösung begrenzt.

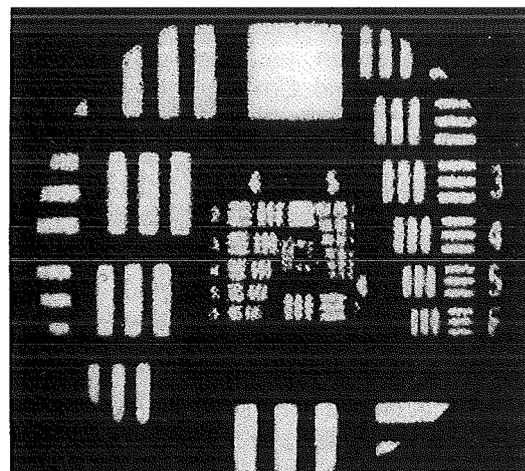


Abb. 13: USAF-Testmuster, abgebildet mit dem Aufbau in Abb. 12 für eine Gegenstandsweite von 10 mm.

6. Diskussion und Ausblick

Durch den kombinierten Prozeß von Röntgentiefenlithographie und Schmelzen lassen sich hochgeöffnete Mikrolinsen mit ausreichender Oberflächenqualität mit Durchmessern von 50 µm bis derzeit 1 mm herstellen. Um dabei reproduzierbare Oberflächenprofile und damit optische Eigenschaften zu bekommen, sollte die Höhe der lithographisch hergestellten Mikrozyylinder mindestens 2/3 des Zylinderradius betragen, so daß sich halbkugelförmige Profile bilden lassen. Die Analyse der Prozeßparameter hat gezeigt, daß die zum Aufschmelzen erforderliche Flutbelichtungsdosis in einem Bereich von 0.5 - 2 KJ/cm³ liegen sollte, wobei größere Linsendurchmesser eher mit höheren Dosiswerten und kleinere mit niedrigeren bestrahlt werden sollten. Die zum Umformen der Oberfläche erforderliche Schmelztemperatur liegt bei den genannten Dosiswerten geringfügig oberhalb der Glasübergangstemperatur des PMMA's und hängt stark von der Größe der Zylinder ab. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die genannte Intervallbreite an Linsendurchmessern nicht auf einem Substrat befriedigend herstellbar ist, sondern in Bereiche mit Linsen ähnlicher Größe unterteilt werden sollte. Die Herstellung der Linsen durch Abformung konnte nachgewiesen werden, so daß für weitere Untersuchungen abgeformte Mikrolinsen mit konstanten optischen Eigenschaften herstellbar sind.

Erste optische Untersuchungen der Linsen zeigen, daß die aus der Oberflächenkrümmung erwartete Brennweite den theoretischen Erwartungen entspricht. Eine theoretische Aussage zur Abbildungsqualität kann erst dann gemacht werden, wenn eine exakte Vermessung des Oberflächenprofils möglich ist und sich daraus theoretische Vorhersagen ableiten lassen, die mit den Ergebnissen der Messungen verglichen werden können.

Die Untersuchungen zur Anwendung der Mikrolinsen in der Endoskopie haben gezeigt, daß die Linsen in diesem Gesamtsystem nicht der begrenzende Faktor hinsichtlich der Abbildungsqualität sind. Damit ist der prinzipielle Einsatz der Mikrolinsen für dieses Anwendungsbeispiel sichergestellt. In Zukunft stehen Arbeiten zur einfachen und stabilen Montage des Systems im Vordergrund. Um dazu den Außenrand der Linsen bei vorgegebenem Linsenradius dem Innenradius der Montagehülse mit der erforderlichen Präzision anzupassen, werden derzeit Prozeßkombinationen von Abformung und justierter Röntgentiefenlithographie bzw. Si-Ätztechnik und Mikro-mechanik untersucht [10].

Erste hier nicht dargestellte Untersuchungen zur Abbildung bzw. Kollimierung des Lichtes von Laserdioden haben gezeigt, daß die Linsen auch mit kohärenten Lichtquellen eingesetzt werden können. Für die Zukunft sind Arbeiten zur Herstellung ashärischer Mikrolinsen geplant, um das elliptische Feld der Dioden an die rotationssymmetrische Feldverteilung z.B. von

Monomodefasern anzupassen und damit die Lichteinkopplung zu optimieren.

Literatur:

- [1] D. Daly, R.F. Stevens, M.C. Hutley, N. Davies: The manufacture of microlenses by Melting Photoresist, in: M.C. Hutley (Ed.), *Microlens Arrays*, IOP Short Meeting Series No 30, Teddington, UK, 1991.
- [2] J. Bähr, K.-H. Brenner: Realisation of 0.2-N.A. Microlenses by Field Assisted Ag-Na Ion Exchange, in: D. Daly (Ed.), *Microlens Arrays*, EOS Topical Meetings Digest Series, Vol. 5, Teddington, UK, May 1995.
- [3] Produktinformation der Fa. NSG Europe: *SELFOC Product Guide*, Temse, Belgien, 1994.
- [4] M. Kufner, S. Kufner, P. Chavel: Irradiation Protonique en Volume: un outil pour la Fabrication de composants micro-optiques, Tagungsband „PROCEDES ET MODELES POUR LA MICRO-OPTIQUE PASSIVE“, Metz, April 1995.
- [5] J. Göttert, M. Fischer, A. Müller: High-aperture surface relief microlenses fabricated by X-ray lithography and melting, in: D. Daly (Ed.), *Microlens Arrays*, EOS Topical Meetings Digest Series, Vol. 5, Teddington, UK, May 1995.
- [6] K.-H. Brenner, M. Kufner, S. Kufner, J. Moisel, A. Müller, S. Sinzinger, M. Testorf, J. Göttert, J. Mohr: Application of three-dimensional micro-optical components formed by lithography, electroforming, and plastic molding, *APPLIED OPTICS*, Vol. 32, No. 32, Nov. 1993.
- [7] J. Schwider, O. Falkenstörfer: Twyman-Green Interferometer for Testing Micro-Spheres, in: D. Daly (Ed.), *Microlens Arrays*, EOS Topical Meetings Digest Series, Vol. 5, Teddington, UK, May 1995.
- [8] D.J. Daly, R.A. Hunt, R.F. Stevens: Imaging Performance of Pairs of Microlens, in: D. Daly (Ed.), *Microlens Arrays*, EOS Topical Meetings Digest Series, Vol. 5, Teddington, UK, May 1995.
- [9] A. Guber, W. Menz: MINOP - Entwicklung eines miniaturisierten neuro-endoskopischen Operationssystems, *Nachrichten Forschungszentrum Karlsruhe*, Jahrg 27, 2-3 1995.
- [10] F.-W. Oertmann, M. Fischer: Microstructured polymer-lenses - an initial quality assessment, Vortrag auf dem 3. MINOP-Statusseminar, Pécs/Ungarn, Sept. 1995.
- [11] U. Köhler, A. Guber, W. Bier: Plasmasches und laserinduziertes Ätzen von Silicium mit den Halogenen Fluor, Chlor und Brom, *Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5574*, (1995).

Leistungsfähigkeit und Anwendungsgebiete von UV-VIS und IR-LIGA-Mikrospektrometern

C. Müller¹⁾, P. Krippner¹⁾, T. Kühner²⁾, J. Mohr¹⁾

¹⁾Institut für Mikrostrukturtechnik

²⁾Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik

Zusammenfassung

Mit Hilfe des LIGA-Verfahrens wurden Mikrospektrometerbausteine ohne bewegliche Teile in einem Prozeßschritt für den UV-VIS und IR-Bereich hergestellt. Durch Kombination der Spektrometerbausteine für den sichtbaren Bereich mit einer Diodenzeile und einer optimierten Elektronik wurden kleine, kompakte und leistungsstarke Mikrosysteme aufgebaut. Diese System werden z.B. zur Farbanalyse in der Druckindustrie und zur On-Line Prozeßüberwachung in der chemischen Industrie eingesetzt.

Im Rahmen einer Kleinserienfertigung werden 2000 Spektrometerbausteine für den sichtbaren Bereich von 380 nm bis 780 nm durch Abformung hergestellt. Die abgeformten Bausteine zeigen die gleichen Leistungsdaten (Streulichtdämpfung und Transmission) wie die röntgentiefenlithographisch strukturierten Bausteine, so daß durch die Abformtechnik eine kostengünstige Massenfertigung der Spektrometerbausteine gegeben ist.

Die Spektrometerbausteine für den IR-Bereich werden in einem Hohlwellenleiter realisiert. Die Bausteine haben eine Transmission von bis zu 25 % der eingekoppelten Lichtleistung. Von der Firma microParts werden diese Bausteine mit einer geeigneten Elektronik zu Gas-Sensoren aufgebaut. Die Funktion und das Leistungsvermögen dieser Sensoren konnte anhand von Testmessungen nachgewiesen werden.

1. Einleitung

Die große Vielzahl von spektralen Analyseaufgaben, z.B. in der Umwelt- und Prozeßüberwachung erfordert kleine und leistungsstarke optische Mikroanalyse-systeme, deren Basiskomponenten einfach aufgebaute Mikrospektrometerbausteine sind.

Mit dem am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten LIGA-Verfahren ist es möglich, optische Funktionselemente [1,2] zu erzeugen. Durch die Genauigkeit der Strukturübertragung bei der Röntgentiefenlithographie und der Abformung werden Strukturen mit Detailabmessungen im Bereich von zehntel Mikrometern bei Strukturhöhen von einigen hundert Mikrometern gefertigt, somit erlaubt das LIGA-Verfahren die parallele Herstellung eines planaren Mikrospektrometerbausteins ohne bewegliche Teile für den UV-VIS oder für den IR-Bereich mit einem selbstfokussierenden, geblazten Reflexionsgitter, von exakt zum Gitter positionierten Führungsschächten für Lichtleitfasern sowie einer Fokuszeile. Durch die parallele Strukturierung aller Elemente entfällt jegliche Justierung.

2. UV-VIS-Spektrometersystem

2.1 Herstellung und Aufbau der LIGA-Mikrospektrometerbausteine

Die Spektrometerbausteine wurden bisher durch Röntgentiefenlithographie hergestellt, indem ein dreischichtiger Resistaufbau strukturiert wird [3].

Im Hinblick auf eine kostengünstige Massenfertigung der Spektrometerbausteine wurde ein Verfahren zur Strukturierung zweischichtiger Wellenleiterstrukturen durch Prägen entwickelt. Dabei muß beim Prägevorgang eine gleichmäßige Schichtdicke der einzelnen Schichten über dem Baustein erzeugt werden. Dies läßt sich erreichen, indem man den Strukturierungsprozeß in zwei Teilschritte unterteilt, die erste Schicht zunächst unter Zuhilfenahme eines weichen Preßstempels prägt und anschließend mit der zweiten Schicht während eines zweiten Prägeschlittes verschweißt. Die nach diesem Prozeß hergestellten Gitterbausteine zeigten vergleichbare Qualität zu den röntgenlithographisch hergestellten Bausteinen. Dies zeigt, daß auch der Abformprozeß die Strukturdetails im Bereich 0,2 µm mit der notwendigen Genauigkeit überträgt. Damit ist sichergestellt, daß die Gitterbausteine auch großtechnisch hergestellt werden

können, was für eine breite Anwendung eine notwendige Voraussetzung ist.

Der Aufbau des Spektrometerbausteins wird im Folgenden anhand eines röntgenlithographisch hergestellten Bausteins beschrieben. Abgeformte Bausteine haben das gleiche Design, beim Prägen werden allerdings nur zwei Schichten strukturiert. Die obere Deckschicht wird durch Übersichten mit Polymer realisiert [4].

In Abb. 1 ist der schematische Aufbau des Spektrometerbausteins für den UV-VIS und NIR-Bereich dargestellt. Das von einer Multimode-Glasfaser in die Kernschicht des lichtleitenden 3-Schicht-Resistaufbaus eingestrahlt polychromatische Licht wird am Reflexionsgitter, das mit Silber bzw. Gold besputtert ist, spektral aufgeteilt und auf die Fokuszeile abgebildet. Das spektral aufgeteilte Licht wird an der linearisierten Fokuszeile entweder mit verschiedenen Multimode-Fasern oder mit einer Photodiodenzeile ausgekoppelt. Dabei wird die Photodiodenzeile auf dem Baustein angebracht und das Licht durch Totalreflexion an einer um 45° geneigten Auskoppelzeile entsprechend umgelenkt.

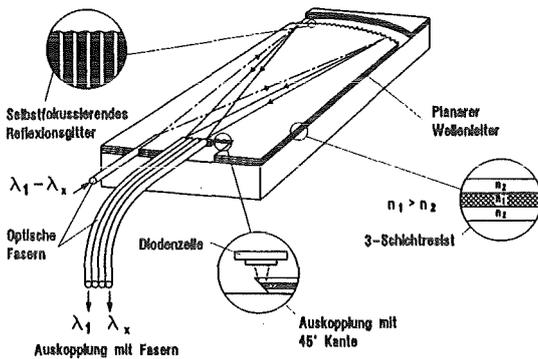


Abb.1: Schematischer Aufbau eines planaren Gitterspektrographen mit einem integrierten selbstfokussierenden Reflexionsgitter

Bei den derzeit eingesetzten Spektrometerbausteinen wird das Licht in der lichtleitenden Kernschicht (PMMA) durch Totalreflexion an den Mantelschichten geführt. Kunststoffe haben im UV (< 400 nm) eine hohe Dämpfung, so daß für diesen Spektralbereich die Lichtleitung in Polymeren nicht mehr ausgenutzt werden kann. Derzeit wird untersucht, inwieweit sich ein Konzept, daß sich bei den Bausteinen im IR-Bereich bewährt hat (siehe Kap. 3), in den UV-Bereich umsetzen läßt. Die Lichtleitung wird durch Reflexion an metallischen Grenzflächen in einem Hohlwellenleiter realisiert. Dieses Konzept stellt sowohl an die Reflektivität der metallischen Grenzflächen als auch an die Ebenheit hohe Ansprüche. Die hohe Reflektivität in diesem Spektralbereich kann nur mit einer dünnen Aluminiumschicht mit einer sehr dünnen Schutzschicht aus Glas realisiert werden. Derzeit werden

verschiedene Schichtkombinationen auf ihre Reflektivität und Oberflächenrauigkeiten untersucht.

2.2 Systembeschreibung

Durch die Kombination des Spektrometers mit einer geeigneten Diodenzeile (Hamamatsu S6463-Q256) und einer optimal an die Zeile angepaßten 16 Bit Elektronik konnte ein Spektrometersystem [5] einer hohen Dynamik realisiert werden (Abb. 2). Eine miniaturisierte Weißlichtquelle, die in einen Faserstecker eingebaut wurde, ergänzt das System.

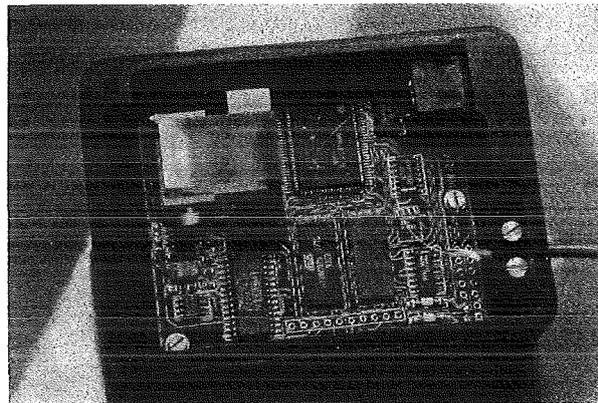


Abb.2: Montiertes Mikrospektrometersystem

Das Mikrospektrometer-System umfaßt bei der Größe einer Zigarettenschachtel sämtliche Komponenten eines vollständigen Spektrometers: den LIGA-Spektrometerbaustein, eine Photodiodenzeile zur Erfassung der erzeugten Spektren, sowie ein Mikrokontroller-System zur Steuerung und Auswertung der Messungen (Abb. 3).

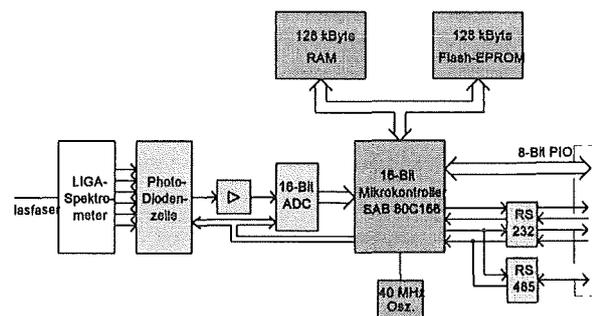


Abb. 3: Blockschaltbild Mikrospektrometer-System

Kernstück des Systems ist ein 16-Bit-Mikrokontroller vom Typ Siemens SAB 80C166, der sich neben einer großen Integrationsdichte durch hohe Rechenleistung auszeichnet - die minimale Befehlszykluszeit beträgt 100 ns bei einem Prozessortakt von 20 MHz. Aufgrund einer Vielzahl bereits integrierter Peripherie-Bausteine, wie serielle Schnittstellen, Parallel-I/O-Ports und Zähler, läßt sich das komplette Controller-System mit nur wenigen zusätzlichen Komponenten realisieren. Das System verfügt über 128 kByte RAM

(Datenspeicher) und 128 KByte FlashEPROM (Programmspeicher).

Die Ausgangssignale der Photodiodenzeile werden zunächst analog aufbereitet und an den Eingangsspannungsbereich des 16-Bit-Analog/Digital-Wandlers angepaßt. Die Pulsfolge zur Ansteuerung der Diodenzeile wird mit Hilfe der integrierten "Capture-Compare-Einheit" des Mikrokontrollers erzeugt. Außerdem kann der Analog/Digital-Wandler aufgrund der vorhandenen Parallel-Ports direkt an den SAB 80C166 angeschlossen werden.

Zur Kommunikation mit einem Hostrechner oder anderen Systemen stehen zwei asynchrone serielle Schnittstellen zur Verfügung. Die Übertragung der Daten kann entsprechend dem auf der Systemplatine integrierten Schnittstellentreiber entweder im Vollduplex-Betrieb mit RS-232-Pegel oder im Halbduplex-Verfahren mit RS-485-Pegel erfolgen.

Der Kontroller verfügt über einen "Bootstrap Loader", der nach einem Hardware-Reset das Laden von Programmen ins RAM des Systems über die serielle Schnittstelle ermöglicht. Das FlashEPROM kann so mit Hilfe eines speziellen Programms in der Schaltung programmiert werden; auf gesockelte EPROMs kann also verzichtet werden. Durch Änderung der Benutzer-Software wird damit eine einfache Anpassung des Spektrometersystems an unterschiedliche Aufgabenstellungen ermöglicht. Das FlashEPROM erlaubt außerdem, Systemparameter (z. B. Normierungsdaten) resident abzulegen.

Das Mikrospektrometersystem wurde in der ersten Version als SMD-Platine mit einer Größe von ca. 60 mm x 70 mm realisiert. Sowohl die Digitalelektronik als auch die Analogelektronik benötigen eine Versorgungsspannung von + 5 V. Die Leistungsaufnahme des Systems beträgt 800 mW.

In einer ersten Anwendung wird das Mikrospektrometersystem über die serielle Schnittstelle mit einem PC gekoppelt (Abb. 4).

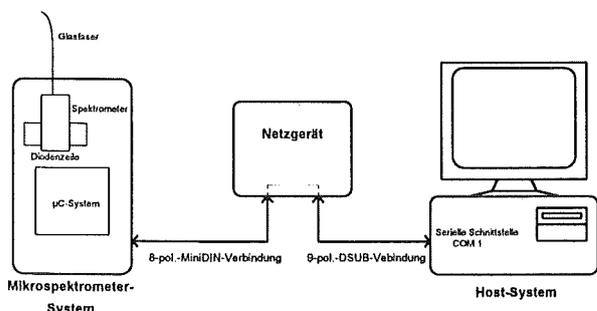


Abb. 4: Anbindung des Mikrospektrometer-Systems an Host-PC

Über den PC werden die Meßabläufe und die Meßparameter dem System vorgegeben. Im einzelnen sind dies:

- Initialisierung der Meßwerterfassung, d. h. Parametervorgabe zur Ansteuerung von Photodiodenzeile und ADC (Integrationszeit, Verstärkungsfaktor, Pixel-Bereich).
- Meßwerterfassung. Digitalisierung der Photodioden-Signale, Zwischenspeicherung, Mittelwertbildung, Vorverarbeitung und Datentransfer zum Host-PC.
- Abspeichern der Systemparameter im Flash-EPROM: Wellenlängen-zu-Pixel-Zuordnung, relevanter Spektralbereich mit minimaler und maximaler Wellenlänge, Spektrometer-Geometrie (Ausleserichtung).

Die Übertragungsrate beträgt dabei 19,2 kBaud.

Gemäß dieser Vorgaben wird die Aufnahme und Vorverarbeitung der Spektren mit Hilfe des Mikrokontrollers durchgeführt.

Dem Mikrokontroller kommen in der Regel folgende Aufgaben zu:

- Ansteuerung der Diodenzeile
- Ansteuerung des Analog/Digital-Wandlers
- Einlesen der Spektren
- Vorverarbeitung und Auswertung der Spektren
- Kommunikation mit Hostrechner / Ausgabe der Ergebnisse

Die über den Mikrokontroller aufbereiteten Spektren werden im PC weiterverarbeitet und dargestellt. Mit zunehmender Spezialisierung der Anwendung lassen sich auch weiterführende Auswertelgorithmen auf Grund der Leistungsfähigkeit des Mikrokontrollers im Mikrospektrometersystem selbst implementieren, so daß ein Hostsystem u. U. ganz entfallen kann.

2.3 Leistungsdaten des Spektrometersystems

In der Tabelle 1 sind die Daten des Systems zusammengestellt. Die Dynamik des Systems wird von der Diodenzeile und der eingekoppelten Intensität bestimmt.

Spektralbereich	380 nm - 1100 nm
Transmission bei λ_{Blaze}	> 25 %
spektrale Auflösung	5 nm
Glasfaser	50/125 μ m, Stufenindex
Diodenzeile	Hamamatsu S5463-Q256
Mikrokontroller	Siemens SAB80 C166
16 Bit A/D-Wandler	Burr-Brown ADS7807U
Dynamik	10.000 - 20.000
Integrationszeit	20 ms - 2560 ms

Tab. 1: Systemdaten des Mikrospektrometersystems

Abb. 5 zeigt für einen exemplarischen Baustein den für ein Spektrometersystem sehr wichtigen Verlauf der Streulichtdämpfung, wie sie sich bei Verwendung einer Halogenbirne als Lichtquelle, die eine hohe Intensität im Roten und nur geringe Intensität im Blauen besitzt, ergibt. Zur Bestimmung des Streulichtes wird ein Filter

(GG495) eingesetzt, das oberhalb 495 nm alles Licht durchläßt und unterhalb eine Dämpfung von 70 dB besitzt. Die Dämpfung ergibt sich aus:

$$(dB) = -10 * \log\left(\frac{I_{495} - I_{Dunkel}}{I_{Null} - I_{Dunkel}}\right)$$

Im Gegensatz zu Kurve a wurde bei Kurve b noch ein Filter BG38 verwendet, das eine homogenere Lichtverteilung zur Folge hat. Unter diesen Bedingungen wurde eine Streulichtdämpfung von 6 dB erreicht.

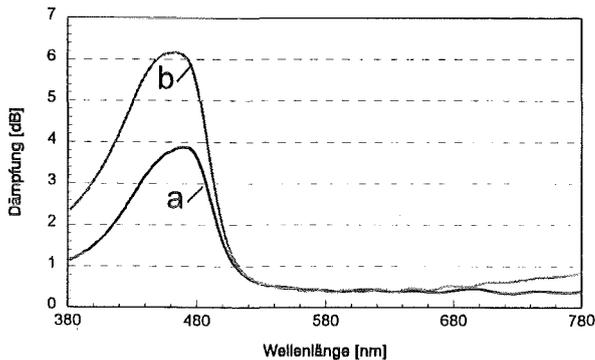


Abb.5: Streulichtdämpfung bei dem GG495 Filter

Da die Bausteine, die derzeit in einer Pilotfertigung von 2000 Stück hergestellt werden, in einem Spektralbereich von 380 nm bis 780 nm arbeiten, kann das Licht oberhalb von 800 nm bis in den IR-Bereich mit einem geeigneten Filter aus dem Weißlichtspektrum der Lichtquelle herausgeschnitten werden kann. Durch diese Reduktion des Spektralbereichs läßt sich die Streulichtdämpfung weiter erhöhen. Neben diesen Maßnahmen werden derzeit Möglichkeiten der Designmodifikation untersucht, mit denen das Streulicht weiter unterdrückt werden kann.

2.4. Einsatzmöglichkeiten für das Mikrospektrometer

Farbmeßtechnik

Die Spektrometerbausteine für den sichtbaren Spektralbereich von 380 nm bis 780 nm können in der Farbmeßtechnik eingesetzt werden. Dazu werden diese Bausteine von der Firma microParts mit Diodenzeilen konfektioniert und als OEM-Teile weiterverkauft. Im nächsten halben Jahr geht man von einem Markt von 2000 Stück aus.

On-Line Prozeßphotometer

Im Rahmen einer Kooperation mit der Firma Ciba Geigy wurde ein On-Line Prozeßphotometer aufgebaut, das bei der Herstellung von Additiven für Kunststoffe eingesetzt wird. Das Herzstück dieses Photometer ist ein Spektrometerbaustein, der mit 4 Detektorfasern und entsprechenden Siliziumdetektoren bestückt ist. Die Einzeldetektoren haben den Vorteil, daß mit einer hohen Frequenz der Prozeß überwacht werden kann, so daß sehr schnell kleine Veränderungen detektiert werden können.

Einsatz in Fließ-Injektions-Systemen

Bei FIA Anwendungen werden derzeit als Detektor rotierende Filteraufbauten oder hochwertige Spektrometer eingesetzt. In Kooperation mit der Firma Perkin Elmer wurde untersucht, inwieweit es möglich ist, einen LIGA-Spektrometersystem in einer FIA-Applikationen einzusetzen. Dazu wurde die Elektronik und das Software-Paket an diese Applikation angepaßt. Bei FIA-Anwendungen ist es notwendig, das Spektrum in einer Zykluszeit von 100 ms auszulesen, damit der zeitliche Verlauf der Reaktion aufgenommen werden kann. Die Untersuchungen zeigen, daß das Mikrospektrometer durch die Multiwellenlängenanalyse für FIA-Anwendungen sehr gut geeignet ist und zusätzliche Meßmöglichkeiten eröffnet. Die ermittelten Nachweisgrenzen liegen bei 0,0015 Au, was die Bestimmung von 0,01 mg/l Nitrit entspricht.

Einsatz als Pyrometer

Mit einem Spektrometerbaustein, der den Wellenlängenbereich von 500 nm bis 1100 nm abdeckt, ist man in der Lage, die Verbrennung von Feststoffen zu untersuchen. Derzeit wird im Rahmen einer Diplomarbeit gemeinsam mit dem ICT-FHG Berghausen ein Pyrometer aufgebaut. Dieses Pyrometer soll bei der Untersuchung von Air-Bag-Treibsätzen eingesetzt werden.

3. IR Spektrometerbaustein

3.1 Aufbau der IR-Spektrometer

Für Wellenlängen ab 1100 nm weist das in den Spektrometern zur Lichtleitung verwendete Material PMMA ebenfalls eine sehr hohe Dämpfung auf. Daher ist das Konzept der Lichtleitung im Polymer für Spektrometerbausteine für den IR-Bereich nicht geeignet. Um für den Spektralbereich von 2,7 µm bis 3,3 µm Spektrometerbausteine mit Hilfe der LIGA-Technik zu realisieren, wurde ein Aufbau gewählt, bei dem das Licht in einem Hohlraum mit goldbeschichteten Oberflächen geführt wird. Der Hohlraum wird auf der einen Seite von dem selbstfokussierenden Reflexionsgitter und auf der anderen Seite von den Faserführungsstrukturen für die Einkoppelfaser und die Auskoppelfasern begrenzt. Die Höhe der Spektrometerbausteine wird durch den Außendurchmesser der eingesetzten Glasfasern bestimmt (Abb. 6).

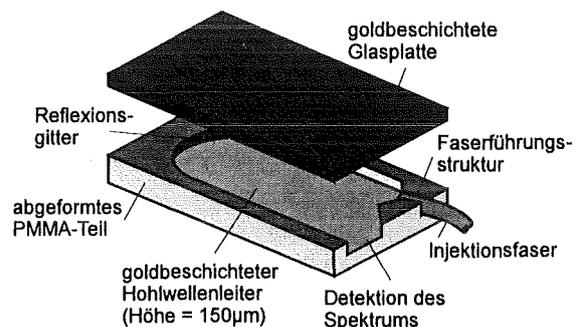


Abb.6: schematischer Aufbau der IR-Spektrometers

In Abb.7 ist die Transmission eines Spektrometerbausteins in Abhängigkeit von der Wellenlänge dargestellt. Dabei wurden zur Detektion in den einzelnen Spektralkanälen ebenfalls Fasern verwendet. Wie zu sehen, liegt die Transmission bei etwa 25 %. Aus diesem Grund ist bei den Meßergebnissen zu berücksichtigen, daß bedingt durch die nichtangepasste Geometrie von Faser und Hohlleiteraufbau bei der Lichtauskopplung mit einem prinzipiellen Verlust von 70 % zu rechnen ist, was einer Einfügedämpfung von 5 dB entspricht.

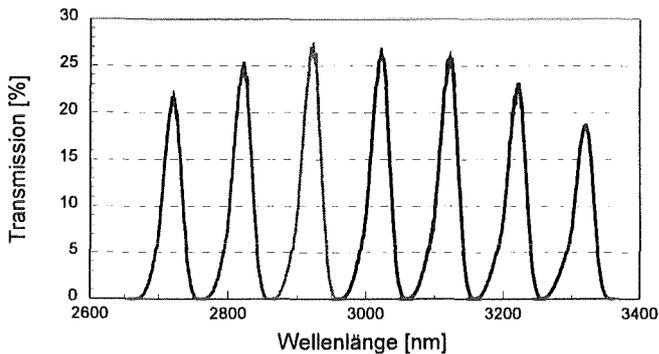


Abb.7.: Transmission des IR-Spektrometers in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Mit Hilfe von verschieden großen Spektrometerbausteinen konnte gezeigt werden, daß die Weglänge des Lichtes im Hohlwellenleiter keinen Einfluß auf die Transmission hat. Demnach ist die Rauigkeit der Deckflächen für Anwendungen im IR-Bereich ausreichend gering und die Reflektivität nahezu 100 %.

3.2 Anwendungen

Gas-Sensor für Propan

Auf der Basis eines derartigen Aufbaus, bei dem die Grundplatte mit den Mikrostrukturen in Polycarbonat spritzgegossen wird, hat die Firma microParts einen Gas-Monitor aufgebaut. Mit diesem wird durch die Auswertung zweier Wellenlängen mit Einzeldetektoren

die Konzentration von Propan in der Luft bestimmt. Die Spektrometerbausteine, die hierfür vom IMT entworfen wurden, arbeiten im Wellenlängenbereich von 3,3 μm bis 3,8 μm .

Kunststoffsartierung

Derzeit wird an einem Spektrometerbaustein für einen Spektralbereich von 1,6 μm bis 2 μm gearbeitet, bei dem auch das Konzept der Lichtleitung in einem Hohlwellenleiter umgesetzt wird. Dieser Baustein wird bei der Kunststoffsartierung in einem Stapelaufbau von bis zu hundert Bausteinen eingesetzt werden. Dabei müssen die spektralen Muster der unterschiedlichen Kunststoffe im angegebenen Wellenlängenbereich anhand von bis zu 10 Stützstellen erkannt werden.

4. Ausblick

Die hohe Dynamik (16-Bit) und sehr gute Reproduzierbarkeit des Mikrospektrometersystems, die für die meisten Anwendungen die wichtigsten Kriterien sind, unterstreichen die hohe Qualität. Für die meisten Applikationen in der Farbmeßtechnik und *Vor-Ort-Analyse* kann das System bereits eingesetzt werden. Durch eine weitere Reduktion des Streulichts sind auch Anwendungen mit besonders hohen Anforderungen bzgl. Linearität zugänglich. In den zukünftigen Arbeiten werden Maßnahmen zur Verminderung des Streulichtes untersucht. Potentiale hierzu bestehen in einer Reduktion der intrinsischen Streuzentren im Material und durch ein neues Spektrometerdesigns, bei dem störende Reflexe nicht mehr in den Baustein eingekoppelt werden können.

Für die IR-Spektrometerbausteine beschränkt sich, trotz der Systemqualität, der Einsatz bisher auf Anwendungen, die mit Einzeldetektoren auskommen. Aus diesem Grunde ist es notwendig auch im IR-Bereich ein Detektorarrayaufbau zu realisieren. Hierzu werden derzeit Arbeiten durchgeführt. Dabei wird der Entwicklungsaufwand eher im Bereich der Realisierung kostengünstiger und leistungsstarker Detektorarrays liegen als bei dem Spektrometerbaustein.

Literatur:

- [1] J. Göttert, W. Menz, J. Mohr, A. Müller, C. Müller
Mikrostrukturierung mit Röntgentiefenlithographie zur Herstellung von mikrooptischen Komponenten
Tegungsband 4. Berliner Optiktage 'Optik 1994',
20.-22. Sept. 94
- [2] W. Bacher, W. Menz, J. Mohr, C. Müller,
W.K. Schomburg: Die LIGA-Technik und ihre
Potential für Mikrosysteme
Naturwissenschaften 81, 536-545 (1994)
- [3] C. Müller, H. Hein, J. Mohr
Mikrospektrometer für spektrale Analyseaufgaben
im sichtbaren und nahen Infrarot-Bereich
Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr.
5238 (1993), 103-108
- [4] C. Müller, J. Mohr.: Miniaturisiertes Spektrometer-
system in LIGA-Technik
Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr.
5609 (1995)
- [5] C. Müller, O. Fromhein, J. Göttert, T. Kühner,
J. Mohr
Microspectrometersystem Based on Integrated
Optic Components in Polymers as Spectral
Detection System for the VIS- and NIR-Range
Proceedings 7th Eur. Conf. on Integrated Optics
(ECIO '95), April 3-6, 1995, Delft (Netherlands),
pp. 491-494

Mikrooptische Funktionsmodule auf der Basis von LIGA-Technik sowie Aufbau- und Verbindungstechnik; Konzepte, Potential und Anwendungen in der Informationstechnik

J. Mohr, J. Göttert, A. Müller, C. Müller

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Mikrooptische Funktionsmodule werden heutzutage in der Regel auf der Basis optischer Wellenleiter und damit integriert optischer Strukturen hergestellt. Durch die Notwendigkeit beim Aufbau komplexer Funktionsmodule verschiedene Materialsysteme einzusetzen, ist einer monolithischen Integration jedoch Grenzen gesetzt. Aus diesem Grunde kommt modularen Konzepten auf der Basis von mikrooptischen Bänken in der Photonik eine große Bedeutung zu. Solche Konzepte lassen sich durch lithographische Verfahren wie z.B. dem LIGA-Verfahren und mit Hilfe der Aufbau- und Verbindungstechnik gut umsetzen. Durch den Einsatz von Prägetechniken sind auch kostengünstige Lösungen möglich. Mit Hilfe des LIGA-Verfahrens werden derzeit verschiedene Funktionsmodule realisiert, aufgebaut und getestet. Dazu gehören z.B. einfache 1xN-Koppler, ein bidirektionales Sende- und Empfangsmodul oder eine optische Bypass-Schaltung. Die Aktivitäten gehen soweit, daß auch aktive Devices (z.B. ungehäuste Laserdioden) über passive Justage in die Module integriert werden. Damit wird ein ganzheitliches Konzept verfolgt, das auch die Integration der Elektronik mit einschließt.

1. Einleitung

Die Tatsache, daß das Bedürfnis an Informationsübertragung immer größer wird, macht es notwendig, Technologien einzusetzen, die eine wesentlich schnellere Datenübertragung erlauben, als es bisher mit der Kupferleitungstechnik möglich war. Aus diesem Grunde werden seit etwa 10 Jahren große Anstrengungen unternommen, um die Datenübertragungsnetze auf optische Übertragungstechnik umstellen zu können. Durch die Möglichkeit der ungestörten parallelen Datenübertragung durch Multiplexverfahren erhöht sich die Datenrate drastisch. Bereits heute werden im Bereich der Langstrecken-Datenübertragung Einmoden-Lichtwellenleiter aus Quarzglas standardmäßig eingesetzt. Darüber hinaus werden erste Glasfaser-Verteilerstrukturen unter dem Schlagwort "fiber to the curb / fiber to the building (FTTC/FTTB)" zumindest bis in die Nähe des Teilnehmers geführt. Beispiele hierfür sind Projekte im Osten Deutschlands, wo 1,2 Mio. Teilnehmeranschlüsse über Glasfaserverteilernetze geschaffen werden (OPAL) und in den USA, wo 4 Mio. derartiger Anschlüsse geplant sind [1]. Auch im Bereich lokaler Netzwerke (LAN; local area network) wird die Glasfasertechnik zunehmend als Übertragungsmedium eingesetzt.

In Bezug auf die Qualität der Fasern wurden in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt. Damit die Technik den vollständigen Durchbruch schafft und ihre Vorteile bis zum Endteilnehmer genutzt werden können ("fiber to the home; FTTH"), ist die Verfügbarkeit sowohl geeigneter Sende- und Empfangseinheiten als auch kostengünstiger, passiver Komponenten

(Verteiler, Koppler, Wellenlängenmultiplexer /-demultiplexer) und Verbindungselemente erforderlich.

In den letzten Jahren werden solche Elemente auf der Basis von wellenleitenden Strukturen in Glas, Lithium-Niobat oder ähnlichen Materialien hergestellt [2]. Probleme ergeben sich dabei allerdings durch die relativ großen intrinsischen Verluste und insbesondere im Bereich der Ankopplung von Fasern an die integriert optischen Chips. Beides zusammen hat relativ große Koppelverluste zur Folge. Darüber hinaus sind aufgrund der Vielfalt der notwendigen Materialsysteme (z.B. Glas für die wellenleitenden Elemente, Halbleiter für aktive Devices) einer monolithischen Integration Grenzen gesetzt. Deshalb kommt modularen Konzepten in der Photonik eine große Bedeutung zu. Dreidimensionale mikrooptische Freistrahlaufbauten haben den Vorteil, daß die spatiale Bandbreite größer ist als im Falle einer zweidimensionalen Lichtführung.

2. Herstellungsverfahren für mikrooptische Freistrahlaufbauten

Beim Aufbau photonischer Funktionselemente haben Verfahren eine große Bedeutung, die eine kostengünstige Herstellung von Aufbauplatten erlauben, in die aktive und passive mikrooptische Komponenten aus verschiedenen Herstellungsprozessen ohne großen Aufwand hybrid eingebaut werden können, so daß sich komplette Funktionsmodule aufbauen lassen. Hierzu eignet sich das LIGA-Verfahren mit der Möglichkeit der Fertigung von Strukturen mit hohem Aspektverhältnis bei gleichzeitig hoher Präzision. Der lateralen

Geometrie der Haltestrukturen sind dabei keine Grenzen gesetzt. Durch die mikrotechnische Fertigung einer präzisen optischen Bank, bei der Halterungen für die hybriden Komponenten mikrometerngenau an der für den Strahlengang erforderlichen Position strukturiert sind, kann der Aufwand der aktiven Justage technisch und ökonomisch reduziert werden. Durch die Kombination verschiedener Mikrostrukturierungstechniken lassen sich gestufte mikrooptische Bänke herstellen [3], so daß auch optische Komponenten mit unterschiedlichem Durchmesser auf einer optischen Achse angeordnet werden können. Parallel zu den Halterungen lassen sich bewegliche mikromechanische Bauteile fertigen, die Schaltfunktionen übernehmen können [4]. Gleichzeitig können auch einfache optische Strukturen wie Prismen oder Zylinderlinsen direkt strukturiert werden [5].

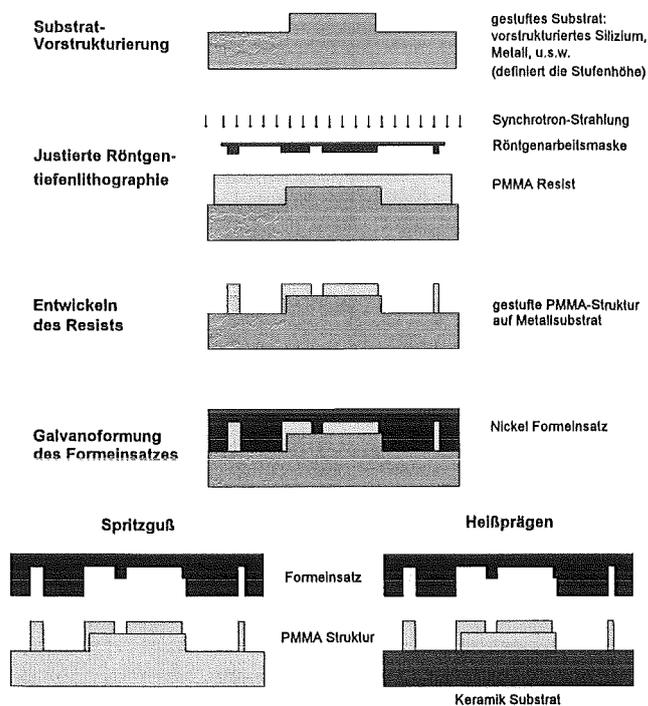


Abb.1: Herstellung einer gestuften mikrooptischen Bank mit dem LIGA-Verfahren zur hybriden Montage von mikrooptischen Komponenten

In Abb. 5 ist die Prozeßabfolge zur Herstellung mikrooptischer Bänke durch das LIGA-Verfahren skizziert. Ausgangspunkt ist ein gestuftes Substrat, auf dem der LIGA-Prozeß mit seinen Schritten Röntgentiefenlithographie und Galvanoformung durchgeführt wird. Das Ergebnis ist ein gestufter Formeinsatz mit dem entweder im Spritzguß Vollpolymerstrukturen oder durch Heißprägen Strukturen auf einer massiven Grundplatte hergestellt werden. Für die Herstellung des gestuften Substrates können je nach Anforderung an die Genauigkeit unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden. Im Falle einer einfachen Stufengeometrie kann das Substrat mit einem Diamanten bearbeitet werden. Bei komplexeren und feineren Strukturen wird die erste Ebene durch Lithographie und Galvanik erzeugt, in beiden Fällen wird die Höhe des Plateaus durch

Polierfräsen und eventuell selektivem Sputter- oder reaktivem Ionenätzen auf den gewünschten Wert eingestellt. Dabei können Genauigkeiten unter einem Mikrometer erzielt werden [6].

Für die Herstellung von mikrooptischen Bänken, die optomechanische Strukturen enthalten, eignet sich die Verwendung von Siliziumwafern, die mit Ätzgruben versehen sind. In diesem Fall wird die Tiefenätzung mit einer Genauigkeit von ca. 1 µm durchgeführt. Bei kleiner Strukturhöhe können auch Trockenätzprozesse zur Strukturierung eingesetzt werden. Abb. 2 zeigt eine derartige Struktur, bei der über Kugellinsen eine Abbildung der Stirnflächen von Monomodefasern durchgeführt wird und wo als Substrat mit Ätzgruben versehene Siliziumwafer eingesetzt werden. Die Dämpfung beträgt in diesem Fall ca. 2 dB bei Verwendung nicht verspiegelter Linsen (Daraus ergibt sich ein Dämpfungsverlust von ca. 1 dB.).

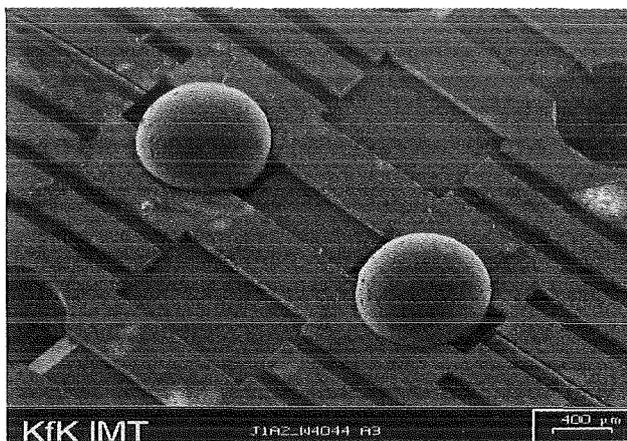


Abb. 2: Mikrooptische Bank mit eingefügten Kugellinsen und Fasern auf der Basis eines geätzten Siliziumsubstrates und mit dem LIGA-Verfahren erzeugter Haltestrukturen

3. Beispiele hybrid aufgebauter mikrooptischer Funktionsmodule

3.1 1 x N- Koppler

Einfache Strukturen, die auf dem beschriebenen Konzept aufbauen sind Koppelstrukturen für Multimode-Fasern. In diesem Fall werden entsprechende Grabenstrukturen mit Anschlagstrukturen durch Abformung erzeugt, die zur Führung und zum Halten der optischen Fasern dienen. Auf diese Weise wurde ein 1 x 2 Koppler hergestellt, wobei die Aufteilung des Lichtes auf zwei Fasern über ein im Kreuzungspunkt der Fasern strukturiertes Prisma erfolgt. Je nach Aufteilungsverhältnis wird ein entsprechend großer Anteil des Lichtes umgelenkt und in einer in dieser Richtung im Führungsgraben positionierten Faser detektiert [7]. Zwischen den Fasern wird das Licht nicht geführt und läuft im Freiraum.

Von der Firma microParts werden für die Herstellung von 1 x 2 und 1 x 4 Koppler für Polymerfasern ebenfalls entsprechende Aufbauplatten mit Grabenstrukturen für

die Fasern durch Abformung erzeugt. Da bei Polymerfasern das Verhältnis Kern- zu Mantelfläche wesentlich größer ist als bei Glasfasern kann das Licht einfach durch im Strahlengang plazierte Keilstrukturen aufgeteilt werden. Die Lichtführung wird durch Vergießen der Grabenstrukturen mit einem lichtleitenden Polymer sichergestellt [8].

In beiden Fällen sind die intrinsischen Dämpfungsverluste mit Werten kleiner 0.5 dB ausreichend klein.

3.2 optische BUS-Platine

Aufgrund der freien Formgebung im lithographischen Schritt können nicht nur einfache Grabenstrukturen sondern auch kompliziertere Lichtführungswege hergestellt werden. Diese können auch als Rippenwellenleiter realisiert sein. Durch die Anwendung eines doppelseitigen Abformprozesses sind auch Überkreuzungen möglich, indem das Licht durch integrierte Prismen mit 45°-Kante von der vorderen in die rückwärtige Ebene der Platte umgelenkt wird [9].

Durch Strukturieren von Halteelementen parallel zu den Lichtleiterbahnen können einfache optische Elemente, wie Strahlteiler- oder Wellenlängenfilterplatten in die Platinen integriert werden. Solche Konzepte sind zusammen mit verschiedenen Industriepartnern in Arbeit.

3.3 Bidirektionales Sende- und Empfangsmodul

Zur Realisierung von optischen Sende- und Empfangsmodulen im bidirektionalen Wellenlängenmultiplexbetrieb (WDM) wurden mikrooptische Aufbauplatten hergestellt.

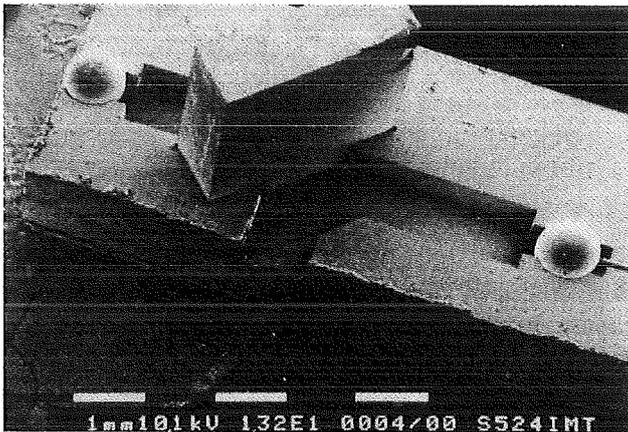


Abb. 3: Durch Abformung hergestellte mikrooptische Bank mit eingefügten Kugellinsen, Wellenlängenfilter und Monomodefaser

Abb. 3 zeigt eine Aufnahme der mit Kugellinsen, Wellenlängenfilter und Glasfaser bestückten mikrooptischen Bank. Dabei wird durch die mit Abformtechnik über ein gestuftes LIGA-Werkzeug hergestellte mikrooptische Aufbauplatte die Position der verschiedenen optischen Komponenten vorgegeben. Die aktiven Komponenten werden erst beim Einbau der optischen Bank in ein Gehäuse relativ zum optischen

Aufbau justiert. Die Laserdiode sitzt links von der optischen Bank. Das abgestrahlte Licht wird über die erste Kugellinse kollimiert, läuft durch das Wellenlängenfilter und wird mit der zweiten Kugellinse auf die Stirnfläche der Monomodefaser abgebildet. Licht, das mit einer anderen Wellenlänge von der Glasfaser abgestrahlt wird, wird mit der Kugellinse kollimiert, am Wellenlängenfilter umgelenkt und der am Gehäuse sitzenden Photodiode zugeführt. Um eine definierte Höhe der optischen Achse zu gewährleisten, liegt die Faser auf einem Plateau, das idealerweise 387.5 μm über dem Höhenniveau des übrigen Substrates liegt. Das Plateau wird durch die Verwendung eines gestuften Formeinsatzes erzeugt. In Tabelle 1 sind die gemessenen Leistungsdaten für die beiden Betriebsmöglichkeiten dargestellt.

Parameter	Meßwerte	Meßwerte
	$\lambda_1 = 1300 \text{ nm}$ $\lambda_2 = 1550 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$ $\lambda_2 = 1300 \text{ nm}$
Einfügedämpfung zw. Laserdiode und Faser	5 dB	9.5 dB
Einfügedämpfung zw. Faser und Photodiode	0.63 dB	0.69 dB
Übersprechdämpfung Laser- / Photodiode	40.2 dB	34 dB
Rückflußdämpfung	16 dB	

Tab.1: Optische Leistungsdaten der mikrooptischen Bank für das bidirektionale Sende- und Empfangsmodul

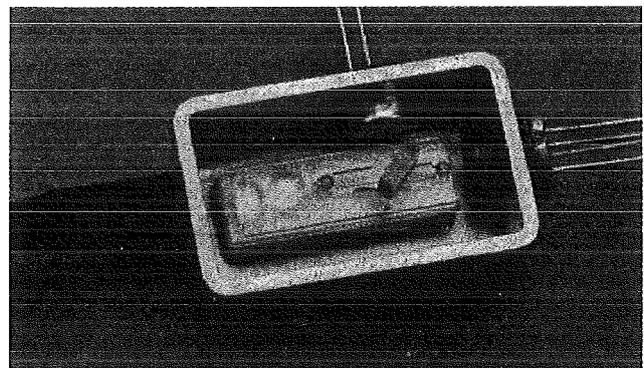


Abb. 4: fertig gehäustes bidirektionales Sende- und Empfangsmodul

Die Leistungsdaten sind zum Teil besser als gefordert. Trotzdem besteht noch ein beträchtliches Potential, um die Einfügedämpfung zwischen Laserdiode und Faser zu verbessern. Dazu ist der optische Aufbau besser an die Strahlteile der Laserdiode anzupassen. Sie war bei Auslegung der Komponente auf 5 μm spezifiziert. Es zeigte sich jedoch, daß sie mit 15 μm deutlich größer ist. Berücksichtigt man dies und werden verspiegelte Linsen eingesetzt, so sind Einfügedämpfungen von nur ca. 3 dB zu erwarten.

Abb. 4 zeigt das fertig gehäuste bidirektionale Sende- und Empfangsmodul. Die mikrooptische Bank ist in das

Gehäuse geklebt, in das nach aktiver Justage Laser- und Photodiode angeschweißt wurden.

3.4 Mikrooptische Bypass-Schaltung

Die mikrooptische Bypass-Schaltung (Abb. 5) ist in einem weiteren Artikel dieses Heftes ausführlich dargestellt [4]. Sie soll hier nur deshalb kurz erwähnt werden, da sie ein Beispiel darstellt, bei dem auch mechanische Elemente (Mikroaktoren) in den Strahlengang integriert sind. Wie aus Abb. 5 zu erkennen, ist in dem Kreuzungspunkt der beiden kollimierten Strahlengänge zwischen den Fasern ein beweglicher Spiegel angeordnet, der dazu dient, die Richtung des von links unten kommenden Strahls umzulenken und somit den Teilnehmerzweig zu überbrücken.

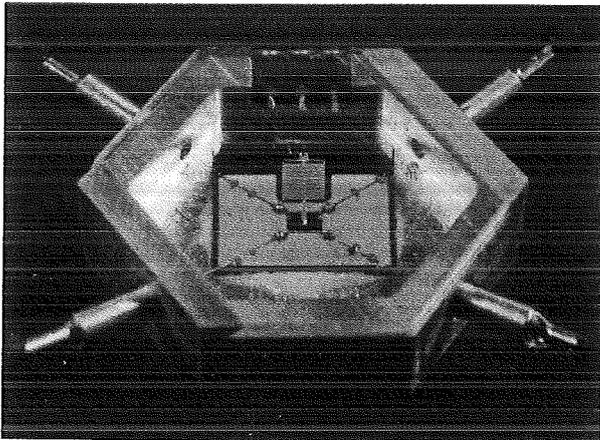


Abb. 5: mikrooptische Bypass-Schaltung mit elektrostatischem Aktor zur Bewegung eines Spiegels

3.5 Mikrooptische Funktionsmodule mit aktiven Devices

Die konsequente Weiterentwicklung des in Kap. 3.4 beschriebenen Konzeptes liegt in der Integration auch ungehäuster Devices in die mikrooptische Aufbauplatte. Dazu werden Konzepte entwickelt, die es erlauben, die aktiven Devices positionsgenau in die mikrooptische Bank zu integrieren. Gleichzeitig besteht die Notwendigkeit geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um die erzeugte Wärme abzuführen. Dies ist um so kritischer wenn man an den Einsatz von Hochleistungs-Halbleiterlasern (für z.B. Erbium dotierte Faserverstärker) oder an die Verwendung von polymeren mikrooptischen Aufbauplatten denkt.

Von verschiedenen Gruppen werden derzeit Untersuchungen durchgeführt, die aktiven Devices mit sogenannten "alignment trenches" herzustellen [9]. Dabei müssen diese Justierhilfen genau zur aktiven Halbleiterlaserfläche positioniert sein. Dies kann durch Photolithographie und Ätzverfahren nach der Herstellung der aktiven Laserfläche mit Genauigkeiten kleiner 1 μm erfolgen. Werden durch das Konzept der Abformung mit gestuften Formwerkzeugen oder durch Montagekonzepte in der optischen Aufbauplatte entsprechende Anschläge relativ zum optischen

Strahlengang erzeugt, läßt sich die passive Montage mit entsprechender Genauigkeit durchführen. Dies wurde am Beispiel eines Moduls zur Laser/Wellenleiterkopplung demonstriert (Abb. 6). In der Abbildung ist deutlich der "alignment trench am Laserchip sowie die Anschlagkante in dem polymeren Aufbau zu erkennen.

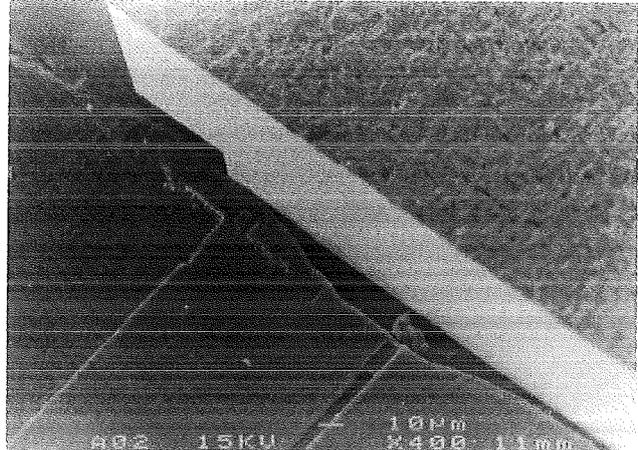


Abb. 6: Laserchip, der auf einer optischen Aufbauplatte über "alignment trench" und Anschlagkante relativ zu einem Wellenleiter passiv justiert ist.

Die Funktionsweise des Moduls wird durch die Abb. 7 verdeutlicht, bei dem eine Aufnahme des Wellenleiters am anderen Ende dargestellt und deutlich die Lichtführung im Wellenleiter zu erkennen ist.

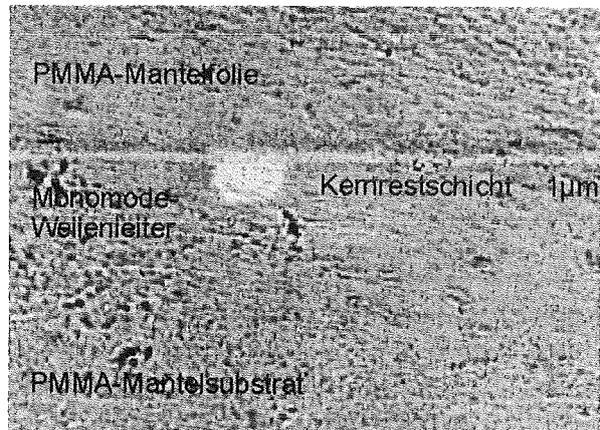


Abb. 7: Ansicht der Stirnfläche des Wellenleiterchips. Die hellen Flächen verdeutlichen die Lichtführung

Das hier am Beispiel einer Wellenleiterstruktur demonstrierte Konzept kann auch für freistrahloptische Aufbauten angewendet werden. Dabei sind zwischen Faser und aktivem Device abbildende Elemente wie Kugellinsen oder mikrotechnisch hergestellte Einzel-linsen oder Linsenarrays [11] zu integrieren.

3.6 Intelligentes Fasersteckmodul

In Abb. 8 ist schematisch der Aufbau eines Fasersteckmoduls dargestellt. Es enthält auf einer SMD-Platine neben elektronischen Komponenten auch optische Funktionsmodule in Form einer optischen

Bank mit hybrid integrierten optischen Komponenten. Die in der optischen Bank integrierten aktiven Devices sind mit einfachen Bondverbindungen mit der Treiber-elektronik verbunden. Neben den dargestellten Drahtverbindungen können auch Verbindungsmethoden wie Flip-Chip-Techniken oder andere angewendet werden. Wie aus der Schemazeichnung zu erkennen, enthält die optische Aufbauplatte auch die Führungsstruktur für den Mikrostecker, so daß die Verbindung nach Außen nicht nur über Fibertails sondern auch über Steckverbindungen möglich ist. Dieses Konzept setzt Stecker mit entsprechender Genauigkeit voraus, die aber bereits auf dem Markt sind [11].

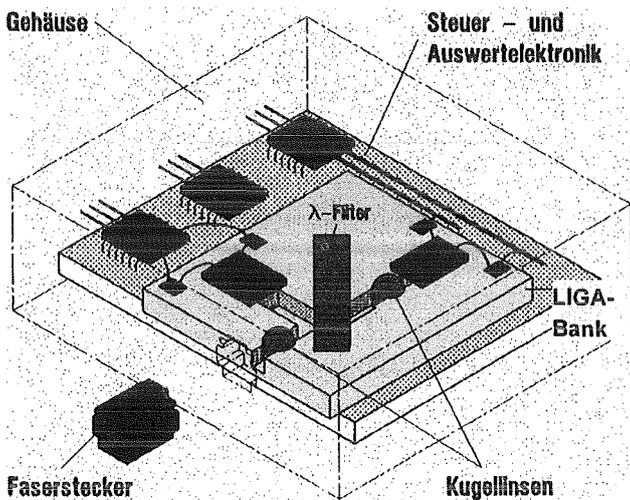


Abb. 8: Konzept für ein intelligentes Fasersteckmodul

4. Diskussion

Die aufgeführten Beispiele mit ihren Leistungsdaten demonstrieren, daß mikrooptische Funktionsmodule auf der Basis von Freistrahloptik eine interessante Alternative für integriert optische Module darstellen. Durch konsequente Anwendung der mikrotechnischen Strukturierungsverfahren, insbesondere solcher, die die Herstellung gestufter Aufbauplatten mit möglichst freier Querschnittsgeometrie erlauben, lassen sich die mikrooptischen Aufbauplatten mit der notwendigen Genauigkeit und auch mit den für eine industrielle Umsetzung notwendigen Kostenstruktur fertigen. Allerdings wird es notwendig sein, zur Montage der Funktionsmodule die Montagetechniken gezielt weiter zu entwickeln [13]. Sofern dies in der nächsten Zeit gelingt, werden diese photonischen Mikrosysteme bald Eingang in den Massenmarkt der Informationstechnik finden.

Danksagung

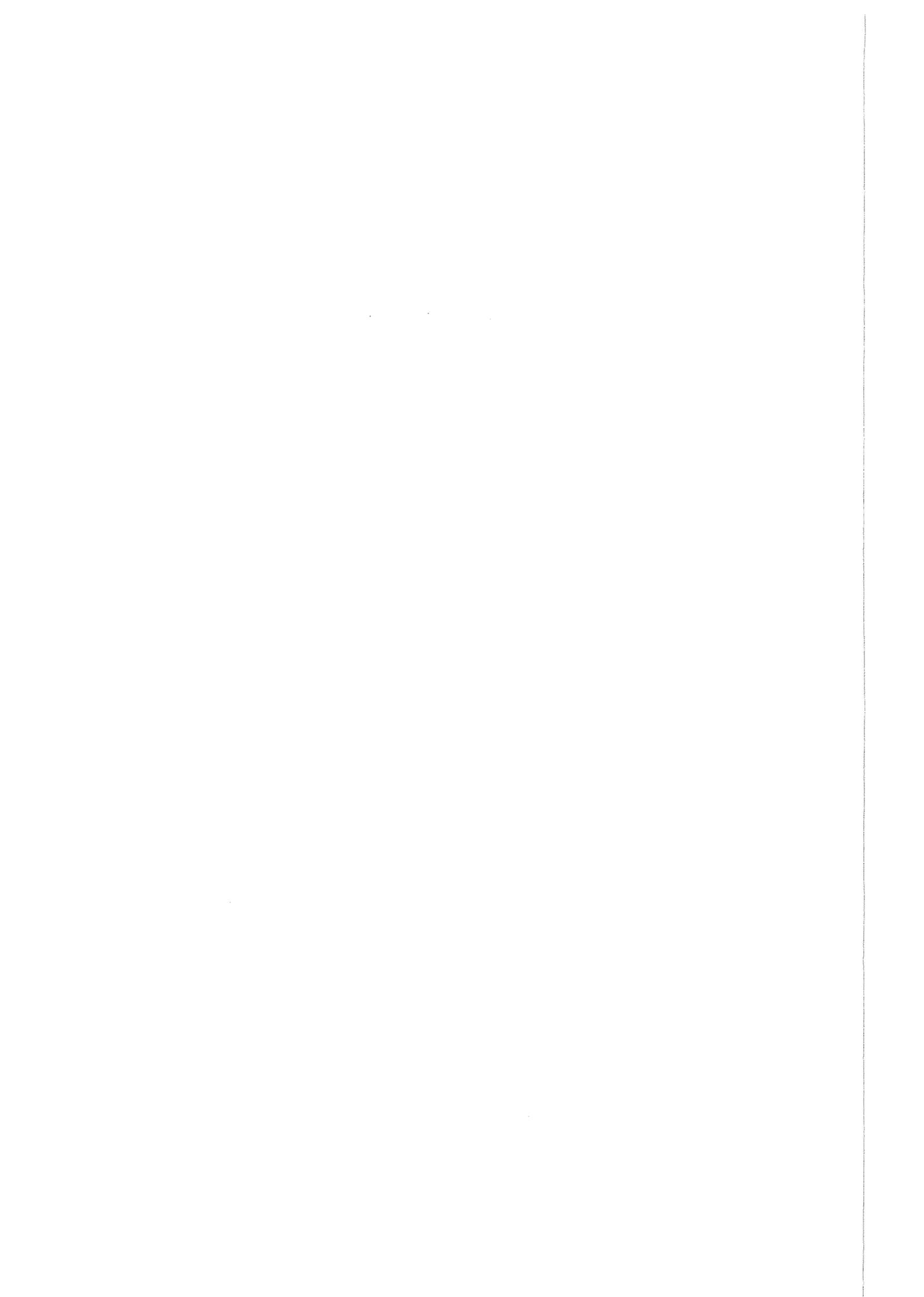
Wir möchten uns bei den Mitarbeitern des Institutes für Mikrostrukturtechnik sowie den Mitarbeitern unserer Projektpartner Alcatel-SEL, Bosch, microParts und Paul-Scherrer-Institut für die erfolgreiche Zusammenarbeit bei der Realisierung der in diesem Artikel dargestellten mikrooptischen Funktionsmodule bedanken.

Literatur:

- [1] S. Alexander, et al.; A Precompetitive Consortium on Wide-Band All-Optical Networks, J. of Lightwave Technology, 11, 5/6 (1993) pp. 714
- [2] S. Kobayashi, F. Kiger, M. Meyers, A. Spector; Prospects for Silica and Glass-Based IO Components, Proc. 7th Eur. Conf on Int. Opt (ECIO '1995) pp. 309
- [3] M. Harmening, W. Bacher, P. Bley, A. El-Kholi, H. Kalb, B. Kowanz, W. Menz, A. Michel, J. Mohr; Molding of Threedimensional Microstructures by the LIGA Process, Proc. Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems MEMS '92, Travemünde, (Feb. 1992) pp. 202-207
- [4] A. Müller, J. Göttert, M. Kohl, J. Mohr; Optomechanische Bypass-Schaltung für die optische Informationstechnik, dieser Tagungsband
- [5] J. Göttert, J. Mohr; Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten der LIGA-Technik in der Mikrooptik, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5153, (1993)
- [6] A. Müller, J. Göttert, M. Kohl, J. Mohr; Abschlußbericht des Verbundvorhabens AVT-KEO "Aufbau- und Verbindungstechnik als Basistechnologie für elektrische und optische Mikrosysteme", Teilvorhaben: "Einsatz des LIGA-Verfahrens zur Herstellung einer mikrooptischen Bank und von Faserkoppelementen, (VDI/VDE, 1995)
- [7] J. Göttert, J. Mohr, C. Müller Coupling Elements for Multimode Fibers by the LIGA Process, in H. Reichl (ed.): Micro System Technologies 92, VDE-Verlag, Berlin, (1992) pp. 297-307
- [8] Produktprospekt der Firma microParts
- [9] J. Mohr, W. Bacher, P. Bley, M. Strohrmann, U. Wallrabe; The LIGA Process- A Tool for the Fabrication of Microstructures Used in Mechatronics, Proc. 1^{er} Congrès Franco-Japonais de Mecatronique, Besancon, Frankreich, (Oct. 1992)
- [10] C. Jones, M. Nield, K. Cooper, R. Waller, J. Rush, P. Fiddymont, J. Collins; An Optical Transceiver on a Silicon Motherboard, Proc. 7th Eur. Conf on Int. Opt (ECIO '1995) pp. 591
- [11] J. Göttert, M. Fischer, A. Müller; LIGA-Mikrolinsen und ihre Anwendung in der Medizin- und Informationstechnik, dieser Tagungsband
- [12] Produktprospekt der Firma Diamond
- [13] U. Gengenbach, F. Engelhardt, J. Göttert, R. Scharnowell; Ein System zur automatisierte Montage optischer Mikrokomponenten, dieser Tagungsband

Poster/Exponate*

* Im Rahmen des 2. Statuskolloquiums fand eine Ausstellung mit 27 Exponaten des Projekts statt. Für die Exponate, die nicht in den Vorträgen behandelt werden konnten, wird hier eine Zusammenfassung gegeben.



Der „Karlsruher Endoskopietrainer“, ein auf „Virtual Reality“ Techniken basierendes MIC-Trainingsystem

U. Kühnapfel¹⁾, Ch. Kuhn¹⁾, B. Neisius²⁾

¹⁾Institut für Angewandte Informatik

²⁾Hauptabteilung Ingenieurtechnik

Zusammenfassung

Basierend auf der im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten Simulationssoftware KISMET [1] wird ein experimentelles „Virtual Reality“ Trainingsystem für die Minimal-Invasive Chirurgie (MIC) des Bauchraums entwickelt. Als prototypischer Anwendungsbereich wurde die Cholezystektomie (Entfernung der Gallenblase) [2] gewählt. Der MIC-Trainer stellt eine selbständige Einheit dar, bestehend aus einer dem Pelvitainer ähnlichen Bedieneinheit, einer Hochleistungs-Grafikworkstation und der KISMET-Software, die daneben auch noch in anderen medizintechnischen Applikationen eingesetzt wird [3],[4],[5]. Ziel dieses Systems ist es, für den lernenden MIC-Chirurgen eine Übungsumgebung bereitzustellen, die ohne echte Organe auskommt, aber dennoch sehr realitätsnah chirurgische Prozeduren zu trainieren gestattet.

Dazu wurde auf der Bedienerseite eine Eingabebox entwickelt, die äußerlich die gewohnten Instrumentengriffe sowie ein virtuelles Endoskop zeigt. Eine Sensordatenerfassung auf PC-Basis mißt die Gelenkwinkelstellungen der Bedieninstrumente und übermittelt diese kontinuierlich an die Grafikworkstation mit KISMET. Daraus wird in Echtzeit eine „virtuelles“ Bild der Endoskopsicht berechnet, optional auch in Stereotechnik mit Shutterbrille.

Ein Schwerpunkt unserer Arbeiten liegt in der Entwicklung von Methoden zur Anatomiemodellierung und in der Implementierung von echtzeitfähigen Algorithmen zur physikalisch basierten Berechnung des elasto-dynamischen Verhaltens des Organgewebes [6]. Verschiedene für die Chirurgie typische Interaktion zwischen Instrumenten und simuliertem Gewebe können bereits demonstriert werden (Klammern bzw. Clippen, Greifen von Gewebe, Durchschneiden von Gefäßen). Die bei der Berechnung der Elastodynamik inhärent berechneten „virtuellen“ Reaktionskräfte zwischen Organen und Instrumenten können über die Eingabegeräte auf den Bediener zurückgeführt werden. Das Subsystem zur Krafrückführung befindet sich bei uns mit einem neuentwickelten Eingabeinstrument in der Erprobung. Zusammen mit einem Kooperationspartner und KISMET-Lizenznehmer wurde die Anbindung eines kommerziell verfügbaren Eingabegeräts mit Krafrückführung (PHANTOM) an KISMET erfolgreich implementiert.

Zukünftige Entwicklungsperspektiven liegen in der Vervollständigung des chirurgischen Interaktionsmodells (Koagulieren, Gewebepreparation, Nähen) und in der Verbesserung des Szenenrealismus (Bluten, Pulsieren von Gefäßen). Mit der zukünftig zu erwartenden Erhöhung der verfügbaren Rechnerleistung wird außerdem eine Verfeinerung der Anatomiemodelle einhergehen.

Literatur

- [1] U. Kühnapfel: Dissertation, Universität Karlsruhe (1991);
Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5052 (1992)
- [2] G.Bueß: „Endoskopie“, Ärzteverlag 1988
- [3] U. Kühnapfel, B. Neisius: „CAD-modellbasierte, graphische Echtzeit-Computersimulation für die endoskopische Chirurgie“, KfK-Nachrichten, Jahrgang 25, Nr. 4 1993, 201-206
- [4] U. Kühnapfel, B. Neisius: „CAD-Based Graphical Computer Simulation in Endoscopic Surgery“, Endoscopic Surgery and Allied Technologies, Georg Thieme Verlag, Vol 1, 1993; 3: 181-184
- [5] U. Voges et. al.: „Experimenteller Telemanipulator für die Minimal Invasive Chirurgie“, dieser Tagungsband
- [6] U. Kühnapfel et.al.: „Endosurgery Simulations with KISMET: A flexible Tool for Surgical Instrument Design, Operation Room Planning and VR Technology based Abdominal Surgery Training“, Proc. Virtual Reality World '95, Stuttgart (1995), Computerwoche Verlag, 165-171

Taktile Optischer Sensor für die Minimal Invasive Chirurgie

H. Fischer, R. Trapp
Hauptabteilung Ingenieurtechnik

Zusammenfassung

In der minimal invasiven Chirurgie geht die feinfühligte Palpation von inneren Organen weitgehend verloren. Das Ziel dieser Arbeit ist die Wiedererlangung der Sensorik für den Chirurgen. Es wurde ein neuer taktile optischer Drucksensor entwickelt, der die Messung von derzeit 64 Meßpunkten auf einer Fläche von 0.64 cm^2 , bei einer digitalen Auflösung von 12 Bit, ermöglicht. Der Sensor wurde im Hinblick auf den Einsatz in einer laparoskopischen Faßzange konzipiert (Abb. 1) und steht zur Zeit als Taststab mit einem Außendurchmesser von 15 mm zur Verfügung. Eine Elektroluminiszenz-Leuchtfolie strahlt durch die Lochmatrix eines Silikonkautschuks auf eine angekoppelte Matrix von Lichtwellenleitern. Wird nun ein Druck auf die Leuchtfolie und den Silikonkautschuk ausgeübt, so verengen sich die Bohrungen im Kautschuk und die in die Lichtwellenleiter eingekoppelte Lichtintensität reduziert sich. Die Verengung der Kanäle ist ein Maß für die applizierte Druckstärke.

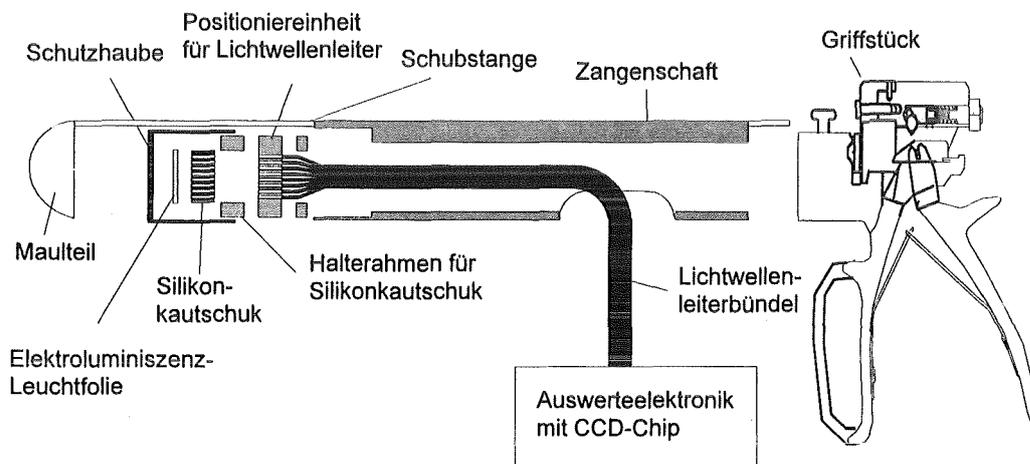


Abb. 1: Gesamtanordnung der Greifzange

Mit diesem optischen Sensor können auftretende Härteverteilungen im Gewebe grafisch sichtbar gemacht werden. Zudem dienen die Meßwerte zur Ansteuerung eines vibrotaktilen Displays, das zur taktile-haptischen Rückkopplung der Druckdaten auf den Finger des Operators dient. Um die Anforderungen an einen analogen Stiftsetzmechanismus für die Darstellung der Signale zu erhalten, wurde ein Aktorarray mit 144 Stiften auf einer Fläche von 4 cm^2 realisiert. Dieser läßt verschiedene Testobjekte in einer 1:1 Darstellung durch erkundende Fingerbewegungen erkennen. Abb. 2 zeigt den Sensor und die Möglichkeiten der Darstellung der Signale.

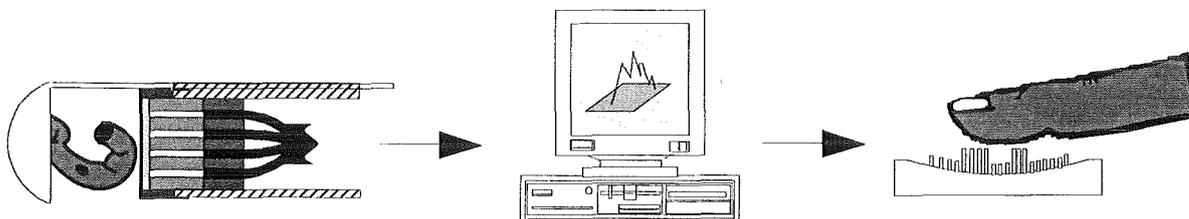


Abb. 2: Taktile Palpation und die Darstellungsmöglichkeit

Literatur

- [1] Schmidt R., Thews G.: Physiologie des Menschen, 26. Auflage Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio, 1995

Hydraulischer Mikroaktor

P. Ruther, K. Feit, W. Bacher

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Im Bereich der Mikroaktorkonzepte können durch Anwendung fluidischer Prinzipien relativ große Kräfte erzeugt werden. Am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) wurde ein hydraulisch betriebener Mikroaktor entwickelt, der mit einer externen Druckversorgung versehen ist. Die mit diesem Aktor übertragbaren Kräfte sind dabei vom Verfahrweg der kraftübertragenden Einheit unabhängig.

Der Mikroaktor hat eine laterale Ausdehnung von $2 \times 2 \text{ mm}^2$, bei einer Strukturhöhe von $200 \mu\text{m}$. Ein beweglicher Kolben mit einer Breite von $450 \mu\text{m}$ dient als kraftübertragende Einheit. Die nach der Herstellung offene Aktorkammer wird mit einer Glasplatte gedeckelt. Diese wird mit einer speziellen Technik [1] auf die Struktur geklebt, wobei die sog. Stopfnut ein Eindringen von Klebstoff in die Aktorkammer verhindert. Die Fluidversorgung des Mikroaktors erfolgt über Schlauchzuführungen, die in Mikrotunnel eingeklebt werden (siehe Abb. 2). Diese Mikrotunnel werden mit Hilfe der sog. Opferstrukturtechnik realisiert [1], wobei vor dem eigentlichen LIGA-Verfahren Glasfasern auf dem Substrat montiert werden. Nach der galvanischen Herstellung der Mikrostruktur werden die Glasfasern selektiv gegenüber der Metallstruktur entfernt.

Die Mikroaktoren wurden zur Charakterisierung mit einem integrierten Kalibriersystem in LIGA-Technik hergestellt (siehe Abb. 1). In diesem System wird ein Mikrobalken zur Kraftdetektion verwendet, der mit Hilfe der Opferschichttechnik realisiert wurde. Bei Versorgungsdrücken im Bereich bis 2 bar liegen die übertragbaren Kräfte bei 20 mN. Der Kolben kann sich in diesem ersten Design um $50 \mu\text{m}$ gegen den Mikrobalken bewegen. Größere Stellwege sind jedoch problemlos zu erreichen. Als Antriebsfluid wird Silikonöl oder Wasser verwendet, wobei letzteres den Einsatz des Aktors in der Medizintechnik ermöglicht. Die Reibung des Kolbens an den Seitenwänden ist durch Fluidschmierung stark reduziert, so daß der Minimaldruck zum Überwinden der Haftreibung unter 0.02 bar liegt.

Der hydraulische Mikroaktor wird in zwei Mikrosystemen eingesetzt, die derzeit am IMT entwickelt werden. Es handelt sich dabei um ein Mikroprüfsystem [1] und ein Schneidwerkzeug auf einem Herzkatheter [2]. Im Prüfsystem wird in einem Biegeexperiment der Elastizitätsmodul von LIGA-Materialien bestimmt. Bei der Anwendung in der Medizintechnik wird der Aktor über einen fluidischen Oszillator mit einem periodischen Drucksignal versorgt. Das Schneidwerkzeug wird über den beweglichen Kolben angetrieben.

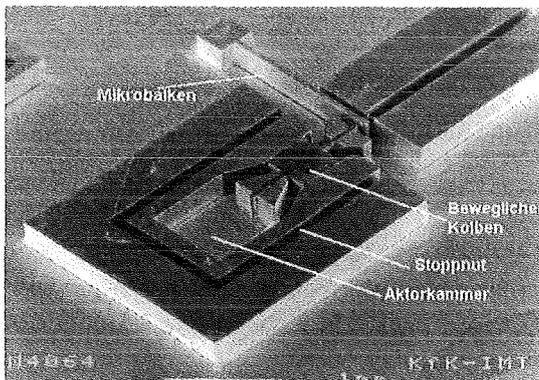


Abb. 1: REM-Aufnahme des hydraulischen Mikroaktors mit integriertem Kalibriersystem.

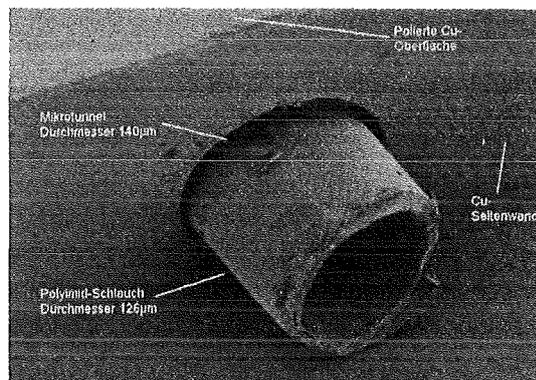


Abb. 2: REM-Aufnahme eines mit Opferstrukturtechnik realisierten Mikrotunnels samt Polyimidschlauch ($\varnothing = 126 \mu\text{m}$).

Literatur

- [1] P. Ruther, et. al.: Microtesting system made by the LIGA process to measure the Young's modulus in cantilever microbeams, akzeptiert für „1995 ASME Int. Mech. Eng. Cong. and Exp.“, San Francisco (1995)
- [2] U. Wallrabe, et. al.: Möglichkeiten der MST zur Herstellung von Mikrokomponenten für einen Herzkatheter im Rahmen von IMICS, dieser Tagungsband.

Bidirektionales Sende-/Empfangsmodul für die optische Datenübertragung

A. Müller¹⁾, J. Hehmann²⁾, A. Rogner³⁾, J. Göttert¹⁾, J. Mohr¹⁾

¹⁾Institut für Mikrostrukturtechnik

²⁾Alcatel-SEL AG

³⁾MicroParts GmbH

Zusammenfassung

Im Rahmen eines BMBF-Projekts wurde zusammen mit Alcatel-SEL und MicroParts ein bidirektionales Sende-/Empfangsmodul für die optische Datenübertragung aufgebaut [1,2]. Ziel war die Herstellung eines kostengünstigen Moduls auf der Basis eines modularen mikrooptischen Konzepts mit marktverfügbaren Komponenten. Zur Umsetzung des Duplexers wurde mit dem LIGA-Verfahren eine mikrooptische Bank aus Polycarbonat hergestellt, in die die abbildenden mikrooptischen Komponenten passiv, d.h. ohne aktive Justage, eingebaut werden. Die gehäuseten aktiven Komponenten (Laserdiode, Photodiode) werden relativ zur mikrooptischen Bank aktiv justiert und durch Laserschweißen in der optimalen Position am Gehäuse fixiert. Der bidirektionale Duplexer ist für

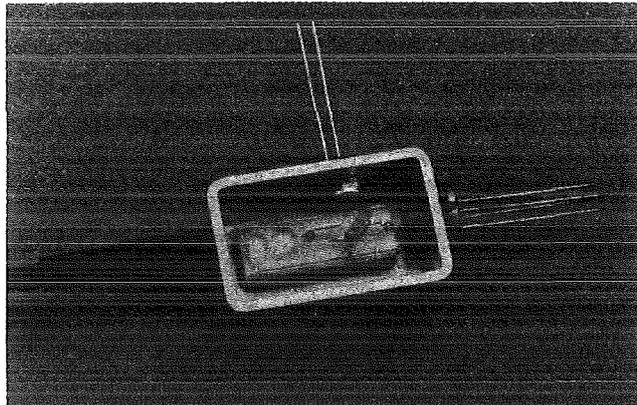


Foto eines montierten Sende-Empfangsmoduls (Alcatel-SEL AG)

Anwendungen im Bereich des Endnutzers mit einer Übertragungsrate von 622 Mbits/s ausgelegt, zur bidirektionalen Signalübertragung werden die Wellenlängen $\lambda_1=1310\text{nm}$ und $\lambda_2=1550\text{nm}$ genutzt.

Die optische Charakterisierung der mikrooptischen Bank zeigt, daß eine moderate Einfügedämpfung von 5.5 dB zwischen Laserdiode und Einmodenfasern und eine hohe Übersprechdämpfung zwischen den Kanälen (40 dB) erreicht wird. Die noch vorhandenen Verluste sind auf das Abstrahlprofil der Laserdioden und Fresnelverluste an den optischen Grenzflächen zurückzuführen. Ein merklicher Einfluß der passiven mikrooptischen Komponenten konnte dabei weder aufgrund ihrer mechanischen Toleranzen noch aufgrund des Bestückungsablaufs nachgewiesen werden. Es verbleiben noch genügend Leistungsreserven für die weiteren Montageschritte.

Das montierte Modul besitzt eine Einfügedämpfung von $< 9\text{ dB}$ und koppelt eine Leistung $> -3\text{ dBm}$ in die Faser. Die Abweichung der mittleren Leistung zwischen -20 °C und 70 °C beträgt $\pm 0.5\text{ dB}$, das Augendiagramm bei 622 Mbit/s ist weit geöffnet, so daß diese Datenrate problemlos übertragen werden kann. Die technischen Eigenschaften dieses Moduls sind damit denen kommerzieller Lösungen vergleichbar.

Die Arbeiten am Bidirektionalen Sende-/Empfangsmodul haben gezeigt, daß mit dem LIGA-Verfahren mechanisch hinreichend stabile und den optischen Anforderungen genügende mikrooptische Bänke nach dem modularen mikrooptischen Konzept hergestellt werden können, und sich damit Alternativen zur integrierten Optik realisieren lassen.

Literatur

- [1] A. Müller et al.: Hybrid Optical Transceiver Module with a Micro Optical LIGA-Bench, Proc. ECOC '95, Brüssel, 17.-21. Sept. '95, S.
- [2] Forschungszentrum Karlsruhe: Abschlußbericht BMBF-Verbundprojekt AVT-KEO, Oktober 1995

Mikromembransensoren

W.K. Schomburg, M. Vitt, M.W. Börner, R. Ahrens

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Im Institut für Mikrostrukturtechnik wird ein Verfahren entwickelt, mit dem Parameter wie Dichte, Temperatur oder Druck in einer Flüssigkeit über Ultraschall gemessen werden können [1]. Während der Messung braucht keine Drahtverbindung zum Meßort zu bestehen und es kann durch die Wand eines hermetisch verschlossenen Behälters hindurch gemessen werden. Diese neuen Möglichkeiten eröffnet eine Anordnung von Mikromembranen, die am Ort der Messung angebracht werden. Diese Anordnung ist insgesamt einige Millimeter bis Zentimeter groß. Die einzelnen Mikromembranen bestehen aus einem wenige Mikrometer dünnen Film, der von einem Netz mit mikroskopisch kleinen Abmessungen gehalten wird (vgl. Abb. 1). Das Netz unterteilt den Film in Mikromembranen mit lateralen Abmessungen von circa 50 bis 100 μm . Einige hundert bis einige tausend solcher Mikromembranen bilden zusammen einen Sensor.

Die Mikromembranen können so ähnlich wie ein Trommelfell in Schwingung versetzt werden. Genauso wie jede Trommel einen für sie typischen Ton abgibt, senden Mikromembranen Schallwellen aus, wenn sie zu Schwingungen angeregt werden. Wegen ihrer geringen Größe liegen die Resonanzfrequenzen von Mikromembranen im Ultraschallbereich. Die Schwingungsfrequenz ist wie bei der Trommel von der Spannung der Membran abhängig. Deshalb kann die Membranspannung bestimmt werden, wenn die Frequenz des ausgesandten Ultraschalls gemessen wird. Die Membranspannung wird je nach Art der Meßaufgabe von der zu messenden Größe abhängig gemacht.

So wurde z.B. eine Membran aus Titan an einem Rahmen aus Aluminium befestigt, um Temperaturen messen zu können. Die thermische Dehnung von Aluminium ist viel größer als die von Titan. Dadurch ändern sich die Membranspannung und die Resonanzfrequenz mit der Temperatur. Wenn der Druck gemessen werden soll, wird der ganze Sensor nach Möglichkeit aus einem Material hergestellt und die Mikromembranen auf einer Seite gekapselt. Auch die Dichte einer Flüssigkeit wirkt sich auf die Resonanzfrequenz aus, denn das umgebende Medium wird von der Membran mitbewegt und trägt so zur schwingenden Masse bei. Hierfür sind Mikromembranen besonders geeignet, die selbst eine geringe Dichte haben.

Berührungslose Messungen mit Mikromembranen an Flüssigkeiten eröffnen zahlreiche neue Einsatzfelder. So ist es z.B. denkbar, daß über Dichtemessungen der Erhaltungszustand einer Suppe in der hermetisch verschlossenen Konservendose gemessen wird oder daß der Heilungsverlauf eines Knochenbruchs von der Hautoberfläche aus überwacht wird. In Zusammenarbeit mit der Firma SONOtec aus Halle soll in den nächsten beiden Jahren ein Sensor für die Dichtemessung entwickelt und auf den Markt gebracht werden.

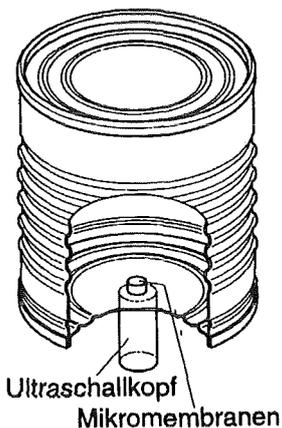


Abb. 2: Dichtemessung in einer Konservendose.

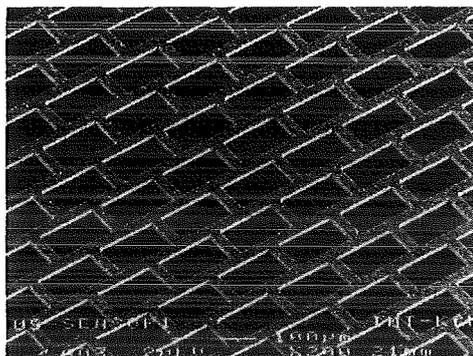


Abb. 1: $40 \cdot 80 \mu\text{m}^2$ große Mikromembranen, die von einem Nickelnetz gehalten werden.

Literatur

- [1] Schomburg, W.K., Vitt, M., Bacher, W., Börner, M.W., Menz, W.: Measurements of Physical Parameters with Ultrasound and Microdiaphragms, Proceedings der Micro Electro Mechanical Systems '95, 29.1.-2.2.95 in Amsterdam (1995) 139 - 144

Integration von mikromechanischen und mikroelektronischen Komponenten mit Hilfe der positionierten Abformung auf vorstrukturierten Substraten

A. Both, W. Bacher, M. Hecke, K.D. Müller

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Am IMT wird das LIGA-Verfahren in Richtung Mikrosystemtechnik, industrielle Nutzung und Qualitätskontrolle weiterentwickelt. Ein aktuelles Forschungsvorhaben dabei ist der Abformprozeß, der eine Schlüsselfunktion für die industriennahe Fertigung darstellt. Zusätzlich bietet der Abformprozeß die Möglichkeit, LIGA-Mikrostrukturen direkt auf Integrierten Schaltkreisen herzustellen, ohne diese zu beschädigen. Um zusätzlich eine funktionale Verknüpfung zwischen Mikroelektronik und Mikromechanik herbeizuführen, müssen die mikromechanischen Elemente auf einer vorbestimmten Position auf den Schaltkreisen erzeugt werden. Die zentrale Anforderung an den Abformvorgang liegt dabei darin, die Mikrostrukturen mit einer Genauigkeit von $\pm 10 \mu\text{m}$ zu den Integrierten Schaltkreisen zu erzeugen, obwohl prozeßbedingt Kräfte von mehreren 10 kN und Temperaturänderungen von bis zu 200°C auftreten.

Zu diesem Zweck wurde ein Verfahren zur positionierten Abformung entwickelt und eine entsprechende Anlage aufgebaut. Diese Anlage zur positionierten Abformung besteht dabei aus zwei Teilen, nämlich der Abformmaschine und der Positioniervorrichtung. Die Abformmaschine wird im wesentlichen durch eine Materialprüfmaschine gebildet, in die die Prozeßkammer zur Abformung integriert wurde. Die Prüfmaschine generiert, mißt und regelt dabei die zur Abformung erforderlichen Kräfte, während in der Prozeßkammer Substrat, Formwerkzeug und Formstoff aufgeheizt bzw. gekühlt werden. Die Positioniervorrichtung verfügt über einen hochgenauen Verstelltisch und zwei Videomikroskope. Mit den Videomikroskopen werden die Justiermarken auf dem Substrat und den abgeformten Strukturen erkannt und mit dem Verstelltisch zueinander zur Deckung gebracht. Die präzise Maßübertragung zwischen Abformmaschine und Positioniervorrichtung wird durch hochpräzise Anschläge gewährleistet. Diese Anschläge sind zusätzlich symmetrisch zur Mitte des Substrats angeordnet, so daß alle Dehnungen aufgrund von Temperaturänderungen von der Mitte des Substrats ausgehen und somit die Positioniergenauigkeit nicht beeinflussen. [1]

Mit der vorgestellten Anlage wurden auf vorstrukturierten Substraten Mikrostrukturen erzeugt. Die wichtigsten Prozeßparameter waren dabei die Umformkraft von 20 kN und die -temperatur von 200°C . In Abbildung 1 ist die bei Versuchen erreichte Positioniergenauigkeit dargestellt und einzeln für x- und y-Richtung aufgetragen. Aus dem Diagramm wird deutlich, daß 90 % der Positionierfehler $8 \mu\text{m}$ oder kleiner sind. Damit erfüllen der entwickelte Prozeß und die vorgestellte Anlage die gestellten Anforderungen bezüglich der Positioniergenauigkeit von $\pm 10 \mu\text{m}$ gut.

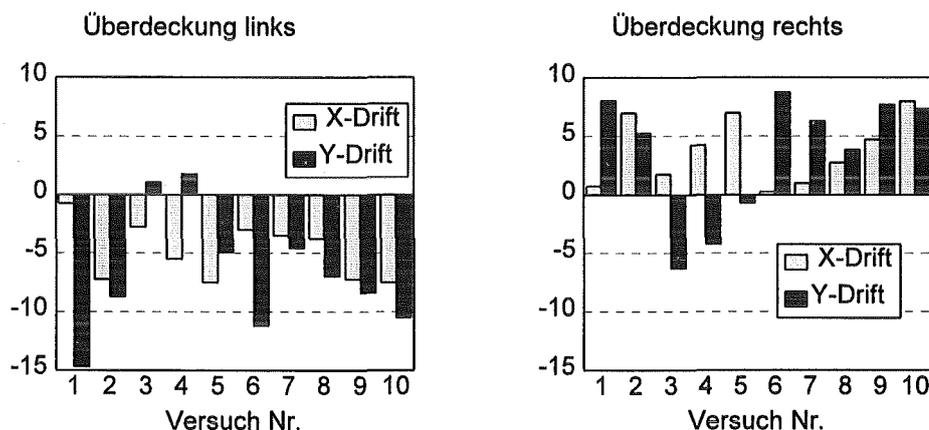


Abb. 1: Erreichte Positioniergenauigkeit über 10 Versuche.

Literatur

- [1] A. Both et al.: Herstellung beweglicher Mikrostrukturen durch positionierte Abformung
Dissertation Universität Karlsruhe 1995, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5671

Mikroaktoren aus Formgedächtnislegierungen

M. Kohl, K.D. Skrobanek
Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Aktoren aus Formgedächtnis-(FG-)legierungen sind elektrisch ansteuerbar und erlauben die Erzeugung hoher Kräfte und großer, beliebig gekrümmter Stellwege. Insbesondere die gleichzeitige Erfüllbarkeit von Aktorfunktionen, Temperatursensor- und strukturellen Funktionen ermöglicht die Realisierung multifunktionaler, "intelligenter" Bauelemente, die sich durch kompakte Formen auszeichnen und dadurch besonders zur Miniaturisierung geeignet sind. FG-Legierungen besitzen daher ein hohes Entwicklungspotential für Mikrosystemanwendungen. Interessante Anwendungen ergeben sich insbesondere in den Bereichen Medizintechnik, Chemische Analytik und Biotechnik bei der Manipulation kleiner Objekte oder geringer Flüssigkeitsmengen. Hier sind zusätzlich die hohe chemische Beständigkeit und Biokompatibilität der FG-Legierungen von besonderer Bedeutung.

Bislang konzentrieren sich die laufenden Arbeiten auf die Entwicklung optimierter aktiver FG-Bauelemente mit Abmessungen im Millimeter- und Mikrometerbereich. Zum Entwurf der Bauelemente werden Modelle auf der Basis finiter Elemente entwickelt. Ein Schwerpunkt bildet hier die Berechnung mechanisch und thermisch optimierter Geometrien zur optimalen Ausnutzung des FG-Effektes. Die Herstellung der FG-Bauelemente erfolgt durch Mikrostrukturierung gewalzter FG-Folien oder gesputterter FG-Filme. Hierzu werden sowohl die Technologien des Laserschneidens als auch die des elektrolytischen Photoätzens weiterentwickelt. Die mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften der hergestellten FG-Bauelemente werden durch eigens entwickelte mikrosystemkompatible Meßverfahren überprüft.

Optimierte FG-Bauelemente sind das Ausgangsprodukt für die Herstellung von Mikroaktoren. Durch hybride Integration konnten beispielsweise erste Prototypen von Mikromembranventilen realisiert werden, siehe Abb.1. Der Durchmesser der Ventilkammer beträgt hier 4 mm. FG-Biegeezungen kontrollieren die Auslenkung einer Polyimidmembran, die durch extern angelegten Druck ausgelenkt wird. Im Druck-Weg-Diagramm in Abb. 2 werden die erzielbaren hohen Kräfte der realisierten Mikroventile deutlich. Beispielsweise kann die Auslenkung der Membran bei externem Druck von 3 bar um 100 μm geschaltet werden. Neben der hybriden Integration einzelner FG-Bauelemente zu Mikroaktoren wird zur Zeit auch die Möglichkeit der monolithischen Herstellung im Batchverfahren untersucht.

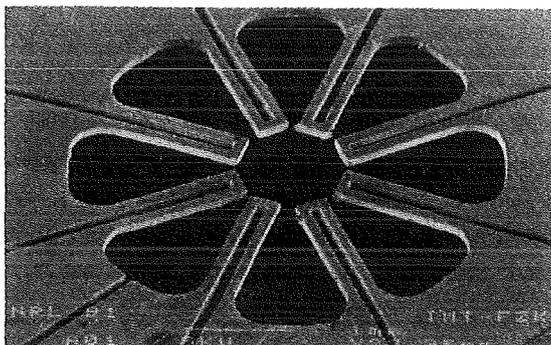


Abb.1 Prototyp eines Mikromembranventils bestehend aus acht Biegeelementen (Länge 1.5 mm, Breite 100 μm , Dicke 160 μm).

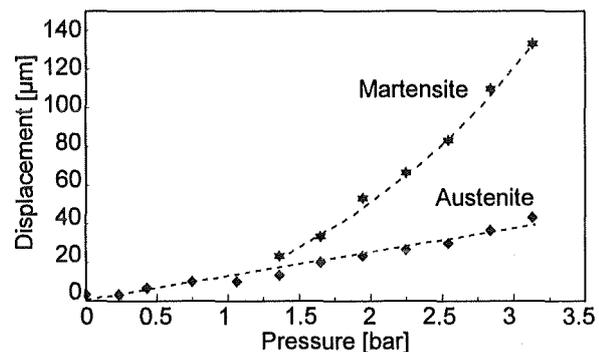


Abb.2 Druck-Weg Kennlinien des Mikroventils im Martensit- ($T=25^\circ\text{C}$) und Austenitzustand ($T>80^\circ\text{C}$).

Literatur

- [1] M. Kohl, E. Quandt, A. Schüßler, R. Trapp and D.M. Allen, **Actuator 94**, Bremen, Germany, H. Borgmann and K. Lenz Eds. (AXON Technologie Consult GmbH, Bremen, 1994) 317-320.
- [2] M. Kohl, K.D. Skrobanek, E. Quandt, P. Schloßmacher, A. Schüßler, and D.M. Allen, wird veröffentlicht in Journal de Physique IV.

Elektromagnetische Linearmikroaktoren nach dem LIGA-Verfahren

B. Rogge, J. Schulz, J. Mohr, A. Thommes, W. Menz

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Durch die Kombination des LIGA-Verfahrens mit Dünnschichttechnik und optischer Lithographie lassen sich in einem 5 Masken-Prozeß [1] magnetische Mikroaktoren herstellen (Abb. 1). Der Prozeß ermöglicht eine vollständig integrierte Herstellung von Mikroschleife, feststehendem weichmagnetischem [2] Spulenkern und einem an Biegefedern aufgehängten Anker. Während die Verbindungen der Spulenwindungen auf dem Substrat durch Dünnschicht- und Ätzprozesse hergestellt werden, erfolgt die Strukturierung der Spulensäulen und des Spulenkerns bzw. der Aktorstruktur durch zwei Röntgentiefenlithographie- und Galvanikschritte. Die Verbindung der Spulen erfolgt durch optische Lithographie und Galvanik.

Mit den bisher hergestellten Aktoren werden Stellwege von 190 µm bei einem Strom von 168 mA und Haltekraften von 17 mN bei 200 mA gemessen (Abb. 2 und 3). Die Resonanzfrequenz liegt bei 100 Hz für Aktoren, die als Stellglieder genutzt werden sollen bzw. 500 Hz für Aktoren, die als Mikrorelais verwendet werden sollen. Daraus ergeben sich Schaltzeiten von 20 ms bzw. 4 ms.

Für zukünftige Anwendungen muß nach zwei unterschiedlichen Gesichtspunkten optimiert werden. Aktoren, die als Stellglieder eingesetzt werden sollen, werden so ausgelegt, daß der Schaltstrom möglichst gering ist. Beim Mikrorelais ist die Kontaktkraft das Optimierungskriterium.

Die bisher hergestellten magnetischen Aktoren stellen erste Prototypen dar. Sie können durch Geometrievariationen weiter verbessert werden. Z. B. bewirkt die Reduzierung der Ankermasse eine Erhöhung der Resonanzfrequenz und damit eine Verringerung der Schaltzeit.

Die Herstellung der Aktoren durch justierte Abformung und optische Lithographie wird zur Zeit erprobt. Der hier erarbeitete Prozeß erlaubt nicht nur die Herstellung von magnetischen Aktoren, er ist auch besonders geeignet für die Herstellung von Mikroschleifen mit einer zum Substrat parallelen Achse.

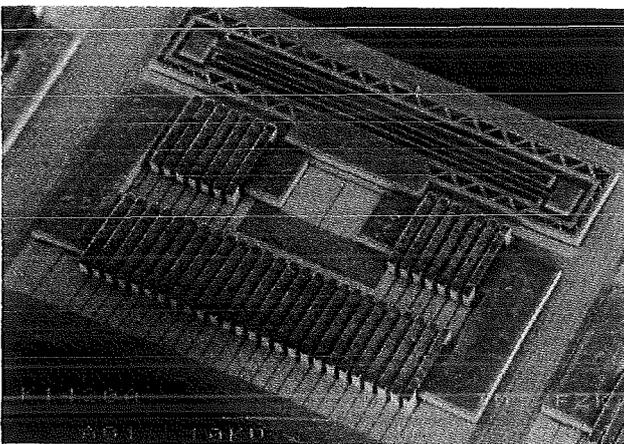


Abb. 1: REM-Aufnahme eines magnetischen Aktors mit Abmessungen 4,5 mm * 3,4 mm und maximalem Stellweg von 190 µm

Abb. 2: Stellweg als Funktion des Stromes

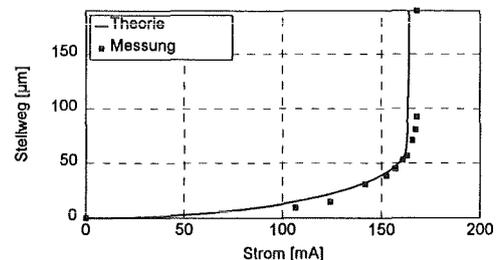
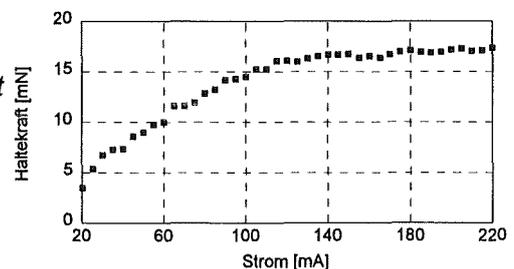


Abb. 3: Haltekraft als Funktion des Stromes



Literatur

- [1] B. Rogge, J. Schulz, J. Mohr, A. Thommes, W. Menz: Fully Batch Fabricated Magnetic Microactuators Using a Two Layer Liga Process; Transducer 1995, Stockholm, June 1995, pp. 320-323
- [2] A. Thommes, W. Bacher, K. Leyendecker, W. Stark, H. Liebscher, Ch. Jakob: LIGA-Microstructures from NiFe Alloy: Preparation by Electroforming and their Magnetic Properties, Proc. Meeting of the American Electrochem. Soc. (New Orleans, USA, 1993), Vol. 94-6, pp. 89-102

Ermittlung von Stoffeigenschaften

Ch. Tsakmakis, N. Huber, A. Ilzhöfer

Institut für Materialforschung II

Mikrozugprüfung

Mit Hilfe eines speziell entwickelten Lastrahmens können Zugexperimente an Mikroproben durchgeführt werden. Bei der Konstruktion dieses Lastrahmens wurde darauf geachtet, daß sowohl die Krafterleitung in die Mikroprobe, als auch die Kraftmessung in einer axialen Konfiguration vorliegen. Eingebaut in eine herkömmliche Prüfmaschine mit Zentralspindeltrieb erlaubt das Lastrahmenkonzept den Einbau bei nicht vollkommen axial fluchtendem Einbaugestänge. Gefertigt aus einer Aluminiumlegierung dient der Lastrahmen vor allem der Aufnahme des größten Anteils der durch die Prüfmaschine aufgebrachten Prüfkraft. Die Prüfeinrichtung besitzt zwei voneinander unabhängige Kraft- und Wegmeßsysteme. Eine Dehnungsmessung wird zur Zeit entwickelt. Untersucht wurden bisher LIGA-Mikroproben aus Nickel, welche am IMT hergestellt werden. Zur Untersuchung des Gefügeeinflusses auf das Verformungsverhalten von galvanisch abgeschiedenen Nickel-Zugproben wurden mehrere Proben bei unterschiedlichen Temperaturen und gleicher Glühdauer getempert. Anschließend wurden die Proben mittels der Mikrozugprüfeinrichtung in einem einachsigen Zugexperiment untersucht. Als wesentlicher Einfluß der sekundären Rekristallisation konnte eine Abnahme der Zugfestigkeit um etwa 70% beobachtet werden.

Literatur

- [1] W. Markowski: Ein neues Prinzip der Werkstoffprüfmaschine, Materialprüfung **32** (1990) 5

Eindruckversuch

Im Hinblick auf die Bestimmung von Materialeigenschaften mikrostrukturierter Werkstoffe wurden Methoden entwickelt, mit deren Hilfe der Elastizitätsmodul aus Eindruckversuchen mit kugelförmigen Prüfkörpern ermittelt werden kann. Basierend auf einer Anzahl von Finite-Elemente Simulationen des Eindring- und Entlastungsverhaltens einer starren Kugel auf einem elastisch-plastischen Material wurde der Einfluß der plastischen Materialeigenschaften auf das Verformungs-Kraft Verhalten während der Entlastung mit Hilfe geeigneter Ansätze beschrieben. So kann der E-Modul direkt aus der Eindringtiefe-Kraft Kurve ohne weitere FE-Simulationen oder einer zusätzlichen optischen Vermessung des Eindruckes bestimmt werden.

Literatur

- [1] N. Huber, D. Munz, Ch. Tsakmakis: Determination of Young's Modulus by Spherical Indentation to be published in J. Mater. Res.

Wirkstoffsensor für Herbizide

David Moss
Institut für Radiochemie

Durch den Einsatz biologischer Makromoleküle als Rezeptorelement in chemischen Sensoren werden Vorteile bei der Selektivität erzielt, die insbesondere bei der Analyse komplexer Proben zur Geltung kommen. Zudem ermöglichen Biosensoren, eine größere Gruppe von Substanzen anhand ihrer gemeinsamen biologischen Wirkung nachzuweisen. Der Nachweis von Herbizidrückständen in Trinkwasser ist ein Musterbeispiel für den sinnvollen Einsatz dieser analytischen Lösung.

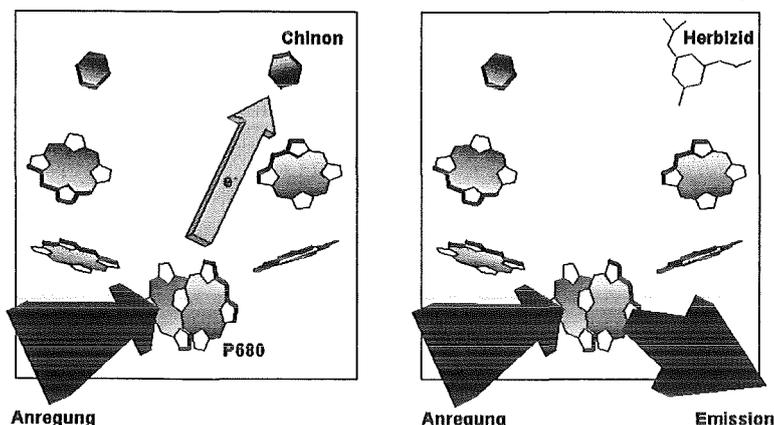


Abb. 1: Die Bindung eines Herbizids am Photosystem II verhindert die Umwandlung der eingestrahlichten Lichtenergie und führt so zu einer erhöhten Lichtemission.

Photosystem II (PS II) ist ein membrangebundener Proteinkomplex, der als Gerüst für die Pigmente (insbesondere Chlorophyll) dient, die bei der Photosynthese beteiligt sind. Die räumliche Anordnung dieser Pigmente ermöglicht eine sehr effiziente Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie, indem das durch Lichtabsorption angeregte Chlorophyllidimer P680 ein Elektron an ein Chinon abgibt (Abb. 1, links). PS II-Herbizide sind Substanzen, die die für das Chinon vorgesehene Bindetasche blockieren. Die einfallende Energie kann nicht mehr photosynthetisch genutzt werden und wird als Fluoreszenz abgestrahlt – bei maximaler Hemmung ist eine Verhundertfachung der Fluoreszenzintensität zu beobachten (Abb. 1, rechts)

Unser Herbizidbiosensor nutzt diese Reaktion zur Detektion sämtlicher PS II-Herbizide als Summenparameter.

Dabei liegt die technische Herausforderung darin, daß beim gesetzlichen Grenzwert von 0,5 ppb (Summe) bzw. 0,1 ppb (Einzelsubstanz) nur ein verschwindend kleiner Hemmungsgrad zu verzeichnen ist. Im zigarrenschachtelgroßen Prototyp (Abb. 2) ist es uns gelungen, die durch 0,1 ppb Diuron hervorgerufene Fluoreszenzerhöhung zu erfassen. Die Fluoreszenz der mit Herbizid belasteten Probe und die einer unbelasteten Referenz werden simultan erfaßt. Ein definierter Ausgangszustand wird vor jeder Messung durch Vorbeleuchtung erreicht. Zur Anregung (LED) wird eine hohe Intensität verwendet, die nach wenigen Sekunden zu einer Reduktion des Chinons führt; dadurch wird eine vollständige Hemmung in beiden Kanälen vorgetäuscht. Der resultierende maximale Fluoreszenzpegel stellt einen Fixpunkt dar, der zur Normierung der beiden Kanäle verwendet wird. Der durch Herbizid entstehende Unterschied in den Fluoreszenzintensitäten erreicht bereits hundert Millisekunden nach Anschalten der LED sein Maximum. Ein entscheidender Beitrag zur Erhöhung der kommerziellen Chancen des Systems ist die Gefriertrocknung der eingesetzten biologischen Materie (photosynthetische Membranen). Hierdurch wird ein pulveriges Produkt erhalten; in dieser Form kann das biologische Material auch bei Zimmertemperatur gelagert werden.

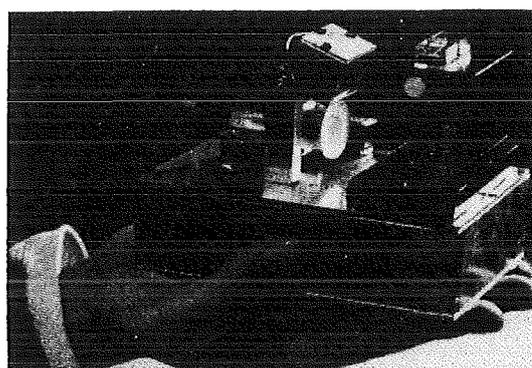


Abb. 2: Im Biosensor-Prototyp können 0,1 ppb Herbizid nachgewiesen werden.

Literatur

- [1] Merz, D.: Miniaturisierte Fluoreszenzmissionsmessung an Thylakoiden zum Nachweis der Hemmung des photosynthetischen Elektronentransportes durch Photosystem II-Herbizide, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5608 (1995)

Miniaturisierter photothermischer Sensor für die Prozeß- und Umweltanalytik

W. Faubel¹⁾, O.Dübel¹⁾, K.H. Cerff²⁾, H.J. Ache¹⁾

¹⁾Institut für Radiochemie

²⁾Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik

Zusammenfassung

1. Das photothermische Prinzip

Das Meßprinzip der photothermischen Verfahren beruht auf der Absorption von Licht durch die zu untersuchende Probe. Die absorbierte Lichtenergie wird durch strahlungslose Übergänge in der Probe in Wärme umgewandelt, welche wiederum eine Brechungsindexänderung zu Folge hat, die durch Überlagerung eines Laserstrahls detektiert werden kann. Diese Brechungsindexänderung läßt sich in den meisten Fällen mit einer Konkavelinse vergleichen. Ein zentrosymmetrischer Detektionslaserstrahl erfährt eine Aufweitung, man spricht daher von einer Thermischen Linse. Die Größe der Aufweitung ist eine Maß für die Konzentration eines Analyten in der entsprechenden Probe.

2. Der Sensor

Der Sensorkopf (Größe 21x25x36 mm) ist in „remote control mode“, einerseits über einen Multimode Lichtleiter mit der Anregungslichtquelle, einem kleinen Dioden gepumpten Nd:YAG Laser oder alternative einer Weißlichtquelle, und andererseits über einem Monomode Lichtleiter mit der Probelaserdiode verbunden [1]. Die Detektionsphotodiode, inklusiv integriertem Vorverstärker, vorgeschaltetem Bandpassfilter und Lochblende, ist direkt in den Sensorkopf eingebaut. Die Größe der Probenkammer (21x5x5 mm) beträgt 130 µl. Die elektronische Signalerfassung und Datenerfassung erfolgt mittels eine Laptop-Computer mit integrierten Steckkarten, so daß auf die bisher eingesetzte elektronische Hardware entfällt. Weiterhin wurden Versuche zur Verwendung der Thermischen Linse als Detektor für kleinste Volumina (nl-Bereich) in Verbindung mit Kapillarelektrophorese so erfolgreich durchgeführt, daß als nächstes der oben beschriebene miniaturisierte Sensorkopf als Detektor für die Kapillarelektrophorese eingesetzt werden soll. Dazu wird z.Zt. die Kapillare der CE als Probenkammer direkt in den Sensorkopf integriert.

3. Anwendungen

Die photothermischen Verfahren wurden bereits an verschiedensten Stoffzusammensetzungen erprobt. Zu den entsprechenden Substanzen gehören Schwermetalle, Pestizide, Polychlorierte Biphenyle (PCB's) und Textilfarbstoffe. Am Beispiel des Pestizides 2-Methyl-4,6-Dinitrophenol (DNOC) konnte die Leistungsstärke der photothermischen Verfahren zur Ultraspurenanalyse (Nachweisgrenze 100 ppt (100 ng/l) demonstriert werden [2]. Wegen der kleinen Strahldurchmesser im 10-100 µm Bereich beträgt das eigentliche Meßvolumen nur wenige nl. Durch diese extrem kleinen Meßvolumina sind die photothermischen Methoden für die Anwendung als Detektor für die Hochleistungsflüssigkeitsspektroskopie (HPLC) oder der Kapillarelektrophore (CE) mit Kapillardurchmessern zwischen 50 µm und 150 µm geradezu prädestiniert. Diesem Vorteil stehen zur Zeit noch hohe Beschaffungskosten für den Anregungslaser und geringe Selektivität gegenüber. Als Alternative ersetzt daher eine Weißlichtquelle den Anregungslaser. Dies hat neben einer Kostensenkung auch noch den Vorteil, daß die spektrale Selektivität erheblich vergrößert. Der Nachteil liegt derzeit noch in der Nachweisempfindlichkeit, die mit der Weißlichtquelle um den Faktor 100 höher liegt als bei einem Laser als Anregungsquelle zur Indizierung der Thermischen Linse [3].

Literatur

- [1] Dübel, O., Cerff, K.H., Faubel, W. und Ache, H.J.: Photothermischer Sensor für die Prozeßanalytik, VDI Technisches Messen 11, 1995 im Druck
- [2] Faubel, W. Schulz, T., Seidel, B.S., Steinle, E. und Ache, H.J.: Comparing the analytical potential of PAS, TL and PTPS for trace detection of pesticides in water, J. Phys. IV, C-7-351, 1994
- [3] Dübel, O., Seidel, B.S., Faubel, W. und Ache, H.J.: Untersuchungen der photothermischen Ablenkungs= spektroskopie und der thermischen Linse mit einer Weißlichtquelle und drei Textilfarbstoffen, Anakon 95, Apr., 24-26, Schliersee, 1995

Anwendungen der Mechanischen Mikrotechnik

W. Bier¹⁾, G. Linder²⁾, Th. Schaller²⁾, K. Schubert²⁾

¹⁾Institut für Mikrostrukturtechnik

²⁾Hauptabteilung Versuchstechnik

Zusammenfassung

Mit Methoden der Mechanischen Mikrotechnik wurden Mikrowärmeübertrager, chemische Mikroreaktoren und Mikrovermischer gefertigt [1]. Sie bauen sich aus gestapelten, mit Mikrokanälen versehenen Folienstücken aus Edelstahl, Kupfer oder Silber auf, die durch Diffusionsschweißen zu einem Grundkörper verbunden werden. Durch Einbau des Grundkörpers in einen mit Anschlüssen versehenen Adapter wird die Integration in technische Anlagen ermöglicht. Die Mikrowärmeübertrager und Mikroreaktoren besitzen hohe spezifische Übertragungs- bzw. Reaktionsleistungen und werden im Kleinserienmaßstab in der Automobil- und chemischen Industrie eingesetzt.

Weitere Anwendungen der Mechanischen Mikrotechnik sind mikrostrukturierte Werkzeuge für die Kunststoffabformung. Die Abformwerkzeuge sind mehrteilig und mehrstufig aufgebaut und enthalten komplexe dreidimensionale Strukturen [2]. Beispiele sind Komponenten zur Fluidführung für das Elektrochemische Mikroanalysesystem (ELMAS) sowie Komponenten für Mikropumpen und Mikroventile. Außerdem wurden Abformwerkzeuge für Glasfaser-Y-Koppler und Zellkultursysteme [3] realisiert.

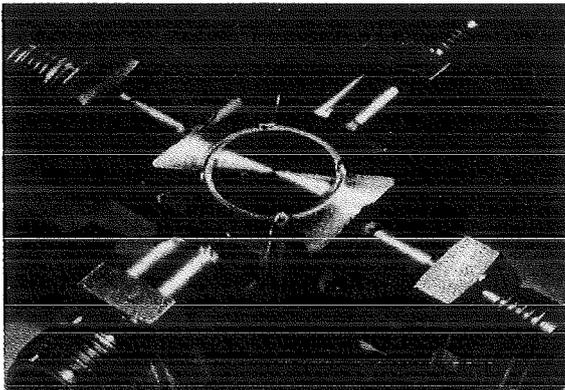


Abb. 1.: Mikrowärmeübertrager aus Edelstahl

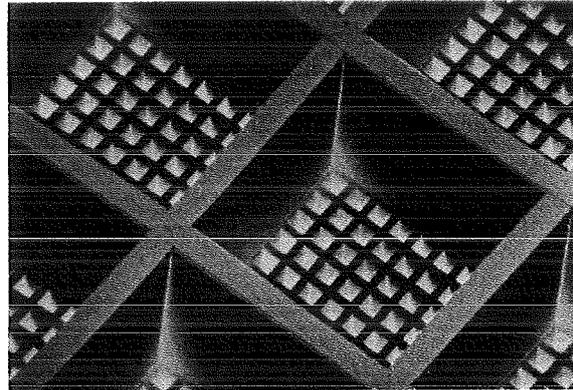


Abb. 2: Abgeformtes Zellkultursystem

Literatur

- [1] G. Linder, W. Bier, Th. Schaller, K. Schubert: Mikrowärmeübertrager und Mikroreaktoren, Symposium Mikrotechnik,ACHEMA, 1994
- [2] Th. Schaller, W. Bier, G. Linder, K. Schubert: Mechanische Mikrostrukturierung metallischer Oberflächen, F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik Messtechnik **102**, 5-6, 1994
- [3] K.F. Weibezahn, G. Knedlitschek, W. Bier, Th. Schaller: Mechanically Processed Microstructures Used to Establish an *In Vitro* Tissue Model, Micro System Technologies '94, 1994

Zerstörungsfreie photoakustische Materialprüfung in der Mikrotechnik

Magnus Rohde

Institut für Materialforschung 1

Zusammenfassung

Das Grundprinzip der Photoakustischen Methode beruht auf der periodischen Bestrahlung einer Probenoberfläche mit intensitätsmoduliertem Licht und der Auswertung der Wärmesignale, die durch Absorption der Strahlung hervorgerufen werden. Da die Probe eingebaut ist in ein abgeschlossenes Gasvolumen, induzieren die Wärmesignale Druckschwankungen im Gas, die mit einem empfindlichen Mikrofon detektiert werden können. Die periodischen Wärmesignale breiten sich wellenförmig aus und dringen in die Probe ein. Die Eindringtiefe der Wärmewellen oder auch thermischen Wellen wird bestimmt durch die thermischen Eigenschaften der Probe und die Frequenz der periodischen Bestrahlung. Bei kleinen Frequenzen haben die Wellen eine relativ große Reichweite, die mit steigenden Frequenzwerten immer mehr abnimmt. Durch Veränderung der Anregungsfrequenz lassen sich somit Tiefenprofile thermischer Eigenschaften zerstörungsfrei ermitteln. Damit ergibt sich die Möglichkeit unter die Oberfläche einer Probe zu „sehen“ und so Fehler, die mittels optischer Inspektionstechniken nicht erkennbar sind, zu entdecken. Zusätzlich erlaubt die Fokussierung der eingestrahltten Lichtes Untersuchungen mit einer Ortsauflösung bis unter 10 µm, da nur der beheizte Bereich zum Wärmesignal beiträgt. Wird der fokussierte Lichtstrahl rasterförmig über die Probenoberfläche geführt, entsteht eine thermische Abbildung der Probe.

Anwendungsgebiet dieser Meßtechnik ist die zerstörungsfreie Materialprüfung an dünnen Schichten oder Folien, Mehrlagensystemen und Strukturen der Mikrosystemtechnik. Neben der quantitativen Bestimmung thermischer Eigenschaften [1,2] lassen sich auch Schichtfehler wie Risse, Poren oder Ablösungen der Schicht vom Substrat und Unterschiede in der Haftfestigkeit erkennen. Anhand ausgewählter Beispiele wurden die Einsatzmöglichkeiten in der zerstörungsfreien Prüftechnik für die Mikrosystemtechnik erfolgreich demonstriert.

Literatur

- [1] M. Rohde, Werkstoffprüfung 1992, S. 271
- [2] M. Rohde, Thin Solid Films 238 (1994) 199

Informationsumgebung zum Entwurf von LIGA-Mikrostrukturen

H. Eggert, H. Guth, K.P. Scherer, P. Stiller, U. Stucky

Institut für Angewandte Informatik

Zusammenfassung

Nach der Konstruktion (Design) von Mikrostrukturen mit einem CAD-System für den Mechanikentwurf stehen alle erzeugten Geometrien im IGES-Format [1] zur Verfügung. Mit Hilfe eines speziell entwickelten Prozessors werden die Informationen in ein objektorientiertes Geometriemodell [2] transferiert. Nach Spezifikation der Vervielfachung wird einerseits im Geometriemodell ein Array generiert, welches für den Elektronenstrahlschreiber als Input dient. Weiterhin wird durch die Auswahl von verschiedenen Meßaufträgen bzgl. der designeten Struktur mithilfe einer Visualisierungskomponente die gesamte (Array-) Struktur inklusive ihrer Fehlerstellen dargestellt, wobei die einzelnen Fehlerklassen über die farbliche und graphische Repräsentation sofort zu erkennen sind.

Das Visualisierungstool wird auch in Verbindung mit einem Design Rule Checker für den Mechanikentwurf benutzt. Dieser überprüft den Entwurf der Struktur auf Einhaltung bestimmter Regeln. Zur Zeit werden folgende zwei Regeln vollautomatisch überprüft:

1. Es müssen alle Strukturen in ihrer 2D-Geometrie durch geschlossene Kanten eindeutig repräsentiert werden. Insbesondere sind keine Lücken zwischen einzelnen Kantenstücken zugelassen.
2. Es dürfen keine Linien mehrfach auftreten.

Ergebnisse dieser Regelüberprüfung werden dem Nutzer auch durch das Tool visualisiert. Weiterhin werden alle Meßergebnisse der bildanalytischen Strukturkontrolle sichtbar gemacht.

Literatur

- [1] Reed (ed), Initial Graphic Exchange Specification (IGES)", Version 5.1, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD 1991.
- [2] K.-P. Scherer, I. Brauch, H. Eggert, P. Stiller: Object Oriented Modelling of Different Knowledge Domains inside the LIGA-Process; System, Man and Cybernetics Conference (SMC), IEEE, Le Touquet/France, Oktober 1993, Vol. 4, S. 429-434

Passive Ankopplung aktiver optischer Devices an monomodige Polymerwellenleiter

M. Marth¹⁾, J. Göttert¹⁾, J. Mohr¹⁾, J. Söchtig²⁾

¹⁾Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe

²⁾Paul-Scherrer Institut, Zürich

Zusammenfassung

Der Einsatz optischer Technologien zur Übertragung großer Datenmengen z.B. in Telekommunikationsanlagen oder auch der Sensorik erfordert die Fertigung leistungsfähiger optischer Funktionsmodule mit aktiven Sendee- und Empfangskomponenten, die mit möglichst geringem Justieraufwand an Monomodefaseran angedockt werden können. Darüber hinaus ist eine kostengünstige Produktion in großen Stückzahlen für diesen sich abzeichnende Massenmarkt erforderlich.

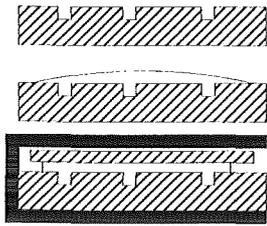


Abb. 1: Herstellung von Monomode-wellenleitern

Prägen bzw. Spritzgießen von Wellenleiterstrukturen in PMMA
Befüllen mit einem Gemisch aus Kernmonomer und UV-Initiator
Auflegen eines Deckels und Härten unter Druck mit UV-Licht und Temperatur

Beispielsweise werden durch die parallele Strukturierung von optischen Komponenten wie z.B. 1 x N-Verzweigern und Faserführungsstrukturen durch Mikroabformtechnik in Polymeren Funktionsmodule mit gleichbleibender Qualität produziert, bei denen während der Fertigung die Monomodefaseran passiv an die optische Komponente angedockt werden. In Abb. 1 sind die wesentlichen Fertigungsschritte zur Herstellung solcher Module skizziert. Die Ankopplung der Fasern erfolgt im 2. Schritt vor der Befüllung der geprägten Wellenleiterstruktur [1].

Ziel dieser Arbeit sind grundlegende Untersuchungen zur Integration von aktiven Sendee-/Empfangskomponenten mit Fasern und polymeren optischen Wellenleitern zum Aufbau von komplexen Monomodewellenleitersystemen wie z.B. einem Transceiver-Modul. Durch die parallele Strukturierung von Faserschichten und Anschlagkanten auf einem mehrstufigen Substrat lassen sich alle für den Aufbau des Gesamtsystems benötigten Komponenten passiv, d.h. ohne Leistungsmessung während der Montage, zueinander justiert aufbauen.

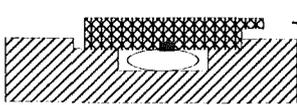


Abb. 2: Konzept für die passive Justierung von Laserdioden auf abgeformten Polymersubstraten

Laserdiode mit genauer Lage der aktiven Zone zur lithographisch strukturierten Anschlagkante
Polymersubstrat mit Graben zur Aufnahme des leitfähigen Epoxyklebers, Anschlagkante für die Laserdiode und dazu positionierten Wellenleiter

In Abb. 2 ist die Positionierung und Kontaktierung einer Laserdiode mit einer integrierten Anschlagkante erläutert [2]. Unterhalb der Laserdiode wird ein weiterer, tiefer Graben geprägt, in den ein elektrisch leitfähiger Epoxykleber eingebracht wird, dessen

Zusatz-Widerstand die elektrischen Eigenschaften der Laserdiode nur unwesentlich beeinträchtigt. Die Laserdiode wird bei der Montage zunächst gegen den mechanischen Anschlag positioniert, der die laterale Lage von aktiver Zone und polymeren Grabenwellenleiter mit lithographischer Genauigkeit festlegt, dann in den Kleber gedrückt und fixiert. Die vertikale Positionierung wird durch die Lage der aktiven Laserzone und der Höhe des Auflageplateaus auf ca. 1 µm genau festgelegt. Theoretische Abschätzungen haben gezeigt, daß die Justagetoleranzen für die verwendeten Laserdioden (Divergenzwinkel $\approx 30^\circ$) unkritisch sind und für die derzeit bei der Montage erreichbare Positioniergenauigkeit von 5 µm einen zusätzlichen Koppelverlust von $< 10\%$ zur Folge hat. Für den Aufbau des Gesamtsystems werden die Monomodefaseran am anderen Ende des Wellenleitergrabens fixiert und der Graben mit dem polymeren Kernmaterial ausgefüllt. Es hat sich gezeigt, daß die dabei verursachte Benetzung der Laserfacette mit dem Kernmonomeren im wesentlichen den Schwellstrom der Laserdiode beeinflusst, was jedoch für die geplante Anwendung toleriert werden kann.

Literatur

- [1] A. Neyer, et. al.: „New Fabrication Technology for Polymer Optical Waveguides“, IPR 92, New Orleans, Louisiana, paper WB2-1, 1992.
- [2] B. D. Patterson, J. E. Eppler, B. Graf, H.W. Lehmann and H. C. Sigg: „A Superluminescent Diode at 1.3 µm with Very Low Spectral Modulation,“ IEEE J. Quantum Electron., vol. 30, pp.703-711, 1994.

Abformen von Kunststoffmikrostrukturen

T. Hanemann, K. Müller, P. Norajitra

Institut für Materialforschung III

Zusammenfassung

Beim Abformen von Kunststoffmikrostrukturen wird die Wirtschaftlichkeit entscheidend durch die Zykluszeit getragen, welche beim Spritzgießen durch den thermischen Zyklus des Spritzgießprozesses bestimmt wird. Durch Optimierung der Spritzgießmaschine, des Spritzgießwerkzeuges und der Abformparameter konnte gegenüber dem Stand Oktober 1994 die Zykluszeit um mehr als 50% reduziert werden. Beispiele für getroffene Maßnahmen sind anhand zweier Simulationsarbeiten aufgeführt.

Im Rahmen eines Industrieauftrages (Fa. microParts) wurde eine Studie zu einem Spritzgießwerkzeug durchgeführt. Ziel war, mögliche Verbesserungen hinsichtlich gleichmäßiger Temperierung in 8 Formnestern, Werkzeugmaterialien und insbesondere der Zykluszeit für die Kunststoffe PMMA und PSU aufzuzeigen. Die Simulationsberechnungen wurden mit Hilfe der FEM-Programme GRAFEM und ABAQUS durchgeführt. Durch zahlreiche Parametervariationen konnte z. B. gezeigt werden, daß die wirksamste Reduzierung der Zykluszeit durch Erhöhung des Temperieröldurchsatzes zu erreichen ist.

Im Rahmen des ESPRIT-Projektes IMICS (Integration of Microcomponents in an Interventional Cardiac Catheter System) sollen Mikro-Turbinengehäuse aus PMMA spritzgegossen werden. Dieses Turbinengehäuse ist Teil des Herzkathetersystems IMICS mit den Außenabmessungen 2.5 mm x 2.5 mm. Es besteht aus mehreren Kammern mit kleinsten Wanddicken von 0.115 mm und ist stirnseitig mit mehreren Bohrungen von 0.23 mm für Durchflußleitungen versehen. Anhand von computersimulierten Füllstudien mit dem Programmpaket MOLDFLOW konnte gezeigt werden, daß sich durch Änderungen an Anguß- und Verteilersystem der Formeinsätze die Zykluszeiten für die Gehäuseabformung verkürzen ließen. Füllstudien zum Spritzgießen von gleichzeitig 8 bzw. 16 Turbinengehäusen haben gezeigt, daß das Anguß- und Verteilersystem bereits nach einer Sekunde gefüllt ist und die vollständige Formfüllung des Turbinengehäuses nach weiteren 50 Millisekunden erreicht ist. Die Ergebnisse der Simulation flossen in das Design der Formeinsätze für die Turbinengehäuse mit ein, die in Kürze fertiggestellt werden.

Zur Verkürzung der Zykluszeit wird zusätzlich ein neues Abformverfahren für Mikrostrukturen entwickelt. Geeignete Kunststoffprecursoren, z. B. Methacrylatmonomere oder Ormocere, lassen sich durch UV-Strahlung polymerisieren. Die Formfüllung erfolgt durch kalte Reaktionsmasse in einen kalten Formeinsatz. Es entfällt die lange Heizzeit, daher sollte eine weitere drastische Reduzierung der Zykluszeit möglich sein. Um die Verwendbarkeit der Photopolymerisation für die Abformung von Mikrostrukturen zu überprüfen, wurde ein Versuchsstand mit spritzgießtypischen Elementen wie Halte- bzw. Nachdruck beim Einspritzen, Werkzeugkühlung, Verwendung von Formeinsätzen, Einbau von Auswerferstiften usw., konstruiert. Zusätzlich wurden ein leistungsstarker UV-Strahler (1 kW) integriert sowie eine Werkzeughälfte aus Spezialglas konzipiert. Die Versuchsanlage befindet sich z. Z. im Aufbau, eine Optimierung aller Versuchsparameter, z. B. Precursorzusammensetzung, Photoinitiator, sowie Belichtungsstärke und -dauer soll mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung effizient durchgeführt werden. Vorversuche zur Photopolymerisation werden bereits durchgeführt.

Literatur

- [1] Haußelt J. : Werkstoffe und Werkstoffprozesse für die Mikrosystemtechnik, dieser Tagungsband
- [2] Wallrabe U. et al.: Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik zur Herstellung von Mikrokomponenten für einen Herzkatheter, dieser Tagungsband

Miniaturisierungsschritte in der Mikroelektronik

S. Wüstling, O. Fromhein, H. Gemmeke, O. Krömer

Hauptabteilung für Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (HPE)

Zusammenfassung

Die Kombination von LIGA- und Silizium-Beschleunigungssensoren erlaubt den planaren Aufbau eines 3D-Beschleunigungsmeßsystems auf einem Substrat. Dies vereinfacht die Fertigung sowie die rechtwinklige Ausrichtung der Sensorelemente und ergibt kompakte Abmessungen. Die HPE hat solche Meßsysteme in drei Varianten realisiert:

1) Ein Aufbau in SMD-Technik (surface mounted devices) stellt eine kostengünstige Lösung für kleine und mittlere Stückzahlen dar. Die Platine mißt 52 x 52 mm², die Verlustleistung der Schaltung beträgt 1,5 W. SMD-Platinen können automatisch bestückt werden, die Bauelemente sind standardmäßig erhältlich. Test, Abgleich und Reparatur erfordern keine teuren Spezialgeräte. An Reinraumarbeiten fällt nur das Bonden der mikromechanischen Sensoren an. Nachteilig sind die relativ großen Abmessungen der Schaltung und der verhältnismäßig hohe Leistungsverbrauch.

2) Die selbe Schaltung läßt sich auch als Multilayer-Dickfilmschaltung aufbauen [1], wenn man die ungehäusten Ausführungen (Dice) der aktiven Bauelemente und bei den passiven Bauelementen spezielle Dickfilmausführungen einsetzt. Dadurch verringert sich die Baugröße für den 3D-Beschleunigungssensor auf 25 x 35 mm². Die Fertigung ist allerdings teurer, da sie unter Reinraumbedingungen mit kostspieligen Werkzeugen erfolgen muß. Auch Test, Abgleich und Reparatur sind aufgrund der kleinen Abmessungen und der Verbindungstechnik (Bonden, Kleben) aufwendig. Da sich an der Schaltungstechnik gegenüber SMD nichts geändert hat, wird keine Verringerung des Leistungsverbrauches erzielt.

3) Geringstmögliche Abmessungen und minimaler Leistungsverbrauch sind erreichbar, wenn man die Ausleseschaltung für die Beschleunigungssensorelemente als Anwendungsspezifische Integrierte Schaltung (ASIC) realisiert. Die reduzierte Anzahl der Bauelemente des Sensorkopfes ergibt einen geringeren Fertigungsaufwand und höhere Zuverlässigkeit. Durch die Anforderungen der monolithischen Integration mußte ein anderes Schaltungskonzept gewählt werden, es wurde allerdings auch eine außergewöhnliche Schaltungstechnik möglich, die mit Standardbauelementen nicht realisierbar gewesen wäre. Die Schaltung des im Herbst 1994 realisierten ersten Designdurchlaufes weist einen Digitalausgang auf (Elektromechanischer Sigma-Delta-Modulator), ermöglicht einen softwaremäßigen Abgleich und bezieht Eigenschaften des Sensors in synergetischer Weise ein, wodurch Bauelemente und dadurch Verlustleistung eingespart werden. Ferner ist der Chip bereits für die Integration von Sensorelement und Auswerteschaltung („LIGA-on-chip“, [2,3]) vorgesehen. Für die Entwicklung eines solchen full-custom-ASICs bedarf es allerdings einer teuren und umfangreichen CAD-Entwurfsumgebung. Die Einrichtungskosten für die ASIC-Herstellung sind ebenfalls verhältnismäßig hoch. Da an einem einmal hergestellten Chip keine Korrekturen mehr durchgeführt werden können, ist die Wahrscheinlichkeit groß, daß mehrere Design-Durchläufe nötig sind. Für den Test der Chips schließlich ist ebenfalls eine aufwendige Ausstattung erforderlich. Mit Hilfe sogenannter Multi-Project-Wafer können jedoch die Einmalkosten für die Herstellung unter mehreren Auftraggebern geteilt werden, so daß für den wirtschaftlichen Einsatz von full-custom-ASICs oft schon Stückzahlen ab 200 hinreichend sein können.

Literatur:

- [1] O. Krömer, O. Fromhein, H. Gemmeke, T. Kühner, J. Mohr, M. Strohrmann: High-precision readout circuit for LIGA acceleration sensors, *Sensors and Actuators A* 46-47 (1995) 196-200
- [2] R. Ruprecht, W. Bacher, A. Both, H. Dinglreiter, H. Kalb: Darstellung einfacher Mikrosysteme durch Kunststoffabformung und Galvanoformung auf integrierten Schaltkreisen, 1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe Nr. 5238
- [3] O. Krömer et al.: Intelligentes triaxiales Beschleunigungssensorsystem, dieser Tagungsband

Mikrofertigung und Analytik mit der Synchrotronlichtquelle ANKA: Dienstleistungsangebot an die Industrie

H.O. Moser¹⁾, P. Bley¹⁾, D. Einfeld²⁾, H. Schweickert³⁾, R. Steininger⁴⁾

¹⁾ Forschungszentrum Karlsruhe, Projekt Mikrosystemtechnik

²⁾ Fachhochschule Ostfriesland, Emden

³⁾ Forschungszentrum Karlsruhe, Hauptabteilung Zyklotron

⁴⁾ Universität Karlsruhe

Zusammenfassung

Mit ANKA plant das Forschungszentrum eine Synchrotronlichtquelle, die sich durch ein neuartiges, auf die industrielle Nutzung zugeschnittenes Konzept auszeichnet. ANKA bietet problemoptimierte, kostengünstige und termingerechte Volldienstleistung an. Dadurch wird die Industrie, ob KMU oder Großunternehmen, effektiv und mit einer vernachlässigbaren Hemmschwelle an die Möglichkeiten der Synchrotronstrahlung in der Mikrofertigung und der Analytik herangeführt und kann dabei weitere Angebote aus dem Pool der gesamten



Leistungen des Zentrums und externer Anbieter mitnehmen. Dies kann von den existierenden Forschungsquellen nicht im selben Umfang geleistet werden, ist aber wesentlich, um die Früchte der staatlichen Investition in die Grundlagenforschung auch zu ernten. Durch die enge Verzahnung mit der Welt der Industrie bietet ANKA für die anwendungsorientierte Weiterentwicklung von Mikrofertigungs- und Analytikverfahren ideale Voraussetzungen.

ANKA erreicht ihre hohe Leistungsfähigkeit mit einer Technik, deren Kernstück ein nach den erprobten Konzepten der Quellen der 2. Generation konsequent optimierter 2.5 GeV-Elektronenspeicherring ist, mit einem Finanzierungsaufwand, der nur ein Bruchteil von dem der Forschungsquellen der 3. Generation beträgt, und mit einer Organisationsform, in der die Symbiose zwischen Dienstleistungspersonal und Forschergruppen eine entscheidende Rolle spielt.

Literatur

- [1] Moser, H.O., Einfeld, D., Steininger, R., et al., ANKA - Synchrotronlichtquelle für Mikrofertigung und Analytik, Vorschlag zum Bau einer Synchrotronstrahlungsquelle (ANKA) im Forschungszentrum Karlsruhe zur Förderung der industriellen Umsetzung von Mikrofertigungs- und Analytikverfahren, Forschungszentrum Karlsruhe, 12. Juni 1995.
- [2] H.O. Moser et al., ANKA, a Synchrotron Light Source for Microstructure Fabrication and Analysis, Particle Accelerator Conference and International Conference on High Energy Accelerators, Dallas, Texas, 1.-5. May 1995.

Liste aller ausgestellten Poster/Exponate

Intelligentes triaxiales Beschleunigungssensorsystem
Optomechanische Bypass-Schaltung für die optische Informationstechnik
Optochemisches Mikroanalyse-System für die Umweltüberwachung
Gasanalytik mit akustischen Oberflächenwellen
ELMAS - ein modulares elektrochemisches Mikroanalyse-System
Experimenteller Telemanipulator für die Minimal-Invasive Chirurgie
Der „Karlsruher Endoskopietrainer“, ein auf „Virtual Reality“ Techniken basierendes MIC-Trainings-System
Taktile optische Sensor für die minimal invasive Chirurgie
Hydraulischer Mikroaktor
Bidirektionales Sende- und Empfangsmodul für die optische Datenübertragung
Mikromembransensoren
Integration von mikromechanischen und mikroelektronischen Komponenten mit Hilfe der positionierten Abformung auf vorstrukturierten Substraten
Mikroaktoren aus Formgedächtnislegierungen
LIGA-Mikrolinsen und ihre Anwendung in der Medizin- und Informationstechnik
Elektromagnetische Linearmikroaktoren nach dem LIGA-Verfahren
Ermittlung von Stoffeigenschaften
Keramische Mikrostrukturen
Multigassensorchip auf Metalloxidbasis für Prozeßsteuerung und Umweltüberwachung
Wirkstoffsensor für Herbizide
Miniaturisierter photothermischer Sensor für die Prozeß- und Umweltanalytik
Anwendungen der Mechanischen Mikrotechnik
Zerstörungsfreie, photoakustische Materialprüfung in der Mikrotechnik
Informationsverarbeitungsumgebung zur Kontrolle von Mikrostrukturen
Passive Ankopplung aktiver optischer Devices an monomodige Polymerwellenleiter
Abformen von Kunststoffmikrostrukturen
Miniaturisierungsschritte in der Mikroelektronik
Mikrofertigung und Analytik mit der Synchrotronlichtquelle ANKA: Dienstleistungsangebot an die Industrie

Liste der am Projekt Mikrosystemtechnik beteiligten Organisationseinheiten

Projektleitung Mikrosystemtechnik, PMT/PL
Institut für Mikrostrukturtechnik, IMT
Institut für Materialforschung, IMF
Institut für Radiochemie, IRCh
Institut für Angewandte Informatik, IAI
Hauptabteilung Ingenieurtechnik, HIT
Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik, HPE
Hauptabteilung Versuchstechnik, HVT

Autoren

Ache, H. J., 15, 136, 197
Ahrens, R., 191
Althainz, P., 131
Bacher, W., 41, 145, 189, 192
Balzer, M., 93
Bauer, W., 161
Bier, W., 45, 87, 100, 198
Bley, P., 1, 204
Börner, M. W., 191
Böß, B., 93
Both, A., 192
Bruns, M., 100
Bürck, J., 136
Büstgens, B., 51, 87, 100
Coerdts, W., 93
Cerff, K. H., 197
Dautzenberg, P., 106
Deimling, B., 100
Dübel, O., 197
Eggert, H., 20, 57, 75, 100, 200
Einfeld, D., 204
Engelhardt, F., 62
Eulenberger, L., 67
Fahrenberg, J., 123
Faubel, W., 197
Feit, K., 189
Fischer, H., 188
Fischer, M., 169
Freywald, K. H., 100
Fromhein, O., 33, 75, 87, 93, 100, 203
Gebhard, U., 123
Gemmeke, H., 33, 75, 203
Gengenbach, U., 62
Göttert, J., 62, 81, 169, 180, 190, 201
Goschnick, J., 131
Gugenberger, F., 155
Guth, H., 57, 200
Hagena, O., 41
Hanemann, T., 202
Haußelt, J., 27
Hehmann, J., 190
Heckele, M., 41, 192
Hoffmann, W.
Holleck, H., 155
Holler, H. E., 115
Huber, N., 195
Ilzhöfer, A., 195
Karl, B., 67
Keller, W., 51, 100
Kneifel, B., 118
Knitter, R., 161
Kohl, M., 81, 193
Krippner, P., 175
Krömer, O., 33, 75, 203
Kühnapfel, U., 106, 187
Kühner, T., 33, 75, 87, 93, 175
Kuhn, Ch., 187
Lindemann, K., 75, 100
Linder, G., 45, 198
Maas, D., 51, 100
Marth, M., 201
Mayer, J., 136
Menz, W., 11, 194
Mohr, J., 41, 75, 81, 87, 123, 175, 180, 190, 194, 201
Moritz, H., 41
Moser, H. O., 204
Moss, D. A., 196
Müller, A., 81, 169, 180, 190
Müller, C., 41, 87, 175, 180
Müller, K., 202
Müller, K. D., 192
Müller-Fiedler, R., 81
Neisius, B., 106, 118, 187
Norajitra, P., 202
Piotter, V., 145
Quandt, E., 155
Radloff, D., 87
Rapp, M., 93
Rapp, R., 100
Reichert, J., 87
Rininsland, H., 62
Ritzhaupt-Kleissl, H. J., 161
Rogge, B., 194
Rogner, A., 190
Rohde, M., 199
Ruprecht, R., 100, 145
Ruther, P., 123, 189
Ruzzu, A., 123
Schaller, Th., 45, 198
Scharnowell, R., 62
Scherer, K. P., 57, 200
Schmidt, L., 145

Schmitt, M., 106
Schomburg, W. K., 87, 100, 191
Schoof, S., 87,
Schubert, K., 45, 198
Schüssler, A., 151
Schulz, J., 75, 194
Schweickart, H., 204
Seemann, K., 155
Selig, M., 118
Seidel, D., 51, 100
Skrobanek, K. D., 193
Söchtig, J., 201
Steininger, R., 204
Stepputat, M., 87
Stier, S., 93
Stiller, P., 57, 200

Stolze, D., 100
Strohmann, M., 75
Stucky, U., 57, 200
Süß, W., 20, 100
Thommes, A., 194
Trapp, R., 106, 118, 188
Tsakmakis, Ch., 195
Vitt, M., 191
Voges, U., 106
Voigt, A., 93
Vollmer, T., 106
Wallrabe, U., 123
Wollersheim, O., 75
Wüstling, S., 33, 203
Zimmermann, B., 136