



KfK 5238
September 1993

1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik

**am 23./24. September 1993
im Kernforschungszentrum Karlsruhe**

zusammengestellt von der Projektleitung

Kernforschungszentrum Karlsruhe

**Kernforschungszentrum Karlsruhe
Projekt Mikrosystemtechnik**

KfK 5238

**1. Statuskolloquium
des
Projektes Mikrosystemtechnik**

23./24. September 1993

**im
Kernforschungszentrum Karlsruhe**

zusammengestellt von der Projektleitung

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2. überarbeitete Auflage

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0303-4003

Inhaltsverzeichnis

Grußwort des Aufsichtsratsvorsitzenden	1
Wirtschaftliche Anwendung und staatliche Förderung der Mikrosystemtechnik im internationalen Vergleich	3
Die Förderung der Mikrosystemtechnik in Deutschland	6
Ziele und Organisation des Projekts Mikrosystemtechnik des KfK	9
Darstellung der am PMT beteiligten Institute	
Die LIGA-Technik und ihr Potential für die industrielle Anwendung	21
Chemische Mikroanalysensysteme: Ziele und neuere Entwicklungen	31
Aufgaben der Informationsverarbeitung in der Mikrosystemtechnik	38
Materialforschung für Mikrosysteme	50
Vom starren MIC-Instrument zum hochflexiblen Telemanipulator	57
Demonstratoren	
LIGA-Sensoren und intelligente Sensorsysteme zur Messung von Beschleunigungen	67
Mikrooptischer Schalter als Bypass-Element in optischen Datennetzwerken	73
Mikromembranpumpen als Elemente eines optochemischen Mikroanalysestems	78
Analytisches Mikrosystem auf der Basis von Surface Acoustic Wave Bauelementen	85
Elektrochemisches Mikroanalysensystem (ELMAS) für die Ionometrie von Flüssigkeiten	89
Ein experimenteller Telemanipulator für die Minimal-Invasive Chirurgie	94
Mikrostrukturierung	
Mikrospektrometer für spektrale Analyseaufgaben im sichtbaren und nahen Infrarotbereich	105
Fluidische Mikrostrukturen in LIGA-Technik am Beispiel fluidischer Elemente	111
Entwicklungen und Erweiterungen der Strukturierungsmöglichkeiten in der Röntgentiefenlithographie	116

Darstellung einfacher Mikrosysteme durch Kunststoffabformung und Galvanoformung auf integrierten Schaltkreisen	122
Optische Lithographie als Strukturierungsmethode der Mikrotechnik und spezielle Anwendungen für den LIGA-Prozeß	129
Mechanische Mikrofertigung - Verfahren und Anwendungen	134
Chemische Mikrosensoren, Materialwissenschaften	
Mehrstufige Gassensorsysteme zur Prozeß- und Umweltüberwachung	143
Optochemische Mikrosensoren für umweltanalytische Aufgaben	148
Magnetostriktive Schichten als Aktoren in der Mikrosystemtechnik	153
Keramische Mikrostrukturen Verfahren zur Materialsynthese und zur Formgebung	159
Systemtechniken	
Arbeitsergebnisse aus der Aufbau- und Verbindungstechnik für die Integration mikrosystemtechnischer Komponenten	167
Schaltungsentwurf für Mikrosysteme	172
Automatische Vermessung von 2D- und 3D-LIGA-Strukturen zur Qualitätskontrolle	177
Informationstechnische Integration von LIGA-Entwurfs- und Fertigungsumgebung	184
Liste der am Projekt Mikrosystemtechnik beteiligten Institute	189
Liste der Autoren	189

Grüßwort des Aufsichtsratsvorsitzenden

Min.-Dir. Dr. J. Rembser

Bundesministerium für Forschung und Technologie

Zum 1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik des Kernforschungszentrums Karlsruhe überbringe ich die Grüße von Bundesforschungsminister Dr. Paul Krüger. Der Minister folgt mit besonderem Interesse Ihren Arbeiten in den technologie- und industrieorientierten Programmen und Projekten. Sie sollen in Deutschland mit die Grundlagen für Technologien des 21. Jahrhunderts schaffen und intensivieren. Darauf wird unser Land künftig mehr als je zuvor angewiesen sein.

Minister Dr. Krüger wird am 4. Oktober 1993 das Kernforschungszentrum besuchen, um sich vor Ort selbst ein Bild von der gegenwärtigen Situation und der Leistungsfähigkeit dieser Großforschungseinrichtung, von den Positionen und Aufgaben der hier arbeitenden Menschen zu machen.

Er wird am Nachmittag auf Ihrem Jahresempfang in der Aula des Fortbildungszentrums für Technik und Umwelt reden.

Ich bedanke mich für die freundliche Einladung, zu Beginn Ihres Statuskolloquiums die Grüßworte für den Aufsichtsrat und für den Hauptgesellschafter Bund/BMFT sprechen zu können.

Das Projekt Mikrosystemtechnik ist dabei, sich zu einem neuen "Flaggschiff" des Forschungszentrums zu entwickeln.

Es ist ein besonders gelungenes Beispiel dafür, wie aus einer Technologie, die für die Gründungsaufgabe des KfK, die Nukleartechnik, entwickelt wurde, eine für ganz andere, nicht-nukleare Aufgaben einsetzbare Technologie entstand. Vom Trenddüsenzylinder und seinen gekrümmten Mikroschlitzten für die Urananreicherung herkommend liegen die Anwendungs- und Einsatzbeispiele und -erwartungen für die Karlsruher LIGA-Technik jetzt - und ich folge Ihrer einschlägigen Presseinformation - in der allgemeinen Meß- und Regeltechnik, in der Haustechnik, im Verkehrswe-

sen, in der Kommunikationstechnik, in der Umwelttechnik und besonders in der Medizin, vor allem der minimal-invasiven Therapie und Chirurgie, bei kleinsten Sensoren, Speichern, Aktoren, Fluidik-, Optik- und Mechanikelementen. Der Statusreport wird viele Beispiele dazu bringen.

Nach eingehenden Erörterungen des KfK mit seinen Gesellschaftern Bund und Land Baden-Württemberg und in seinen Aufsichtsgremien ist das Projekt Mikrosystemtechnik jetzt mit gesicherten Ziel- und Ressourcenfestlegungen bis Ende des Jahres 1995 im Forschungs- und Entwicklungsprogramm des Zentrums, in den Absprachen mit externen Partnern von Hochschulen und Industrieunternehmen verankert. Das Karlsruher Projekt ist Teil des nationalen BMFT-Förderprogramms Mikrosystemtechnik, und es wächst weiter mit ihm zusammen. Dies ist nicht zuletzt auch eine Frage des Respektes und der Resonanz der auf beiden Seiten Verantwortlichen.

Ende 1995 ist eine externe Evaluation des jetzigen Projektabschnittes, seiner Ergebnisse und Fortschritte, seiner Qualität und Perspektiven vorgesehen. Diese Bewertung soll die Grundlage für die nächsten Arbeitsschritte schaffen. Sie soll auch zu einer abschließenden Entscheidung führen, ob eine eigene Synchrotronstrahlenquelle für die Arbeiten des KfK-Zentrums und seiner Partner von Freiburg bis Dortmund lohnt oder ob nicht die privilegierte Nutzung des künftigen Synchrotronrings BESSY II in Berlin-Adlershof vorzuziehen ist.

Das Projekt Mikrosystemtechnik ist mit seinen Kosten-, Finanzierungs- und Zusammenarbeitsstrukturen beispielhaft für technik- und industrieorientierte Forschungsarbeiten in Großforschungszentren angelegt. Dies schließt auch strukturelle Zielvorgaben ein, an denen die Entwicklungen und Ergebnisse gemessen werden können:

- Ende 1995 sollen 10 % des Finanzbedarfs für das Karlsruher Programm von aktuellen und potentiellen Nutzern der Ergebnisse in der Wirtschaft gedeckt werden;
- weitere 20 - 30 % der Karlsruher Vorhaben sollen mit entsprechenden Arbeiten bei kleinen, mittleren und großen Unternehmen der Region und des ganzen Landes verbunden und vernetzt sein;
- 60 - 70 % der Forschungen sollen sich schließlich als prospektive FuE - Arbeiten auf eine 100 %-ige Grundfinanzierung von Bund und Land abstützen können.

Zusätzlich eingeworbene Mittel, etwa von der EG, wird das Zentrum zur Verstärkung seiner Forschungsarbeiten und seiner personellen Forschungskapazitäten einsetzen können.

Das KfK spürt die derzeitige wirtschaftliche Lage unseres Landes und die außerordentliche Belastung seiner öffentlichen Finanzen, die vor allem durch den Neuaufbau in den neuen Bundesländern bedingt wird, schmerzlich in einem merklichen Abbau der grundfinanzierten Personalstellen.

Ende 1995 werden mindestens 480 Stellen weniger im Haushalt eingestellt und besetzt sein als im Jahre 1990.

Dies ist aber kein Grund für permanentes Klagen, für ein Sich-Selbst-Bedauern oder für enge Vorwürfe und Kritik am verantwortlichen Hauptgesellschaftlicher Bund.

Mit verbleibenden mehr als 2.500 Stellen und zusätzlichem Annexpersonal - von Auszubildenden über Diplomanden, Doktoranden (hier gibt es gut dotierte Nachwuchsprogramme mit zusätzlichen Finanzmitteln), drittmittelfinanzierten Fachkräften bis hin zu Gastforschern - in der Größenordnung von zusammen 1.100 Köpfen, also insgesamt mehr als 3.500 Beschäftigten, bleibt das KfK allein schon von dieser Quantität her ein in Deutschland, Europa und der westlichen Welt herausragendes außeruniversitäres Forschungs- und Ingenieurzentrum.

Nutzen Sie dies mit Einfallsreichtum, Selbstvertrauen und Mut. Dazu wünsche ich dem Zentrum und heute besonders dem Projekt Mikrosystemtechnik Glück und Erfolg.

Wirtschaftliche Anwendung und staatliche Förderung der Mikrosystemtechnik im internationalen Vergleich

W. Klose

Vorstandsbereich "Neue Technologien und Grundlagenforschung"

Marktsituation

Ergebnisse von Marktstudien in den vergangenen 2 Jahren sind in Deutschland von der Firma Battelle und im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) von der Gesellschaft für Innovationsforschung und Beratung GmbH zum Potential der Mikrosystemtechnik vorgelegt worden [1], [2]. Hinzu treten weitere internationale Studien, darunter auch eine des Office of Technology Assessment (OTA) des Kongresses der Vereinigten Staaten [3].

Alle Studien stimmen darin überein, daß die Miniaturisierung und die Erschließung des Mikro-Bereichs für viele technische Komponenten und Systeme bereits angelaufen sind. Gemäß Battelle können schon 20 Sensortypen, 10 Aktuatoren, 25 einfache Strukturen und 15 Systeme am Markt in Europa, USA und Japan nachgewiesen werden. Alle Studien gehen von der Erwartung eines steigenden Marktes in den nächsten 10 Jahren aus, wobei Umsätze in Dollar-Milliarden Höhe erwartet werden.

Die Entwicklung der Mikrotechnik zeigt deutlich 2 unterschiedliche Richtungen.

Mikrotechnische Komponenten und Systeme

Komponentenentwicklung
Systemintegration

Spezielle Anwendungen. (Hier gibt es moderne Technikgebiete, die Mikrostrukturen als *conditio sine qua non* voraussetzen. Als Beispiel diene der Einsatz von lebenden biologischen Strukturen, deren Handhabung Werkzeuge in ihrer Dimension erfordert.)

Verwendung von Mikrostrukturen als Werkzeuge in der Fertigungstechnik.

Die Studie der Gesellschaft für Innovationsforschung zeigt an zwei interessanten Fragestellungen den direkten Bedarf der Wirtschaft für neue mikrotechnische Produkte.

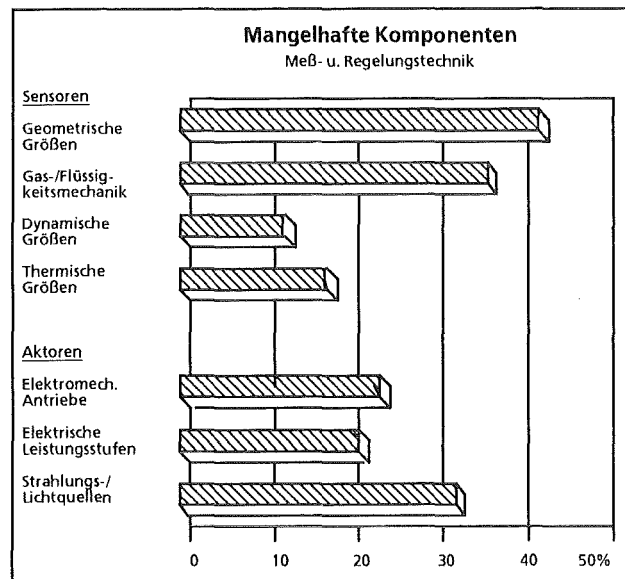


Abbildung 1: Unzufriedenheit mit Komponenten der Meß- u. Regelungstechnik

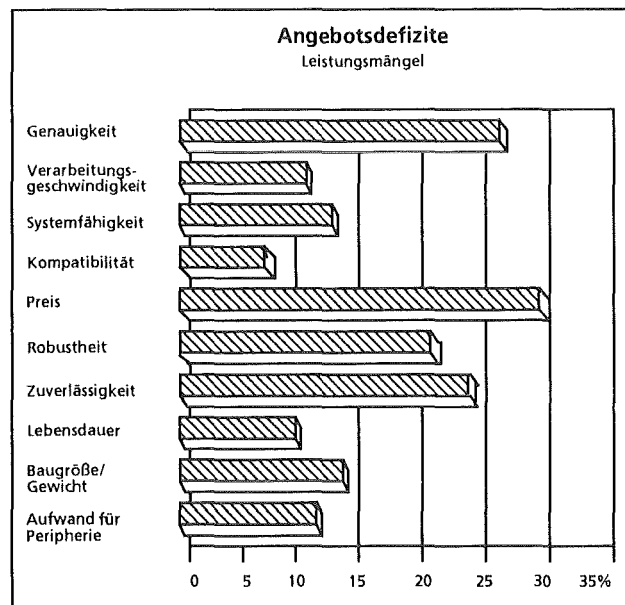


Abbildung 2: Leistungsmängel bei Komponenten der Meß- u. Regelungstechnik

Welche Anstrengungen zur Befriedigung dieser Marktbedürfnisse werden international unternommen?

Einer Statistik zufolge, die der Vorsitzende unseres Projektbeirats, Herr Dr. Kroy, vor einiger Zeit angefertigt hat, ist es offensichtlich, daß die Industrie in Europa im Vergleich zu den Vereinigten Staaten von Amerika und Japan auf die Marktherausforderungen relativ weniger intensiv reagiert hat und das Feld hier durch den Forschungsbereich dominiert ist.

Vergleich der Wirtschaftsregionen

Im folgenden werden die drei großen Wirtschaftsregionen USA, Japan, Europa im Hinblick auf das Mikrotechnik-Engagement der Industrie sowie staatlicher Förderung betrachtet.

USA

Nach der diesjährigen MEMS-Konferenz im Februar [4] hatte der Verfasser versucht, eine internationale Gruppe von Fachleuten dazu zu bewegen, sich für die fachliche Themenwahl zukünftiger Tagungen, für die Anfertigung von Gutachten und als Trendsetter für die Weiterentwicklung des Gesamtgebiets der Mikrotechnik für zuständig zu erklären. Vorbild dafür waren die ECFA (European Committee for Future Accelerators) und ICFA-Komitees (International Committee for Future Accelerators) der Hochenergiephysiker. Auch sie waren zunächst "privat" zustandegekommene Gremien, zusammengesetzt aus prominenten Hochenergiephysikern aus aller Welt, die sich als Sprecher von Zukunftsplanungen in der Hochenergiephysik etablierten. Sie waren bald von allen Regierungen akzeptiert und wurden in Folge auch in die jeweiligen staatlichen Planungen mit einbezogen.

Für die Mikrotechnik klappte der Versuch nicht. Es zeigte sich, daß sich die Vertreter der USA nicht mehr frei genug für diese Art internationaler Absprachen fühlten. Es gibt in den USA bereits massive kommerzielle Interessen. Außerdem setzt die US-Regierung freigewordene Mittel aus der Militärforschung bevorzugt für Programme ein, die die Wettbewerbsfähigkeit der US-Wirtschaft stärken sollen. Die staatlichen Labors sind gehalten, ihr Wissen zunächst in den USA anzubieten.

Zu diesem Ergebnis paßt der Bericht einer EG-Delegation, die in diesem Frühjahr verschiedene F&E-Zentren in den USA besuchte, um sich über die Themen Robotik und Mikrosysteme zu informieren.

Die EG-Delegation stellt in ihrem Bericht fest, daß wegen des industriellen Wettbewerbs und Schutzrechtsfragen in den USA an Kooperation

mit Europa im vorwettbewerblichen F&E-Bereich wenig Interesse zu finden ist.

Seit 1985 gibt es in den USA das ERC-Programm (Engineering Research Center). Die Zentren werden von der NSF (National Science Foundation), den Hochschulen und der Industrie gemeinsam gefördert und sollen bewirken:

- 1) interdisziplinäre, über Fakultäts- und Departmentgrenzen hinwegreichende Kooperation,
- 2) Ausbildung moderner Ingenieure und Fakultätsmitglieder,
- 3) Bearbeitung industriebezogener, kritischer Probleme, die nicht notwendig kurzfristiger Natur sein müssen.

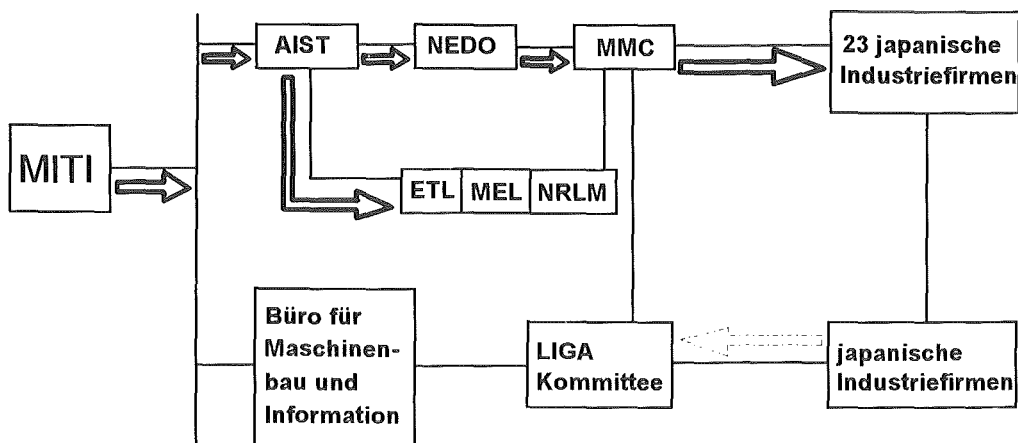
Im Gegensatz zur F&E-Förderung in Europa erhalten die ERC auch Geld, über deren Zweckbestimmung sie allein entscheiden.

Für die Mikrotechnik gibt es in den ERC kein zusammenhängendes Programm, wohl aber viele erfolgreiche und international bekannte Arbeitsgruppen, die von einzelnen Fakultätsmitgliedern geleitet werden und die die gegebene Infrastruktur (der Reinräume) nutzen.

Japan

Die Situation in Japan ist anders als in Deutschland und der EG und in den USA. In Japan gibt es eine programmatisch klare staatliche Vorgabe und Festlegung auf ein zielgerichtetes Projekt. Staatliche Gelder werden direkt an Industrielabors und nur Industrielabors für die Übernahme definierter Aufgabenstellungen im Rahmen dieses Projekts gegeben. Das Ziel ist damit klar umrissen, die Fachmeinung der Experten floß schon in die Definition des Projekts ein. Das Projekt ist langfristig auf 10 Jahre angelegt und umfaßt ca. 400 Mio DM Fördermittel. Als Projektträger wirkt das "Micro-Machine-Center" (MMC), das darüber hinaus für weitere, zusätzliche Koordinierungsaufgaben zur Verfügung steht.

Wichtig ist, daß neben der Arbeit an dem staatlich finanzierten Projekt die Industrie, organisiert im AMTDA (Advanced Machining Technology & Development Association), mit eigenem Geld und vom staatlichen Projekt unabhängige, gemeinsame, vorwettbewerbliche Programme verfolgt. Ohne Geldzuweisungen beobachtet das Micro-Machine-Center für den staatlichen Bereich diese Aktivitäten. Es gibt ein eigenes AMTDA/LIGA-Komitee, das die Verwendung der LIGA-Technik für moderne Produktionsverfahren untersucht.



⇒ Finanzierung des Nationalen F+E-Programms ("Large Scale")
 "Technologie von Mikromaschinen"
 10 Jahre, 25 Milliarden Yen = 400 Mio DM

⇄ Finanzierung durch die Industrie

Europa und Deutschland

Die Förderung der Forschung durch die EG-Kommission gemäß viertem Rahmenplan 1994 - 1998 ist subsidiär zu den nationalen Programmen. Diese Förderungsstrategie ist der deutschen sehr ähnlich. Auch entsprechen sich diejenigen Unterprogramme des BMFT und des 4. Rahmenprogramms, in denen die Mikrosystemtechnik angesiedelt ist. Bei der EG läuft die Mikrotechnik unter Informations-Technologien als "integrierte Mikrosysteme", im BMFT in der Abteilung Informations- und Produktionstechnik.

Bekanntlich wird für die Förderung ein fachlicher Rahmen vorgegeben. Das Maximum an Vorgabe erfolgt bei Verbundvorhaben, die in der Regel durch Initiativen der Fachleute selbst zustandekommen.

Die Mittel werden an Universitäten, staatliche Forschungseinrichtungen und Industrielaboratorien gegeben [Anmerkung: in der Schweiz erhält die Industrie keine Mittel aus staatlichen Forschungsprogrammen].

Eine fachliche Koordination unter den Anwendungsempfängern selbst wird angestrebt. Bei der EG hat die NEXUS (Network of Excellence in Multifunctional Microsystems) genannte Gruppe diese Funktion für die Mikrosystemtechnik übernommen.

Die Industrie unterhält keine eigenen F&E-Programme im Bereich der Mikrosystemtechnik, die unabhängig von der staatlichen Förderung und/oder gemeinschaftlich vorwettbewerblich durchgeführt werden.

- [1] **Micromechanics**, International Multiclient Study on Technologies and Markets in Europe, USA and Japan; Battelle Europe, Frankfurt, July 1992.
- [2] **Mikrosystemtechnik**: Vision und industrielle Realität. Aus- und Bewertung des Förderschwerpunktes "Mikrosystemtechnik"; Gesellschaft für Innovationsforschung und Beratung mbH, Berlin, 1993.
- [3] U.S. Congress, Office of Technology Assessment, **Miniaturization Technologies**, OTA-TCT-514, Washington, November 1991.
- [4] IEEE-Conference on **Micro Electro Mechanical Systems**, Fort Lauderdale, Florida, USA, 7.-10-Feb. 1993.

Die Förderung der Mikrosystemtechnik in Deutschland

W. Wiche

Bundesministerium für Forschung und Technologie

Immer wieder wird die Frage gestellt, was versteht man unter Mikrosystemtechnik?

Wenn Sensoren, Signalverarbeitung und Aktoren in miniaturisierter Bauform so zu einem Gesamtsystem verknüpft werden, daß dieses System empfinden, entscheiden und reagieren kann, so spricht man von einem Mikrosystem. Hierbei ist entscheidend, daß diese Funktionen eigenständig erfolgen. Sensoren entsprechen dabei den menschlichen Sinnesorganen, die Signalverarbeitung dem Gehirn und die Aktoren den Gliedmaßen.

Mikrosysteme werden dadurch möglich, daß Mikrotechniken, so z.B. Schichttechniken aus der Mikroelektronik, Integrierte Optik, Mikromechanik oder Enzyme als biologische Erkennungskomponenten für Biosensoren funktional und miniaturisiert im Aufbau kombiniert werden. Zusammengefügt werden Sensoren, Signalverarbeitung und Aktoren durch Aufbau- und Verbindungstechniken. Hierbei unterstützen Systemarchitekturen und Signalverarbeitungskonzepte die Integration der Mikrotechniken. Außerdem ermöglichen rechnergestützte Werkzeuge den Entwurf, die Simulation und den Test komplexer Produktentwicklungen.

Somit ist Mikrosystemtechnik (MST) die funktionale Verknüpfung einzelner Mikrotechniken unter Anwendung der Systemtechniken zu extrem verkleinerten, weitgehend autonomen Funktionseinheiten.

Als Anwendungsfelder für Mikrosysteme sind z.B. zu nennen:

- Fertigungs- und Verfahrenstechnik,
- Verkehrstechnik,
- Umwelttechnik oder
- Medizintechnik.

Das laufende BMFT-Programm "Mikrosystemtechnik" (1990-1993) richtet sich in erster Linie an die mittelständische Industrie. Es besteht aus einem Bündel von inhaltlich verknüpften Förderungsmaßnahmen:

- Förderung von Verbundprojekten
- Indirekt-spezifische Förderung
- Förderung von Technologietransfer- und Querschnittsaufgaben.

Die förderpolitische Zielsetzung wurde bislang erreicht. Bei der indirekt - spezifischen Förderung von Produktentwicklungen entfielen 78 % der insgesamt 499 Vorhaben auf Unternehmen mit einem Jahresumsatz unter 50 Mio DM. Besonders bemerkenswert ist die hohe Beteiligung von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) an Verbundprojekten zur vorwettbewerblichen Technologieentwicklung. 72 der 129 Unternehmen, die an den 31 bewilligten Verbundprojekten beteiligt sind, haben einen Jahresumsatz von weniger als 50 Mio DM.

Die Förderpraxis des Programms Mikrosystemtechnik entspricht somit der Beschlußempfehlung des Ausschusses für Forschung, Technologie und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages (vom 24.10.1992), nach der für KMU verstärkt Unterstützungsmöglichkeiten vorzusehen sind, die auf eine Einführung von Informations- und Kommunikationstechniken abzielen.

Vorwettbewerbliche Forschung und Entwicklung nützt nur dann der Industrie, wenn sie in den weiteren Stufen des Innovationsprozesses zu marktfähigen Produkten führt. Die starke Beteiligung von KMU an den Verbundprojekten sorgt dafür, daß die Arbeiten eher zu praxisgerechten Ergebnissen führen.

Für das Programm MST wurden 1990-1992 insgesamt 260 Mio DM ausgegeben; für 1993 beträgt das Haushaltssoll 105,6 Mio DM.

Durch die Vielzahl der Techniken und wegen der Mannigfaltigkeit der Anwendungsfelder für Mikrosysteme ergibt sich ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf, dessen Finanzierung durch ein Programm allein nicht gedeckt werden kann. So wird das MST-Programm des BMFT mittlerweile durch weitere Förderungsmaßnahmen des Bundes

und durch zahlreiche Aktivitäten der Länder ergänzt.

Bei den Förderprogrammen des Bundes bestehen inhaltliche Bezüge zu 10 Fachprogrammen. Deren Thematik erstreckt sich von den technologieorientierten Programmen, wie z.B. der Mikroelektronik und Materialforschung bis hin zu den Programmen für Umwelt- oder Gesundheitsforschung. Weniger bekannt ist jedoch, daß auch durch die Programme zur Innovationsförderung die Anwendung der Mikrotechniken bzw. der MST unterstützt wird. So wurden im Programm "FuE-Darlehen für kleine Unternehmen zur Anwendung neuer Technologien", das von der Kreditanstalt für Wiederaufbau mit BMFT-Unterstützung durchgeführt wird, an 51 Unternehmen zinsverbilligte Darlehen für Produktinnovationen zugesprochen, bei denen Mikrotechniken zur Anwendung kommen. Mit dem Modellversuch "Beteiligungskapital für junge Technologieunternehmen" wird die Eigenkapitalausstattung von 63 jungen Technologieunternehmen verbessert, die Mikrotechniken funktionsbestimmend einsetzen. Speziell in den neuen Bundesländern können innerhalb der angelegten Fördermaßnahmen u.a. auch Unternehmen gefördert werden, die sich mit Themen der MST befassen.

Auf Länderebene reicht das Förderangebot von regionalen Förderprogrammen zur Gewährung von Zuschüssen an Unternehmen bis hin zum Aufbau einer Forschungsinfrastruktur an einzelnen Hochschulen. Hinzu kommen die beachtlichen Aktivitäten im Bereich der Hochschulausbildung. Eine bundesweite Umfrage zu Situationen der Hochschulausbildung für Mikrosystemtechnik ergab im Frühjahr 1993, daß an 16 Hochschulen Studiengänge bzw. Studienschwerpunkte bereits etabliert sind, und daß an weiteren 21 Hochschulen solche Studiengänge bzw. Studienschwerpunkte geplant sind. Mit diesem Lehrangebot wird die Voraussetzung für eine breite Basis an jungen qualifizierten Wissenschaftlern und Ingenieuren geschaffen.

Für Forschungseinrichtungen und Unternehmen, die ihre Aktivitäten in der Mikrosystemtechnik intensivieren wollen, ist es von Bedeutung, daß die Mikrosystemtechnik nunmehr von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften in ihre Fördermaßnahmen einbezogen ist. In der zweiten Ausschreibung des EG-Programms ESPRIT III ist die MST mit konkreten Forschungsaufgaben vertreten. Gefördert wird bereits ein "Network of Excellence in Multifunctional Microsystems". Dieses - kurz genannt "NEXUS" - hat zur Aufgabe, den europaweiten Informationsprozeß zur Mikrosystemtechnik zwischen den Instituten, unter Berücksichtigung der Belange der Industrie, zu intensivieren. Für das "Vierte Rahmenprogramm

im Bereich der Forschung, der technologischen Entwicklung und der Demonstration (1994-1999), das 1994 in Kraft treten soll, ist eine Verstärkung der MST-Förderung vorgesehen.

Nach dem Subsidiaritätsprinzip ist die EG nur für die Aufgaben zuständig, die auf der Ebene der einzelnen Mitgliedsstaaten nicht bewältigt werden können. Der EG kommt eine aktive Rolle zu bei der Koordinierung der europäischen Aktivitäten unter Berücksichtigung der Anstrengungen in Japan und in den USA. Dabei geht es insbesondere um die Entwicklung eines Instrumentariums im Bereich der Handelspolitik, mit dem erreicht werden kann, daß europäische Unternehmen und ihre Partner in der Forschung faire Chancen im internationalen Wettbewerb haben. Internationale Normen und Standards können die Positionen europäischer Partner in weltweiten strategischen Allianzen für komplexe Mikrosysteme auf Massenmärkten verbessern, wenn die europäischen Aspekte das Ergebnis einer europaweiten Kommunikation zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen sind.

Einrichtungen, die vom Bund institutionell gefördert werden, bilden das größte mit öffentlichen Mitteln geförderte wissenschaftliche Potential für MST in Deutschland außerhalb der Hochschulen. Von besonderer Bedeutung sind hier die Institute der Fraunhofer-Gesellschaft und das Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK). Bei der Fraunhofer-Gesellschaft arbeiten z.Z. 12 Institute und Einrichtungen mit einem nennenswerten Anteil auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik. Das neue FhG-Institut für Silizium-Technologie (ISIT) plant 70 % seines Arbeitsprogramms für die Mikrosystemtechnik ein. Die FhG-Einrichtung für Zuverlässigkeit und Mikrointegration in Berlin wurde eigens für die Mikrosystemtechnik gegründet. Insgesamt wurden von den Fraunhofer-Instituten und -Einrichtungen 1992 über 53 Mio DM für die MST aufgewendet.

Das KfK hat 1992 im Rahmen seiner inhaltlichen Neuorientierung den FuE-Schwerpunkt Mikrosystemtechnik gebildet, dessen Durchführung in der Form eines institutsübergreifenden Projekts erfolgt. Besonderes Gewicht innerhalb dieses Schwerpunktes hat die Anwendung und Weiterentwicklung der LIGA-Technik. Für die Jahre 1993-1995 wird das KfK für das Projekt jährlich 60 Mio DM aufwenden. Das KfK wird den spezifischen Möglichkeiten einer Großforschungseinrichtung entsprechend seine weitgespannten Kapazitäten überwiegend für grundlegende Vorlaufforschung der Mikrosystemtechnik einsetzen. Die Mikrosystemtechnik ist aber nur in ständiger Wechselwirkung mit den späteren industriellen Anwendern sinnvoll weiterzuentwickeln. Daher wird das

KfK bis 1995 10 % seines Programms im Bereich der Mikrosystemtechnik in Industrieaufträge, und weitere 20-30 % in Kooperationsvorhaben mit der Industrie einbinden.

Mit der Aufnahme der Mikrosystemtechnik in sein Forschungsprogramm hat das KfK innerhalb der Großforschungseinrichtungen sowohl konzeptionell als auch unternehmerisch Neuland betreten. Worin das unternehmerische Neuland besteht, hat Prof. Danielmeyer vor einigen Monaten prägnant formuliert:

"Wir sind es gewohnt, die Rolle der Forschung für die Wirtschaft hervorzuheben. Dahinter steckt ein traditionelles Denkschema: Erst kommt die Forschung, dann die Entwicklung, dann die Fertigung und schließlich der Vertrieb. Mit dieser Reihenfolge kann ein Unternehmer sein Kapital heutzutage am schnellsten verspielen - er kommt zu spät mit Innovationen auf den Markt".

Die Abkehr von diesem Denkschema ist heute für eine industrieorientierte Großforschungseinrichtung lebensnotwendig. Es kommt also darauf an, innovative Produkte in enger Kooperation zwischen Forschungseinrichtungen und Unternehmen über alle Phasen des Innovationsprozesses arbeits teilig anzugehen. Es ist selbstverständlich, daß sich im Lauf einer solchen Produktinnovation die Anteile von Kooperationsprojekten in der Weise verlagern, daß der Industrieanteil systematisch wächst.

Diese Gedanken sind auch in den Entwurf des neuen BMFT-Programms Mikrosystemtechnik (1994-1999) eingeflossen. Hier sollen folgende Maßnahmen durch Zuschüsse unterstützt werden:

- Förderung von industriellen Verbundprojekten zur Entwicklung von
 - Systemtechniken
 - Standardbauteilen für Mikrosysteme
 - Prototypen beispielhafter Mikrosysteme für Anwendungen in Bereichen staatlicher Vorsorge.
- Förderung von wissenschaftlichen Grundlagen.
- Förderung des internationalen Wissenschaftsaustauschs.
- Förderung der industriellen Diffusion und Technikfolgenabschätzung von Mikrosystemtechnik.

Der Entwurf ist vor kurzem an rund 600 Repräsentanten aus Wissenschaft und Wirtschaft mit der Bitte um Stellungnahme versandt worden. Die in dem Übersendungsschreiben enthaltenen Fragen bezüglich

- Standardbauteilen von Mikrosystemen
- Prototypen von beispielhaften fortgeschrittenen MST-Lösungen und
- Fertigungsprozessen für Mikrosysteme

zielen darauf ab, den absehbaren Forschungsbedarf mit Prioritäten zu belegen.

Mikrosysteme oder Bauteile von Mikrosystemen, die im Rahmen von Verbundprojekten entwickelt werden sollen, müssen nicht nur im Labor technisch machbar sein, sondern auch industriell gefertigt werden können, und zwar zu Kosten, die vom Markt her bestimmt sind. Die Herstellung von Standardbauteilen für Mikrosysteme könnte eine Antwort auf die Frage sein, wie man bei komplexen Mikrosystemen trotz unterschiedlicher Anforderungen der Anwender zur Kostendegression durch große Stückzahlen kommen kann. Der BMFT wird die dazu notwendige Abstimmung der jeweils Beteiligten nach Kräften unterstützen.

Die an der Mikrosystemtechnik interessierten Unternehmen und Forschungseinrichtungen in Deutschland werden in Zukunft sorgfältig zu prüfen haben, welche der unterschiedlichen Förderungsmaßnahmen für ihre Zwecke am besten geeignet sind. Die Erfahrungen mit dem noch laufenden BMFT-Programm Mikrosystemtechnik (1990-1993) deuten darauf hin, daß schon bald nach der Verkündung des neuen Programms Mikrosystemtechnik (1994-1999) - trotz der gestiegenen Anforderungen an die künftigen Projekte - wieder mit einem Nachfrageüberhang gerechnet werden muß. Die begrenzt verfügbaren Finanzmittel werden nicht für alle gewünschten Projekte ausreichen. Es erscheint also ratsam, daß von Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen auch Kooperationen über die Landesgrenzen hinweg in Betracht gezogen werden, damit die Voraussetzungen für eine Beantragung bei den Programmen der EG erfüllt sind. Aber auch hier werden - wie in der Vergangenheit - nicht alle Anträge bewilligt werden.

Für die Durchführung des KfK-Projekts werden sowohl das KfK als auch seine industriellen Kooperationspartner eine Antwort auf die folgenden Fragen finden müssen:

- 1) Was ist machbar im Rahmen des 60 Mio DM Budgets?
- 2a) Welche Aufgaben können nur gemeinsam mit EG-Partnern angegangen werden?
- 2b) Welche Fördermöglichkeiten gibt es hierfür im Rahmen der EG-Programme?

Auch hierzu sollte das 1. Statuskolloquium des Projekts Mikrosystemtechnik Anregungen für weitergehende Überlegungen bieten. In diesem Sinne wünsche ich der Veranstaltung einen erfolgreichen Verlauf.

Ziele und Organisation des Projekts Mikrosystemtechnik des KfK

P. Bley

Projektleitung Mikrosystemtechnik

Zusammenfassung

Im Dezember 1992 wurde im Kernforschungszentrum (KfK) das Projekt Mikrosystemtechnik (PMT) gegründet. In diesem Projekt wurden die Arbeiten des seit 1986 bestehenden Arbeitsschwerpunktes "Mikrotechnik" zusammengefaßt, in welchem Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (F&E) zur Mikrostrukturierung (besonders zum LIGA-Verfahren), Aufbau- und Verbindungstechnik, Chemische Mikrosensorik, Schichttechnologie, Werkstoffentwicklung und Informationsverarbeitung für Mikrosysteme durchgeführt wurden. Hinzu kamen Aufgabenbereiche aus den früheren Arbeitsschwerpunkten "Werkstoffe und Grenzflächen" sowie "Handhabungstechnik", besonders Minimal-Invasive Chirurgie. Im Projekt arbeiten z. Z. vier Institute und drei Hauptabteilungen des KfK zusammen. Die Zahl der F&E-Stamm-Mitarbeiter beträgt 160, die Gesamtzahl aller am Projekt beteiligten KfK-Mitarbeiter liegt bei 230, und das jährliche Gesamtbudget wurde auf maximal 60 Mio DM festgelegt. Ein Ziel der Arbeiten des KfK im Bereich PMT sind langfristige und vorwettbewerbliche F&E-Arbeiten. Das KfK arbeitet auf diesem Gebiet eng mit vielen Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen zusammen. Ein weiteres Ziel ist die rasche Umsetzung der Entwicklungsergebnisse in marktfähige Produkte. Um dies zu erreichen und um seine Arbeiten an den Bedürfnissen der Industrie auszurichten, kooperiert das KfK mit vielen Industrieunternehmen. Dabei kann diese Kooperation in Form von gemeinsamen Projekten oder in Form von Entwicklungsaufträgen, die das KfK durchführt, erfolgen.

1. Projektarbeiten im KfK

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (F&E) werden im KfK in Organisationseinheiten (Institute, Hauptabteilungen usw.) durchgeführt, die mit den geeigneten Geräten und dem dafür ausgebildeten wissenschaftlich-technischen Personal ausgestattet sind. Verschiedene Organisationseinheiten arbeiten entsprechend ihrer Fachkompetenz in Projekten zusammen, die institutsübergreifend organisiert sind (Matrix-Struktur). Im Gesellschaftsvertrag des KfK ist vorgesehen, daß solche Teile des Forschungs- und Entwicklungsprogramms, die in verschiedenen Organisationseinheiten bearbeitet werden, aber auf ein gemeinsames Ziel gerichtet sind, in Projektform durchgeführt werden. Die Projektleitungen erarbeiten mit den am jeweiligen Projekt beteiligten Organisationseinheiten das F&E-Programm, das vom Wissenschaftlich-Technischen Rat des KfK (WTR) und dem Vorstand verabschiedet wird. Die Koordinierung der internen und externen Zusammenarbeit sowie die Kontrolle des laufenden Programms obliegt der Projektleitung.

2. Ausgangssituation

Im KfK wurden seit Mitte der 70er Jahre im Rahmen des Arbeitsschwerpunktes "Trenndüsenverfahren zur Urananreicherung" verschiedene Mikrostrukturierungsverfahren entwickelt, um Dü-

sengeometrien mit geringen lateralen Abmessungen (Mikrometerbereich) herzustellen. Die Notwendigkeit, noch kleinere und genauere Mikrostrukturen beliebiger lateraler Form mit großen Strukturhöhen herstellen zu können, führte Ende der 70er Jahre zur Entwicklung des sogenannten LIGA-Verfahrens (Herstellungsschritte: Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung, Galvanik und Abformung von Kunststoffen (vgl. Beitrag von W. Menz in diesem KfK-Bericht)). Die kerntechnischen Arbeiten zum Trenndüsenverfahren wurden zwischen 1985 und 1988 planmäßig reduziert und abgeschlossen. Es wurde jedoch relativ früh erkannt, daß das LIGA-Verfahren vielfältige Einsatzmöglichkeiten besitzt, und entsprechende Arbeiten wurden etwa seit 1982 kontinuierlich ausgeweitet. Da die Technik der Mikrostrukturierung nach dem LIGA-Verfahren nicht nur auf große Resonanz in der wissenschaftlichen Welt, sondern auch auf Interesse in der Industrie stieß, etablierte sich damit 1986 der Arbeitsschwerpunkt "Mikrotechnik" im F&E-Programm des KfK. Zu dem Arbeitsthema LIGA-Verfahren kamen die Informationsverarbeitung (1987), die Chemische Mikrosensorik (1987), alternative Strukturierungsverfahren (z. B. Mechanische Mikrofertigung), die Aufbau- und Verbindungstechnik und die Materialwissenschaften (1991) hinzu. Das KfK kann heute auf all diesen Gebieten über umfangreiches und fundiertes Fachwissen zurückgreifen.

3. Gründung des Projekts Mikrosystemtechnik

Zur Entwicklung und Herstellung von Mikrosystemen ist die Zusammenarbeit aus verschiedensten Fachbereichen erforderlich. Das KfK bietet gute Voraussetzungen dazu, da organisatorische Strukturen existieren, die einen raschen und direkten Zugriff auf fachlich unterschiedlich ausgerichtete Institute mit Erfahrungen auf wesentlichen Teilgebieten der Mikrosystemtechnik (MST) ermöglichen. Die am Arbeitsschwerpunkt Mikrotechnik beteiligten Institute des KfK arbeiteten von Beginn an eng zusammen. Um die Arbeiten noch besser zu koordinieren und auf einheitliche, industriennahe Ziele auszurichten, wurde am 1. Dezember 1992 das Projekt Mikrosystemtechnik (PMT) gegründet. Zu den Arbeitsgebieten des Arbeitsschwerpunktes Mikrotechnik kamen Aufgabenbereiche aus den früheren Arbeitsschwerpunkten "Werkstoffe und Grenzflächen" sowie "Handhabungstechnik", besonders Minimal-Invasive Chirurgie, hinzu.

Gemäß Beschluß des Aufsichtsrats werden die Aufwendungen für das PMT jährlich maximal insgesamt 60 Mio DM betragen. In diesem Betrag ist der gesamte von den Gesellschaftern Bund und Land zu tätige Aufwand für Personal, Gemeinkosten und wissenschaftlich-technische Einrichtungen sowie für Investitionen enthalten. Insgesamt arbeiten im Projekt 160 F&E-Stamm-Mitarbeiter. Hinzu kommen noch Nachwuchs- und Gastwissenschaftler sowie Mitarbeiter der wissenschaftlich-technischen Unterstützung, so daß insgesamt ca. 230 KfK-Mitarbeiter in diesem Projekt mitarbeiten (vgl. Abschnitt 4).

Im KfK-Gesellschaftsvertrag ist für Projekte ein Projektgremium vorgesehen, das sich aus KfK-Mitarbeitern (dem zuständigen Vorstand, den Leitern der am Projekt wesentlich beteiligten Organisationseinheiten sowie gewählten Vertretern der wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiter des Projekts) zusammensetzt und dessen wesentliche Aufgabe die Beratung der Geschäftsführung und des WTR ist. Darüberhinaus hat das KfK für das PMT einen ausschließlich mit externen Vertretern gebildeten Projektbeirat berufen, dem hochrangige Persönlichkeiten aus Wirtschaft, Forschung und Lehre sowie den Ministerien der Gesellschafter angehören. Dieser Projektbeirat wird das KfK bei der Zielsetzung und Durchführung des Projekts - besonders hinsichtlich der langfristigen Ziele - beraten und begleiten.

4. Am PMT beteiligte Institute und Hauptabteilungen

Direkte F&E-Arbeiten werden in vier Instituten und einer Hauptabteilung durchgeführt (Abb. 1):

Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT)

- Mikrostrukturierung nach dem LIGA-Verfahren (einschließlich der kompletten Maskentechnologie)
- Mechanische Mikrostrukturierung (spanabhende Bearbeitung mit formgeschliffenen Werkzeugen, z. B. Diamanten)
- Strukturierung mit Licht- und Teilchenstrahlen (Elektronenstrahlschreiber, inerte und reaktive Ionenstrahlen)
- Fortgeschrittene Aufbau- und Verbindungstechnik zum Aufbau kompletter Mikrosysteme,

Institut für Materialforschung (IMF)

- Entwicklung und Charakterisierung neuer Werkstoffe ("clever materials", Keramiken mit Hilfe des LIGA-Prozesses)
- Prozeßtechnik für mikrosystemkompatible Verarbeitung neuer Werkstoffe
- CAD/FEM-Methoden zur Analyse von Mikrostrukturen,

Institut für Radiochemie (IRCH)

- Chemische Mikrosensorsysteme auf der Basis verschiedener Transducer-Prinzipien (Optroden, Metalloxidfilm- und Oberflächenwellensensoren, Chemische Feldeffekttransistoren)
- Dünnschichttechnik
- Oberflächenanalytik,

Institut für Angewandte Informatik (IAI)

- Rechnergestützte Methoden und Werkzeuge für Entwurf, Modellierung und Simulation von Mikrosystemen
- Rechnergestützte Handhabungstechniken für Mikromontage und Medizintechnik
- Informationstechnische Integration des LIGA-Prozesses einschließlich Qualitätssicherung,

Hauptabteilung Ingenieurtechnik (HIT)

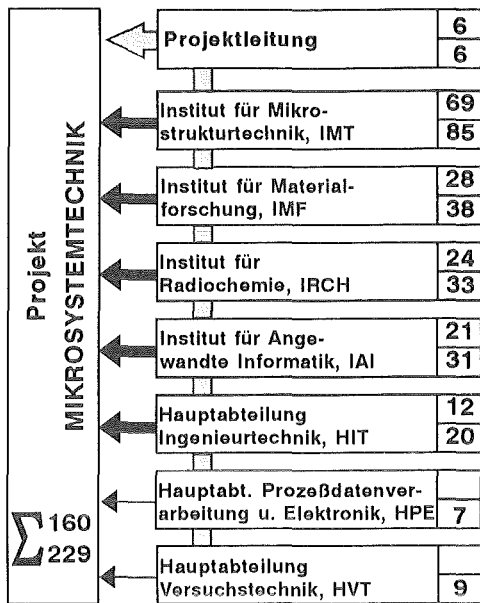
- Entwicklung von Instrumenten und Systemen für die Medizintechnik, insbesondere Minimal-Invasive Chirurgie (MIC).

Diese fünf Organisationseinheiten erhalten wissenschaftlich-technische Unterstützung durch die

Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (HPE)

und die

Hauptabteilung Versuchstechnik (HVT).



- ← F&E-Arbeiten
- ← Wiss.-techn. Unterstützung
- ← Koordination

Abb. 1: Am PMT beteiligte Organisationseinheiten mit Anzahl der Stamm-F&E-Mitarbeiter (obere Zahl) sowie der Gesamtzahl aller am Projekt beteiligten KfK-Mitarbeiter (untere Zahl) (Stand Mitte 1993)

Der prozentuale Beitrag dieser Organisationseinheiten zum Projekt Mikrosystemtechnik auf der Basis der F&E-Stamm-Mitarbeiter (Stand Mitte 1993) ist in Abb. 2 dargestellt.

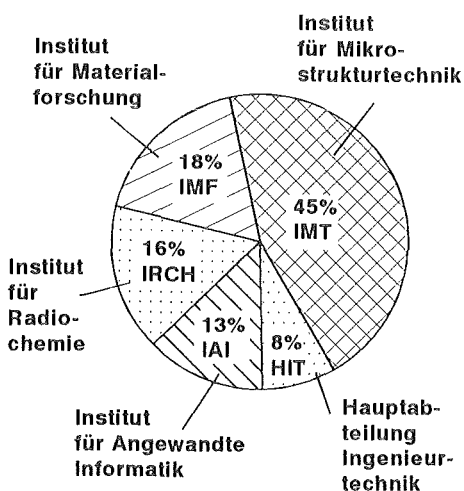


Abb. 2: Beiträge der Organisationseinheiten zu den F&E-Arbeiten im Rahmen von PMT

Eine ausführliche Darstellung aller am Projekt Mikrosystemtechnik beteiligten Institute des KfK und deren Arbeitsgebiete erfolgt an anderer Stelle dieses KfK-Berichts durch die Beiträge der jeweiligen Leiter dieser Organisationseinheiten.

5. Überblick über die Arbeitsgebiete des PMT

Zur Herstellung mikromechanischer und mikrooptischer Komponenten setzt das KfK die LIGA-Technik ein, die die Herstellung von Mikrostrukturen aus Metallen, Metallegierungen, Kunststoffen und Keramiken gestattet. Auf diesem Gebiet hält das KfK eine bisher noch unbestrittene Spitzenstellung. Neben dem LIGA-Verfahren stehen dem KfK verschiedene andere Strukturierungsmethoden zur Verfügung, wie z. B. die Mechanische Mikrofertigung, lichteptische Strukturierungsmethoden und Strukturierung mit Elektronen- und Teilchenstrahlen sowie selektive Ätzverfahren für Metalle.

Im Bereich der Chemischen Mikrosensorik verfolgt das KfK eine durchgängige Basisforschung und Technologieentwicklung mit dem Ziel hoher Selektivität und Langzeitstabilität. Dabei kann auf eine hervorragende Ausstattung und Kompetenz für dünnschichttechnologische Analyse- und Präparationsverfahren zurückgegriffen werden.

Diese Arbeiten werden sinnvoll ergänzt und unterstützt durch ein breites Spektrum materialwissenschaftlicher, für die MST spezifischer Arbeiten sowie Arbeiten zur Werkstoffprozeßtechnik.

Das KfK entwickelt im Bereich der Software sowohl Werkzeuge zur Analyse und Simulation der Herstellungsprozesse als auch der Strukturkontrolle (z. B. Bildverarbeitung). Ebenso werden Simulationsmethoden für Mikrostrukturen (z. B. mechanische und thermische Einflüsse, Sensor- und Aktorprinzipien) und komplette Mikrosysteme entwickelt. Zur Simulation mikroelektronischer Komponenten, die einen ganz wesentlichen Teil der Mikrosysteme darstellen, verfügt das KfK schon über geeignete Werkzeuge bzw. ist dabei, diese Fähigkeiten beträchtlich zu erweitern. So können z. B. ASICs entworfen und kompakte Mikrosysteme in hybrider Bauweise erstellt werden, was eine unabdingbare Voraussetzung darstellt, um die Systeme hinreichend testen zu können, bevor sie ggf. in eine serienähnliche Fertigung gehen.

Die Fähigkeiten der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) werden laufend erweitert und dem neuesten Stand der Technik angepaßt.

Für den Einsatz in der Minimal-Invasiven Chirurgie entwickelt das KfK sowohl neue Operationsgeräte in Feinstwerk- und Mikrotechnik als auch Telemanipulatorsysteme als Beitrag für ein zukünftiges integrales OP-System. Diese Arbeiten sind in die MST integriert, da viele Probleme in beiden Bereichen ähnlich sind und mit vergleichbaren Lösungsansätzen angegangen werden. So sind z. B. für die Neurochirurgie ein Endoskop mit mikromechanischen und -optischen Komponenten oder für einen Telemanipulator Sensoren zum Ersetzen des Tastsinns in der Entwicklung. In all diesen Fällen müssen auch Mikro-/Makroschnittstellen entwickelt werden.

Das KfK verfügt über keine Fertigungslinie zur Herstellung von Bauteilen in integrierter Siliziumtechnik und beabsichtigt auch nicht, solche aufzubauen. Das KfK wird in diesem Bereich mit anderen Forschungseinrichtungen und Industriefirmen kooperieren. Die mikroelektronischen Bauteile werden entweder durch eine fortgeschrittene Aufbau- und Verbindungstechnik mit den im KfK entwickelten Komponenten und Subsystemen verbunden, oder diese Komponenten werden direkt durch im KfK entwickelte Verfahren (vgl. Beitrag von R. Ruprecht et al. in diesem KfK-Bericht) auf den prozessierten Si-Wafern aufgebaut.

Die F&E-Arbeiten der verschiedenen Arbeitsschwerpunkte des KfK sind in Arbeitsthemen gegliedert. Abb. 3 zeigt die entsprechende Aufteilung der PMT-Arbeiten (Planung 1994).

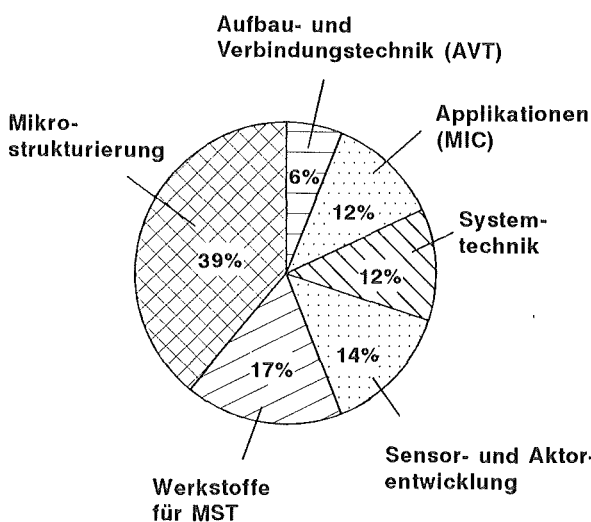


Abb. 3: Aufteilung der F&E-Arbeiten des PMT nach Arbeitsthemen

Die Arbeitsthemen (fett, mit den daran beteiligten Organisationseinheiten) sind dabei weiter in Vorhaben untergliedert:

Mikrostrukturierung (IMT, HVT)

- Maskentechnik
- Röntgentiefenlithographie
- Galvanik
- Abformung
- Mechanische Mikrofertigung

Werkstoffentwicklung für die Mikrosystemtechnik (IMF, IMT)

- Werkstoffe für Mikrostrukturen
- Werkstoffe für Sensoren und Aktoren
- Werkstoffprozeßtechnik
- Prüftechnik

Sensor- und Aktorentwicklung (IMT, IRCH, HPE)

- Entwicklung chemischer Mikrosensoren
- Aufbau von chemischen Sensoren und Subsystemen
- Entwicklung physikalischer Sensoren und Aktoren

Aufbau- und Verbindungstechnik (IMT, HVT)

- Prozesse für die AVT
- Mikro-Makro-Schnittstellen

Systemtechniken (IMT, IAI, IMF, HPE, HVT)

- Rechnergestützte Methoden und Werkzeuge
- Systemarchitekturen und Signalverarbeitungs-konzepte

Applikationen (IMT, IRCH, IAI, IMF, HIT, HPE, HVT)

- Medizintechnik (insbes. MIC)
- Prototypische Mikrosysteme (Demonstratoren)

6. Ziele und Aufgaben des Projekts Mikrosystemtechnik im KfK

Ziel des Projekts ist die Entwicklung neuartiger Mikrosysteme, die aus verschiedenen Komponenten aufgebaut sind und deren Funktionen durch die Integration von Sensor- und Aktorelementen, elektronischen Bauelementen und Informationsverarbeitung bestimmt wird. Zur Herstellung von neuartigen physikalischen und chemischen Mikrokomponenten sind die notwendigen Herstellungsverfahren und Materialien zu entwickeln. Zum Aufbau der Komponenten, besonders aber zu deren Systemintegration, sind geeignete Entwurfs-, Planungs- und Prüfwerkzeuge zur Verfügung zu stellen. Ziele sind zum einen vorwettbewerbliche, langfristige F&E-Arbeiten zur MST, zum anderen die rasche Umsetzung entwickelter Systeme in marktfähige Produkte. Hierzu sind die Arbeiten des KfK im Projekt Mikrosystemtechnik auf systemübergreifende Ansätze ausgerichtet. Sie ergänzen das bestehende BMFT-Förderprogramm zur MST in Deutschland.

Nahezu alle anderen Forschungsansätze zur Entwicklung der MST haben ihren Ausgangspunkt in der wohl etablierten Siliziumtechnik. Hingegen baut die MST im KfK auf der hier entwickelten LIGA-Technik auf und gestattet wegen der weitgehenden Freiheit in der Materialauswahl komplementär zur Siliziumtechnik, dem Anwender Lösungen in den für ihn optimalen Werkstoffkategorien anzubieten. Allerdings bedeutet die Nutzung von LIGA-Bauteilen, daß (wie oben ausgeführt) bei der Herstellung von Mikrosystemen, die einen elektronischen Schaltkreis einschließen, die Produkte geeignet miteinander verbunden werden müssen.

Bei der Durchführung mittel- und langfristiger F&E-Arbeiten arbeitet das KfK einerseits mit Universitäten, Hochschulen und anderen Forschungseinrichtungen (vgl. Abschnitt 7) zusammen, andererseits kooperiert das KfK zur raschen Industrialisierung der entwickelten Systeme mit verschiedenen Industrieunternehmen, die sich in der MST engagieren (vgl. Abschnitt 8). Auch ist das KfK sowohl an BMFT-Verbundprojekten als auch an EG-Projekten beteiligt. Abb. 4 zeigt schematisch die Verbindung der mikrosystemtechnischen Arbeiten des KfK zu den externen Arbeitsgruppen auf diesem Gebiet.

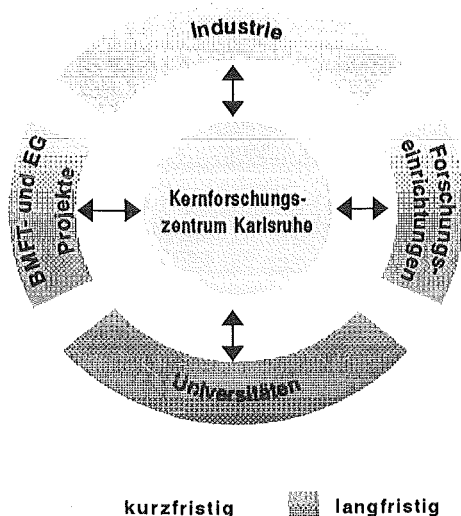


Abb. 4: Übersicht über die Kooperationen des KfK im Bereich der Mikrosystemtechnik mit externen Einrichtungen

7. Zusammenarbeit bei mittel- und langfristigen F&E-Arbeiten

Das KfK führt das Projekt Mikrosystemtechnik in enger Kooperation mit Universitäten und anderen wissenschaftlichen Einrichtungen durch. Besonders enge Verbindungen bestehen zwischen dem

KfK und der Universität Karlsruhe. Viele Leiter von KfK-Instituten üben gleichzeitig eine Professur an der Universität Karlsruhe aus und wurden gemeinsam berufen. Damit ergibt sich eine sehr enge Zusammenarbeit auf dem Gebiet der MST, und viele wissenschaftliche Arbeiten werden im Rahmen von Studien-, Diplom- oder Doktorarbeiten durchgeführt. Auch mit den Universitäten von Freiburg, Stuttgart und Tübingen bestehen vertragliche Kooperationen im Bereich MST. Darüberhinaus gibt es mit vielen anderen deutschen, aber auch ausländischen Universitäten umfangreiche Zusammenarbeiten. Diese beziehen sich weitgehend auf die Entwicklung einzelner Prozeßtechniken, während bei der Zusammenarbeit mit der Industrie die Entwicklung von Prototypen im Vordergrund steht.

Das KfK kooperiert zur Entwicklung von Mikrosystemen auch mit anderen Forschungseinrichtungen. Da viele Fraunhofer-Institute auf dem Gebiet der MST tätig sind, dort jedoch im Gegensatz zum KfK die Siliziumtechnik im Vordergrund steht, bietet sich eine Abstimmung der Forschungsprogramme und eine Kooperation an. Ein entsprechender Rahmenvertrag wurde inzwischen abgeschlossen.

8. Zusammenarbeit mit der Industrie

Die erfolgreiche Nutzung der Chancen der MST durch die Industrie setzt in den Unternehmen voraus, daß eine Reihe von Problemen gelöst wird, zu denen hier nur einige Schlagworte genannt werden sollen: Finanzierbarkeit risikoreicher Produktinnovation, Technologiemanagement, Systemdenken, Innovationsmanagement. Diese Probleme sind, insbesondere in ihrer Relevanz für kleine und mittlere Unternehmen (KMU), mehrfach ausführlich untersucht worden und müssen hier nicht erneut dargelegt werden. Es wird hierzu insbesondere auf den Entwurf zum "Programm Mikrosystemtechnik 1994 - 1999 im Rahmen des Zukunftskonzeptes Informationstechnik" (BMFT, Stand Dezember 1992) verwiesen. Gerade für KMU "wäre deshalb ein leistungsfähiges Netzwerk technischer Dienstleistungen auch unter Beteiligung von Großunternehmen und insbesondere Forschungseinrichtungen mit entsprechender Infrastruktur gefragt". Um seinen Beitrag zur Lösung der identifizierten Probleme zu leisten, integriert sich das KfK mit seinem Projekt Mikrosystemtechnik in die allgemeine forschungspolitische Zielsetzung des BMFT und richtet seine Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet voll auf eine industrielle Anwendung aus. Bei den Arbeiten des PMT ist zu unterscheiden (Abb. 5) zwischen:

- "Vorlaufforschung", im allgemeinen ohne direkte Industriebeteiligung,
- "Industrienaher Forschung", bzw. "Industriekooperation", d. h. Forschung im vorwettbewerblichen Stadium, bei der sich die Industrie an gemeinsamen Forschungsprojekten gleichgewichtig beteiligt, meist zur Herstellung erster Labormuster von Mikrosystemen, und
- "Auftragsforschung", die vom KfK im Auftrag der Industrie gegen entsprechende Zahlung durchgeführt wird.

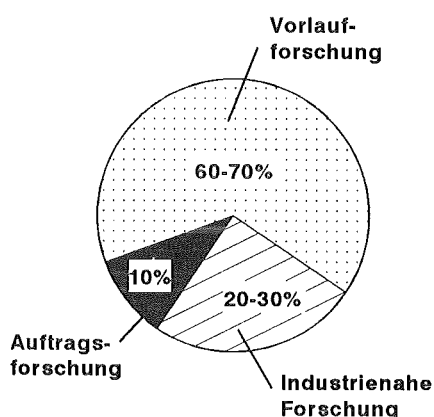


Abb. 5: Angestrebte Aufteilung der Arbeiten des KfK im Bereich Mikrosystemtechnik

8.1 Basis- und Vorlaufforschung

Die Arbeiten des KfK sind zum Teil langfristig angelegt und dienen der Erarbeitung neuer Erkenntnisse und der Erforschung neuer Technologien. Sie finden in engstem Kontakt mit der wissenschaftlichen Welt statt. Sie sind auch ein wesentlicher Bestandteil des deutschen Systems zur Ausbildung von Wissenschaftlern und Ingenieuren.

Der Aufsichtsrat des KfK hat dem dadurch Rechnung getragen, daß er 60-70 % der Arbeiten für die MST ausdrücklich diesem Bereich zugewiesen hat. Dessen Planung erfolgt nach der im KfK üblichen Prozedur jährlicher F&E-Programme und ist langfristig nicht im Detail vorhersagbar. Im Rahmen der Dreijahresplanung des Programmbudgets werden für diesen Teil der PMT-Arbeiten nur allgemeine Zielsetzungen angegeben. Auch die vom Aufsichtsrat des KfK eingesetzte Perspektiv-Kommission hat dies bei der Vorstellung ihrer Empfehlungen im KfK ausdrücklich betont: "Bis zum Ende des Jahrzehnts muß auf breiter

Basis ein Angebot an Mikrotechniken neuer, bisher nicht bekannter Möglichkeiten erarbeitet werden, die die Industrie befähigt, zu neuen Anwendungen aufzubrechen."

Im Rahmen dieser "Vorlaufforschung" werden in den einzelnen Instituten des KfK Forschungsarbeiten durchgeführt, die zum besseren Verständnis physikalischer, chemischer und informationstechnischer Prozesse beitragen. Langfristig sollen hieraus dann neue oder verbesserte Komponenten von Mikrosystemen bzw. vollständige Mikrosysteme entwickelt werden. Da eine sehr rasche Nutzung dieser Ergebnisse auf dem Markt nicht zu erwarten ist, wird sich im allgemeinen die Industrie hier nicht direkt beteiligen.

Von den vielen Arbeiten, die im KfK im Bereich der Vorlaufforschung durchgeführt werden, können hier nur wenige stellvertretend genannt werden. (Eine vollständige Darstellung kann dem F&E-Programm des KfK entnommen werden.)

- Entwicklung von multifunktionellen Dünnschichten für die Sensorik und Aktorik
- Untersuchungen von Gefüge und mechanischen Eigenschaften von Mikrostrukturen
- Untersuchung des Mikrogefüges, des Umwandlungsvermögens, der Herstellung und der Strukturierung von Formgedächtnislegierungen für die Aktorik
- Entwicklung neuer Verfahren (Sol-Gel Prozesse, Methanolverfahren, Sprühkalzination) zur Synthese von Mikrostrukturen aus Keramiken
- Entwicklung neuer Prüftechniken und Untersuchungsmethoden für Mikrostrukturen
- Entwicklung neuartiger Konzepte für Chemische Mikrosensoren zur Erhöhung der Selektivität, Stabilität und Sensitivität
- Neue Methoden der Aufbau- und Verbindungstechnik, z. B. Erweiterung des Anodischen Bondens auf neue Materialkombinationen
- Entwicklung von Rechenmethoden zur Analyse und Optimierung von mechanischen, optischen und chemischen Komponenten von Mikrosystemen
- Entwicklung neuer Konzepte für die Informationsverarbeitung in Mikrosystemen sowie die Simulation von komplexen Mikrosystemen.

8.2 Industriennahe Forschung

Der Aufsichtsrat des KfK erwartet, daß etwa 20 - 30 % der Aktivitäten des KfK auf dem Gebiet der MST als "industriennahe Forschung" durchgeführt werden, wobei die "Industrienähe" dadurch dokumentiert wird, daß sich die Industrie an gemeinsamen Forschungsarbeiten mit einem gleichgewichtigen Einsatz der Mittel beteiligt. Diese Form der Zusammenarbeit wird vom KfK auch in der MST schon seit langer Zeit praktiziert. So existieren mit vielen Industrieunternehmen entsprechende Kooperationen, in denen das Thema der Zusammenarbeit sowie der Beitrag der Partner vertraglich festgelegt wurden, so daß bereits heute der o.g. Anteil industriennahe Forschung weitgehend erbracht wird.

Die Arbeiten des KfK durch Beteiligung an Verbundprojekten können ebenfalls dieser "industriennahen Forschung" zugerechnet werden. Obwohl das KfK im allgemeinen bei BMFT-Verbundprojekten über seine Grundfinanzierung hinaus keine weiteren finanziellen Zuwendungen erhält, beteiligt sich das KfK an solchen Projekten, da einerseits die Möglichkeit gesehen wird, so die Fähigkeiten des KfK zu demonstrieren und die F&E-Arbeiten gezielt auf die Anforderungen der Industrie auszurichten, andererseits können Kon-

takte zu kompetenten Industrieunternehmen aufgebaut werden, die zur späteren Drittmittelwerbung genutzt werden können. Z. Z. arbeitet das KfK an folgenden BMFT-Verbundprojekten mit:

- AVT-KEO (Aufbau- und Verbindungstechnik als Basistechnologie für elektrische und optische Mikrosysteme),
- MST-MW (Methoden- und Werkzeugentwicklung für den Mikrosystementwurf),
- Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen,
- MINOP (Mikrosystemtechnik zum Einsatz in der minimalinvasiven neurochirurgischen Operationstechnik).

Die Beteiligung an weiteren BMFT-Verbundprojekten ist in Vorbereitung.

8.3 Direkte Auftragsforschung

Als Großforschungseinrichtung hat das KfK sowohl nach allgemeinem Verständnis als auch nach Satzung und Geschichte eine andere Rolle und Aufgabe als die Fraunhofer-Gesellschaft und ihre Institute. Daher wurde bisher im Bereich der MST vom KfK kaum direkte Auftragsforschung für Industrieunternehmen durchgeführt. Der Aufsichtsrat des KfK erwartet nun, daß das KfK ent

Arbeitsgebiet	Ressourcen	Institute
Herstellungsmethoden für Mikrostrukturen	LIGA (Strukturierung mit Synchrotronstrahlung, Mikrogalvanik, Reaktionsgießverfahren, Spritzgießen, Vakuumprägen), anwendbar auf Metalle, Kunststoffe, Keramiken Elektronenstrahlolithographie Lichtoptische Strukturierungsmethoden (Photolithographie) Bearbeitung mit Teilchenstrahlen (Ion milling) Plasmaverfahren (RIE, Plasmaätzen, PECVD) Aufdampfen, Sputterdeposition, Si-Ätzen Mechanische Mikrofertigung mit Formdiamanten Feinwerktechnische Einrichtungen	IMT, IMF, HIT, HVT
Herstellungsmethoden für die Materialien der Mikrosystemtechnik	Dünnschichttechnologie Pulvermetallurgische Verfahrenstechniken Werkstoffprozeßtechnik Laser- u. Ionenstrahltechniken	IMF, IMT, IRCh, HIT
Entwurfs- und Simulationstechniken	Software-Umgebung für Entwicklung & Simulation von Mikrosystemen (FEM, CAD, CAO (Computer Aided Optimization)) Simulationstechniken	IAI, IMF, HIT, IMT
Analytik und Prüftechniken	REM, TEM, STM, AFM (Hochauflösende Mikroskopie) AES, SIMS, SNMS (Referenzanalytik, Validierung) COSMOS-2-D (Optische Qualitätssicherung mit Bildverarbeitungsmethoden) 3D-Bildverarbeitung DMTA, HPLC, UV-VIS-FTIR (Oberflächenanalytik mit hoher lateraler Auflösung) RBS	IAI, IMF, IRCh, HIT, IMT
Aufbau und Test von Mikrosystemen	Aufbau- und Verbindungstechniken (Anod. Bonden, Klebetechniken für verschiedene Materialien, Drahtbonden) Lasergestützte Aufbau-, Trenn- und Verbindungstechniken Mikrohandhabungstechnik Versuchseinrichtung zur Erprobung von Mikrosystemen	IAI, IMF, HIT, IMT

Tab. 1: Ressourcen des KfK auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik

gegen seiner traditionellen Rolle in Zukunft 10 % seines Aufwands für die MST aus Auftragsforschung und ähnlichen Einnahmen deckt. Daher wird das KfK im Bereich der MST auch im Auftragsverfahren Forschungsarbeiten für Industrieunternehmen durchführen und so seine Kenntnisse und seine begrenzten Fertigungsmöglichkeiten der Industrie, besonders den KMU, zur Verfügung stellen.

Solche Aufträge können z. B. die Entwicklung von kompletten Mikrosystemen oder Subsystemen darstellen. Aber auch einzelne Teilschritte oder unterstützende Arbeiten zu in der Industrie laufenden Entwicklungen kann das KfK übernehmen. Hierzu stehen seine umfangreichen Ressourcen zur Verfügung, die in Tabelle 1 zusammengestellt sind.

So ist das KfK bereit, für Industrieunternehmen oder andere Kooperationspartner z. B. Aufträge zur Herstellung von Mikrostrukturen nach Vorgabe der Auftraggebers auszuführen, um so die Industrie zu unterstützen, da die herzustellenden Mikrostrukturen z. Z. oft noch nicht von einem am Markt operierenden Unternehmen geliefert werden können. Das KfK wird auch seine Organisationsstruktur so einrichten, daß Aufträge (auch "Kleinaufträge" von z. B. KMUs) rasch und zügig abgewickelt werden können.

9. Leitprojekte und Demonstratoren

9.1 Definition

Um seine Fähigkeiten im Bereich der MST deutlich zu demonstrieren, besonders was die Herstellung von komplexen Mikrosystemen betrifft, hat das KfK beschlossen, "Leitprojekte" zu definieren und innerhalb dieser Leitprojekte "Demonstratoren" herzustellen. Dabei sind Leitprojekte ausgewählte, übergeordnete Anwendungsgebiete, in denen vom KfK entwickelte Mikrosysteme eingesetzt werden können. Für die Planungsperioden 1993 - 1995 wurden vier Leitprojekte definiert:

- Mikrosysteme für Meß- und Regeltechnik
- Mikrosysteme für Kommunikationstechnik
- Chemische Mikroanalyzesysteme
- Mikrosysteme in der Medizintechnik (insbes. MIC)

Demonstratoren dazu sind Prototypen von Mikrosystemen, die mindestens zwei verschiedene Komponenten aus den Bereichen Mikromechanik, Mikrooptik, Chemische Mikrosensorik, Mikroelektronik enthalten und kritische Dimensionen im

Mikrometerbereich aufweisen. Diese Demonstratoren werden vom KfK entworfen, entwickelt, hergestellt und getestet.

9.2 Auswahlkriterien

Bei der Auswahl der Demonstratoren, die unmittelbar nach Gründung des Projekts erfolgte, wurde von den z.Z. im KfK vorhandenen Technologien ausgegangen, um innerhalb von drei Jahren funktionstüchtige Labormuster vorstellen zu können.

Bei der Auswahl der Demonstratoren aus vielen von den Instituten vorgeschlagenen Alternativen war zunächst deren institutsübergreifender Charakter maßgeblich. Weiterhin war wichtig, daß auch die zur Anwendung kommenden Technologien weiterentwickelt werden und diese dann eine sehr breite Anwendung finden können.

Das Hauptkriterium für die Auswahl der Demonstratoren war jedoch das Potential für eine Zusammenarbeit mit der Industrie; alle Vorschläge, bei denen schon konkrete Kooperationen mit Industriefirmen bestehen (bzw. für Teilkomponenten) wurden schließlich auch als Demonstratoren ausgewählt.

9.3 Demonstratoren der ersten Generation

In den vier Leitprojekten wurden zunächst folgende Demonstratoren der ersten Generation ausgewählt, die Ende 1995 als funktionstüchtige Labormuster vorliegen sollen. Ihre ausführliche Beschreibung erfolgt durch die Beiträge im Teil "Demonstratoren" dieses KfK-Berichts, sie werden deshalb hier nur kurz zusammenfassend dargestellt:

3-D-Beschleunigungssensor

(Leitprojekt Mikrosysteme für Meß- und Regeltechnik)

Ein Array von Beschleunigungssensoren, die in LIGA-Technik hergestellt werden, ermittelt die Beschleunigung in allen drei Raumrichtungen, eine spezielle Analog-Elektronik mißt die kapazitiven Signaländerungen und ein digitaler Schaltkreis wertet diese, z. B. unter Berücksichtigung von Selbsttests, aus.

Optischer Schalter

(Leitprojekt Mikrosysteme für Kommunikationstechnik)

Ein in LIGA-Technik gefertigter elektrostatischer Aktor bewegt einen Spiegel, so daß Lichtstrahlen in ihrem Weg verändert werden können. Dies wird in der optischen Datenübertragung benötigt, um z. B. defekte Komponenten in einer Übertragungs-

leitung zu überbrücken. Dieser Demonstrator ist der KfK-Beitrag zu dem BMFT-Verbundprojekt AVT-KEO (Aufbau- und Verbindungstechnik als Basistechnologie für elektrische und optische Mikrosysteme).

Optischer Schadstoffanalysator

(Leitprojekt Chemische Mikroanalysesysteme)

Über ein System aus Pumpen und Ventilen (Mikromechanik) werden die zu analysierende Flüssigkeit oder entsprechende Spül- und Eichflüssigkeiten einer Küvette mit optochemischen Sensoren (Chemische Mikrosensorik) zugeleitet. Durch chemische Reaktionen in dieser Küvette ändert sich die Absorption der von einer Lichtquelle ausgehenden Strahlung. Diese wird mit einem miniaturisierten Gitterspektrometer (Mikrooptik) direkt nachgewiesen. Eine angeschlossene Datenverarbeitung analysiert das Spektrum, vergleicht es mit Referenzspektren und gibt direkt die Konzentration der gewünschten (Schad)stoffe aus (Mikroelektronik).

Analytisches Mikrosystem zur Detektion organischer Gase

(Leitprojekt Chemische Mikroanalysesysteme)

Ein Array von Oberflächenwellen-Sensoren, dessen Einzelsensoren durch spezielle Beschichtungen für unterschiedliche Gase empfindlich sind, detektiert organische Gase. Ein Mikrofluid-Handhabungssystem (Pumpe, Ventile) erlaubt Meß- und Kalibrierzyklen, die von einer speziellen Elektronik gesteuert und ausgewertet werden.

Elektrolyt-Analysator

(Leitprojekt Mikrosysteme in der Medizintechnik)

Dieses Mikrosystem dient zur Analyse von Körperflüssigkeiten (z. B. Konzentration von H^+ - oder Na^+ -Ionen) und arbeitet mit einem Array von ionensensitiven Feldeffekttransistoren (ISFETs). Das Sensorarray ist ebenfalls mit einem Mikrofluid-Handhabungssystem und einer speziellen Elektronik zur Datenauswertung verbunden.

Experimenteller Telemannipulator für die Minimal-Invasive Chirurgie

(Leitprojekt Mikrosysteme in der Medizintechnik)

Ein Telemannipulatorsystem für den MIC-Einsatz soll den Chirurgen bei der Durchführung von Operationen unterstützen, in dem die operativen Eingriffe über Endoskope ferngesteuert durchgeführt werden. Damit ergibt sich eine bessere Zugänglichkeit zum Operationsraum (z. B. Bauchraum) sowie eine wesentlich verbesserte Handhabung der Instrumente. Dieser Demonstrator schließt die Erfassung und Übertragung der ausgeübten Kräfte (Sensorik) und die Simulationstechniken mit ein.

9.4 Demonstratoren der zweiten Generation

Neben den o. g. Demonstratoren der "ersten Generation", deren Fertigstellung in drei Jahren weitgehend abgeschlossen sein soll, arbeitet das KfK auch an Mikrosystemen mit längerfristiger Zielsetzung, die eine höhere Komplexität und einen höheren Schwierigkeitsgrad aufweisen. Teilweise müssen zu deren Realisierung im Rahmen der Vorlaufforschung noch Grundlagen erarbeitet werden.

Es können hier nur einige dieser Mikrosysteme aufgeführt werden, die erst längerfristig zum Tragen kommen werden:

Intelligenter Instrumententräger

Dieses System soll eine Reihe von Sensoren und Aktoren auf einer flexiblen Endoskopspitze vereinigen, in-situ Analysen der Umgebung sowie ggf. "operative" Eingriffe vornehmen.

Taktile Sensor

Bei der Minimal-Invasiven Chirurgie fehlt dem Operateur bisher vor allem die taktile Information. Durch taktile Sensoren sollen hier die notwendigen Daten aufgenommen und in für den Chirurgen geeigneter Form dargestellt werden.

Mikrodosiersystem

Ein aus Pumpen, Ventilen, Vorratsbehältern sowie verschiedenen Sensoren und einer Datenverarbeitung bestehendes System gibt entsprechend der Sensorsignale eine Flüssigkeit dosiert ab. Langfristig soll dieses System auch als implantierbares Mikrosystem ausgelegt werden.

Thermische Linse

Mit dem im KfK entwickelten, auf dem Prinzip der Near-Field Thermischen Linse beruhenden, photothermischen Meßverfahren können einerseits geringste Spuren von Pestiziden und anderen Umweltschadstoffen ohne Voranreicherung, andererseits sehr hohe Konzentrationen z. B. von Textilfarbstoffen ohne Verdünnung bestimmt werden. Diese Methode soll miniaturisiert werden, um einen breiten Einsatz in der Analysetechnik zu ermöglichen.

Evanescent Wave Sensor und NIR-Spektrometer

Für die Messung unpolarer organischer Schadstoffspezies können Meßsonden eingesetzt werden, die auf dem Prinzip des evaneszenten Feldes beruhen. (Die nachzuweisenden organischen Spezies dringen in einen vom Licht durchstrahlten polymerbeschichteten Lichtleiter ein und verändern so die Lichtabsorption, die in einem direkt angeschlossenen Spektrometer, das im Nahen Infrarot (NIR) arbeitet, nachgewiesen wird.) Die Miniaturisierung dieses Systems, dessen Funk-

tionsprinzip makroskopisch bereits nachgewiesen wurde, soll durchgeführt werden, so daß ein kostengünstiges Analysegerät entsteht.

Herzkatheter

Es sollen bei diesem Demonstrator Komponenten für einen Herzkatheter entwickelt werden: eine Aktoreinheit zum Entfernen von Kalkablagerungen, ein Positioniersystem zur radialen Ausrichtung des Katheters in der Vene und ein Beobachtungssystem. In Kooperation mit anderen Forschungseinrichtungen und Industriefirmen entwickelt KfK/IMT die beiden ersten Komponenten. Es werden medizinkompatible Aktoreinheiten basierend auf einem fluidischen Antrieb realisiert. Außerdem wird ein Ventilsystem aufgebaut werden, mit dem mehrere Ballons, die am Katheter angebracht sind, kontrolliert aufgeblasen werden können. Die Arbeiten sind Bestandteil eines EG-Projekts im Rahmen von ESPRIT "Integration von Mikrokomponenten in einem intravenösen Herzkatheter-System".

10. Ausblick

Mehrere, kürzlich erschienene Marktanalysen prognostizieren für mikrosystemtechnische Produkte ein Marktvolumen, das den jetzigen Halbleiter-Siliziummarkt übertreffen wird. Die hierzu noch notwendigen Entwicklungsarbeiten sind dabei eine sehr anspruchsvolle Aufgabe, denn das Potential der MST kann nur durch eine breite, interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener natur- und ingenieurwissenschaftlicher Disziplinen voll erschlossen werden. In vielen Bereichen werden auch neue wissenschaftliche Erkenntnisse benötigt. Für derartige Aufgaben ist eine Großforschungseinrichtung wie das KfK mit seinen auf verschiedenen Fachdisziplinen arbeitenden Instituten und der fachübergreifenden Projektarbeit besonders geeignet. Das KfK arbeitet an der Entwicklung der Mikromechanik, Mikrooptik, Chemischen Mikrosensorik und Mikroaktorik, und - mit Hilfe mikroelektronischer Bauteile - an der Integration dieser Komponenten zu anspruchsvollen teilautonomen Mikrosystemen.

Auch werden im KfK wichtige Fragen der Produktionstechnik, des Systementwurfs und der Materialwissenschaft bearbeitet. Im Rahmen des vom KfK mittel- und langfristig ausgerichteten F&E-Programms werden grundlegende Basisforschungen vorangebracht. Gleichzeitig ist es aber auch das erklärte Ziel des KfK, umsetzbare Teilergebnisse kurzfristig und kontinuierlich für die industrielle Nutzung bereitzustellen. Durch die schon vorhandenen und durch zukünftige Industriekooperationen wird das KfK sein Forschungsprogramm auf die Bedürfnisse der Industrie ausrichten und Industriefirmen, besonders KMUs, mit den im KfK vorhandenen Kenntnissen und Ressourcen bei der Entwicklung von Mikrosystemen unterstützen.

11. Literaturangaben

Es wird auf die in diesem KfK-Bericht folgenden wissenschaftlich-technischen Beiträge und die dort angegebene Literatur verwiesen.

Weitere Informationen, Angebote

Sollten Sie weitere Fragen bezüglich der Leistungen haben, die das KfK im Bereich Mikrosystemtechnik für Sie durchführen könnte, wenden Sie sich bitte an:

Projekt Mikrosystemtechnik
- Projektleitung (PMT-PL)-
Kernforschungszentrum Karlsruhe
Postfach 3640
76021 Karlsruhe
Telefon: 07247-822777
Telefax: 07247-825579

**Darstellung der am Projekt Mikrosystemtechnik
beteiligten Institute**

Die LIGA-Technik und ihr Potential für die industrielle Anwendung

W. Menz

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Die LIGA-Technik (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung, Kunststoff Abformung) wurde im Kernforschungszentrum Karlsruhe im Laufe der letzten Jahre ständig erweitert, verbessert und mit anderen Technologien kombiniert. Inzwischen konnten anhand zahlreicher Prototypen die Vorteile der LIGA-Technik gegenüber anderen Mikrostrukturierungstechniken sehr eindrucksvoll nachgewiesen werden. Insbesondere bei Mikroaktoren und mikrooptischen Anwendungen zeigt die LIGA-Technik unbestreitbare Vorteile. Durch die Materialvielfalt, die freie laterale Strukturierbarkeit und die großen Strukturhöhen können Spezifikationen bezüglich Leistungsdichte, Kraftübertragung und Lebensdauer erfüllt werden, die den Einsatz für industrielle Anwendungen interessant werden lassen. Am Beispiel der Minimal-Invasiven Therapie wird das Potential der Mikrosystemtechnik aufgezeigt.

1. Einleitung

Im Kernforschungszentrum begann die Entwicklung zur Mikrostrukturtechnik bereits Anfang der achtziger Jahre, als man im Rahmen der Arbeiten zur Isotopentrennung nach dem Trenndüsenverfahren die LIGA-Technik entwickelte [1].

Wenn auch die LIGA-Technik in Zusammenhang mit dem Trenndüsenverfahren nie zu einem großtechnischen Einsatz kam, ist doch diese Technologie von vornherein im Hinblick auf eine wirtschaftliche Massenfertigung konzipiert worden. Dieser Aspekt wurde in den folgenden Jahren noch weiterverfolgt und ausgebaut. Mit der Firma MicroParts, Dortmund, besteht ein Lizenz- und Kooperationsabkommen zur wirtschaftlichen Verwertung der LIGA-Technik.

In den folgenden Kapiteln sollen zunächst die Prinzipien der LIGA-Technik, ihre technologischen Erweiterungen und beispielhafte Prototypen für industrielle Anwendungsfelder vorgestellt werden. Nachfolgend wird dann die Mikrosystemtechnik in ihren wesentlichen Eigenschaften diskutiert. In allen Betrachtungen wird die industrielle Anwendung vorrangig gegenüber grundsätzlichen Erwägungen behandelt.

2. Die LIGA-Technik

Alle Mikrosysteme basieren auf einer Mikrostrukturtechnik, mit der Mikrokomponenten hergestellt werden können, die später zu Systemen gefügt werden. In der Mehrheit der Forschungslabors in aller Welt wird die Silizium-Technik der Mikro-

elektronik als Basistechnologie verwendet, ergänzt durch weitere Verfahren, mit denen die dritte Dimension erschlossen wird.

Mit der LIGA-Technik wurde ein grundsätzlich anderer Ansatz gewählt, der gegenüber der Silizium-Technik ein größeres Spektrum von Anwendungen erlaubt und somit eine wichtige Alternative, aber auch eine Ergänzung zu dieser, darstellt.

Wenn auch die Grundprozesse heute beherrscht werden, bedarf das Verfahren noch ständiger Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen, um Varianten und Verbesserungen für neue Strukturen und Prototypen zu erarbeiten. In allen seinen Varianten erreicht das LIGA-Verfahren etwa die Komplexität eines Halbleiterprozesses, wenn man bedenkt, daß mehr als 250 Einzelprozesse entwickelt, optimiert und dokumentiert werden müssen.

2.1 Röntgentiefenlithographie

Der zentrale Prozeßschritt des LIGA-Verfahrens ist die Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung. Nur durch diese Technik ist es möglich, Strukturen herzustellen, die gleichzeitig Strukturhöhen von bis zu einem Millimeter und laterale Detailabmessungen im Mikrometer- oder sogar Submikrometerbereich aufweisen.

Für die Herstellung der präzisen Mikrostrukturen mit dem typischen hohen Aspektverhältnis ist eine energiereiche und parallele Röntgenstrahlung erforderlich, wie sie von Synchrotronstrahlungsquellen ausgesendet wird [2].

Eine zweite wichtige Voraussetzung, um solche Strukturen herstellen zu können, ist die Verfügbarkeit einer kontrastreichen Maske. Da Röntgenstrahlen je nach Material unterschiedlich stark absorbiert werden, muß eine solche Röntgenmaske für die Tiefenlithographie auf einer möglichst dünnen Membranträgerfolie eines Materials niedriger Ordnungszahl aufgebaut werden. Die Herstellung von Membranträgerfolien aus Titan wurde im Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) soweit entwickelt und optimiert, daß die Maskentechnik auf diesen Trägern routinemäßig erfolgt.

Die Strukturinformation der Maske ist in einem Absorber aus möglichst schwerem, die Röntgenstrahlung gut abschirmendem Material wie Gold enthalten und muß auf der Membranträgerfolie mechanisch stabil aufgebracht werden. Dazu eignet sich die Galvanotechnik ganz besonders gut - vorausgesetzt man beherrscht die Mikrostruktur-Galvanik [3, 4]. Die Herstellung der Masken ist der personal- und kostenintensivste Prozeßabschnitt in der Prozeßabfolge einer Mikrostruktur.

Durch Schattenprojektion der Absorberstruktur in eine Kunststoffschicht (Polymethylmethacrylat, PMMA) mit Synchrotronstrahlung wird der bestrahlte Teil des Kunststoffs so "geschädigt", daß er mit einem geeigneten Lösungsmittel entfernt werden kann und nur die unbestrahlte (und somit unlösliche) "Primärstruktur" zurückbleibt. Normalerweise ist diese Primärstruktur nur ein Zwischenprodukt auf dem Wege zu einer metallischen Mikrostruktur oder einem Abformwerkzeug für die Massenfertigung von hochwertigen Mikrostrukturen.

2.2 Galvanik

Die Untersuchung der speziellen Gegebenheiten bei der galvanischen Metallabscheidung in den winzigen Mikrostrukturen, wie sie für das LIGA-Verfahren typisch sind, nimmt heute einen wichtigen Platz in der Verfahrensentwicklung ein. Schwerpunkte der Forschung sind Arbeiten zur Bestimmung der Transportvorgänge von Metall-Ionen in den engen Kanälen oder tiefen Löchern einer LIGA-Mikrostruktur. Gegenwärtig sind mit dem LIGA-Verfahren Mikrostrukturen aus Nickel, Kupfer und Gold, sowie aus Nickel-Kobalt- und Nickel-Eisen-Legierungen herstellbar [3, 4, 5]. Technisch von großer Bedeutung für das LIGA-Verfahren ist die Herstellung von Abformwerkzeugen für die Kunststoffabformung [6].

2.3 Kunststoffabformtechnik

Die Kunststoffabformtechnik ist für das LIGA-Verfahren der Schlüssel zur Serienfertigung bzw. zur Massenproduktion und somit zu einem wirtschaftlichen, industriellen Einsatz.

Die Kunststoffabformtechnik benutzt Abformwerkzeuge in LIGA-Technik, die durch Galvanoformung hergestellt wurden. Die Entwicklung der Herstellungsverfahren für solche Abformwerkzeuge ist ein eigenes und sehr wichtiges Arbeitsgebiet des Instituts. Mit ihrer Hilfe lassen sich Tausende von Kopien der Primärstruktur aus unterschiedlichen Kunststoffen fertigen [6, 7].

Die Materialpalette für industriell gefertigte Mikrostrukturen endet jedoch nicht bei den Kunststoffen. Die Mikrogalvanik in Verbindung mit abgeformten Strukturen erlaubt die Verwendung verschiedener Metalle und Metallegierungen. Mit Hilfe der Methode der "verlorenen Formen" lassen sich auch keramische Mikrostrukturen herstellen.

2.4 Weiterentwicklung der Prozeßtechnik

Die Entwicklung spezieller Herstellungstechniken für das LIGA-Verfahren nimmt einen breiten Raum im Forschungsspektrum des IMT ein. Obwohl mit den bereits erarbeiteten Varianten eine Vielzahl von Strukturen hergestellt wurde, ist das IMT bestrebt, den Prozeß zu optimieren und weiterzuentwickeln, um die Defektrate zu vermindern und einen stabilen und sicheren Standardprozeß zur industriellen Fertigung zur Verfügung stellen zu können.

Durch die Entwicklung einer sogenannten Opferschichttechnik konnten bewegliche Strukturen in LIGA-Technik realisiert werden [8]. Dabei wird das Substrat mit einer strukturierten Schicht aus Titan versehen, bevor der eigentliche LIGA-Prozeß ausgeführt wird. Nach Fertigstellung der LIGA-Struktur wird die Titanschicht als Opferschicht unter der Mikrostruktur selektiv naßchemisch geätzt. Dadurch kann die Mikrostruktur in einzelnen Bereichen vom Substrat gelöst werden. Teile der Struktur lassen sich somit elastisch gegenüber anderen Bereichen der Struktur aufhängen, wie etwa die seismische Masse eines Beschleunigungssensors. Teilkomponenten lassen sich aber auch vollständig von der übrigen Struktur lösen. Diese Komponenten können um eine feststehende Achse rotieren und bilden das Grundkonzept für Mikroturbinen und Mikromotoren. Die Opferschichttechnik stellt somit die technologische Basis von Sensor- und Aktorentwicklungen dar.

Um auch Strukturen herstellen zu können, die in der dritten Dimension einen veränderlichen Querschnitt aufweisen, wurde die Röntgentiefenlithographie mit verschiedenen anderen Strukturierungsmethoden kombiniert. So konnten durch die Verbindung mit der Abformtechnik gestufte Strukturen realisiert werden [9].

Für die Prüfung der Materialeigenschaften von Mikrostrukturen müssen wegen der geringen Abmessungen spezielle Verfahren erst entwickelt werden. Damit beschäftigt sich eine Arbeitsgruppe, die einerseits die Materialeigenschaften von Anordnungen von Mikrostrukturen (Arrays) mit makroskopischen Verfahren vermisst und andererseits Prüfmethoden in Mikrotechnik entwickelt, die den zu prüfenden Strukturen in den Dimensionen angemessen sind. Die "Prüfmaschine auf dem Chip" wird Erkenntnisse darüber vermitteln, ob das Verhalten von Materialien in Mikrometer-Dimensionen noch mit den klassischen, makroskopischen Gesetzmäßigkeiten zu formulieren ist [10].

Die LIGA-Technik erweist sich als besonders geeignet zur Herstellung von Mikroaktoren. Allein die große Materialpalette erlaubt die Anwendung vielfältiger Aktorprinzipien. Die Galvanotechnik leistet hier Beiträge durch die Entwicklung von Abscheideverfahren für weichmagnetische Nickel-Eisen-Legierungen (PERMALLOY) in Mikrostruktur-Dimensionen [5,11] oder für spezielle Mehrkomponenten-Legierungen, die eventuell Formgedächtniseigenschaften zeigen.

Für die Darstellung von Mikrosystemen muß man mikrooptische oder mikromechanische mit mikroelektronischen Komponenten integrieren. Unser Ziel ist eine quasi-monolithische Integration der verschiedenen Techniken, bei der direkt vertikal über der mikroelektronischen Schaltung und mit funktionaler Kopplung an deren Kontakte die LIGA-Mikrostruktur mit mechanischen oder optischen Funktionen aufgebracht wird. Der heutige Stand erlaubt uns die Aussage, daß auf diese Weise einfache Mikrosysteme hergestellt werden können, wie aus Abb. 1 ersichtlich ist [12].

3. Prototypen von Mikrostrukturen in LIGA-Technik

Jede Technologie ist so gut wie ihre Produkte. Jede noch so brillante wissenschaftlich-technische Idee muß sich irgendwann einmal als industrielles Produkt bewähren. Dazu müssen Prototypen aufgebaut und unter möglichst realistischen Bedingungen hinsichtlich ihres späteren Verwendungszweckes getestet werden. Viele Vorschläge, die als Konstruktionszeichnung beeindruckend wirken,

verschwinden im Papierkorb der technischen Entwicklung, wenn es um Realisierung unter industriellen Spezifikationen, Zusammenspiel mit anderen Komponenten oder Lebensdauertest geht. Alle unsere "Produkte", die im folgenden aufgezeigt sind, wurden aufgebaut und unter definierten Bedingungen über längere Zeit getestet.

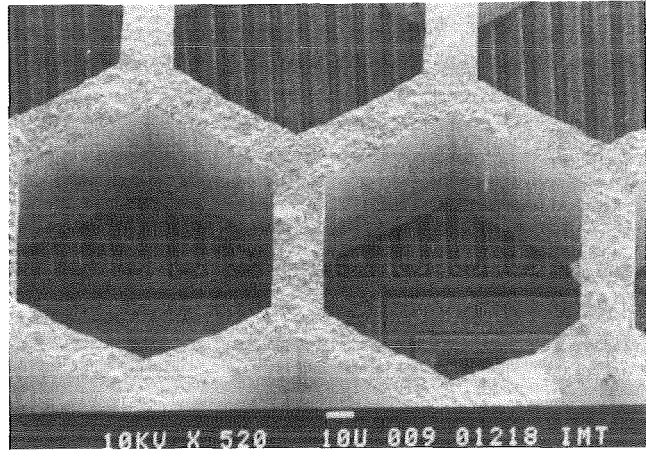


Abb. 1: LIGA-Struktur, die durch Prägetechnik auf einem integrierten Schaltkreis abgeformt wurde.

3.1 Flexible Mikrostrukturen

Die erste bewegliche LIGA-Struktur, die mit Hilfe der Opferschichttechnik hergestellt wurde, ist ein Beschleunigungssensor [13]. Zwischen zwei fest mit dem Substrat verbundenen Elektroden befindet sich eine an einer Blattfeder aufgehängte seismische Masse. Bei einer Beschleunigung verändern sich die Spaltbreiten zwischen Elektroden und seismischer Masse, und die damit verbundene Kapazitätsänderung kann mittels einer Brückenschaltung gemessen werden.

Durch die freie Geometriewahl kann über das Design eine Temperaturkompensation des Sensors erreicht werden. Durch die geringen Abmessungen und die dadurch mögliche hohe Packungsdichte können Arrays von Beschleunigungssensoren gleichzeitig hergestellt werden, so daß sich einerseits verschiedene Beschleunigungsrichtungen, andererseits ein breiter Beschleunigungsbereich durch in der Empfindlichkeit gestufte Sensoren abdecken läßt. Die Abb. 2a zeigt das Detail eines Beschleunigungssensors in LIGA-Technik, Abb. 2b den Prototypen eines Mikrosystems mit Sensor-Array, Verstärkern und Signalverarbeitung [14].

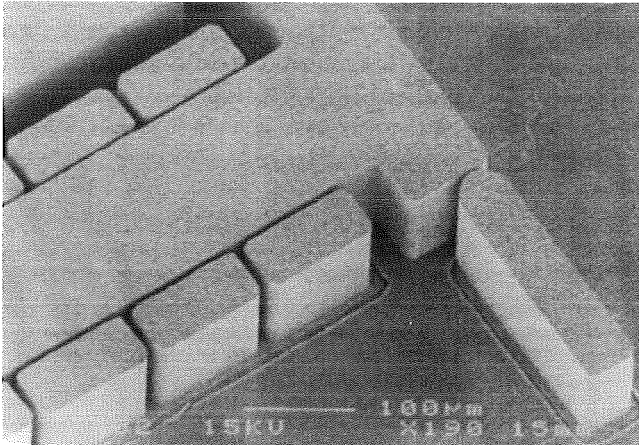


Abb. 2a: Detail eines Beschleunigungssensors. Die seismische Masse (Bildmitte) ist von feststehenden Gegenelektroden eingerahmt. Der Spaltabstand beträgt $3\ \mu\text{m}$ bei einer Strukturhöhe von $100\ \mu\text{m}$. Die Struktur rechts unten dient als Überlastanschlag.

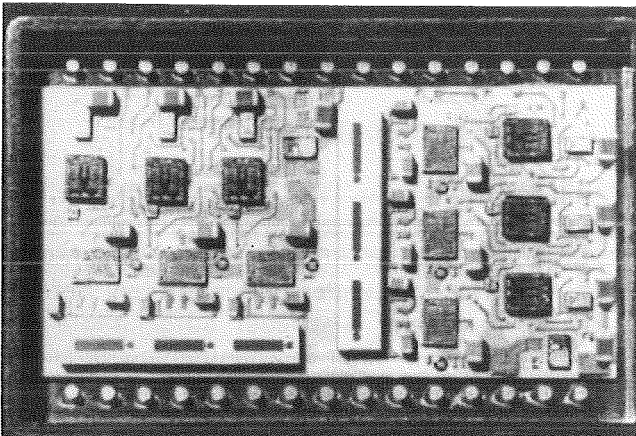


Abb. 2b: Photo eines Mikrosystems zur Messung der Beschleunigung in zwei Dimensionen.

3.2 Rotierende Mikrostrukturen

Vollständig frei bewegliche Mikrostrukturen wurden in Form einer mit Gas angetriebenen Mikroturbine und eines elektrostatischen Mikromotors realisiert [15, 16]. Mittels der Mikroturbinen konnten Erfahrungen über die Tribologie im allgemeinen und über das im LIGA-Prozeß verwendete Material im speziellen gesammelt werden. Wegen der geringen Masse der Turbinenläufer können sie in weniger als sechs Umdrehungen von Stillstand auf 2500 Umdrehungen pro Sekunde beschleunigt werden. Bei verschleißfesten Materialien wie Nickel konnte eine

Laufzeit von etwa 100 Millionen Umdrehungen erreicht werden, was einer Lebensdauer von über 10 Stunden entspricht. Mögliche Anwendungen solcher Turbinen sind in der Bearbeitung sehr feiner biologischer Strukturen in medizinischen Bereich zu sehen.

Wie bereits an der Mikroturbine zu erkennen ist, liegt die Stärke des LIGA-Verfahrens aufgrund der hohen Strukturhöhe und damit der relativ geringen Bruchwahrscheinlichkeit der Mikrostrukturen in der Mikroaktorik. Verschiedene Prinzipien zur Anregung sind dabei denkbar.

Das Prinzip eines elektrostatischen Mikromotors beruht auf der anziehenden Kraft zweier gegenpolig geladener Elektroden, die einen Kondensator bilden. Stehen sich zwei Elektroden versetzt gegenüber, so ziehen sich die beiden Platten nicht nur in Richtung ihrer Normalen an (Antriebskomponente senkrecht zu den Oberflächen), sondern bewegen sich auch so lange parallel zur Oberfläche, bis sie

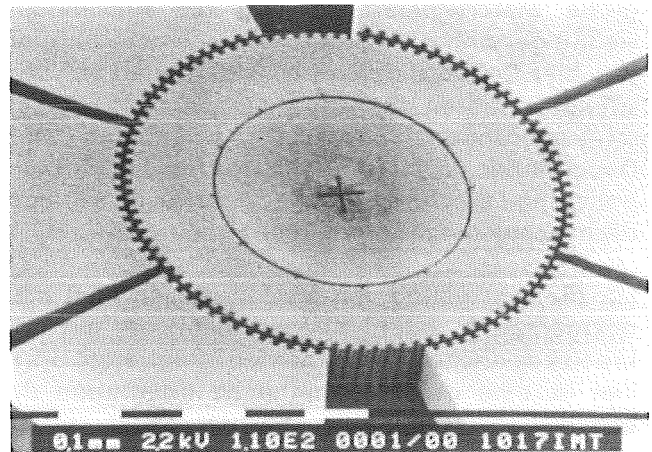


Abb. 3 Elektrostatischer Mikromotor in LIGA-Technik. Der Rotor hat einen Durchmesser von etwa $500\ \mu\text{m}$ und eine Höhe von $100\ \mu\text{m}$. Die "Zähne" an Rotor und Stator dienen als Kapazitäten, die bei Versatz zueinander eine tangentielle Kraft aufbringen.

sich genau gegenüberstehen (Antriebskomponente tangential zu den Oberflächen). Versieht man daher einen Rotor und einen Stator mit partiell gegeneinander versetzten Elektroden, so kann die tangentielle Antriebskomponente zur Erzeugung eines Drehmoments bzw. einer Rotation ausgenutzt werden. Abb. 3 zeigt eine Aufsicht auf einen LIGA-Motor. Durch eine geeignete Wahl aller Geometrieparameter kann erreicht werden, daß der Rotor nicht auf der Welle gleitet, sondern abrollt, was zu

einer deutlichen Verringerung der Reibung zwischen Rotor und Welle führt.

3.3 Fluidische Elemente

Die Herstellung von fluidischen Elementen in LIGA-Technik erweitert die Anwendungsmöglichkeiten in der Mikrosystemtechnik erheblich, da neben den elektrischen, optischen und mechanischen Komponenten auch pneumatische und hydraulische Prinzipien realisiert werden können.

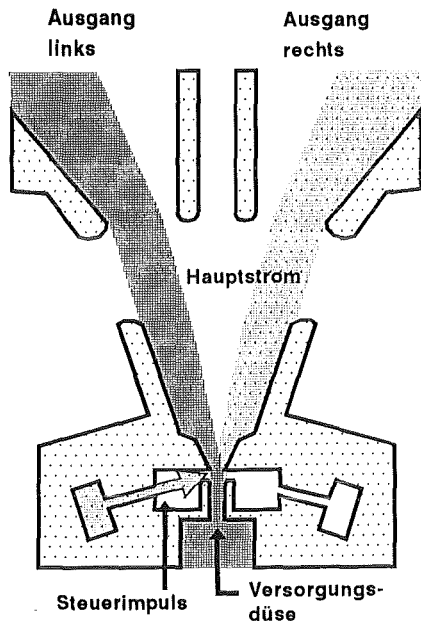


Abb. 4a Schema eines bistabilen Wandstrahl-Elementes. Der Fluidstrom legt sich zunächst stochastisch an eine der beiden Wandführungs-Elemente (Coanda-Effekt) und bleibt dort gegen kleine Störungen stabil stehen. Durch einen Steuerimpuls kann der Fluidstrom auf das zweite Wandführungs-Element umgesteuert werden.

Abb. 4a zeigt das Prinzip eines bistabilen Wandstrahlelementes, bei dem ein fluidischer Strom, der sich stabil an eine der beiden Wandelemente oberhalb der Düse anlegt und gegen kleine Störungen in dieser Position verharrt, durch Impulse aus einem Steuerkanal "umgeschaltet" werden kann. Der Fluidstrom nimmt dann die neue Position ein und verhält sich wiederum stabil gegen kleine Störungen. Durch Aneinanderreihung unterschiedlicher fluidischer Elemente kann man fluidische Verstärkungen bis zu einem Faktor 1000 erreichen, durch geeignete Rückkopplung auf die Steuerleitungen sind fluidische Oszillatoren darstellbar. Da

sich das fluidische Grundelement wie ein Schalter verhält, lassen sich im Prinzip logische Schaltungen wie in der Mikroelektronik aufbauen.

Fluidische Elemente scheinen besonders als Aktoren für die Medizintechnik geeignet, da sie über eine hohe Leistungsdichte verfügen, verschleißfrei arbeiten, mit medizinisch unbedenklichen Medien (physiologische Kochsalzlösung) betrieben werden können und gegen Verschmutzung (partikelbeladene Medien) relativ unempfindlich sind. In Abb. 4b ist der Prototyp eines fluidischen Wandstrahlelementes in LIGA-Technik gezeigt [17, 18].

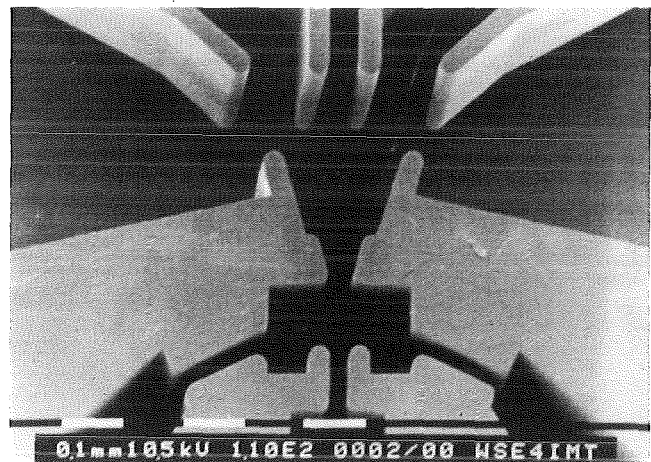


Abb. 4b REM (Rasterelektronenmikroskop) - Aufnahme eines fluidischen Wandstrahl-Elementes in LIGA-Technik. Die Versorgungsdüse hat eine Breite von $30 \mu\text{m}$, die Gesamtstruktur ist $500 \mu\text{m}$ hoch.

Weitere Arbeiten zur Mikrofluidik konzentrieren sich auf die Herstellung von Pumpen und aktiven Ventilen, die für Anwendungen in der Umweltanalytik und der Minimal-Invasiven Therapie vorgesehen sind [19].

3.4 Optische Komponenten

Aufgrund der sehr ebenen Seitenwände können mit LIGA-Strukturen auch optische Aufbauten realisiert werden. Außerdem lassen sich LIGA-Strukturen als Halteelemente für externe optische Komponenten einsetzen. Damit ist der Aufbau sehr kompakter mikrooptischer Komponenten möglich. Derartige Aufbauten sind am IMT in der Entwicklung, wobei über gestufte Substrate Kugellinsen und auch aktive optische Komponenten integriert werden können.

Als Beispiel für ein komplexes mikrooptisches Bauteil wurde ein Mikrospektrometer mit einem Dreischichtresist-Aufbau entwickelt, dessen Prinzip

in Abb. 5 dargestellt ist [20, 21]. Über eine Lichtleitfaser, die positionsgenau in einen Faserschacht eingelegt ist, wird das Licht in den Baustein eingekoppelt. Das Licht trifft auf ein gekrümmtes, selbstfokussierendes Reflexionsgitter und wird an diesem in seine spektralen Bestandteile zerlegt. Durch die individuelle Gestaltung der einzelnen Zähne des Gitters werden die spektralen Anteile des eingekoppelten Lichts auf 10 Ausgangsfasern mit einem Durchmesser von $125\ \mu\text{m}$ fokussiert, die ebenfalls in vorstrukturierte Faserschächte eingelegt sind. Das Gitter besitzt etwa 1200 Zähne, die eine Stufenbreite von $3\ \mu\text{m}$ und eine Stufenhöhe von nur $0.3\ \mu\text{m}$ aufweisen.

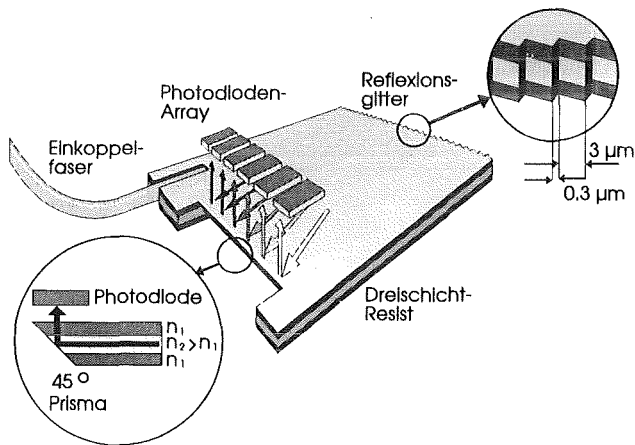


Abb. 5: Skizze eines Mikrospektrometers in Röntgentiefenlithographie. Die "Zähne" des Reflexionsgitters sind etwa $3.0\ \mu\text{m}$ breit, die Stufenhöhe liegt bei nur $0.3\ \mu\text{m}$. Jeder Zahn ist so berechnet, daß das Spektrum auf eine Zeile fokussiert wird, von der es dann mit Lichtleitfasern ausgelesen werden oder mittels eines Umlenkprisma und einer Diodenzeile direkt gemessen werden kann.

Durch die Strukturierung einer 45° Kante im Bereich der Fokuspunkte wird das Licht direkt mit einer Diodenzeile detektierbar. Derzeit liegen die gemessenen Intensitäten der einzelnen Wellenlängen über dem Wellenlängenbereich von $400\ \text{nm}$ bis $1100\ \text{nm}$ im Bereich von 20 %. Die Auflösung beträgt $10\ \text{nm}$. Höhere Auflösungen erscheinen möglich, wenn es gelingt, das Eintrittsfenster der Einkoppelfaser mit Hilfe integrierter optischer Komponenten auf die Diodenzeile zu fokussieren. Derartige Spektrometerbausteine sind sehr interessant als kostengünstige und kompakte Subkomponenten in Spektralanalysegeräten für den Umweltschutz.

4. Von der Mikrostruktur zum Mikrosystem

Die oben vorgestellten Beispiele wären für sich genommen von nur begrenztem technischen und wirtschaftlichen Interesse, wären sie nicht die Ausgangskomponenten für Mikrosysteme. Erst die Mikrosysteme bergen das Potential für einen technologischen Durchbruch von der Größenordnung der Mikroelektronik oder noch darüberhinausgehend.

Die "Intelligenz" des Mikroprozessors wird um Sensoren, Aktoren und andere Komponenten ergänzt. Das Mikrosystem kann nun auf äußere Signale reagieren, Entscheidungen treffen, Manipulationen durchführen oder seine Position verändern. Ein Mikrosystem kann etwa ferngelenkt oder durch Sensoren gesteuert verschiedene Meßstellen anfahren, dort komplexe Messungen durchführen und aufgrund der Resultate Entscheidungen bzw. Manipulationen ausführen. Diese Fähigkeiten sind etwa für die Exploration unzugänglicher Räume oder für die Mikrochirurgie von außerordentlichem Interesse.

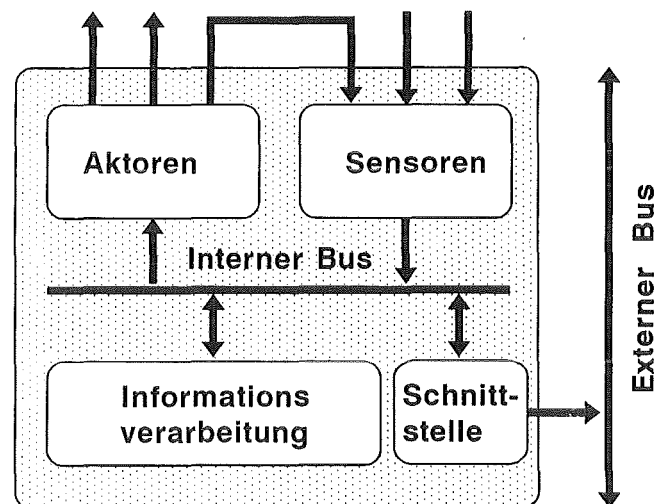


Abb. 6: Schema eines vollständigen Mikrosystems mit Sensoren (oder Sensor-Arrays), Mikroaktoren, Informationsverarbeitung mit Peripherie und der Schnittstelle nach "außen".

In Abb. 6 ist das Grundkonzept eines Mikrosystems dargestellt. Man sieht einen "Block" mit Sensoren, einen anderen "Block" mit Aktoren, die Informationsverarbeitung mit der nötigen Peripherie und schließlich die Schnittstelle nach außen. Das Besondere an der Mikrosystemtechnik gegenüber konventionellen Konzepten der Systemtechnik ist darin zu sehen, daß Sensoren und Aktoren sowohl von der Größe wie vom Leistungsspektrum und schließlich auch von den Kosten her mit den Komponenten der Mikroelektronik kompatibel sind.

4.1 Sensoren

Ein Sensor, etwa ein Beschleunigungssensor, ist nicht mehr ein kostspieliges, individuell abgeglichenes Einzelteil, sondern kann in großer Zahl auf kleinem Raum mit geringer Fertigungstreuung hergestellt werden. Der Einzelsensor wird also durch das Array ersetzt. Wenn nun ein Sensor aussetzten sollte, bleiben noch viele andere Sensoren funktionsfähig; damit ist die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems erheblich gesteigert. Die Einzelsensoren lassen sich aber auch in ihrem Empfindlichkeitsbereich so stufen, daß stets einige Sensoren im optimalen Bereich arbeiten, unabhängig von der Amplitude der Wirkgröße. Bei chemischen Meßproblemen kann man Arrays aus Sensoren mit unterschiedlicher Selektivität und Querempfindlichkeit aufbauen und somit das Array softwaremäßig für eine bestimmte Aufgabe durch Mustererkennung "schärfen". Man erhält damit ein Meßsystem, das unterschiedliche Aufgaben nacheinander mit hoher Trennschärfe abarbeiten kann.

4.2 Aktoren

Wenn die Sensoren sozusagen die "Sinnesorgane" des Mikrosystems sind, stellen die Aktoren die "Hände und Füße" des Systems dar. Sie befähigen das System, auf äußere Reize zu reagieren. Mit Hilfe "intelligenter" Werkzeuge können ferngesteuert diffizile Aufgaben bearbeitet werden. Ein weiterer Vorteil des Einsatzes von Mikroaktoren ist die Möglichkeit, ein Mikrosystem ortsunabhängig zu machen. Ein System kann also ferngesteuert oder aufgrund eigener Informationen bestimmte Wege abfahren und Manipulationen ausführen. Auch hier gilt wieder das oben gesagte: wegen der kostengünstigen Fertigung und der kleinen Dimensionen lassen sich redundante Subsysteme bereitstellen, die im Notfall aktiviert werden können, was wiederum die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems bedeutend erhöht.

4.3 Informationsverarbeitung

An die Informationsverarbeitung werden in der Mikrosystemtechnik besonders hohe Anforderungen gestellt. Zum einen sind die Aufgaben äußerst anspruchsvoll, denkt man etwa an die Auswertung des Signalstroms aus einem Sensor-Array in Echtzeit, zum anderen sind die Mikrosysteme schon aus Platzgründen in Größe und Leistung sehr eingeschränkt. Hier ist es also notwendig, Programme zu entwickeln, die speziell auf die Belange der Mikrosystemtechnik zugeschnitten sind und mit höchster Rechereffizienz die begrenzten Fähigkeiten des Mikroprozessors nutzen.

Neben der Meßwertverarbeitung kommt dem Rechner aber auch die Aufgabe zu, Selbsttest, Selbstkorrektur und Verwaltung redundanter Subsysteme durchzuführen. Auch hier läßt sich die Zuverlässigkeit des Mikrosystems steigern und erlaubt Anwendungen, die wegen extremer Zuverlässigkeitsanforderungen mit konventionellen Methoden noch nicht realisiert werden können.

4.4 Schnittstellen

Der Begriff "Schnittstelle" soll an dieser Stelle grundsätzlich anders gefaßt werden als in der Mikroelektronik üblich. Um Begriffsverwirrungen zu vermeiden, wurde der Vorschlag gemacht, diese Art von Verbindungen "Koppelstellen" zu nennen [22]. In der Mikrosystemtechnik ist die Schnittstelle ungleich komplexer; es handelt sich nicht nur um eine elektrische Kontaktierung im quasi-zweidimen-

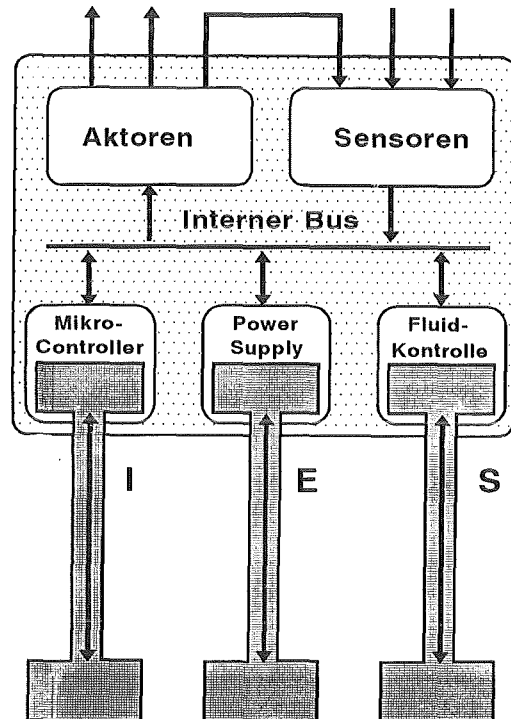


Abb. 7: Schema der IES-Kopplung zwischen Mikrosystem und makroskopischer Umgebung (I = Information, E = Energie, S = Substanz).

sionalen Raum, sondern um die Übertragung von Energie, Information und Stoffen in ein (dreidimensionales) Mikrosystem hinein und aus ihm heraus, wie auf der Abb. 7 dargestellt. Die überwiegende Anzahl der bisher ungelösten Probleme der Mikrosystemtechnik ist in diesem erweiterten Feld der Koppelstellen zu sehen. Für die zuverlässige Ankopplung fluidischer Energie etwa an ein Mikrosy-

stem gibt es bis heute noch keine befriedigende Lösung.

Es ist daher nicht von der Hand zu weisen, daß die Machbarkeit und die Marktfähigkeit zukünftiger Mikrosysteme wesentlich davon abhängen, ob es gelingt, technisch vernünftige Konzepte der Mikro-Makro-Koppelstellen zu entwickeln.

4.5 Aufbau- und Verbindungstechnik

Auch die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) für die Mikrosystemtechnik steht vor großen technologischen Herausforderungen. Die neuen Anforderungen der Mikrosystemtechnik verschieben den Schwerpunkt der Arbeiten aus dem Bereich der gesicherten Erfahrung in ein Arbeitsgebiet, in dem noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsaufwand betrieben werden muß, um bereits anstehende und zukünftige Aufbauprobleme lösen zu können.

Durch die Verflechtung der etablierten Mikroelektronik mit Komponenten der Mikrostrukturtechnik lassen sich mit Hilfe der AVT komplexe, multifunktionale Mikrosysteme aufbauen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß z.B. die in LIGA-Technik hergestellten Sensoren keine Standardbauelemente aus Standardmaterialien sind, sondern fast ausschließlich anwendungs- und herstellungsspezifisch ausgelegt sind. Die AVT für die Mikrosystemtechnik muß diesen Anforderungen Rechnung tragen und im Rahmen ihrer Entwicklungsarbeiten geeignete Technologien für neue Materialien und Bauteil-Geometrien bereitstellen. Durch flexible Anschluß- und Gehäusetechniken muß eine optimale, störungsfreie Anpassung an das jeweilige Meßproblem erfolgen. Häufig müssen winzige Anschlüsse für kleine Stoffströme (Flüssigkeiten und Gase) entwickelt werden. Die AVT ist somit für die Funktionalität, Qualität und den wirtschaftlichen Erfolg der fertigen Mikrosysteme an zentraler Stelle mitverantwortlich.

Als eine außerordentlich interessante Technik wird in der Mikrosystemtechnik das sogenannte feldunterstützte Bonden eingesetzt. Mit diesem Verfahren können ausgewählte metallische und halbleitende Werkstoffe mit Gläsern ohne Zwischenschicht dauerhaft und dicht miteinander verbunden werden.

5. Chancen der deutschen Industrie

International wird mit großem Einsatz an der Entwicklung der Mikrosystemtechnik gearbeitet. In diesem Feld der Konkurrenten hat die Bundesrepu-

blik augenblicklich noch eine gute Position. Für die LIGA-Technik können wir zur Zeit noch feststellen, daß wir technologisch die Weltspitzenstellung halten. Drastische Personal- und Mittelkürzungen am Kernforschungszentrum Karlsruhe und auch in anderen Forschungsinstituten lassen jedoch für die Zukunft Schlimmes befürchten. Japan und die USA rüsten zur Aufholjagd, insbesondere auf dem Gebiet der LIGA-Technik.

Der große wirtschaftliche Durchbruch der Mikrosystemtechnik wird wohl nicht vor der Jahrhundertwende stattfinden, aber es ist inzwischen eine allgemein anerkannte Erfahrung, daß Produkte, die auf einer neuen Technologie beruhen, vom ersten Entwurf bis zur Markteinführung 10 bis 15 Jahre benötigen.

Das Anwendungspotential der Mikrosystemtechnik ist inzwischen unübersehbar geworden. Wie seinerzeit in der Mikroelektronik zeigen sich auch in der Mikrosystemtechnik Anwendungen, an die zu Beginn der Entwicklung nie gedacht wurde, sondern die erst dann formuliert und umgesetzt werden konnten, als die Technologie auch von anderen Branchen akzeptiert und weiterentwickelt wurde. Wer etwa hätte vor dreißig Jahren gedacht, daß ein großes Anwendungsfeld für Mikroelektronik bei den Personal Computern oder den Funktelefonen liegt? Allerdings lassen sich bereits heute Bedarfslfelder für Mikrosysteme definieren, die von der optischen Kommunikation über die Kraftfahrzeug-Sicherheitstechnik, die Haustechnik (Domotik), die chemische Prozeßtechnik, die Umwelttechnik bis zur Medizintechnik reichen. Gerade das letzte Gebiet ist von einer großen wissenschaftlichen und volkswirtschaftlichen Relevanz, so daß es sich lohnt, etwas näher darauf einzugehen.

5.1 Anwendung der Mikrosystemtechnik in der Medizin

Die Chirurgie ist zur Zeit in einem großen Wandel begriffen, der von Außenstehenden in seiner Bedeutung gar nicht richtig bewertet werden kann. Während man bisher mit relativ großen Einschnitten in den Körper den Krankheitsherd operationsgerecht freilegte und dabei in Kauf nahm, auch gesundes Gewebe zu beeinträchtigen oder zu zerstören, wendet sich die Minimal-Invasive Therapie (MIT) einem Konzept zu, bei dem kleinste Einschnitte oder sogar die natürlichen Körperöffnungen dazu benutzt werden, mit "intelligenten" Endoskopen in den Körper einzugehen und den Krankheitsherd anzufahren. Dabei geht natürlich die direkte Sicht und das unmittelbare Tastgefühl des Chirurgen verloren. Das endoskopische System muß aus dem Körperinnern heraus Ersatzinformationen an

den Chirurgen liefern, die gleichwertig oder besser sind. Das ist eine große Herausforderung an die Sensorik und Aktorik eines solchen Mikrosystems [23].

Auf der anderen Seite läßt sich durch die MIT die Leidensphase eines Patienten beträchtlich verringern. Einige Operationen, die früher einen wochenlangen Krankenhausaufenthalt bedeuteten, können heute mit endoskopischen (jedoch noch nicht mikroendoskopischen) Geräten ambulant durchgeführt werden. Dramatische Erfolge erwartet man in der Neurochirurgie, wo die Zugangsräume extrem eng sind und Verletzungen selbst kleinster Blutgefäße fatale Folgen für den Patienten haben können.

Bis zu einem kompletten "intelligenten" Endoskop, bei dem der Chirurg vor dem Bildschirm sitzt und mit einem Joystick das Endoskop durch den Körper des Patienten steuert, werden sicher noch einige Jahre vergehen. Immerhin ist ein solches Konzept bereits Inhalt eines auf 10 Jahre angelegten Forschungsprogramms des Ministry of International Trade and Industry (MITI) in Japan. Auch hierbei zeigt sich wieder die japanische Strategie, weit voraus zu denken und Problemkreise systematisch anzugehen. Aus Japan werden dann vermutlich nicht individuelle Einzelkomponenten der Medizintechnik auf den Markt kommen, sondern es ist zu erwarten, daß diese Komponenten in ein therapeutisches Gesamtsystem eingebunden sind.

Die deutsche medizintechnische Industrie hat heute noch einen beachtlichen Anteil am Weltmarkt. Auf der anderen Seite ist die Branche von kleinen und mittleren Unternehmen geprägt, die häufig untereinander in Konkurrenz stehen. Jede einzelne Firma für sich dürfte überfordert sein, die Mikrosystemtechnik in voller Breite aufzunehmen und zu bearbeiten. Hier müssen Modelle geschaffen werden für gemeinsame Entwicklungsanstrengungen, die über kleinliches Konkurrenzdenken hinausgehen und echte Synergien schaffen. Solche Initiativen können sicherlich staatlich gefördert werden, der Anstoß dazu muß aber aus der Industrie selbst kommen.

6. Ausblick

Wie bereits oben ausgeführt ist die Mikrosystemtechnik, anders als die Mikroelektronik, keine Technologie aus einem "Guß", sondern setzt sich aus einer Vielzahl von elektronischen, mechanischen, optischen, fluidischen, biochemischen und anderen Komponenten zusammen, die mittels Aufbau- und Verbindungstechnik zu einem System gefügt werden müssen. Diese Komponenten werden in den

meisten Fällen auch in unterschiedlichen Technologien gefertigt, so daß in den seltensten Fällen ein Mikrosystem komplett aus einem Hause kommen wird. Gerade hierin ist jedoch der Wettbewerbsvorteil der deutschen Industrie zu sehen, die durch kleine und mittelständische Unternehmen geprägt ist. Diese Infrastruktur kann für die Mikrosystemtechnik in ihren vielfältigen Facetten nutzbar gemacht werden. Dennoch ist auch hier vor einem nationalen Alleingang zu warnen. Trotz wirtschaftlicher Konkurrenz ist es von großer Bedeutung, nicht nur auf europäischer, sondern auf weltweiter Basis zusammenzuarbeiten. Gerade in der Mikrosystemtechnik mit ihrer Vielfalt an Komponenten ist die Standardisierung eine wesentliche Voraussetzung zu wirtschaftlichem Erfolg. Sinnvolle Standards aber lassen sich nur durch weltweiten Dialog und Kooperation auf diesem für uns alle so wichtigem Gebiet erarbeiten.

Literatur

- [1] E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, D. Münchmeyer; *Microelctronic Engineering* 4 (1986) p. 35
- [2] E.W. Becker, W. Ehrfeld; *Phys. Bl.* 44 , 6 (1988) p.166
- [3] A. Maner, W. Ehrfeld, R. Schwarz; *Galvanotechnik* 79, 4, (1988) S. 1101
- [4] W. Bacher, P. Bley, H. Hein, U. Klein, J. Mohr, W.K. Schomburg, R. Schwarz, W. Stark; *KfK-Nachrichten* 23, 2-3 (1991) S. 76
- [5] A. Thommes, W. Bacher, W. Stark, K. Göller, C. Jakob, R. Nutsch, H. Liebscher; *DEHEMA-Symposium "Mikro-Elektrochemie"*, 17.-19. Juni 1992, Friedrichroda, Thüringen (1992)
- [6] W. Bacher, K. Feit, M. Harmening, A. Michel, W. Stark, J. Stölting; *KfK-Nachrichten* 23 2-3 (1981) S. 84
- [7] M. Harmening, W. Bacher, W. Menz; *Macromol. Chem., Macromol. Symp.* 50 (1991) p.277
- [8] J. Mohr, C. Burbaum, P. Bley, W. Menz, U. Wallrabe; *Micro System Technologies '90*; H. Reichl, ed., Springer Verlag, (1990) S. 529
- [9] M. Harmening, W. Bacher, P. Bley, A. El-Kholi, H. Kalb, B. Kowanz, W. Menz; *Micro Electro Mechanical Systems'92* Travemünde, Germany, 4.-7. Februar 1992, Proc. IEEE, Cat. Nr. 0-7803-0497-7/92 (1992) p.202-207
- [10] K. Weindel, K. Feit; unveröffentlichte Ergebnisse (1993), Interner IMT-Bericht

- [11] A. Thommes, W. Stark, K. Leyendecker, W. Bacher, H. Liebscher, C. Jakob; Proc. 3rd Symp. Magnetic Materials, Processes and Devices, New Orleans, LA, USA, 10.-15. Oktober 1993
- [12] R. Ruprecht, A. Both, W. Bacher; Micro Mechanics Europe, MME'93, Neuchatel, Schweiz, 7.-8. September 1993
- [13] C. Burbaum, J. Mohr, P. Bley, W. Menz; Sensors and Materials, 3,2 (1991) S. 75
- [14] H. Gemmeke, M. Balzer, O. Fromheim, T. Kühner, O. Kröner; PMT-Statuskolloquium, Karlsruhe, 23./24. September 1993, KfK-Bericht (1993) im Druck
- [15] M. Himmelhaus, P. Bley, J. Mohr, U. Wallrabe; J. Micromech. Microeng. 2 (1992) S. 196
- [16] U. Wallrabe, P. Bley, B. Krevet, W. Menz, J. Mohr; Micro Electro Mechanical Systems'92, Travemünde, Germany, 4.-7 Febr. 1992, Proc. IEEE, Ca. Nr. 92CH3093-2 (1992) S. 139
- [17] A. Schwarz, B. Schmidt, P. Bley, H. Hein, W. Menz, J. Vollmer; Tagungsband 10. Aachener Fluidtechnisches Kolloquium, Aachen, 17.-19. März 1992 (1992) S. 153 - 170
- [18] J. Vollmer, H. Hein, W. Menz, D. Walter; 7th Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, Yokohama, 7.-10. Juni 1993, Digest of Technical Papers, S. 116-119
- [19] R. Rapp, P. Bley, W. Menz, W.K. Schomburg; 6th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Ft. Lauderdale, Florida, Proceedings (1993) 123
- [20] B. Anderer, W. Ehrfeld, D. Münchmeyer; Proc. SPIE Micro-Optics, 1014 (1988) S. 17
- [21] J. Mohr, C. Müller; 7th Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, Yokohama, 7.-10. Juni 1993, Abstracts of Late News Paper, S. 32-33
- [22] M. Kohl, W. Menz; Jahresbericht 1992 zum BMFT Verbundprojekt "Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen"
- [23] W. Menz, G. Buess; Endoscopic Surgery and Allied Technologies 1 (1993) p. 171-180.

Chemische Mikroanalyssysteme: Ziele und neuere Entwicklungen

H. J. Ache

Institut für Radiochemie

Zusammenfassung:

Im Institut für Radiochemie (IRCh) werden applikationsorientierte Entwicklungen von innovativen Meß- und Regelsystemen verfolgt, die, realisiert auf der Basis hochintegrierter chemischer Mikroanalyssysteme unter Einschluß von Mikroelektronik und Aktoren, als echte Mikrosystemlösungen den praktischen Anforderungen einer kontinuierlichen und zuverlässigen "Vor-Ort"-Analytik in diversen Bereichen wie Prozeßtechnik, Umwelttechnik oder Medizin entsprechen sollen.

Zur konkreten Umsetzung dieses Konzepts entwickelt das IRCh analytische Methoden und Geräte, die im Hinblick auf die technischen Anforderungen wie Nachweisgrenzen für eine chemische Substanz oder Substanzklasse, Empfindlichkeit im gewünschten Konzentrationsbereich, tolerierbare Querempfindlichkeiten, Reproduzierbarkeit, Dauer der Analyse, Lebensdauer, zufriedenstellende Ergebnisse aufweisen können. Der konsequente Einsatz verschiedener Mikrosystemtechniken und -komponenten bei der Entwicklung soll dabei zur Kostenreduzierung bei der späteren Serienherstellung anwendungsfähiger Analysensysteme führen und so eine ökonomisch attraktive Lösung ermöglichen.

Der Aufbau von analytischen Mikrosystemen wird im IRCh prinzipiell in zwei Entwicklungslinien verfolgt: einerseits erfolgt die Identifizierung und Quantifizierung des Analyten mittels chemischer Mikrosensoren durch chemisch sensitive Schichten, die an ein mikroelektronisches und/oder optisches Bauelement gekoppelt werden, andererseits mit analytischen Mikrosonden, die vorwiegend physikalische Wechselwirkungen des Analyten wahrnehmen. Dabei wird ein bewußt breiter Ansatz bei Sensorprinzipien und Technologien gewählt, um durch wichtige Evaluierung der ausgewählten Sensorprinzipien die jeweils optimale Lösung für eine vorgegebene Aufgabe bereitstellen zu können.

Die Entwicklung der anderen Komponenten eines chemischen Mikroanalyssystems, wie mikrofluidische Probenahmesysteme, Signalaufbereitung und -verarbeitung, erfolgt in enger Zusammenarbeit mit anderen Organisationseinheiten des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KfK) und unter industrieller Beteiligung.

1. Einsatzfelder und Anforderungen an kontinuierlich messende chemische "Vor-Ort"-Analytik

In den Bereichen Prozeßkontrolle, Umweltschutz, Arbeitssicherheit und Medizintechnik hat der chemische Analysenbedarf, nicht zuletzt bedingt durch gesetzliche Auflagen, neue Dimensionen angenommen, die mit den derzeitigen Methoden in Zukunft nicht mehr zu erfüllen sein werden.

Als Lösung bietet sich eine kontinuierliche und zuverlässig arbeitende "Vor-Ort-Analytik" an, die "in-line" und möglichst in "Echtzeit" mißt.

Dadurch könnten nicht nur die hohen Kosten drastisch verringert werden, die bei der herkömmlichen "off-line-Analytik" anfallen, bei der Probenahme und Analytik an unterschiedlichen Orten erfolgt, sondern es sind damit auch eine ganze Reihe technischer Verbesserungen verbunden.

Da die "in-line-Analytik" einen rechtzeitigen Eingriff in den Prozeßablauf erlaubt, ist es möglich, den Betrieb industrieller Prozesse näher am verfahrenstechnischen Optimum zu führen, so daß eine gleich hohe Produktqualität und -ausbeute bei möglichst geringem Rohstoff- und Energieverbrauch bei geringster Umweltbelastung durch minimierte Emissionen und weniger Abfall erreicht werden kann. Im Falle der Umweltüberwachung gewährleistet eine solche Analytik eine schnelle Ermittlung von Gefahrezuständen, z. B. bei einer störfallbedingten Freisetzung von chemischen Stoffen. Für den Bereich der Arbeitssicherheit, z. B. für die kontinuierliche Überwachung der Arbeitsatmosphäre und der Einhaltung der maximalen Arbeitsplatzkonzentration von toxischen Chemikalien, gelten ähnliche Überlegungen. In der

Medizintechnik wäre die kontinuierliche in-vivo oder auch in-vitro Überwachung von Vitalparametern während einer Operation oder in der Intensivpflege, wie auch die Überwachung des Wirkspiegels von applizierten Therapeutika typische Anwendungsfelder für in-line Analytik.

Eine kritische Betrachtung der derzeitigen und zukünftigen Anwendungsfelder für einen breiten Einsatz von kontinuierlich arbeitenden chemischen Sensoren oder Analysensystemen kommt zu folgenden Feststellungen:

- Es besteht ein großer Bedarf an kontinuierlich messenden chemischen Sensoren oder Analysensystemen, die in ihren technischen Spezifikationen wie Nachweisgrenzen für eine chemische Substanz oder Substanzklasse, Empfindlichkeit im gewünschten Konzentrationsbereich und tolerierbare Querempfindlichkeit den jeweiligen Anforderungen entsprechen. Für viele Fälle sind extrem schnelle Ansprechzeiten (Echtzeitanalyse) erforderlich.
- Die Anschaffungs- und Betriebskosten der chemischen Analysensysteme müssen aus wirtschaftlichen Gründen in einem angemessenen Verhältnis zu den Gesamtkosten der zu überwachenden Anlage stehen. Ein Haupteinsatzfeld wird bei kleineren Prozeßeinheiten wie z. B. Automotoren und Haushaltswaschmaschinen etc. gesehen, wo durch optimale Prozeßführung im Verbrennungsmotor oder beim Waschvorgang erhebliche Energieeinsparungen erzielt werden können, aber wo die Produktkosten ohnehin relativ niedrig sind. Daraus folgt, daß die Anschaffungs- und Betriebskosten für derartige chemische Analysensysteme im allgemeinen extrem niedrig angesetzt werden müssen. Gleiches gilt für Geräte, die für eine flächendeckende Umweltüberwachung oder in der klinischen Diagnostik zum Einsatz kommen sollen.
- Eine hohe Zuverlässigkeit, verbunden mit Langzeitstabilität und langer Standzeit ist eine unverzichtbare Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz und ihre Akzeptanz bei den verschiedenen Anwendern.
- Die vielen unterschiedlichen Anwendungen und Einsatzgebiete wie auch die Vielfältigkeit und Komplexität der Meßaufgaben erfordern eine hohe (kunden)spezifische Ausrichtung der Sensoren und Analysensysteme bei mittleren und kleinen Stückzahlen. Nur in Ausnahmefällen, wie in der Automobilindustrie und vielleicht bei Haushaltsmaschinen, sind hohe Stückzahlen zu erwarten.

Während die genannten technischen Spezifikationen wie vielleicht auch die Forderung nach der Zuverlässigkeit der Techniken auch heute schon

durch einen - allerdings sehr hohen - technischen und finanziellen Aufwand erfüllt werden können, ist die Forderung nach Zuverlässigkeit bei gleichzeitig geringen Herstellungskosten wegen der erwähnten Komplexität der chemischen Meßaufgaben und den damit verbundenen relativ geringen Stückzahlen mit den derzeit vorhandenen konventionellen Techniken zur Zeit nicht realisierbar.

Selbst eine weitgehend standardisierte feinwerktechnische Fertigung von Komponenten, die zu modularen Sensorsystemen zusammengefügt werden können, kann nur eine Zwischenlösung darstellen.

Voll zufriedenstellende Lösungen, die Zuverlässigkeit mit geringen Herstellungskosten vereinen, werden erst durch den Einsatz neuer Technologien und Systemtechniken möglich, wobei sich in diesem Fall das Konzept der Mikrosystemtechnik anbietet.

2. Zielrichtung der IRCh-Arbeiten zu chemischen Mikroanalysensystemen

Im IRCh werden daher applikationsorientierte Entwicklungen von innovativen Meß- und Regelsystemen verfolgt, die, realisiert auf der Basis hochintegrierter chemischer Sensorsysteme unter Einschluß von Mikroelektronik und Aktoren, als echte Mikrosystemlösungen den praktischen Anforderungen einer kontinuierlichen und zuverlässigen "Vor-Ort"-Analytik in diversen Bereichen, wie Prozeßtechnik, Umwelt oder Medizin, entsprechen sollen.

Zur konkreten Umsetzung dieses Konzepts entwickelt das IRCh analytische Methoden und Geräte, die im Hinblick auf die technischen Anforderungen wie Nachweisgrenzen für eine chemische Substanz oder Substanzklasse, Empfindlichkeit im gewünschten Konzentrationsbereich, tolerierbare Querempfindlichkeiten, Reproduzierbarkeit, Dauer der Analyse, Lebensdauer, zufriedenstellende Ergebnisse aufweisen können. Der konsequente Einsatz verschiedener Mikrosystemtechniken und -komponenten bei der Entwicklung soll dabei zur Kostenreduzierung bei der späteren Serienherstellung anwendungsfähiger Analysensysteme führen und so eine ökonomisch attraktive Lösung ermöglichen.

Diese Arbeiten sollen dabei gleichzeitig anhand von konkreten Beispielen, den sogenannten Demonstratoren, die Möglichkeiten der Mikrosystemtechnologie für die Herstellung derartiger chemischer Mikroanalysensysteme aufzeigen, Problemfelder analysieren und die Rolle der beteiligten Subdisziplinen wie Chemie, Materialwissenschaften, Elektronik, Datenverarbeitung und Sy-

stemtechnik definieren. Sie sollen ferner den Beitrag der benötigten Technologien wie Systemtechnologie, Material- und Prozeßtechnologie, Aufbau- und Verbindungstechnik, Design und Simulation, flexible Fertigungstechnologie für kleine und mittlere Stückzahlen und ihr sinnvolles Zusammenwirken exemplarisch demonstrieren.

Erst am funktionierenden Demonstrator können interessierten Anwendern die Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik so verdeutlicht werden, daß es zu Spezifikationen für wirtschaftlich nutzbare Produkte kommen wird.

Zum besseren Verständnis sollen in der weiteren Diskussion die einzelnen Funktionen eines chemischen Mikroanalysengeräts kurz dargestellt werden:

- Probenahme
- Probenkonditionierung
- Messung (Chemischer Sensor bestehend aus chemisch sensitiver Schicht und Transducer oder analytische Mikrosonde)
- Signalaufbereitung
- Datenauswertung (Chemometrie)
- Datenausgabe, Meßergebnis, Regelung.

Ein konsequenter Systemansatz würde nun "top-down" die Spezifikationen und Anforderungen an die einzelnen Komponenten oder Subsysteme festlegen und die Planung der einzelnen Schritte zur Realisierung des Systems, wie u. a. Prozeßplanung und -simulation, Funktionsmodule / Schnittstellen, Prozeßdesign, Layout bis hin zu den Fertigungs- und Prüfdaten, vornehmen.

Wegen des Fehlens von wichtigen "Standard"-Komponenten kann diese Vorgehensweise zur Zeit noch nicht konsequent verfolgt werden. Die grundsätzlichen Voraussetzungen für eine Integration der einzelnen Komponenten oder Subsysteme in das Mikroanalysensystem lassen sich jedoch weitgehend abschätzen und müssen als Richtlinien für ihre Entwicklung gelten.

Wie diese Vorgaben zum Tragen kommen, läßt sich am Beispiel der Arbeiten des IRCh zur Entwicklung von chemischen Mikrosensoren oder analytischen Mikrosonden verdeutlichen, wobei das Präfix "Mikro" auf ihre Integrationsfähigkeit in ein Mikroanalysengerät hinweist.

Unter einem chemischen Sensor generell wird dabei eine Meßeinrichtung verstanden, die aus einer chemisch sensitiven Schicht an der Sensoroberfläche besteht, an der eine voll reversible, schnell verlaufende und möglichst selektive Wechselwirkung mit dem Analyt stattfindet. Die dadurch bewirkten Veränderungen der Schichteigenschaften werden

mittels eines mit dieser Schicht in direktem Kontakt stehenden Transducers in ein optisches oder elektrisches Signal umgewandelt, das die Identifizierung und Quantifizierung des Analyten erlaubt.

Bei der "analytischen Mikrosonde" handelt es sich dagegen um die miniaturisierte oder Mikro-Ausführung einer konventionellen Analysetechnik, insbesondere spektroskopischer Techniken, wobei in diesem Fall vorzugsweise eine physikalische Wechselwirkung, z. B. mit Lichtphotonen, zur Identifizierung und Quantifizierung des Analyten herangezogen wird.

Wie bereits oben erwähnt ist die Zuverlässigkeit eines Mikroanalysensystems ein ganz entscheidender Faktor für sein Anwendungspotential.

Das derzeit schwächste Glied in einem solchen System und damit das den Grad der Zuverlässigkeit bestimmende Subsystem ist die Messung, d. h. der "Chemische Mikrosensor" oder die "analytische Mikrosonde". Deshalb soll dieser Aspekt hier vorrangig diskutiert werden.

3. Entwicklung eines chemischen Mikrosensors

Betrachtet man zunächst einmal die Variante "Chemischer Mikrosensor", so ergibt sich das Problem der Zuverlässigkeit zwangsläufig aus seiner Funktionsweise, die auf der direkten Wechselwirkung zwischen Sensoroberfläche und Analyt beruht; d. h. daß - anders als bei Sensoren für physikalische Zustandsgrößen, die zusammen mit der nachgeschalteten Elektronik meist in stabilen Gehäusen, abgeschirmt von der Umgebung, untergebracht werden - die Natur eines chemischen Sensors den direkten Kontakt mit einer oftmals sehr aggressiven Umgebung bedingt, in der sich der zu bestimmende Analyt befindet. Damit werden auch besonders hohe Anforderungen an die Beschaffenheit der chemisch selektiven Oberfläche gestellt. Diese Anforderungen werden zur Zeit nur in wenigen, besonders günstig gelagerten Fällen zufriedenstellend erfüllt.

Die Entwicklung von Materialien chemischer Funktionalität, die der Realisation einer gewünschten chemischen Identifizierungsaufgabe des Sensors dienen, d. h. ausreichende Selektivität, Nachweisempfindlichkeit und Sensitivität, akzeptables Ansprechverhalten und Kompatibilität mit dem Analytenmedium bei gleichzeitiger extremer Langzeitstabilität oder -beständigkeit aufweisen können, nimmt daher eine Schlüsselstellung ein.

Die Auswahl dieser Materialien wird aber gleichzeitig bestimmt durch ihre Eignung zur Verarbeitung mit modernen Mikroprozeß- und Mikrofertigungstechniken.

Im Vordergrund der IRCh-Arbeiten stehen deshalb Eignungsuntersuchungen von neuartigen, für diese Zwecke speziell hergestellten Materialien und Verbindungen, auch in Form extrem dünner Schichten: Es werden Membranen aus organischen Polymeren, speziellen Gläsern und keramischen Materialien entwickelt, die durch gezielte Strukturgebung, eingebaute funktionelle Gruppen und die Verankerung von Erkennungsmolekülen dem Sensor die beabsichtigte chemische oder biochemische Selektivität, verbunden mit der gewünschten Langzeitstabilität, verleihen. Diese Materialien werden, zusammen mit dem jeweiligen für die gegebene Aufgabe optimalen Transducer, dessen Mikrosystemverträglichkeit ebenfalls gegeben sein muß, für bzw. an den im folgenden aufgeführten Sensorkonzepten entwickelt, eingesetzt, erprobt und bewertet:

- Optochemische Sensoren, basierend auf Faseroptik und integrierter Optik
- Gassensoren auf der Basis von massensensitiven Detektoren nach dem SAW-Prinzip (Surface Acoustic Waves) und modifizierten Metalloxidfilmsensoren (MOF)
- ChemFET's
- Biosensoren.

Die Grundpräparation der Sensormembranen erfolgt in dünnen Schichten nach dem Sol-Gel-, CVD (Chemical Vapor Deposition)- oder PVD (Physical Vapor Deposition)-Verfahren, also vornehmlich mit IC-kompatiblen Verfahren. Nachbehandlungen wie Tempern, Ionenimplantation, Elektronenstrahl exposition oder Reaktivgasexposition stellen den gewünschten Endzustand her. Handelt es sich bei den Erkennungsmolekülen um besonders empfindliche Verbindungen, z. B. Enzyme u. ä., so ist ihr Einbau durch eine chemische Synthese mit speziell dafür geeigneten und präparierten Polymermatrices am Ende des Herstellungsprozesses vorgesehen.

Gefordert sind hierbei, neben der Adaption der Präparationstechniken zur vertikalen und/oder lateralen Strukturierung, auch die Entwicklung einer physikalisch und chemisch stabilen Kopplung der Funktionselemente, d. h. zwischen chemisch sensitiver Schicht und Transducer, Optimierung der Nachweisstärke des Sensors durch gezielte Formgebung, und Entwicklung analytischer Kapselung. Außerdem werden spezielle Bond- und Gehäusetechniken zur Integration der Signalvorverarbeitung auf dem Sensorchip entwickelt, die auch bei Einwirkung chemischer, mechanischer und elektrischer Störeinflüsse eine stabile Funktion des gesamten Systems gewährleisten.

Es soll noch einmal klar herausgestellt werden, daß eine zeitlich garantierte hohe Langzeitstabilität und -beständigkeit eine unverzichtbare Voraussetzung für den Einsatz von chemischen Sensoren ist, da sich - wiederum anders als bei Sensoren für die Bestimmung physikalischer Parameter - wohldefinierte Kennlinien für das Ermüdungs- und Alterungsverhalten u. ä. Phänomene nicht aufstellen und damit nicht im System zwecks Rekalibration abspeichern lassen.

Es stimmt daher hoffnungsvoll, daß die Arbeiten des IRCh wie auch von anderen Arbeitsgruppen zu Sensorsystemen mit einer garantierten Standzeit von mehr als sechs Monaten unter realistischen Betriebsbedingungen geführt haben. Dazu gehören im IRCh hergestellte optochemische Sensoren mit in Sol-Gel immobilisierten Porphyrinderivaten als Erkennungsmoleküle für die Detektion von toxischen Schwermetallen, wie auch Iodid-Sensoren auf der Basis chemisch modifizierter (mit AgI beschichteter) Feldeffekttransistoren (ChemFET's) oder Na-sensitive ChemFET's mit Silikatbeschichtung definierter Zusammensetzung. Massensensitive Sensoren auf SAW-Basis mit Polymerbeschichtungen haben ebenfalls Dauertests für den Nachweis von gasförmigen organischen Verbindungen in der Raumatmosphäre erfolgreich bestanden.

Die eingehende Charakterisierung der präparierten Schichten, insbesondere unter Anwendungsbedingungen, wird sowohl mit konventioneller Analytik ausgeführt wie auch mit Methoden, die eine Tiefenauflösung im Bereich weniger Atomabstände besitzen (XPS, SAM, SNMS, SIMS, ISS).

Alle genannten Sensorsysteme konnten mit den weiter oben beschriebenen Techniken mikrosystemgerecht hergestellt werden. Die dazu erforderlichen Transducer sind entweder Massenprodukte aus der Mikroelektronikindustrie, wie FET's und SAW-Bauelemente, oder lassen sich, wie bei den optochemischen Sensoren, in Form von porösen Glasfilmen lateral strukturiert mittels der Lift-off-Technik auf Glassubstraten aufbauen. Sie sind daher von vornherein für mikrosystemtechnische Lösungen geeignet.

Diese Fortschritte geben berechtigten Grund zu der Annahme, daß in absehbarer Zeit zuverlässige chemische Mikrosensoren für die Integration in chemische Mikroanalytensysteme zur Verfügung stehen werden.

4. Entwicklung von "analytischen Mikrosonden"

In einer zweiten Entwicklungslinie, parallel zu den Arbeiten zum chemischen Mikrosensor, wurde im IRCh der Versuch unternommen, die bekannten Vorteile langjährig erprobter Methoden der instrumentellen Analytik zu nutzen und durch eine Miniaturisierung einzelner Teile konventioneller Analyseninstrumente zu "analytischen Mikrosonden" diese für die Integration in chemische Mikroanalyssysteme vorzubereiten.

Besonders geeignet erschienen dafür spektroskopische Techniken, da sich hier die aggressive Analytlösung in einer inerten Umgebung, z. B. in einer Quarzzone, befindet. Es findet hier keine chemische, sondern eine physikalische Wechselwirkung statt, womit a priori eine Reihe von Problemen, wie sie beim chemischen Sensor auftreten, eliminiert sind. Die Zuverlässigkeit einer analytischen Mikrosonde, verglichen mit dem chemischen Sensor als Teil eines chemischen Mikroanalyssystems, sollte erheblich besser sein, immer vorausgesetzt, daß eine Integration möglich ist.

Zwei Techniken sollen hier kurz erwähnt werden.

Die erste beruht auf einer Meßsonde, die nach dem Prinzip der evaneszenten Felder arbeitet. Aufbauend auf einer praxiserprobten Makroversion für die Detektion von Chlorkohlenwasserstoffen (CKW's) in kontaminiertem Grundwasser mittels NIR-Spektroskopie im Nahen Infrarot (NIR) wurde eine "Miniausführung" unter Verwendung von integrierten Optik-Bauelementen entwickelt. Sie besteht aus einem planaren Oberflächenwellenleiter auf einem integriert-optischen Chip aus Glas. Eine mittels spin-coating darauf aufgebrachte hydrophobe Membran (Polysiloxan) extrahiert selektiv beispielsweise Chlorkohlenwasserstoffe. Ein in dem Oberflächenwellenleiter propagierender Lichtstrahl, der an der Glas-hydrophoben Membran totalreflektiert wird, dringt bis zur Tiefe etwa der Wellenlänge des Lichts in die Polysiloxanschicht ein und mißt die dort vorhandene CKW-Konzentration ohne störende Wasser-Bande, da kein Wasser in die hydrophobe Polysiloxanschicht eindringen kann. Eine chemometrische Auswertung der erhaltenen NIR-Spektren erlaubt auch, mehrere Komponenten gleichzeitig zu bestimmen. Eine Mikroweißlichtquelle und ein selbstfokussierendes Reflexionsgitter, durch LIGA-Technik (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung, Kunststoff Abformung) hergestellt, sowie ein NIR-Detektor (Halbleiter-Diodenzeile) mit entsprechender Datenverarbeitung sind die anderen, ebenfalls mit Miniaturisierungstechniken herstellbaren Komponenten des Systems.

Die zweite Technik ist die sog. "Thermische Linse". Das Meßprinzip beruht auf der thermischen Um-

setzung von Laserlicht durch die nachzuweisende Substanz. Dazu wird ein fokussierter und gepulster Laserstrahl durch die Analytlösung geführt. Bei einer bestimmten Wellenlänge wird das Licht von der Substanz absorbiert. Die entstehende Wärme erzeugt in einem eng begrenzten Raumbereich eine graduelle Dichteänderung und damit eine Veränderung des Brechungsindex. Die Größe dieser thermischen Linse ist über die Absorption des Laserlichts an die Konzentration der nachzuweisenden Substanz gekoppelt. Bestimmt wird die Größe der Thermischen Linse über einen zweiten Laserstrahl (Probelaser) anderer Wellenlänge. Dieser wird nicht absorbiert und trifft hinter der Probe durch ein Pinhole auf einen Photodetektor, der die Lichtintensität mißt. Die Änderung der Lichtintensität des Probelasers ist direkt proportional zur Konzentration des Analyten in der Lösung.

Der Durchbruch zur Miniaturisierung gelang durch die Ausnutzung der Fresnel-Beugung in Nahfeld (IRCh-Patent). Durch außerordentlich hohes Nachweisvermögen, verglichen mit konventionellen Methoden, eignet sich diese Technik besonders als Detektor für die Hochleistungsflüssigkeitschromatographie oder für die Kapillarelektrophorese.

Als Ergebnis läßt sich zusammenfassen, daß die berechtigte Aussicht besteht, daß sich durch Miniaturisierung konventioneller Analysetechniken und durch Verwendung von Mikrobauanteilen wie Mikrolaser und -linsen etc. integrationsfähige und zuverlässige analytische Mikrosonden herstellen lassen.

Die Arbeiten zu diesen beiden Techniken sind Teil des Programms "Demonstratoren der zweiten Generation", da ihre Entwicklung langfristig ausgelegt sein muß.

In diesem Zusammenhang soll nochmals darauf hingewiesen werden, daß durch den Übergang zur mikrosystemtechnischen Lösung eine zusätzliche Erhöhung der Zuverlässigkeit erzielt werden kann, indem man die unterschiedlichen Funktionen eines Mikrosystems mit ähnlichen, zueinander kompatiblen Prozessen integriert herstellt. Kurze Leitungswege, der Wegfall von Kabeln und Steckern führen zu einer größeren Zuverlässigkeit der Produkte.

5. Entwicklung von Mikrosensor-Arrays: Aufbau, Simulation und Optimierung

Wie kann man nun der zweiten, ebenfalls ganz entscheidenden Forderung, nämlich der Forderung nach geringen Herstellungskosten, Rechnung tragen? Das Konzept der Mikrosystemtechnik macht dazu diverse Vorschläge. Einmal sollte es möglich sein, die Funktion bestimmter Subsysteme

me durch Simulation vorauszuberechnen und ihre Funktion anschließend auch rechnerisch zu optimieren. Damit können erhebliche Entwicklungszeit und -kosten gespart werden. Ein Schritt in diese Richtung konnte bereits bei der Demonstrator-Entwicklung "Analytisches Mikrosystem auf der Basis von Surface-Acoustic-Wave-Bauelementen" getan werden.

Bei diesem System werden massensensitive Sensoren zur Detektion von Raumluftinhaltsstoffen verwendet, wobei die Massenänderung, die zur Identifizierung und Quantifizierung des Analyten herangezogen wird, durch eine reversible und selektive Sorption der Analyten an der Sensoroberfläche zustandekommt. Hier wie bei fast allen chemischen Sensoren ist eine ausreichende Spezifität für die Detektion einer einzelnen Substanz normalerweise nicht gegeben oder nur durch sehr hohen Forschungsaufwand zu erreichen. Im Sinne einer Ersparnis von Entwicklungskosten und gleichzeitig einer späteren flexiblen Fertigungstechnik wurde daher von vornherein der Detektor als Sensorarray entwickelt. Durch die Kombination verschiedener Sensoren mit Beschichtungen, z. B. Polymeren unterschiedlicher Sorptionseigenschaften, lassen sich Sensitivitätsmuster gewinnen, die nach einer chemometrischen Auswertung (Partial-Least-Square-Algorithmus) auch aus einer Analytenmischung die geforderte qualitative und quantitative Bestimmung einer oder mehrerer Komponenten zulassen. Unter Verwendung des Linear Solvation Energy Relationship (LSER)-Modells läßt sich eine Vorhersage der Sorptionseigenschaften verschiedenster Schichtmaterialien treffen. Dadurch wird eine gezielte Optimierung durch Auswahl von Schichtmaterialien bzw. deren Kombination möglich. Mit dem so konzipierten und optimierten Sensor-Array sind selektive Bestimmungen einer größeren Vielfalt von gasförmigen organischen Analyten erreichbar. Dies bedeutet, daß der Verzicht auf eine hohe Spezifität kompensiert wird durch ein leistungsfähiges chemometrisches Auswertesystem; das System wird zwar dadurch komplexer, aber durch seine universellere Anwendbarkeit kann es in höheren Stückzahlen hergestellt werden und - was im Hinblick auf die anfallenden Kosten von noch größerer Bedeutung sein dürfte - die Herstellung von Detektoren für die verschiedensten Meßaufgaben läßt sich sehr flexibel, ohne wesentliche Änderungen des Fertigungsprogrammes, z. B. durch einfachen Austausch der im Spin-off-Verfahren auf die Transducer aufgetragenen Polymere, handhaben.

Diese Flexibilität im Fertigungsprozeß zu erreichen, ist ebenfalls eine Zielvorstellung der Mikrosystemtechnik und eine Voraussetzung für eine kostengünstige Produktion bei niedrigen Stückzahlen.

6. Andere Subsysteme eines chemischen Mikroanalysengeräts

Auf die anderen Subsysteme eines chemischen Mikroanalysengeräts wie aktive und passive Mikrofluidikkomponenten, computerkontrollierte Datenerfassung, -verarbeitung und -speicherung sowie Systemsteuerung und ihre Entwicklung im Hinblick auf eine mikrosystemtechnische Lösung soll hier nicht eingegangen werden. Diese Aspekte werden in den Vorträgen zu den drei Demonstratoren, an deren Verwirklichung das IRCh maßgeblich mitarbeitet, zum Ausdruck kommen:

- Optischer Schadstoffanalysator
- Analytisches Mikrosystem zur Detektion organischer Gase
- Elektrochemisches Mikroanalyssystem (ELMAS) für die Ionometrie von Flüssigkeiten.

Besondere Erwähnung verdienen aber die Subsysteme Probenahme und Probenvorbereitung, da sie ausschlaggebend für die Aussagekraft der Analyseergebnisse sind und bei ihrer Ausgestaltung insbesondere der Erfahrung des Analytischen Chemikers bedürfen.

Hier wird es wegen der Vielfältigkeit des Probenmaterials besonders schwierig sein, zu einfachen und generellen Lösungen zu kommen.

Am einfachsten wird sich die Probennahme bei wohldefinierten Prozeßströmen gestalten, wo die Anzahl der zu analysierenden Verbindungen und auch der vorliegenden Konzentrationsverhältnisse überschaubar ist, z. B. bei Laborluftüberwachung etc. In komplexeren Fällen kann es nötig sein, chromatographische Trennungen vorzuschalten, wie beispielsweise bei der Verwendung der analytischen Mikrosonde "Thermische Linse".

In jedem Fall muß aber die Datenauswertung das Auftreten störender, nicht im chemometrischen Auswertemodell vorgesehener Verbindungen erkennen lassen.

In ähnlicher Weise muß es auch möglich gemacht werden, den Ausfall oder auch ein teilweises Versagen eines Sensorarrays oder Detektors rechtzeitig wahrzunehmen.

Auf die Bedeutung der "garantierten" Lebensdauer oder Standzeit des Subsystems "Analytische Messung" für die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems ist bereits weiter oben eingegangen worden.

Eine periodische Kalibrierung mit Eichsubstanzen, wie sie bei der konventionellen Analytik die Regel ist, würde - wollte man sie auch in chemische Mikroanalyssysteme integrieren - zusätzliche, reparaturanfällige Mikrofluidiksysteme mit Mikropumpen und -ventilen erfordern.

Eine sinnvollere und innovativere Lösung bestünde in einer permanenten Kontrolle der Materialeigenschaften des Sensors, insbesondere der kritischen chemisch selektiven Schicht. Gelingt es, dort auftretende Materialveränderungen mit solchen in den Sensoreigenschaften zu korrelieren, wäre eine unabhängige Überwachung der Sensorfunktion möglich. Bei optochemischen und spektroskopischen Techniken gibt es bereits erste Ansatzpunkte für derartige Lösungen, die im IRCh z. Z. verfolgt werden.

7. Weitere Arbeiten des IRCh in der Mikrosystemtechnik

Weitere Entwicklungen, die hier nur kurz erwähnt werden können, sind die IRCh-Arbeiten zu "Mehrstufigen Gassensorsystemen zur Prozeß- und Umweltüberwachung" und zur Biosensorik. Zum letzteren Projekt wäre zu sagen, daß es gelungen ist, einen praxisreifen Wirkstoffsensor für Herbizide zu entwickeln, der allerdings z. Z. erst als ein Einwegsensor vorliegt, sowie einen reversiblen personenbezogenen Monitor für HCN in der Gasphase zur Arbeitsplatzüberwachung (Patent angemeldet). Erste Arbeiten zur Erweiterung der oben beschriebenen NIR-Evanescent-Feldsonde in den Mittel-Infrarotbereich wurden aufgenommen.

8. Technologische Umsetzung und Zusammenarbeit mit Anwendern

Die im IRCh ausgewählten und bearbeiteten Probleme zur chemischen Mikrosensorik sind streng anwendungsorientiert, die zugehörigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten haben hohen Innovationsgrad und werden unter dem Gesichtspunkt der Integration in Mikrosysteme ausgeführt.

Als konkrete Anwendungsfelder sind umfangreiche Arbeiten zur in-line Analytik, insbesondere im Umweltbereich und in der Prozeß- und Medizintechnik, zu nennen. Diese Entwicklungen werden in engem Kontakt mit potentiellen Anwendern geführt, wodurch einmal die Garantie gegeben ist, daß Konzeption und Spezifikationen sinnvoll und für den beabsichtigten Zweck optimal sind und daß das Produkt für den Anwender einen echten, den Entwicklungsaufwand rechtfertigenden Fortschritt bedeutet. Die Durchführung der Entwicklungen erfolgt in iterativen Schritten zu einem prototypischen Muster (Demonstrator), in das fortlaufend Verbesserungen und insbesondere Erfahrungen von ausführlichen Feldversuchen eingearbeitet werden.

Die Entwicklung wird in erster Linie in Kooperation mit kleineren oder mittelständischen Unternehmen durchgeführt.

Durch seine Einbindung in das KfK hat das IRCh dabei den Vorteil des direkten Zugriffs auf mikro-mechanische und mikrooptische Bauteile des LIGA-Verfahrens und auf mikroelektronische Signalverarbeitung durch Zusammenarbeit mit den anderen Organisationseinheiten wie Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT), Hauptabteilung für Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (HPE), Institut für Materialforschung (IMF) und Institut für Nukleare Festkörperphysik (INFP). Die systemtechnischen Aspekte werden zusammen mit dem Institut für Angewandte Informatik (IAI) entwickelt. Weiterhin ist eine Anbindung an Verbundvorhaben wie IMAS (Integriertes Mikroanalyzesystem) und SUM (Sensorsystem und Mustererkennung) geplant.

Aufgaben der Informationsverarbeitung in der Mikrosystemtechnik

H. Trauboth

Institut für Angewandte Informatik

Zusammenfassung

Die Forschungs- und Entwicklungsaufgaben (FuE) und der derzeitige Stand der Arbeiten des Instituts für Angewandte Informatik (IAI) im Projekt Mikrosystemtechnik des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KfK) werden in einer Übersicht beschrieben. Diese Aufgaben betreffen die rechnergestützten Werkzeuge und Methoden zur Entwicklung, Fertigung und Qualitätssicherung von Mikrosystemen, die Informationstechnik in Mikrosystemen und die medizinische Systemanwendung der Minimalen Invasiven Therapie. Die Informationsverarbeitung ist ein wesentlicher und integrierender Bestandteil aller Bereiche der Mikrosystemtechnik.

1. Einleitung

Die große Bedeutung der Informationsverarbeitung in der Entwicklung, Fertigung und Qualitätssicherung mikroelektronischer Komponenten und Systeme ist unbestritten. Man rechnet heute mit einem Anteil der reinraumbedingten Prozeßtechnik von nur noch ca. 20 % gegenüber dem der Software im weitesten Sinne. Bei der fortschrittlichen anwendungsorientierten ASIC-Entwicklung und Fertigung in mäßigen Stückzahlen nimmt die rechnergestützte Informationsverarbeitung ungefähr die Hälfte der Arbeit ein gegenüber der anderen Hälfte, die der Halbleiter-Prozeßtechnik gewidmet ist. Dieser Trend hat sich nach 30 Jahren in der Mikroelektronik eingestellt.

Die Aufgaben der Informationsverarbeitung in der **Mikroelektronik** sind gekennzeichnet durch die äußerst hohe Zahl von Schaltelementen auf kleinstem Raum und deren sehr komplexe Verknüpfung in zunehmend mehrschichtigen Schaltkreisen mit einer Vielfalt und Vielzahl von informationstechnischen Funktionen in einem Chip. Die hohe Dichte führt zu höheren Schaltfrequenzen und Energiedichten, wodurch elektromagnetische Störfelder, thermische Belastungen und Signallaufzeiten zu beherrschen sind. Die Fertigungsanlagen werden immer aufwendiger und kostspieliger. Die Informationsverarbeitung hat beträchtlich dazu beigetragen, diese Probleme soweit möglich zu lösen. So werden u.a. bereits im Entwurf über CAD-Layout und Simulationen der Funktionen und Nebeneffekte auf den verschiedenen Ebenen umfassende Analysen bezüglich elektromagnetischer Verträglichkeit, thermischer Belastung und Leistungserfüllung durchgeführt, bevor mit der Fertigung der Masken begonnen

wird. In der Fertigung werden Prozeßvorgaben vom Rechner erzeugt und Anlagen teilautomatisch beschickt und gesteuert. Zur Qualitätssicherung werden u. a. komplexe Testeinrichtungen zur elektrischen Funktionsprüfung über Rechner mit automatisch erzeugten Testdaten versorgt und gesteuert. Die Aufgaben der Informationsverarbeitung in der Entwicklung, Fertigung und Qualitätssicherung der Mikroelektronik nehmen weiterhin an Komplexität und Umfang zu.

Die im KfK verfolgte **Mikrosystemtechnik**, die im wesentlichen auf der im KfK erfundenen LIGA-Technik beruht, steht erst am Anfang ihrer Entwicklung.

Mit der **LIGA-Technik** (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung, Abformung) können fast beliebige 2 1/2- und 3-dimensionale Mikrostrukturen verschiedenartiger Materialien und deren Kombination hergestellt werden. Die Abformtechnik erlaubt preiswerte große Stückzahlen. Mit dieser Technik können nun mechanische, optische, fluidische und chemische Komponenten einzeln und in Kombination sowie durch eine entsprechende Aufbau- und Verbindungstechnik integriert mit mikroelektronischen Komponenten zu Mikrosystemen gefertigt werden. Für diese Technik können nur einige wenige Methoden und Werkzeuge der Informationsverarbeitung aus der Mikroelektronik übernommen werden wie z. B. CAD-Systeme (Computer Aided Design) für 2-dimensionale Strukturen zur Entwurfsbeschreibung als Eingabe in einen Elektronenstrahlschreiber für die Maskenerzeugung oder eine Prozeßbeschreibungssprache für verfahrenstechnische Ätz- und Galvanikprozesse. Der Entwurf von 3-dimensionalen Strukturen erfordert aber u. a.

den Einsatz von 3D-CAD-Systemen und deren Kopplung zu 2D-CAD-Systemen für die schichtweise Herstellung der 3D-Strukturen und die damit verbundene Umsetzung des 3D-Produktentwurfs eines Mikrosystems in 2D-Entwürfe der schichtartigen Zwischenprodukte. Diese 3-dimensionalen Komponenten nutzen gleichzeitig mehrere physikalische Effekte wie z. B. elektrische Felder, mechanische Elastizität und thermische Ausdehnung, was weitaus komplexere Simulationen und Analysen erfordert wegen der eng gekoppelten physikalischen Variablen, der unterschiedlichen Materialeigenschaften und der Mikro- bzw. Nanodimensionen, in denen die makroskopischen Gesetze oft nicht mehr gelten. Außerdem führt die Vielfalt von 3D-Geometrien u. a. zu komplexeren elektrischen Feldern, mechanischen Federn und Wärmeleitungen. Die Abschätzung des dynamischen Verhaltens eines entworfenen Mikrosystems ist daher gegenüber der eines digitalen mikroelektronischen Systems weitaus schwieriger und erfordert komplexere Rechenverfahren und Parametersätze, ja sogar neuartige Rechenmethoden und Modelle.

Die **Herstellung** der Mikrostrukturen erfolgt durch viele, (bis zu 200) meist sequentielle Prozessschritte, die teilweise voneinander abhängig sind. Diese physikalisch-chemischen Prozesse (wie Ätzen, Beschichten und Abformen) verhalten sich oft bei Änderung von Material- und Prozeßparametern in unvorhergesehener Weise, was zu unzureichender Qualität von Zwischenprodukten und dem Endprodukt führt. Daher müssen über **Experimente** und Meßdaten signifikante Parameter rechnergestützt ermittelt werden, die für manuelle und rechnergeführte Steuerungen und Regelungen der Fertigungsanlagen notwendig sind. Neben der Untersuchung der Prozeßtechnik müssen die verschiedenen, z. T. neuartigen Werkstoffe auf ihre Eigenschaften in unterschiedlichen geometrischen Formen experimentell und modellhaft analysiert werden, um wichtige Parameterwerte für das dynamische Verhalten zu erhalten wie z. B. Elastizitätsmodul, Dielektrizitätskonstante, Hysterese, Reibung. Hierbei fallen viele Meßdaten, Geräteeinstellungen und Umgebungsbedingungen an, die nur über informationsverarbeitende Einrichtungen erfaßt, ausgewertet und zur Entwicklung, Fertigung und Qualitätssicherung schnell und zuverlässig bereitgestellt werden können. Außerdem kann die **Qualitätskontrolle** der Ergebnisse der vielen Prozessschritte (Zwischenprodukte) nur über rechnergestützte Verfahren und Einrichtungen zeitgerecht und zuverlässig durchgeführt werden. Zur Montage, zum Transport und zur Prü-

fung mikrotechnischer Teile sind automatisch arbeitende Positionierungs- und Greifeinrichtungen und für komplexere Handhabungen ist eine in die Mikrowelt feinfühlig eingreifende **Telerobotik** notwendig.

Mikrosysteme, die vom KfK für demonstrative Anwendungen in der Automatisierungstechnik, Medizin und Umwelttechnik entwickelt und prototypisch gefertigt werden, enthalten jeweils ein Subsystem zur **Informationsverarbeitung**, das mit seiner Hardware-Architektur und Software auf die Anwendung zugeschnitten ist. Hierzu werden die mikroelektronischen Funktionseinheiten und ihre Verknüpfung entworfen; der Entwurf incl. seiner Einbettung in das gesamte Mikrosystem werden analysiert und das dynamische Verhalten simuliert. Der detaillierte Schaltungsentwurf und seine Fertigung werden anschließend nach außen vergeben.

Zur Eröffnung neuer **Anwendungsfelder** für die Mikrosystemtechnik sind ganzheitliche Systemlösungen z. B. in der Medizin nötig, die dem Anwender einen wesentlichen Fortschritt bringen und die das Mikrosystem in die Makroumgebung harmonisch einbetten. Wir konzentrieren uns vorerst auf die laparoskopische **Minimal Invasive Chirurgie (MIC)**, in der noch Minitchnik eingesetzt werden kann, die dann durch Mikrotechnik sukzessiv ergänzt wird. Hier muß gewährleistet sein, daß der operierende Chirurg (in der Makrowelt) das im Körper befindliche Mikrosystem sicher führen und bedienen kann.

Aus diesen skizzierten Problemstellungen leiten sich die im Institut für Angewandte Informatik bearbeiteten FuE-Aufgaben ab.

2. FuE-Aufgaben des Instituts für Angewandte Informatik (IAI)

2.1 Rechnergestützte Werkzeuge und Methoden

Der Entwurf eines Mikrosystems wird aus den Anforderungen der Anwendung und aus den Randbedingungen der Prozeßtechnik abgeleitet (Abb. 1). In der Anforderungsanalyse werden die zu erfüllenden Funktionen und Leistungen sowie die Einschränkungen der Umgebung des zu entwerfenden Gesamtsystems, d. h. sowohl des makrotechnischen wie des mikrotechnischen Teils und seiner internen wie externen Schnittstellen, erfaßt und geordnet. Der Entwurf muß auch die begrenzten Möglichkeiten der verfahrenstechnischen Prozesse und Anlagen, die den 3D-Mikrosystementwurf mehrschichtig mit verschiedenartigen Werkstoffen in die reale Mikrostruktur umsetzen, berücksichtigen.

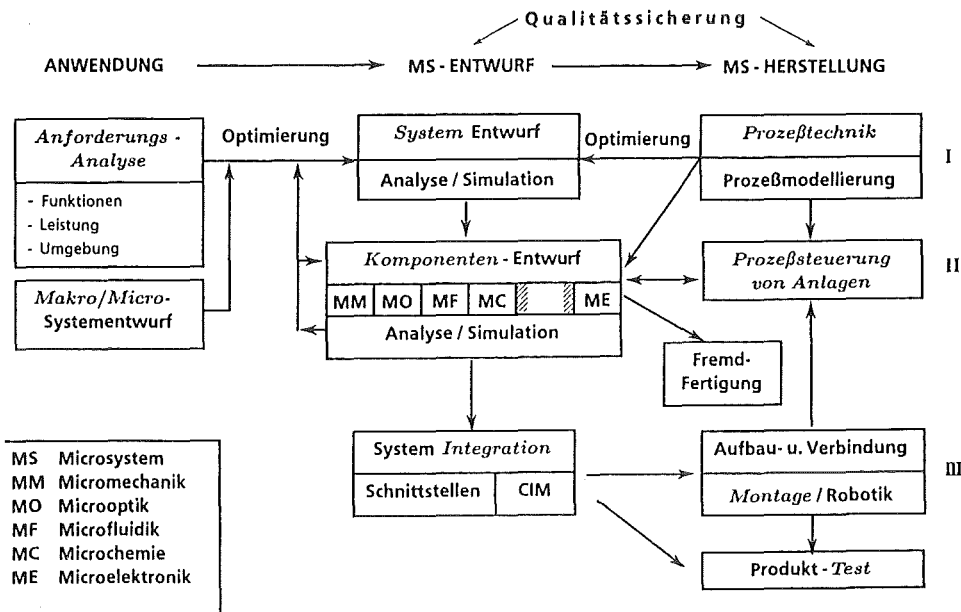


Abb. 1: Informationsbezogene Aktionen des Entwurfs und der Herstellung von Mikrosystemen

sichtigen. Diese Prozesse sind statistischen Schwankungen unterworfen. Es sind umfassende Simulationen und Analysen sowohl des Entwurfs des Produkts (Mikrosystem) wie auch der Herstellungsprozesse soweit wie möglich durchzuführen, um iterativ zu einer Systemlösung zu gelangen, die die Anforderungen der Anwendung mit den Fähigkeiten der Prozeßtechnik in Einklang bringt. Aus alternativen Systemlösungen ist die bestmögliche Lösung hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Leistung und Qualität durch eine vorwiegend heuristische Optimierung zu finden. Es besteht also eine enge Beziehung zwischen dem Mikrosystem-Entwurf und seiner Realisierung, der Herstellung. Beide müssen einer gründlichen Qualitätssicherung unterworfen werden. Simulation und Analyse setzen eine abstrakte Beschreibung der wesentlichen Funktionen und des Verhaltens von Produkt und Prozessen voraus, was unterschiedliche Modellierungen entsprechend den betrachteten Systemaspekten und den vorhandenen physikalischen/ chemischen Kenntnissen über die Herstellungsprozesse bedingt. Den Entwurf kann man sich grob in drei Ebenen vorstellen: System (I), Komponente (II) und Integration (III). Die Komponenten können aus mechanischen, optischen, fluidischen, chemischen oder elektronischen Mikrostrukturen aufgebaut sein, die entweder über Aufbau- und Verbindungsschichten (z. B. Opferschichten) prozeßtechnisch oder über Montage miteinander zu einem Mikrosystem integriert werden. Je nach Art der Mikrostruktur sind unterschiedliche Analysen und Simulationen der Kompo-

nenten allein, in gegenseitiger Wechselwirkung und in Wechselwirkung mit der mikroelektronischen Komponente in größerem Detail im Vergleich zur Systemebene durchzuführen. Das Mikrosystem kann in hybridem oder vollintegriertem Aufbau zum Endprodukt gefertigt werden, das dann einem Produkttest unterworfen wird, der Funktionen und Leistung mit den ursprünglichen Anforderungen vergleicht.

Die einzelnen Aktionen des Entwurfs und der Herstellung von Mikrosystemen verwenden (am Eingang), erarbeiten (intern) und erzeugen (am Ausgang) verschiedenartige Informationen in den drei Ebenen (Abb. 2). So sind als Eingangsinformationen für den Systementwurf und dessen Analyse die Anforderungen an das zu realisierende Mikrosystem (in abstrahierter Form als Produktmodell) und die Bedingungen aus den prozeßtechnischen Abläufen anzusehen. Daraus werden die Systemstruktur mit ihren wesentlichen Werkstoffparametern und zu ihrer Analyse/Simulation das entsprechende Systemmodell erarbeitet. Das Ergebnis (am Ausgang) schlägt sich als Spezifikation für die Komponenten nieder. Die verschiedenen Informationsbeziehungen können aus Abb. 2 abgelesen werden. Es soll hier darauf hingewiesen werden, daß das Informationsgerüst, das in einer Wissensbasis bzw. Datenbank abzulegen ist, sehr umfangreich und vielgestaltig ist, wie im Vortrag von Dr. Scherer u. a. näher gezeigt wird [1].

Umfang und Komplexität der zu verarbeitenden Informationen können nur durch den Ein-

MS - ENTWURF			MS - HERSTELLUNG
Eingang	I	Anforderungen (Produktmodell) Prozestechn. Abläufe / Bedingungen	Prozeßvariablen Prozeßablaufmodell
	II	Spezifikation der Komponenten Prozeßbedingungen	Prozeßvorgaben (Sollwerte)
	III	Schnittstellen (Struktur, Parameter)	Verbindungsstruktur Montageplan
Intern	I	Systemstruktur, Parameter (Werkstoffe) Systemmodell / -simulation	Prozeßmodelle (Algorithmen, Statistik)
	II	Komponentenstruktur, Parameter Komponentenmodell / -simulation	Steuer - Regel - Algorithmen
	III	Integrations- u. Montageplan	Steuer - Regel - Algorithmen Robotersteuerung
Ausgang	I	Spezifikation der Komponenten	Prozeßvorgaben (Sollwerte)
	II	Schnittstellen Prozeßvorgaben (Sollwerte) ME - Schaltungsspezifikation	Prozeßbedingungen
	III	Verbindungsstruktur Montageplan	Testspezifikation

Abb. 2: Informationsgerüst des Entwurfs und der Herstellung von Mikrosystemen

	ENTWURF / ANALYSE	HERSTELLUNG	QUALITÄTSSICHERUNG
I	Wissensbasierte Methoden Spezifikationsprache Systemmodelle / Systemsimulation	Statist. Versuchsplanung Experimentelle Optimierung Prozeß- und Ablaufsprache/ Simulatoren	Konsistenz- u. Plausibilitäts- Prüfmethoden Analysatoren Testplan
II	CAD - Systeme Gekoppelte mechan., elektr., opt., therm., fluid. Analysatoren u. Simulatoren FEM, SPICE, VHDL	Prozeßsteuerungssprache Numerische Algorithmen Statistische Verfahren M - S - R - Datenverarbeitung	Strukturvermessung Mustererkennung Prüfdatenverarbeitung Verifikation der Modelle
III	Wissens- / Datenbanktechnik CAD / CAM Software - Management	Telerobotik (Ablaufplanung, Steuerung Telepräsenz)	Verifikation / Validation Schnittstellenprüfer Testverfahren

Abb. 3: Rechnergestützte Werkzeuge und Methoden

satz von rechnergestützten **Werkzeugen** und modernen Methoden der Informatik bewältigt werden. Da die Informationen des Entwurfs, der Analyse, der Herstellung und der Qualitätssicherung über alle Ebenen hinweg miteinander in Beziehung stehen, durchziehen wissensbasierte Methoden, Entwicklungsumgebungen und Datenbanktechnik alle diese Bereiche. In Abb. 3 sind schlagwortartig die Werkzeuge und Methoden angegeben, die vorwiegend in den einzelnen Bereichen und Ebenen notwendig sind. So werden vor allem zum Entwurf von Subsystemen und Systemkomponenten CAD-Systeme, zur Analyse von mechanischen Mikro-

strukturen Finite Element Methoden (FEM) und zur Simulation von mikroelektronischen Subsystemen der Analogsimulator SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) und zur Beschreibung des Digitalentwurfs die höhere Sprache VHDL (Very high speed integrated circuit Hardware Description Language) eingesetzt. Zur funktionalen Beschreibung der Herstellungsprozesse als Grundlage der Prozeßmodellierung und Simulation dient eine Prozeß- und Ablaufsprache, die textuelle und graphische Formen annehmen kann, wie z. B. die amerikanische wissensdarstellende Sprache PFR (Process Flow Representation). Auf der

nächst tieferen Abstraktionsebene werden Anweisungen an und Einstellungen von Anlagen in einer Prozeßsteuerungssprache ausgedrückt. Statistische Verfahren werden zur Meßdatenauswertung für die Prozeßmodellierung und zur Meß-, Steuer- und Regeltechnik (M-S-R) der Anlagen eingesetzt. Die Qualitätssicherung durchzieht mit ihren verschiedenartigen Prüfungen und Verifikationen alle Bereiche und Ebenen. Im Gegensatz zur Mikroelektronik spielt hier die Strukturvermessung eine wichtige Rolle. Auch im Bereich der Fertigungsplanung und -steuerung sollen soweit wie möglich vorhandene Werkzeuge, Methoden und Schnittstellenstrukturen der Makrotechnik genutzt werden, wie z.B. die im europäischen ESPRIT entwickelten Systeme Computer Integrated Manufacturing - Open Systems Architecture (CIM-OSA) und Standard for the Exchange of Product Data (STEP). Zur Handhabung von Mikrostrukturen für Montage, Trennung, Positionierung und Transport sind Techniken der Telerobotik erforderlich, die auf die Besonderheiten der Mikrotechnik wie z.B. kleinste Dimensionen, Kräfte und Empfindlichkeiten zugeschnitten werden müssen.

Bei der Entwicklung und beim Einsatz von Werkzeugen ist darauf zu achten, daß die Schnittstellen der Werkzeuge, die in verschiedenen Instituten, Abteilungen und Industrien eingesetzt werden, möglichst kompatibel sind, so daß formative Datenumsetzungen möglichst gering gehalten werden. Die Fertigung muß Rücksicht auf die anwendungsspezifische Struktur dieser Mikrosysteme, ähnlich wie bei der ASIC-Fertigung, nehmen. Um auf dem weltweiten Markt mit großem Wettbewerbsdruck schnell und flexibel reagieren zu können, müssen Entwurf, Analyse und Fertigung informationsmäßig eng, aber modular miteinander verzahnt sein. Die rechnergestützten Werkzeuge einschließlich ihrer Entwicklungsumgebungen, die im IAI entwickelt werden, müssen daher über die Fertigung von Funktionsmustern hinaus auch in der kommerziellen Fertigung einsetzbar sein.

2.2 Informationstechnik in Mikrosystemen

Jedes aktive Mikrosystem enthält eine mikroelektronische Komponente, die invariante und anwendungsabhängige informationsverarbeitende Funktionen ausführt. Diese Funktionen bestehen aus der Kombination von Hardware und Software (Bild 4). Aus der Umgebung des Mikrosystems (und evtl. aus dem Mikrosystem selbst) werden über physikalische/chemische Phänomene durch die Sensorik (Einzelsensor, Sensorfeld) analoge elektrische Signale er-

zeugt, die im A/D-Wandler in digitale Werte umgewandelt, gefiltert und verstärkt werden. Diese Signaldaten können in der "**Signalverarbeitung**" speziellen Filterungen und Mustererkennungen unterworfen werden, wobei Spezial-Hardware-Prozessoren oder Neuronale Netzwerke die Signalverarbeitung beschleunigen können. In der "**Datenverarbeitung**" werden dann alle Funktionen zur numerischen Auswertung der Signaldaten, zu ihrer Verknüpfung mit anderen Daten in Algorithmen und zur Steuerung/Regelung von Vorgängen im Mikrosystem selbst und in der Umgebung über entsprechende Aktorik durchgeführt. In dieser Software-Einheit, die durch eine besondere Prozessor-Hardware in ihrer Leistung unterstützt werden kann, werden auch die **Kommunikation** mit der Umgebung oder anderen Mikrosystemen über Bus (und Netz) und die **Selbstüberwachung** und -test des Mikrosystems gesteuert. Um den Hardware- und Softwareaufwand zu begrenzen, sind bestimmte Funktionen, die anwendungsunabhängig sind und häufig vorkommen, nach Möglichkeit einheitlich zu gestalten wie z. B. interne Steuerungsabläufe, einfache Signalfilterungen und Routine-Rechenprogramme. Um flexibel auf neue Anforderungen aus der Anwendung reagieren zu können, soll die Software möglichst modular aufgebaut sein. Die Software muß auf möglichst preiswerte Hardwarestrukturen (mit begrenzten Leistungen) zugeschnitten werden, um die Gesamtkosten des Mikrosystems in Grenzen zu halten. Anwendungen mit hohen Sicherheitsanforderungen wie z. B. in der Medizin verlangen fehlertolerante Hard-/Softwarestrukturen und -funktionen, was zu erhöhtem Aufwand führt. Die Entwicklung dieser mikrosysteminternen Software verlangt eine eigene **Entwicklungsumgebung** auf einem größeren Hostrechner (meist Arbeitsplatzrechner) u. a. mit Fähigkeiten zur Compilierung, Editierung, Test und Simulation von Programmen bzw. Funktionen. Soweit wie möglich wird angestrebt, vorhandene Hardware-Prozessoren und Mikrokontroller einzusetzen und anwendungsspezifische Software hauptsächlich selbst zu entwickeln. Beim Systementwurf sind alternative Lösungen bezüglich der Hardware-Architektur und der Software-Funktionen zur Signal- und Datenverarbeitung zu erstellen und durch Analysen und Simulationen die beste Lösung auszuwählen.

2.3 Medizinische System-Anwendung

Die Humanmedizin ist ein potentes und lohnendes Feld, in der die Mikrosystemtechnik beachtliche Fortschritte zum Nutzen des Patienten

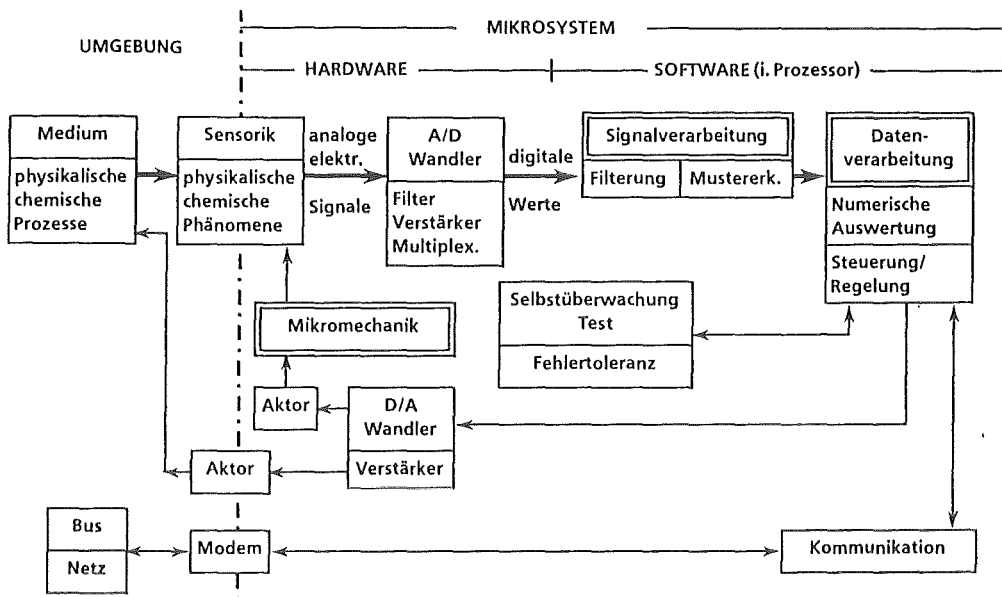


Abb. 4: Informationstechnik im Mikrosystem

ten wie des Gesundheitswesens bringen kann. Die Mikrosystemtechnik ermöglicht das "sanfte" Eindringen in den menschlichen Körper, in seine Organe und Gefäße und die gezielte lokale Behandlung sowohl operativ wie medikamentös. Die **Minimale Invasive Therapie (MIT)**, und hier besonders die Minimale Invasive Chirurgie (MIC), wird bereits bei bestimmten Operationen praktiziert, wenn auch die endoskopische Technik mit ihren manuellen mechanischen Instrumenten, starren Endoskopen und elektronischen Geräten noch beschränkt ist. Es ist nun das Ziel, die im industriellen Bereich weit entwickelten Technologien der Telerobotik, Automatisierungs-, Video- und Simulationstechnik in den medizinischen Bereich umzusetzen und dessen hohen Anforderungen gerecht zu werden.

Das Innere des Körpers wird als ein geschlossener, dem Mediziner nur über 3D-Videoendoskopie (**Telepräsenz**) zugänglicher, vielgestaltiger Hohlraum betrachtet, in dem von außen nur über natürliche Öffnungen oder minimale Einschnitte ferngesteuerte, feinfühlig Operationsinstrumente eingeführt werden und diese von außen über einen oder mehrere Manipulatorgriffe bedient werden. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle muß ganz auf die Bedürfnisse des operierenden Arztes zugeschnitten sein, wobei möglichst viele seiner Sinne wie Sehen, Hören, Tasten und Kraftspüren einzubeziehen sind. Zur gründlichen Diagnose und ständigen Beobachtung des Zustands am Operationsort sind endoskopische 3D-Ausleuchtung, 3D-Optik sowie Sensorik zur Mes-

sung von Temperatur, Feuchtigkeit, Geweboberfläche, Gewebehärte, chemische-/biologische Absonderungen und Durchblutung erforderlich, die alle ferngesteuert und aufeinander abgestimmt zu positionieren sind. Die verschiedenartigen endoskopischen Werkzeuge zum Trennen, Zusammenfügen, Greifen, Abbinden und Spülen von Gefäßen und Entfernen von Gewebe sind über Antriebe und ihre Ansteuerungen von außen feinfühlig mittels entsprechender Kraftreflektion zu betätigen. Sie dürfen in ihrem eng begrenzten Arbeitsraum keine Verletzungen an den Wandungen hervorrufen. Die Größe des Arbeitsraums gibt die maximale Größe des Werkzeugs einschließlich seines Antriebs und evtl. Wechselkopfs für Mehrfunktions-Werkzeuge vor. Im laparoskopischen Körperbereich ist der Arbeitsraum größer als im Gehirn, wo auch viele Bereiche nicht direkt erreichbar sind. In der Neurochirurgie werden Werkzeuge, Sensoren, Optik und Antriebe im Mikromaßstab wohl zuerst große medizinische Fortschritte bringen. Im laparoskopischen Bereich werden mikrotechnische Sensorfelder und in Werkzeuge integrierte mikrotechnische Sensoren große Verbesserungen für die MIC erzielen. Hier kann Feinwerktechnik oft ausreichen.

Unabhängig von der Art der MIC besteht jedes MIC-Operationssystem aus der **Integration** von makroskopischen und mikroskopischen Systemkomponenten. Die inkorporale Mikrowelt wird sozusagen in die Makrowelt über Telepräsenz abgebildet. So ist der Mensch mit seinen Armen, Händen und Beinen (Aktoren) und seinen

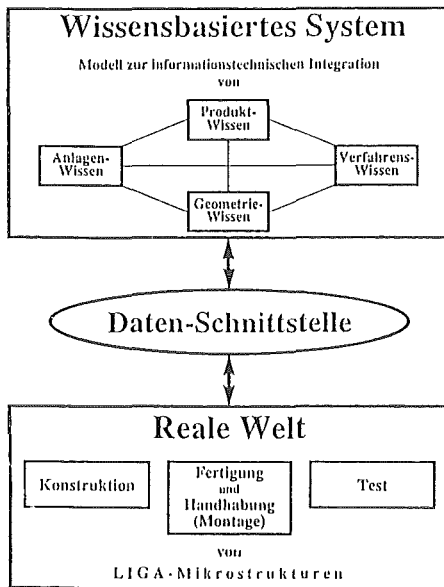


Abb. 5: Beziehungen zwischen LIGA-Verfahren und Informationstechnik

Sinnesorganen an Kopf und Fingern (Sensoren) ein Teil der Makrowelt und dementsprechend sind es auch Manipulatorgriff, Bildschirm und Tastatur des Operationsbedienstands. Dieser Bedienstand soll auch schnellen Zugriff zu Hintergrundinformationen der Operation bieten wie z. B. über Röntgendiagnose, Tomographie, Laboranalytik und Anamnese, die über Vernetzung und Zugriff auf Datenbanken im Krankenhaus verfügbar sind. Auch die vielen elektronischen Überwachungsgeräte im Operationssaal sind in das MIC-Informationssystem einzubinden. Die hohen Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanforderungen bedingen fehlertoleranten Aufbau der informationstechnischen Hardware und der Software für kritische Funktionen. Da die medizintechnischen Geräte meistens von vielen kleinen und mittelständischen Spezialfirmen hergestellt werden, spielt der Aufbau der vielen elektronischen Schnittstellen eine wichtige Rolle.

Für die Entwicklung von **Telemanipulatoren**, von deren Werkzeugen, Steuerungen und Antrieben sind Simulationen des dynamischen Zusammenspiels von Kinematik, Steuerung und Gewebe sehr wichtig. Im Gegensatz zu einer technischen Umgebung sind bei einer biologischen Umgebung mit gefährlicher Verletzungsgefahr und schwer meßbarer Elastizität und Verformungsfähigkeit der Gewebewandungen oft nur heuristische Lösungen mit iterativen Simulationen möglich. Je kleiner die Dimensionen der mechanischen Komponenten werden, desto stärker gehen (meist nichtlineare) Neben-

effekte wie Reibung oder thermische Verformung ein, die Steuerung und Regelung erschweren. Die Simulationstechnik kann auch zur Planung und Schulung von MIC-Operationen sowie zum Durchspielen von "Störfällen" wertvolle Unterstützung bieten.

Unsere FuE geht schrittweise vor, indem sie möglichst schnell praktikable Lösungen mit feinwerktechnischer Kinematik verfolgt mit allen Komponenten der Telerobotik und rechnergestützten Steuerungstechnik, die auch bei weiterer Miniaturisierung im wesentlichen übernommen werden können. Allerdings stößt man im Mikrobereich oft an Grenzen und muß andere physikalische Phänomene wie z. B. Piezoelektrizität und magnetische Verformung nutzen. Auf gute Ergonomie und Zuverlässigkeit des MIC-Systems wird hierbei großer Wert gelegt.

3. Stand der Arbeiten

3.1 Rechnergestützte Werkzeuge und Methoden

3.1.1 Informationstechnische Integration des Entwurfs- und Fertigungswissens

Die enge Verknüpfung des Wissens und der damit verbundenen Informationen über Entwurf, Herstellung und Qualitätssicherung wurde durch das umfassende System LIMES (LIGA Modelling and Engineering System) auf der Basis eines wissensbasierten objekt-orientierten Ansatzes entworfen, so daß nun mit der Realisierung der Software-Entwicklungs- und Produktionsumgebung begonnen werden konnte (Abb. 5). Außerdem kann damit die Einbindung bereits vorhandener Software-Werkzeuge systematisch erfolgen. Die Repräsentation von **Prozeßwissen** auf dem Rechner bildet die Grundlage für eine durchgängige rechnergestützte Integration des gesamten Fertigungsprozesses, da das Fertigungswissen bei sämtlichen Schritten des Produktzyklusses, wie u. a. der Spezifikation, dem Entwurf und der Qualitätskontrolle benötigt wird. Es wurde zuerst ein Modell zur Repräsentation sowohl statischer Wissensinhalte über den Prozeß als auch funktional kausaler Zusammenhänge entwickelt, mit dessen Hilfe der reale Prozeßablauf auf dem Rechner beschrieben und simuliert werden kann. Prozeßwissen kann jedoch durch die Erfassung scharfer linguistischer und numerischer Zusammenhänge allein nicht beschrieben werden. Daher werden zur Erfassung und Verarbeitung vager Wissensinhalte auch Methoden des plausiblen Schließens auf Grundlage der Fuzzy Logik eingesetzt. Es zeigte sich, daß

es durch die kombinierte Anwendung scharfer und vager Wissensverarbeitung möglich wird, für die Durchführung eines Prozesses bedeutende Wissensinhalte strukturiert zu erfassen und zu simulieren.

Im Rahmen der **Qualitätssicherung** (hier speziell optische Qualitätskontrolle von Mikrostrukturen durch Vermessung) wurde eine durchgängige integrierte Lösung vom Entwurf einer Mikrostruktur im mechanischen CAD-System bis hin zur automatischen Vermessung der gefertigten Struktur durch das BV-System COSMOS-2D (Computer System for Measurement of Optically Acquired Structure Surfaces in 2-Dimensional Space) entwickelt und demonstriert.

Dieser Prototyp wurde für einfach zusammenhängende Strukturen realisiert. Eine wissensbasierte Komponente sorgt für die semantische Aufbereitung der im CAD-System erzeugten Geometriedaten (Geometriemodell). In einer weiteren wissensbasierten Komponente ist die Strategie niedergelegt, wie die einzelnen Vermessungsaufträge zusammengestellt werden müssen, damit ein semantisch korrekter Gesamtauftrag an COSMOS-2D generiert werden kann (Konfiguration).

Als Basis für die **Integration** der mechanischen CAD-Welt, der wissensbasierten Aufbereitung, dem elektronischen CAD-System und dem BV-System COSMOS-2D wurde ein objektorientiertes Datenmodell entwickelt. Die im mechanischen CAD erzeugte Struktur wird über die IGES-Schnittstelle (Initial Graphic Exchange Specification) in dieses Datenmodell abgebildet. Aus dem Datenmodell werden sowohl ein GDSII-File (Graphic Data station II) als Input für das elektronische CAD-System als auch ein Vermessungsauftrag als Input für COSMOS-2D generiert.

In dem Beitrag "Informationstechnische Integration von LIGA-Entwurfs- und Fertigungsumgebung" von K.-P. Scherer u. a. wird näher darauf eingegangen [1].

Das IAI (Dr. H. Eggert) leitet das Teilprojekt 4 "Mikrostrukturierungsverfahren" im Rahmen des BMFT-FuE-Verbundprojekts "Methoden- und Werkzeugentwicklung für den Mikrosystementwurf" und hat entsprechende FuE-Aufgaben übernommen, die mit dem KfK-FuE-Programm kompatibel sind (Abb. 6).

3.1.2 Vermessung von Mikrostrukturen mit COSMOS-2D

Zur Sicherung der Qualität von Mikrostrukturen, die mit dem LIGA-Verfahren hergestellt werden, ist das Strukturvermessungssystem COSMOS-2D entwickelt worden, das durch-

schnittlich in 0,5 sec. ein Mikrostrukturbild vermessen und analysieren kann. Durch Einbau spezieller Bildverarbeitungs-Hardware und Entwicklung spezieller Algorithmen können nun unterschiedliche Materialoberflächen vermessen werden. Bei der galvanisierten Ni-Struktur wird eine gewölbte Strukturoberfläche (Badewanneneffekt) durch den eigenentwickelten schnellen Software-Autofocus zusammen mit der speziellen Bildverarbeitungs-Hardware berücksichtigt. Eine benutzerfreundliche Benutzung wird durch die Entwicklung der Bedienoberfläche unter X11 (Open Look) erreicht.

Zur Vermessung von **3D-Strukturen** über das bildgebende Verfahren der Rasterelektronenmikroskopie (REM) wird die Methode der Stereophotogrammetrie verwendet. Dazu werden die Mikroskopfunktionen und der Probenstisch über einen externen Rechner gesteuert. Untersuchungen ergaben, daß Neuronale Netze für die Erkennung geometrischer Merkmale eingesetzt werden können. Es wurde ein Konzept erarbeitet, um aus den vorliegenden Meßaufträgen, geometrischen Daten und Probenparametern die für die Vermessung relevanten Daten (Blickwinkel, REM-Parameter und Daten für die Erkennungsalgorithmen) zu berechnen. Software wird entworfen.

Näheres kann dem Beitrag von H. Guth u. a. "Automatische Vermessung von 2D- und 3D-LIGA-Mikrostrukturen zur Qualitätskontrolle" entnommen werden [2].

3.1.3 Statistische Prozeßkontrolle für LIGA-Prozeßanlagen

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Theoretische Physik der Universität Freiburg (Prof. Honerkamp) wurde begonnen, mit Hilfe der Statistischen Versuchsplanung und Experimentellen Optimierung Verfahren zur verbesserten Steuerung/Regelung der Abformprozesse in einer Prozeßanlage des Instituts für Mikrostrukturtechnik (IMT) (Vakuum-Prägen von LIGA-Mikrostrukturen aus Polymethylmethacrylat - PMMA-) zu finden. Dazu werden vorhandene Programmpakete angepaßt und weiterentwickelt.

3.1.4 Automatisierte Handhabung von Mikrostrukturen

Die Entwicklung von rechnergesteuerten Positionierungs-, Greif- und Einspannvorrichtungen als Basiskomponenten für die automatisierte Handhabung und Telerobotik im Rahmen der mikrotechnischen Fertigung und Qualitätskontrolle wurde begonnen.

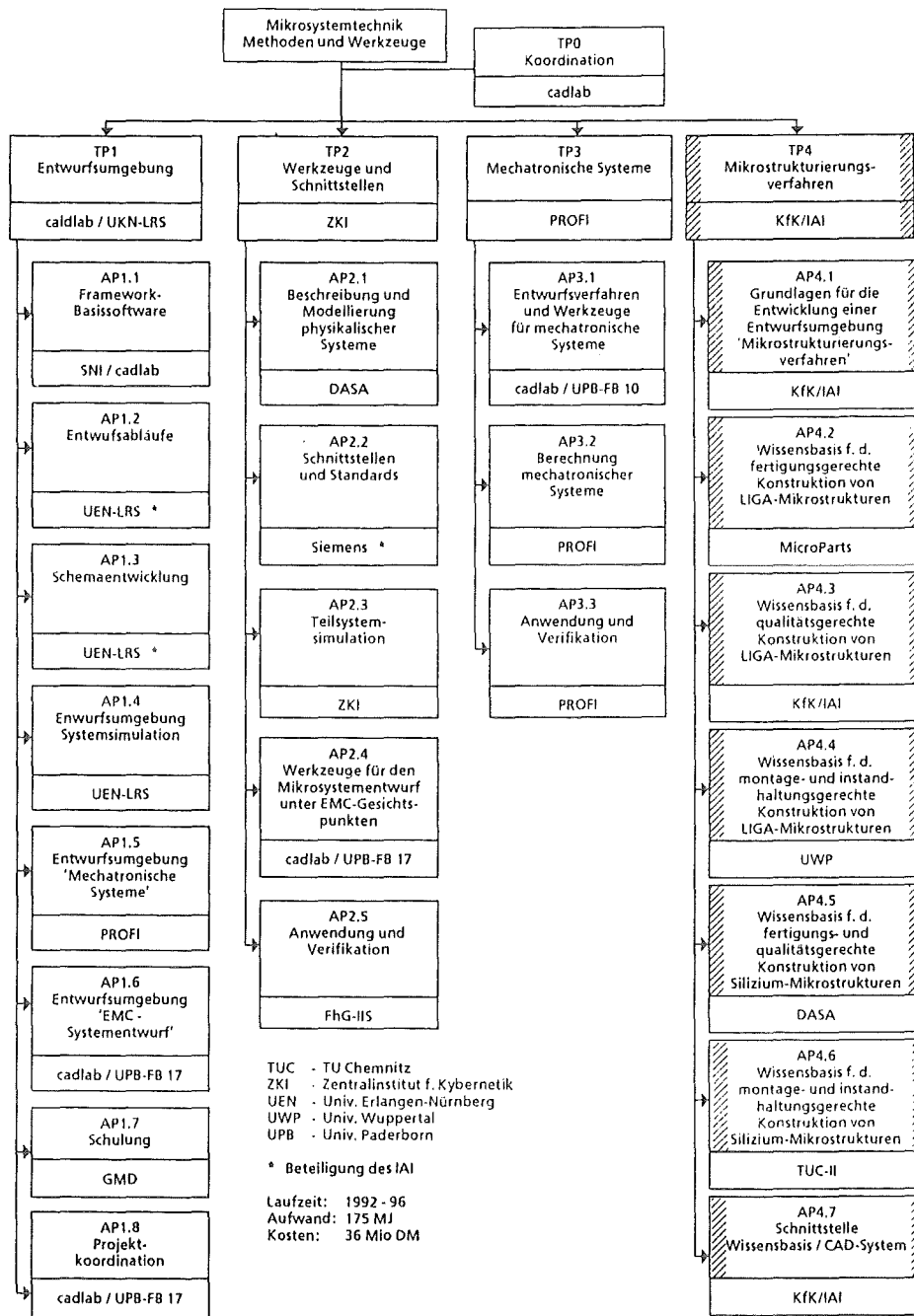


Abb. 6: Projektstruktur gegliedert nach Teilprojekten (TP) und Arbeitspaketen (AP)

Zur Montage von Mikrosystemen wurde eine Roboterzelle mit einem hochpräzisen Träger-Tisch, Feinpositionierer sowie Greif- und Spannvorrichtung und Steuereinheiten, die über CAD-Modelldaten, Sensorik und Bildverarbeitung rechnergeführt werden, konzipiert und spezifiziert. Es wird hier eine Kooperation mit der Fa. Jenoptik angestrebt. Für die Maskenjustierung wurde das System Computer Aided LIGA Mask Alignment (CALIMA) entworfen, das automatisch schnelle präzise Einstellungen von Justiervorrichtung, Positioniertisch, Mikroskop

und Kamera über Bildverarbeitung auf dem angeschlossenen PC vornimmt (Abb. 7). Mit der Realisierung wurde begonnen. Dadurch werden die bisherigen langwierigen manuellen Justierungs- und Einstellungsvorgänge schrittweise vereinfacht und in der Endausbaustufe komplett ersetzt.

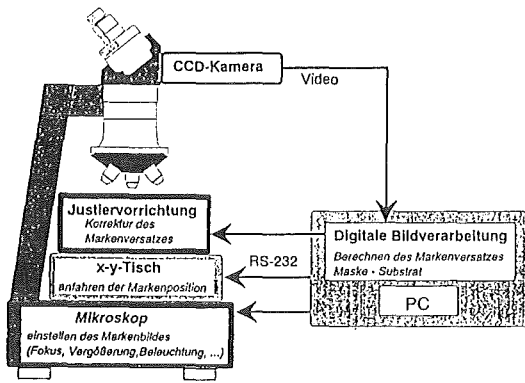


Abb. 7: Konzept des CALIMA-Systems

3.2 Informationstechnik im Mikrosystem zur Messung von Beschleunigungen

Als Demonstrator wird ein dreidimensionales Beschleunigungs-Mikrosystem entwickelt. In einer ersten Stufe wurde zusammen mit Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (HPE) eine erste Auswerteelektronik auf der Basis eines Mikrocontrollers entwickelt. Die notwendige Software zum Betreiben dieser Auswerteelektronik gliedert sich in zwei Bereiche: in die hardwarenahe Software und in Applikationsprogramme. Mit der Entwicklung der hardwarenahen Software entstand ein invarianter Kernel, der nach entsprechender Modifizierung und Erweiterung um die Aktorfunktionen auch für andere Mikrosysteme einsetzbar werden kann. Durch die Verwendung eines Mikrocontrollers bleibt eine größtmögliche Freiheit für die Applikationssoftware erhalten. Für die Weiterverarbeitung der Beschleunigungswerte im vorliegenden System wurden zunächst eine Mittelwertbildung und eine Fourier-Analyse programmiert.

Die Entwicklung eines rechnergestützten **Werkzeugs zum Entwurf** der Informationstechnik von Mikrosystemen wurde begonnen. In einer ersten Ausprägung wurde das geplante Mikrosystem zur Messung von Beschleunigungen auf der Grundlage des im IMT entwickelten LIGA-Beschleunigungssensors mit objektorientierten Methoden beschrieben und modelliert. In dieses **Modell** gehen sowohl die Material- und Geometriedaten des Sensors, als auch wesentliche Eigenschaften der Auswerteelektronik ein. So ist es möglich, Beschleunigungen zu simulieren und Ergebniswerte, die über die physikalische und elektronische Wirkungskette nachgebildet werden können, in einer graphischen Oberfläche darzustellen. Damit steht in einer ersten Version ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem eine Optimierung, wie bereits

im vorliegenden Fall des Mikrosystems zur Messung von Beschleunigungen, im Vorfeld der Realisierung durchgeführt werden kann.

Im Beitrag "LIGA-Sensoren und intelligente Sensorsysteme zur Messung von Beschleunigungen" von M. Strohrman u. a. wird das gesamte Mikrosystem inkl. Informationstechnik näher erläutert [3].

Das Konzept der Informationstechnik des Demonstrators Mikro-Elektrolyt-Analysator EL-MAS wird im Beitrag "Elektroanalytisches Mikrosystem für die Ionometrie von Flüssigkeiten (Elektrolyt-Analysator)" von W. Hoffmann u. a. dargelegt [4].

3.3 Systemanwendung "Minimal Invasive Chirurgie (MIC)"

Die 3D-Videoendoskopie für MIC hat sich aus dem 3D-Videoeobachtungs-Subsystem des Telemanipulator-Systems Digitales Steuerungssystem für Telemanipulatoren (DISTEL) für makroskopische Handhabungsaufgaben entwickelt. Dieses neuartige Verfahren der Telepräsenz erzielt eine hohe optische Güte und wurde daher von den Astronauten für die D2-Weltraummission ausgewählt. Es wurde auch effektiv in ein Kunstobjekt für die Multimediale 2 des Zentrums für Kunst und Medientechnologie (ZKM) integriert.

Die weiterführenden Arbeiten zur 3D-Videoendoskopie haben neben einer Vielzahl von Voruntersuchungen (u.a. im Tierexperiment) zu den weltweit ersten Human-Einsätzen an der Universität Tübingen (Prof. Bueß) geführt, die aufgrund ihrer Ergebnisse und Bedeutung für eine sichere Durchführung der Minimal Invasiven Chirurgie von der Fachwelt entsprechend gewürdigt worden sind. So konnten auf vier international wichtigen Veranstaltungen der MIC sowohl OP-Mitschnitte als auch Live-Aktionen in 3D präsentiert werden.

Durch die hervorragende Arbeit des Lizenzpartners sind mehrere Optik-Varianten entstanden, und es konnten die ersten marktfähigen medizin-tauglichen Systeme der Öffentlichkeit, u.a. in den USA vorgestellt werden. Der Lizenzpartner wurde für die innovative Leistung in der Opto-Mechanik als Rudolf-Eberle-Preisträger 1992 gewürdigt.

Das Telemanipulatorsystem DISTEL wurde für MIC-Vorversuche umgebaut. Anhand reproduzierbarer Referenzversuche werden mit unterschiedlichen Versuchspersonen (Chirurgen, Medizinstudenten) die prinzipiellen Möglichkeiten der Telemanipulation in der Medizin mittels 3D-Videotechnik, Sprach-Ein-Ausgabe, Bildschirmtechnik, Kommunikation und Steue-

rungstechnik untersucht und daraus die MIC-Anforderungsspezifikationen abgeleitet.

Zum präzisen Führen der endoskopischen 3D-Optik durch den operierenden Arzt wurde ein auf Infrarotsensoren beruhendes räumliches **Navigationssystem** entwickelt und erfolgreich demonstriert. Dieses System und die eigenentwickelte einfache, aber genaue Trokar-Fixierungsmechanik **ROBOX** tragen wesentlich zur Verbesserung der Sicherheit und Ergonomie des Telemanipulatorsystems für MIC bei.

Der Beitrag "Experimentelles Telemanipulatorsystem für die Minimal-Invasive Chirurgie" von E. Holler und R. Trapp erläutert dieses System [5].

Das im KfK entwickelte Software-Werkzeug **KISMET** (Kinematic Simulation, Monitoring and Off-Line Programming Environment for Telerobotics) ist für viele Anwendungen im makroskopischen Bereich erfolgreich eingesetzt worden, so u. a. bei der DLR für die Roboterexperimente der D2-Weltraummission und als wichtiges Element eines Leitstands für die Telerobotik zur Instandhaltung einer nuklearen Fusionsmaschine. KISMET wird nun für dreidimensionale, kinematische **Echtzeit-Simulationen** der Entwürfe von neuartigen endoskopischen Instrumenten und ihrer Wirkungsweise an Verdauungsorganen eingesetzt. Ein mehrgelenkiges Instrument mit elektrischen Antrieben, das in der Hauptabteilung Ingenieurtechnik (HIT) entworfen wurde, ist aus CAD-Daten zusammen mit seinem organischen Arbeitsraum im Bauch (für laparoskopische Operationen) im Detail modelliert und interaktiv simuliert worden, wobei bewegte farbige 3D-Bilder auf dem Bildschirm erzeugt werden. FEM-Analysen für Elastizitäts-Untersuchungen können auch an KISMET angeschlossen werden. Es wurde demonstriert, daß KISMET zur dynamischen Simulation, Animation und Analyse komplexer Instrumente innerhalb organischer Körper und auch zur Planung, Schulung und Überwachung von endoskopischen Eingriffen wirkungsvoll eingesetzt werden kann (Abb. 8).

Im Rahmen der Konzeptentwicklung für künftige MIC-OP-Systeme wurde eine umfangreiche **Systemanalyse** begonnen. Zunächst wurde am Beispiel der Universitätsklinik Tübingen eine Ist-Analyse zum Einsatz der MIC durchgeführt. Dabei wurde der Schwerpunkt auf die Gallenblasenoperation gelegt, über die die meisten Informationen zu erhalten waren und für die die umfangreichsten Erfahrungen zur MIC existieren. Die Minimal Invasive Chirurgie bedeutet für den Patienten eine gegenüber der herkömmlichen Chirurgie geringere, für das Ope-

rationsteam aber eine größere Belastung. Ziel einer zukünftigen Entwicklung sind leistungsfähigere Instrumente und integrierte Geräte. Dabei sind insbesondere die Fragen der Standardisierung, der einfachen Bedienbarkeit und auch der Sterilisierbarkeit zu berücksichtigen. Ein wichtiger Aspekt ist ferner die Zuverlässigkeit, sowohl der Geräte und die damit verbundene Sicherheit wie auch die durch sie zu steigende Qualität der chirurgischen Arbeit.

Die Analyse von MIC-Operationen unter verschiedenen Gesichtspunkten gab Hinweise auf bestehende Unzulänglichkeiten und Fehlerquellen, die beseitigt werden sollen.

4. Ausblick

Mit dem Fortschritt der Prozeßtechnik zur Beherrschung komplexerer Mikrostrukturen und einer größeren Materialvielfalt werden auch die Aufgaben der Mikrosysteme umfangreicher und komplexer werden. Gleichzeitig werden die Anforderungen von den Anwendungen bezüglich Preis, Qualität und Fertigungsdauer steigen. Der weltweite Markt von Mikrosystemen wird bald zu stärkerem Wettbewerb von der Halbleiterindustrie vor allem aus den USA und Japan führen. Nur durch Reduzierung der Kosten vom Konzept eines Mikrosystems bis zum fertigen Produkt und durch Reduzierung der Zeit der Umsetzung eines Konzepts in ein fertiges Produkt bei hoher Qualität wird die LIGA-Technik konkurrenzfähig sein. Dies bedeutet, daß eine größere Menge an Informationen aus Entwurf, Fertigung und Qualitätssicherung anfallen, komplexere Beziehungen zwischen den Informationen entstehen und damit höhere Leistungen der Informationsverarbeitung und Dokumentation notwendig werden. Rechnergestützte Modellierung, Simulation und Analyse von Anwendung, Produkt und Fertigungsprozeß werden eine entscheidende Rolle spielen. Dazu müssen auch die Software-Werkzeuge bezüglich Funktionalität, Ergonomie, Flexibilität und Qualität stetig weiterentwickelt werden. Auch die Nutzung von Erfahrung und Wissen beim Fortschreiten der Fähigkeiten der Prozeßtechnik bedarf des gezielten Rückgreifens auf stetig wachsende archivierte Informationsmengen und deren Verknüpfung mit den Anforderungen aus neuen Anwendungen und mit neuen Software-Werkzeugen. Komplexität und Umfang der Informatik-Aufgaben in der Mikrosystemtechnik werden also zunehmen.



Abb. 8: Simuliertes endoskopisches Instrument im 3D-Bauchraum

Literatur

- [1] K.P. Scherer, J. Brauch, H. Eggert, P. Stiller; Informationstechnische Integration von LIGA-Entwurfs- und Fertigungsumgebung, KfK-Bericht Nr. 5238, 1993.
- [2] H. Guth, C. Döpmeier, M. Goik, A. Hellmann, U. Stucky; Automatische Vermessung von 2D- und 3D-LIGA-Mikrostrukturen zur Qualitätskontrolle, KfK-Bericht Nr. 5238, 1993.
- [3] M. Strohmam, O. Fromhein, W. Keller, K. Lindemann, J. Mohr; LIGA-Sensoren und intelligente Sensorsysteme zur Messung von Beschleunigungen, KfK-Bericht Nr. 5238, 1993.
- [4] W. Hoffmann, H. Eggert, W. K. Schomburg, D. Seidel; Elektroanalytisches Mikrosystem für die Ionometrie von Flüssigkeiten (Elektrolyt-Analysator), KfK-Bericht Nr. 5238, 1993.
- [5] E. Holler, R. Trapp; Ein Experimenteller Telemanipulator für die Minimal-Invasive Chirurgie, KfK-Bericht Nr. 5238, 1993.

Materialforschung für Mikrosysteme

K.-H. Zum Gahr

Institut für Materialforschung I

Zusammenfassung

Die Mikrosystemtechnik bietet mit der Integration sensorischer, aktorischer und elektronischer Komponenten unter Einsatz spezieller, funktioneller Werkstoffe ein großes Potential zur Entwicklung ganz neuartiger Produkte in einem sehr breiten Anwendungsspektrum. Wie in anderen technischen Bereichen wird die Realisierung vieler neuer Systeme durch den Entwicklungsstand und die Verfügbarkeit der systemspezifischen Materialien sowie die Beherrschung der notwendigen Werkstoffprozeßtechnik wesentlich beeinflusst.

Im vorliegenden Beitrag werden exemplarisch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Instituts für Materialforschung (IMF) im Rahmen des Projekts "Mikrosystemtechnik" dargelegt. Die beschriebenen Arbeiten gliedern sich in Materialfragen bei der Fertigung von LIGA-Strukturen (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung, Kunststoff Abformung), Entwicklung von Materialien für spezielle sensorische oder aktorische Anwendungen sowie die systemspezifische Charakterisierung von Materialien für Mikrokomponenten.

1. Einleitung

Mikrosysteme entstehen durch eine Kombination von sensorischen, aktorischen und elektronischen Komponenten, wobei deren charakteristische Abmessungen im Mikrometerbereich liegen. Die systemorientierte Integration dieser Einzelkomponenten mit ihren z. B. chemischen, mechanischen, fluiddynamischen, optischen, biologischen, elektrischen und/oder elektronischen Funktionen führt zu teilautonomen Systemen mit eigener Datenverarbeitung, die mit ihrer jeweiligen Umgebung kommunizieren können.

Die Herstellung der Mikrokomponenten durch das LIGA-Verfahren [1] bestehend aus Lithographie, Galvanik und Abformung als wesentliche Prozeßstufen, erlaubt den Einsatz verschiedenster, funktionspezifischer Materialien. Entsprechend dem jeweiligen Anforderungsprofil sind geeignete metallische, polymere oder keramische Materialien für monolithische und hybride Mikrostrukturen, Prozeß-, Aufbau- und Verbindungstechniken sowie Verfahren zur Eigenschaftscharakterisierung der Werkstoffe und Mikrostrukturen in Mikrometer- bzw. Submikrometerdimensionen zu entwickeln (Abb. 1).

Hieraus ergeben sich vielfältige, anspruchsvolle Aufgaben für die Materialforschung. Als Materialien für Mikrosysteme bieten sich Metalle und ihre Legierungen aufgrund ihrer guten Wärmeleitfähigkeit mit der Möglichkeit zur galvanischen Abscheidung, keramische Werkstoffe mit speziellen elektrischen bzw. dielektrischen Eigenschaften, hoher Steifigkeit und chemischer Stabilität, Polymerwerkstoffe mit ihrem geringen spezifischen

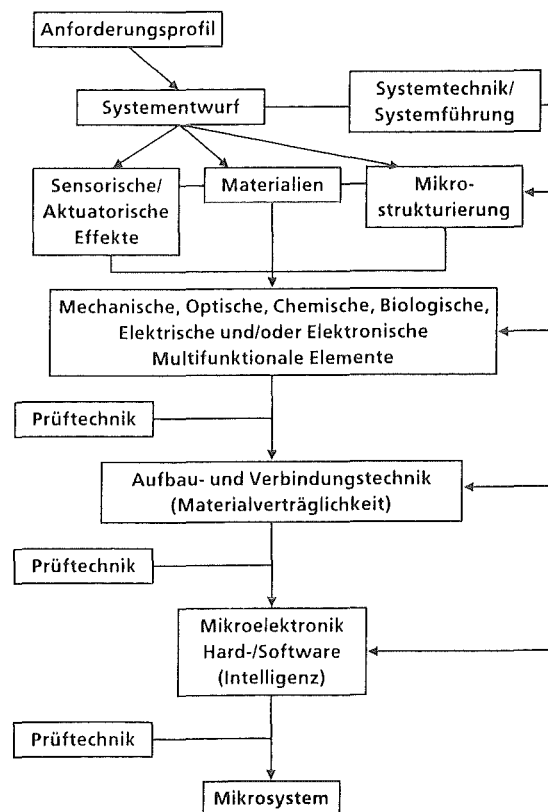


Abb. 1: Schrittfolgen zur Entwicklung von Mikrosystemen.

Gewicht, sowie guter Verarbeitungs- und Strukturierungsfähigkeit und nicht zuletzt die Halbleitermaterialien mit ihrer, aufgrund der Bedeutung in der Mikroelektronik, weit entwickelten Technologie an.

Signalwandler:

- mechanisch - elektrisch:
 - Piezoelektrischer Effekt
z.B. ZnO, AlN
 - Piezoresistiver Effekt
z.B. Si
- thermisch - mechanisch:
 - Bimetall-Effekt
z.B. Si/Metall
 - Formgedächtnis-Effekt
z.B. Ni-Ti
- magnetisch - mechanisch:
 - Magnetostriktiver Effekt
z.B. Fe, Ni, TbFe₂
- thermisch - elektrisch:
 - Thermoelektrischer Effekt
z.B. Pt/Pt-Rh
- chemisch - elektrisch:
 - Leitfähigkeit-Effekt
z.B. Metalloxid-Ionenleiter als Gassensoren
O₂ → kub. stab. ZrO₂, NiO
CO und H₂ → ZnO, SnO₂, TiO₂

Abb.2: Effekte und Materialien zur Entwicklung von Signalwandlern.

zieller Effekte an. Häufig werden derartige und andere Materialien nicht in kompakter Form sondern als dünne Schichten auf geeigneten Trägermaterialien eingesetzt. Dünnschichttechnologien, z. B. auf Basis verschiedener PVD-Verfahren (Physical Vapour Deposition) ermöglichen die Realisierung oberflächenoptimierter, ein- oder multifunktionaler Komponenten durch Ein-, Viellagen- und/oder Gradientenschichten. In Hinblick auf die Strukturierbarkeit und zur Vermeidung unerwünschter Anisotropieeffekte sind wichtige Gefügeelemente der eingesetzten Materialien, wie z. B. Größe und Form der Kristallite, Poren oder zweiten Phasen sowie Texturen, im Submikrometerbereich zu optimieren. Im Vergleich zu Komponenten der Mikroelektronik hat die Dreidimensionalität der mikrotechnischen Komponenten eine wesentlich stärkere Bedeutung. Hierdurch ergeben sich besondere Anforderungen an die Werkstoffprozeß-, Aufbau- und Verbindungstechnik. Nachfolgend werden einige Beispiele aus verschiedenen Bereichen der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für mikrotechnische Komponenten vorgestellt.

2. Werkstoffentwicklung und Werkstoffprozeßtechnik

Hierbei geht es zum einen um Eigenschaftsverbesserungen der nach dem LIGA-Verfahren hergestellten Strukturen und Komponenten durch gezielte Material- und Prozeßoptimierung. Zum anderen werden Materialien mit speziellen sensorischen und aktorischen Fähigkeiten und deren geeignete Prozeßtechnik entwickelt.

2.1 Werkstoffe für LIGA-Strukturen

Für die Galvanoformung von mikrostrukturierten Komponenten nach dem LIGA-Verfahren werden u. a. Metalle, wie Kupfer und Nickel, sowie bestimmte Legierungen eingesetzt.

An galvanisch abgeschiedenen Wabennetzstrukturen und Folien (20 bis 100 µm) aus Nickel wurden gezielte Gefügeuntersuchungen und Härtemessungen durchgeführt [2, 3]. Die Ergebnisse zeigten, daß prozeßbedingt stengelförmige Kristallite (Abb. 3) mit bevorzugter Wachstumsrichtung senkrecht zur Dickenrichtung der Struktur bzw. Folie und mit <100>- und <110>-Wachstumsorientierungen auftraten. Hierbei hing die entstehende Textur stark von Verfahrensparametern der galvanischen Abscheidung ab.

Messungen der Ultramikrohärte mit einem Nanoindenter ergaben, daß werkstoff- und geometrie- bzw. strukturbedingt sehr hohe Härtewerte vorlagen, die mit stark kaltverformten Gefügen vergleichbar sind. Bei höherer thermischer Aktivierung kam es zur Primär- und Sekundärrekristallisation mit diskontinuierlichem Kornwachstum und einem ausgeprägten Härteabfall. Das diskontinuierliche Kornwachstum wird durch scharf ausgeprägte Texturen begünstigt, da die Korngrenzenbeweglichkeit von den Orientierungsunterschieden der Kristallite abhängt. Die Folge war die gemessene, breite Korngrößenverteilung. Diese Ergebnisse weisen auf größere Eigenspannungen und dadurch bedingte bzw. beim Strukturwachstum während der galvanischen Abscheidung erzeugte Kristallbaufehler hin. Untersuchungen [4] zu chemischen Eigenschaften galvanischer Ni-Strukturen zeigten eine ausgezeichnete Beständigkeit in neutraler bzw. saurer, belüfteter bzw. N₂-gespülter Sulfatlösung. In anodischen und zyklischen Polarisationsstests wurde ein deutlicher Einfluß des Gefüges und des Oberflächenzustands festgestellt.

Aus diesen Untersuchungen lassen sich wichtige Folgerungen für eine Verfahrensoptimierung bei der Galvanoformung und eine Produktverbesserung ableiten.

2.2 Werkstoffe für Sensorik und Aktorik

Im Rahmen der Entwicklung kompakter oder schichtförmiger Aktorwerkstoffe sind u. a. Materialien mit Formgedächtnis sowie mit magnetostriktiven oder piezoelektrischen Eigenschaften von besonderem Interesse. Entsprechend der Abb. 2 lassen sich mit diesen Werkstoffen thermische, magnetische oder elektrische Eingangsgrößen in mechanische Ausgangsgrößen wie Kräfte und Wege umwandeln.

Formgedächtniseffekte treten z. B. bei metallischen Legierungen [5] wie NiTi, CuZn, CuZnAl oder CuAlNi sowie bei Mg-PSZ oder Ce-TZP Keramik (MgO oder CeO₂ teilstabilisiertes Zirkonoxid) auf [6]. Die werkstoffwissenschaftliche Grundlage des Formgedächtnisses ist die reversible, thermoelastisch martensitische Umwandlung. Unter der Einwirkung einer mechanischen Spannung oder einer

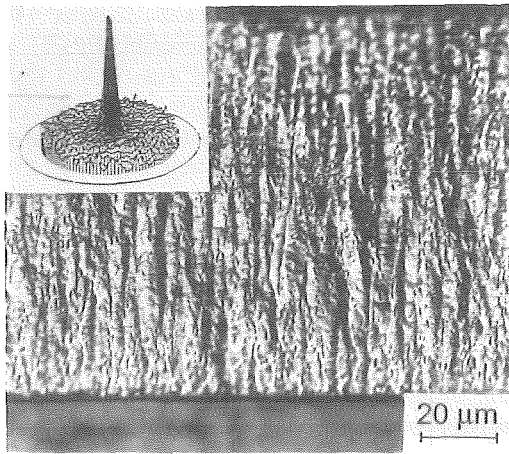


Abb.3: Querschnitt durch eine galvanisch abgeschiedene Ni-Schicht mit {220}-Polfigur.

Erhöhung bzw. Absenkung der Temperatur, erfolgt die Umwandlung einer martensitischen (Tief-temperaturphase) in eine sogenannte austenitische Phase (Hochtemperaturphase) bzw. umgekehrt. Man unterscheidet zwischen Ein-Weg- und Zwei-Weg-Formgedächtnis sowie Pseudoelastizität. Der Einwegeffekt ist dadurch gekennzeichnet, daß eine große, bleibende Formänderung der martensitischen Phase bei geringer Erwärmung (Übergang in die austenitische Phase) vollständig zurückgeht. Der Zweiwegeffekt liegt vor, wenn sich der Werkstoff allein unter thermischen Zyklen (Aufheizen, Abkühlen, d. h. thermisch-induzierte Umwandlung) an zwei unterschiedliche, geometrische Formen erinnert und diese abwechselnd einnimmt. Als Pseudoelastizität bezeichnet man ein Verhalten des Materials bei dem unter nahezu konstanten Kräften (spannungs-induzierte Umwandlung) relativ große Formänderungen auftreten, die bei Entlastung völlig zurückgehen und sich die Ausgangsform wieder einstellt. Wird der Formgedächtniseffekt unterdrückt, so entstehen große Kräfte, die z. B. für Stellglieder oder Steckverbindungen genutzt werden können. Die Umwandlungstemperaturen (Schalttemperaturen) sind abhängig von der Legierungszusammensetzung und den Herstellungsbedingungen, d. h. dem Werkstoffgefüge, sowie der anliegenden mechanischen Spannung.

Mit dem Ziel einer Anwendung von Formgedächtnislegierungen in Mikrokomponenten wurden an verschiedenen NiTi-Legierungen (49,2 at % bzw. 51 at % Ni) systematische metallographische, elektronenmikroskopische und mikroanalytische Untersuchungen in Abhängigkeit von den Herstellungsbedingungen der Gefüge durchgeführt [7]. Zur Erzielung des Zwei-Weg-Formgedächtniseffekts ist die feindisperse Ausscheidung kohärenter Teilchen in der austenitischen Matrix erforderlich. Dies läßt sich durch niedrige Temperaturen und/oder kurze Zeiten während der isothermen

Auslagerung erreichen. Abb. 4 zeigt eine TEM-Hellfeld-Aufnahme von Ni_4Ti_3 -Ausscheidungen in der martensitisch-austenitischen Matrix nach einer Auslagerung von 100 h an Luft bei 400°C. Die durch

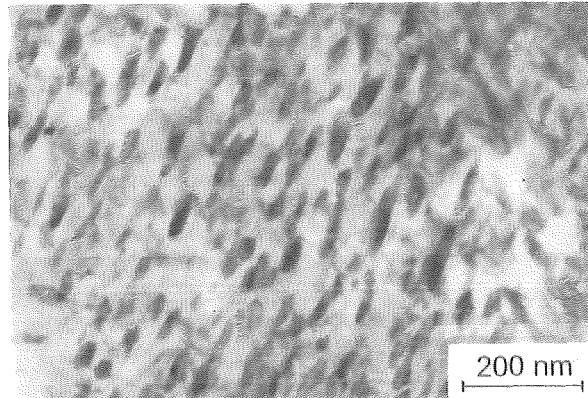


Abb. 4: Ni_4Ti_3 -Ausscheidungen in einer NiTi-Legierung (TEM-Hellfeld).

Elektronenbeugung und energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX) identifizierte Ausscheidungsphasen sind in Abb. 5 in Abhängigkeit von der Temperatur und Dauer der isothermen Auslagerung an Luft dargestellt. Untersuchungen an ca. 30 % kaltverformten NiTi-Proben, mit 51 at % Ni, zeigten, daß bereits bei tieferen Temperaturen (ca. 100 °C niedriger) und nach kürzeren Auslagerungszeiten Ausscheidungen vorlagen. Für technische

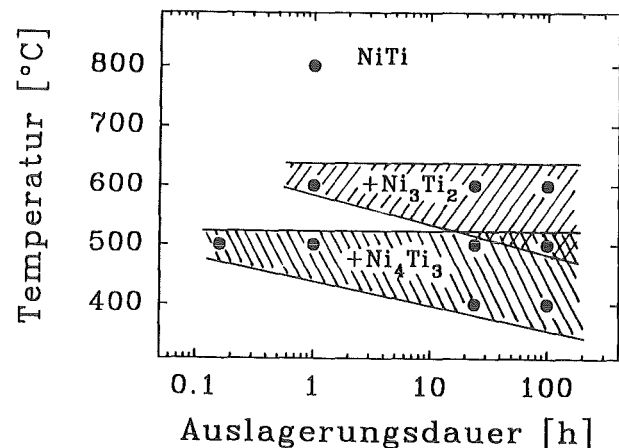


Abb. 5: Ausscheidungsphasen in NiTi-Legierungen in Abhängigkeit von der Auslagerungstemperatur und -zeit.

Anwendungen bei erhöhter Temperatur ist neben dem Ausscheidungsverhalten auch das Auftreten einer Rekristallisation, d. h. einer Kornneubildung und einem eventuell folgenden Kornwachstum, von Bedeutung. Bei Überschreiten der Rekristallisationstemperatur (Überhitzung) der Legierung kommt es zu wesentlichen Gefügeänderungen, verbunden mit einem starken Härteabfall und dem Verlust des Formgedächtnisses.

Für den Aufbau von Hybrid-Mikrostrukturen sind geeignete Verbindungstechniken zu entwickeln. Hierzu wurden 50 bis 150 μm dicke NiTi-Folien mit-

einander bzw. mit Cu- oder Ni-Folien mit Hilfe eines Nd-YAG-Lasers verschweißt. Die Breite der aufgeschmolzenen Zone lag in der Größenordnung der Foliendicke. Härtemessungen zeigten eine Aufhärtung in der Schweißnaht (Abb. 6), die besonders ausgeprägt in der Verbindungszone Ni/NiTi war. Die Ursache hierfür war die Bildung von intermetallischen Phasen, die sich versprödhend auswirken können.

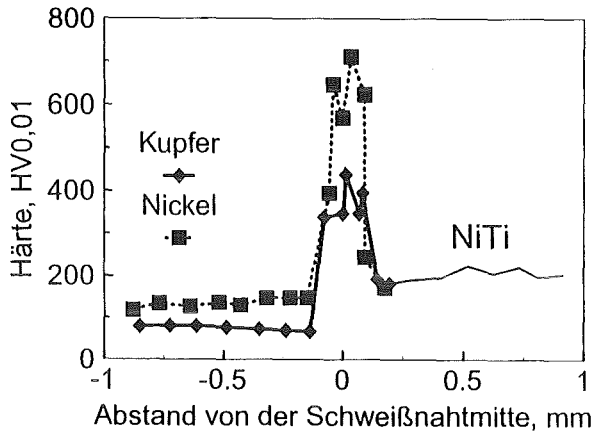


Abb. 6: Härteverlauf über eine lasergeschweißte Cu- bzw. Ni-NiTi-Verbindungszone.

Dünnschichttechnologien, wie z. B. das Magnetronkathodenzerstäuben, bieten vielfältige Möglichkeiten multifunktionelle Sensoren oder Aktuatoren, u. a. auf der Basis magneto- oder elektrostriktiver, piezoelektrischer oder Formgedächtniseffekte, zu realisieren. Hierbei lassen sich Funktions-, Hilfs- und Schutzschichten selektiv aufbringen und in komplexer Form kombinieren.

Der Effekt der Magnetostriktion erlaubt es, bei relativ kleinen Wegen große Kräfte zu erzeugen. Wird ein magnetostriktives Material in ein Magnetfeld gebracht, so erfolgt eine bevorzugte Ausrichtung der inneren Magnetisierung in den Weisschen Bezirken parallel zur äußeren Feldrichtung. Hiermit verbunden ist eine Dimensionsänderung des Festkörpers, bei der die relative Längenänderung mit Magnetostriktion bezeichnet wird. TbFe- und TbDyFe-Schichten wurden, durch Simultansputtern der Elemente, amorph oder nanokristallin auf verschiedenen Substraten abgeschieden. Im Gegensatz zu polykristallinen TbFe-Verbindungen liegen die Sättigungsfeldstärken in Legierungen aus verschiedenen Seltenen Erden (z. B. Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe₂, Terfenol-D) oder bei amorph abgeschiedenen Dünnschichten deutlich niedriger, d. h. es werden zur Erzielung ausreichender Magnetostriktionen geringere äußere Feldstärken benötigt.

Abb. 7 zeigt die bisher an amorphem TbFe-Schichten (2 bis 5 µm dick) auf einkristallinem Si-Substrat oder polykristallinem Titan erreichten

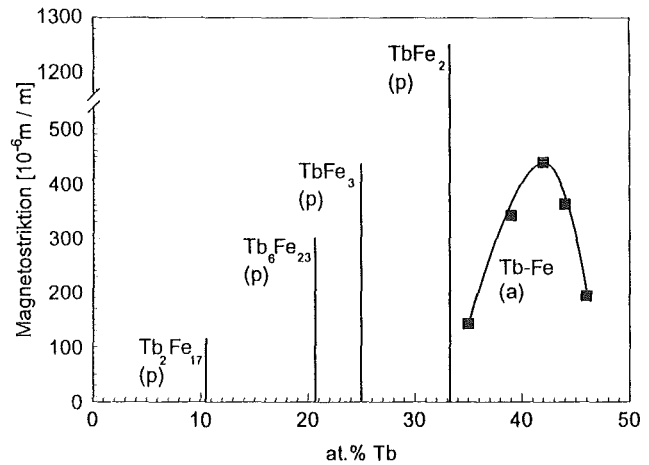


Abb. 7: Magnetostriktion in TbFe-Dünnschichten (Magnetronkathodenzerstäuben, p = polykristallin, a = amorph) als Funktion des Tb-Gehalts.

Striktionswerte in Abhängigkeit vom Gehalt an Terbium [8]. Im Vergleich zu Schichten, die durch Elektronenstrahlverdampfen erzeugt wurden [9], konnten mit diesen Magnetronsputterschichten um einen Faktor von ca. 2 höhere Magnetostriktionen erreicht werden. Die Untersuchungen zeigten, daß für größere Striktionswerte höhere Tb-Gehalte erforderlich und legierungs- sowie verfahrenstechnische Optimierungen möglich sind. Zur Entwicklung eines Gassensorarrays, u. a. zur Detektion von H₂-Gas, wurden Untersuchungen an SnO₂-Dünnschichten auf SiO₂-Substraten durchgeführt [10]. Die Schichten wurden durch Magnetronkathodenzerstäuben in Ar/O₂-Atmosphäre bei unterschiedlichen Substrattemperaturen T_S hergestellt. Elektronenmikroskopische Untersuchungen ergaben in den verschiedenen Schichten stark unterschiedliche Kristallitgrößen, und zwar ca. 10 nm bei T_S = 100 °C bzw. ca. 100 nm bei T_S = 800 °C. Durch das Einstellen sehr feinkörniger Gefüge konnte somit die Meßsensitivität der Sensorschichten deutlich erhöht werden.

3. Werkstoffcharakterisierung

Die genaue Kenntnis wichtiger Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe ist von entscheidender Bedeutung sowohl für die Beherrschung der Fertigung als auch für die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit einzelner Komponenten bzw. des gesamten Mikrosystems. Aufgrund spezieller, funktionspezifischer Anforderungen müssen neue Materialien verwendet werden, deren Eigenschaften wenig bekannt sind. Sie werden eingesetzt in kompakter Form oder als Dünnschicht, ein- oder mehrphasig, monolithisch oder in Verbunden. Mit zunehmender Miniaturisierung und Strukturierung steigt das Verhältnis von Oberfläche zu Volu-

men und damit der Umgebungs-, Oberflächenstruktur- und Fertigungseinfluß, was zu extremen Eigenschaftsveränderungen führen kann. Hieraus ergeben sich zwangsläufig vielfältige Aufgaben für die Werkstoffcharakterisierung. Aufgrund der Miniaturisierung lassen sich die üblichen Verfahren der Werkstoffprüfung nicht oder nur sehr selten einsetzen, so daß neue Prüftechniken zu entwickeln sind. Nachfolgend werden einige Fragestellungen aus der Werkstoffcharakterisierung von Mikrokomponenten exemplarisch angesprochen.

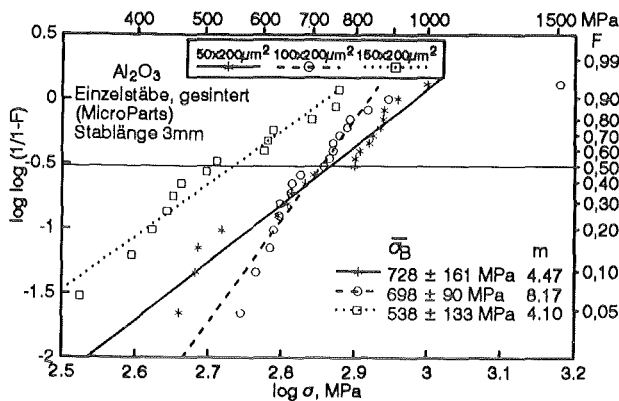


Abb.8: Weibull-Diagramm für die 3-Pkt.-Biegefestigkeit von maßgesinterten, stäbchenförmigen Mikroproben.

3.1 Mechanische Eigenschaften

Für die Ermittlung von Festigkeitskennwerten an Mikroproben im Biegeversuch, z. B. für Biegungen von beweglichen Mikrostrukturen oder stäbchenförmigen Geometrien allgemein, wurde eine spezielle Prüfeinrichtung entwickelt [11]. Hiermit werden bei Belastungen bis herab zu ca. 0,5 N und Probendicken bis herab zu ca. 30 µm die Einflüsse verschiedener Parameter, wie z. B. der Probengröße oder der Oberflächenqualität an unterschiedlichen Werkstoffen, untersucht. Die optische Kontrolle erfolgt während der Versuche über Videokameras und die Messung der Probendurchbiegung über eine Laser-Abtasteinrichtung. Im Fall spröder, keramischer Werkstoffe, bei denen häufig Volumendefekte bruchauslösend wirken, ist eine Festigkeitszunahme mit abnehmender Probengröße zu erwarten, wie es z. B. an Glasfasern bereits nachgewiesen wurde. In Versuchsreihen an verschiedenen Al₂O₃-Keramiken wurden, mit Hilfe einer Diamantsäge, stäbchenförmige Proben mit Querschnitten bis herab zu 100x100 µm² hergestellt. Hierbei zeigte sich zunächst ein Festigkeitsanstieg mit abnehmender Probengröße. Bei weiterer Querschnittsreduzierung fielen die Festigkeitswerte jedoch wieder ab. Diese Ergebnisse wurden auf den mit abnehmendem Probenquerschnitt zunehmenden Oberflächeneinfluß, im vorliegenden

Fall auf Oberflächendefekte durch das Sägen, zurückgeführt. In anderen Versuchsreihen wurde die Festigkeit von fertiggesinterten Al₂O₃-Proben mit Querschnitten von 150 x 200 µm², 100 x 200 µm² bzw. 50 µm x 200 µm² und Stablängen von 3 mm ermittelt (Abb. 8). Die erzielten 3-Punkt-Biegefestigkeiten lagen wesentlich höher als bei den gesägten Mikroproben. Besonders günstige Werte für die Biegebruchfestigkeit und den Weibull-Modul wurden an Proben mit einem Querschnitt von 100 x 200 µm² gemessen.

3.2 Thermophysikalische Eigenschaften

Aufgrund steigender Miniaturisierung und Integrationsdichte sind in vielen Systemen durch Verlustleistung hohe thermische Belastungen im Betrieb zu erwarten. Dies kann überlagert werden durch äußere thermische Beanspruchungen bei erhöhten Umgebungstemperaturen. Als Folge der thermischen Spannungen kann der Verlust der Formstabilität, der spezifisch funktionellen Eigenschaften der Materialien oder das Versagen durch Bruch eintreten. Hieraus ergeben sich wichtige Aufgaben zur Charakterisierung der thermophysikalischen Eigenschaften der Werkstoffe, der Komponenten bzw. des Mikrosystems.

Für die thermophysikalischen Arbeiten wurde eine Meßmethode zur Bestimmung von Kennwerten der Wärmeleitung mit lokaler Auflösung in Mikrometerdimensionen und geeignet für Dünnschichtsysteme entwickelt [12]. Als Basis hierfür wurde die photoakustische Spektroskopie gewählt, die auf der Erzeugung und Detektion thermischer Wellen, d. h. periodischer Oszillationen eines externen Wärmestroms (z. B. Laserstrahl) beruht. Die Eindringtiefe der thermischen Wellen ist abhängig von den thermophysikalischen Eigenschaften des Festkörpers und von der Frequenz der Temperaturoszillationen. Mit niedrigen Frequenzen lassen sich große, mit hohen Frequenzen geringe Eindringtiefen erzielen, wobei letzteres für dünne Schichten wichtig ist. Daher können mit einer photoakustischen Messung Tiefenprofile der thermischen Eigenschaften aufgenommen und Schicht-Substrat sowie Multilayer-Systeme thermisch charakterisiert werden.

Durch geeignete theoretische Modelle lassen sich mit dieser Meßtechnik vielfältige Aufgaben lösen. An einem Mehrschichtsystem Ti-TiO_x-PMMA (Polymethylmetacrylat) wurde qualitativ und zerstörungsfrei die Haftfestigkeit an der Grenzfläche Ti-TiO_x/PMMA gemessen (Abb. 9). Dieses Schichtsystem ist innerhalb der LIGA-Prozeßtechnik von wesentlicher Bedeutung. Durch die Bestimmung des thermischen Kontaktwiderstandes R_K, innerhalb einer thermischen Tiefenprofilierung, können Veränderungen in der Haftung ermittelt werden. Es handelte sich hierbei um zwei Schichtsysteme, und zwar einmal mit und einmal ohne die Zugabe eines

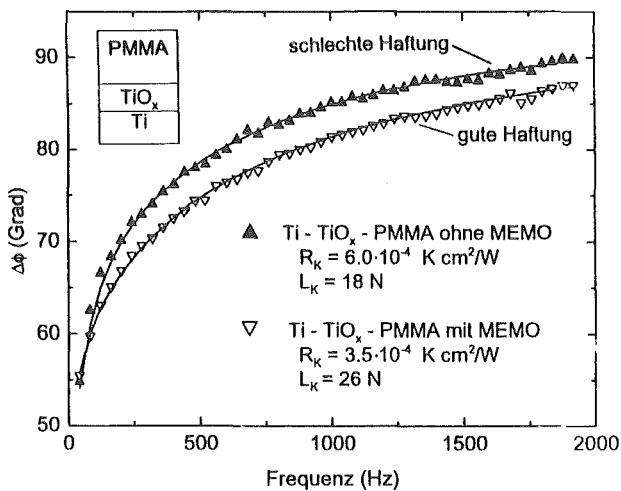


Abb. 9: Photoakustische Spektroskopie an Ti-TiO₂-PMMA-Dünnschichten: Phasenverschiebung der Temperaturoszillationen als Funktion der Modulationsfrequenz.

speziellen Haftvermittlers. Die gemessenen Phasenverschiebungen $\Delta\Phi$ als Funktion der Frequenz der Temperaturmodulation zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Proben mit und ohne Haftzusatz. Der thermische Kontaktwiderstand war bei der Probe mit schlechter Haftung deutlich höher. Diese Ergebnisse stimmten gut mit denen aus Scratch-Tests an diesen Schichten überein, bei denen die kritischen Lasten L_K (von 18 N bzw. 26 N) das Schichtversagen anzeigten.

3.3 Tribologische Eigenschaften

Mikromechanische Komponenten, insbesondere Mikroaktoren, spielen eine wichtige Rolle in verschiedenen Mikrosystemen. Durch die mit dem LIGA-Verfahren erzielbaren großen Strukturhöhen ist es möglich, die für Bewegungen notwendigen Kräfte aufzubringen und umzusetzen. Da bewegte Teile geführt werden müssen, ergeben sich häufig Gleit- oder Wälzkontakte zwischen den beteiligten Festkörperoberflächen, und der externe Zusatz von Schmierstoff ist nur in wenigen Anwendungen möglich. Als Folge kommt es zu Reibung und Verschleiß, d. h. Dissipation von Energie bzw. Materie.

Mikrotribologische Fragestellungen [13] müssen daher eingehend bearbeitet werden, sowohl in Hinblick auf die Funktionsfähigkeit beweglicher LIGA-Strukturen (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung, Kunststoff Abformung) als auch zur Optimierung von Fertigungsabläufen. Abb. 10 zeigt eine nach dem LIGA-Verfahren hergestellte Mikroturbine aus Nickel. Der Rotor mit einem Durchmesser von ca. 260 μm wurde durch einen Gasstrom angetrieben und rotierte mit ca.

30.000 min^{-1} . Zwischen Rotor und Achse sowie Rotor und Gehäuse kam es zu Reibung und Verschleiß, verbunden mit dünnen abgelösten Materialschichten. Die Entstehung dieser Verschleißprodukte kann auf eine Folge von Wechselwirkungen im Bereich von Oberflächenrauheiten in Form von plastischer Verformung, Bildung adhäsiver Haftverbindungen, lokales Abscheren sowie Materialübertrag zwischen den Kontaktflächen zurückgeführt werden. Aus den untersuchten Mechanismen lassen sich material- und systemspezifische Verbesserungen für einen zuverlässigen Betrieb und eine verlängerte Lebensdauer ableiten.

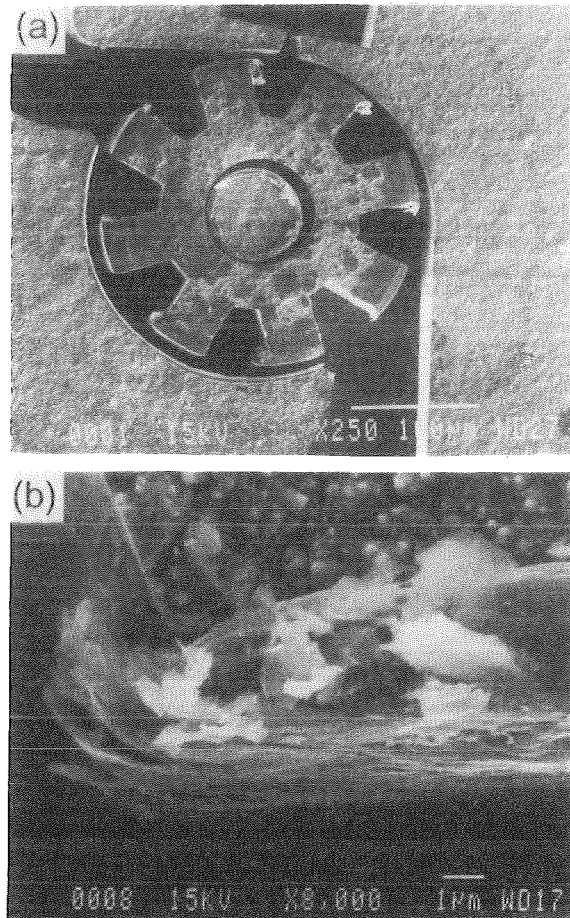


Abb. 10: Mikroturbine (a) nach dem LIGA-Verfahren hergestellt und Verschleißprodukte (b) nach einem Lauf mit 30.000 U/min in einem Luftstrom.

Literatur

- [1] P. Bley, W. Menz: Stand und Entwicklungsziele des LIGA-Verfahrens zur Herstellung von Mikrostrukturen; KfK-Nachr., 23 (1991), 69.
- [2] P. Graf, W. Schneider, H. Zimmermann: Metallografische und röntgenkristallografische Beschreibung von galvanisch abgeschiedenen Nickelschichten; KfK-Primärbericht (1993).
- [3] E. Materna-Morris, P. Graf, H. Zimmermann: Ultramikrohärteprüfung an Mikrostrukturen; KfK-Primärbericht (1993).
- [4] G. Schanz, S. Leistikow: Elektrochemische Untersuchungen zur Charakterisierung von Nickel-Galvanikschichten; KfK-Primärbericht (1992).
- [5] E. Hornbogen: Legierungen mit Formgedächtnis - Neue Werkstoffe für die Technik der Zukunft?; Metall, 41 (1987), 488.
- [6] M. V. Swain: Shape memory behaviour in partially stabilized zirconia ceramics; Nature, 322 (1986), 234.
- [7] T. Stober, P. Schloßmacher: TEM-Untersuchungen an NiTi; KfK-Primärbericht (1992).
- [8] E. Quandt, T. Gerst: Magnetostriction and Characterization of $Tb_xDy_{1-x}Fe_2$ Sputtered Films; Europhysics Conf., Abstr., Vol. 17 A, Regensburg 1983, p. 1229.
- [9] D.W. Forester, C. Vittoria, J. Schelleng, P. Lbitz: Magnetostriction of amorphous Tb_xFe_{1-x} thin films; J. Appl. Phys., 49 (1978), 1966.
- [10] H. Leiste, V. Schauer: Thin films for gas sensor applications; Eurosensors VI, San Sebastian (Spanien), 1992.
- [11] M. Blumhofer, J. Burbach, W. Dienst, H. Zimmermann: Festigkeitsprüfung an keramischen Mikroproben; KfK-Primärbericht (1993).
- [12] M. Rohde: Photoacoustic Characterization of thermal transport properties of thin films and microstructures; Thin Solid Films, (1993) in press.
- [13] K.-H. Zum Gahr: Microtribology; Interdisciplinary Science Reviews, (1993) in press.

Vom starren MIC-Instrument zum hochflexiblen Telemanipulator

H. Rininsland, P. Dautzenberg, B. Kneifel, B. Neisius, H. Schülken, M. Selig, R. Trapp

Hauptabteilung Ingenieurtechnik

Zusammenfassung

Die endoskopische oder Minimal- Invasive Chirurgie (MIC) befindet sich in einem starken Aufwärtstrend, weil sie für den Patienten aufgrund der kleinen Körperöffnungen und geringen Belastung von großem Vorteil ist. Die technischen Möglichkeiten sind bei weitem nicht ausgeschöpft. Die verfügbaren starren Instrumente begrenzen die Bewegungsmöglichkeiten auf eine geringe Zahl von Freiheitsgraden, erfordern somit vom Chirurgen hohe Geschicklichkeit bei großer physischer und psychischer Belastung. Flexible steuerbare Instrumente erhöhen die Zahl der Freiheitsgrade, entlasten den Chirurgen und eröffnen neue Operationsstrategien. Ziel letztendlich ist ein Telemanipulationssystem, bei dem die flexiblen steuerbaren Instrumente als Endeffektoren zusammen mit den bildgebenden Endoskopen zu einem Gesamtsystem vereint werden, das der Chirurg steuert und überwacht. Über die bisherigen Entwicklungen und die geplanten Ziele wird berichtet.

1. Einleitung

Die Minimal-Invasive oder endoskopische Chirurgie hat bereits vor einigen Jahrzehnten ihren Anfang genommen.

Anfang der 50er Jahre hat der kürzlich verstorbene Prof. Wittmoser die ersten minimal invasiven Eingriffe in der Thorax-Chirurgie vorgenommen. Kurz vor seinem Tode erzählte er mir am Telefon, daß er seinerzeit als "Zirkuschirurg" verketzert worden sei.

Ein Jahrzehnt später begannen die grundlegenden technischen Entwicklungen der modernen Laparoskopie am Universitätsklinikum in Kiel durch Prof. Semm. Verschiedene Einzeltechniken für gezielte endoskopische gynäkologische Eingriffe wie Schneid- und Nähetechniken wurden eingesetzt. Auch die Technik für eine laparoskopische Entfernung des Blinddarms wurde von ihm entwickelt. Auch Prof. Semm sah sich vielen Anfeindungen von seiten der konventionellen Chirurgie ausgesetzt.

In den 80er Jahren schließlich reiften die Techniken der endoskopischen Cholecystektomie, d.h. die minimal invasive Entfernung der Gallenblase, und die transanale endoskopische Mikrochirurgie, d.h. die minimal invasiven Eingriffe im unteren Dickdarmbereich. Diese Strategien hat neben anderen im wesentlichen Prof. Bueß vom Universitätsklinikum in Tübingen vorangetrieben [1]. Mit ihm und seinen Mitarbeitern verbindet uns seit 1990 ein Kooperationsvertrag, in dessen Verlauf nicht nur das gegenseitige Verstehen gewachsen ist, sondern eine Vielzahl von Neuentwicklungen

und eine noch größere Zahl von Ideen und Wunschvorstellungen entstanden sind. Im folgenden wird darüber zu berichten sein.

2. Vergleich von konventioneller und Minimal-Invasiver Chirurgie

In der konventionellen offenen Chirurgie verschafft sich der Chirurg über große Öffnungen des menschlichen Körpers direkten Zugang zum Operationsort. Die Hand des Chirurgen tastet die Organe ab und führt die Instrumente unter direkter Sicht. Für die Ausführung des eigentlichen operativen Eingriffs sind dies sehr günstige Bedingungen.

Der Tastsinn der Hände und die Augen des Chirurgen kommen voll zum Einsatz. Das Arbeitsfeld liegt offen und übersichtlich vor dem Chirurgen.

Die wesentlichen Nachteile der offenen Chirurgie hat der Patient zu tragen. Dies sind vor allem

- die hohe traumatische Belastung während der Operation,
- die postoperativen Schmerzen und die Belastung durch den Heilungsprozeß, einschl. der psychologischen Belastung,
- die Infektionsgefahr bei großen Schnitten,
- lange Liege- und Rekonvaleszenzzeiten.

Die Minimal- Invasive oder endoskopische Chirurgie bringt demgegenüber für den Patienten enorme Vorteile.

Doch zunächst: Was ist MIC?

Vereinfacht erklärt: Über kleine Röhrchen von ca. 10 mm Durchmesser, sog. Trokare, werden das Beobachtungsendoskop und die Instrumente in den Körper eingeführt. Das vom Beobachtungsendoskop aufgenommene Bild wird über eine integrierte Kamera auf einen Bildschirm übertragen. Hieraus ergibt sich der Vorteil der vergrößerten (5 - 10fach) anatomischen Darstellung [2]. Anhand der Bildschirmübertragung führt der Chirurg die Operation im Körperinneren durch. Die z.Z. verfügbaren Instrumente zum Schneiden, Trennen, Koagulieren, Nähen usw. sind im wesentlichen starre Instrumente, deren Manipulierbarkeit sehr begrenzt ist und vom Chirurgen ein hohes Maß an Geschicklichkeit und Konzentration erfordern, um schwierige Manipulationen während einer Operation erfolgreich ausführen zu können.

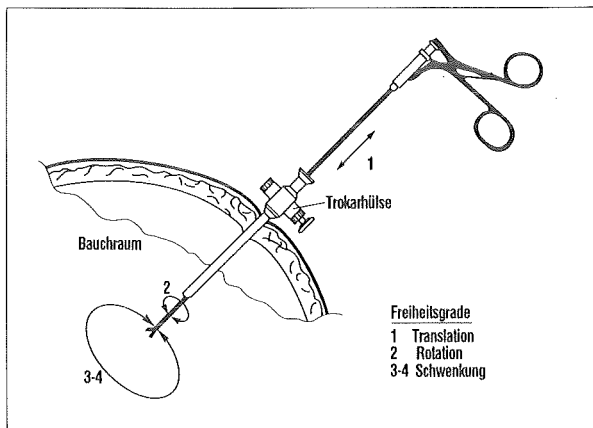


Abb. 1: Freiheitsgrade einer starren Zange

Bisher stehen nur 4 Freiheitsgrade zur Verfügung und zwar die Translation entlang und die Rotation um den Instrumentenschaft sowie die eingeschränkte kardanische Schwenkung der Trokarhülse in der Bauchdecke (Abb. 1). Beim derzeitigen Stand der Technik liegen die Nachteile eindeutig auf der Seite des Chirurgen:

- der Tastsinn ist bei Einsatz der starren Instrumente fast vollständig verloren gegangen;
- die optische Beobachtung erfolgt in der Regel über einen zweidimensionalen Bildschirm,
- die Freiheitsgrade der Bewegung beim Arbeiten mit den starren Instrumenten sind sehr eingeschränkt,
- daraus ergeben sich oft sehr ungünstige Körperhaltungen und eine hohe physische Belastung,

- schließlich werden z.Z. die minimal invasiven Operationen in den konventionellen Operationssälen (OP) durchgeführt, die naturgemäß den technischen Anforderungen dieser neuen OP-Technik nicht angepaßt sind.
- Anschaffungs- und Wartungskosten der technischen Einrichtungen sind hoch.

Dennoch hat die Minimal-Invasive oder endoskopische Therapie inzwischen in fast allen Teildisziplinen der Chirurgie wie Orthopädie, Urologie, Neurochirurgie, HNO neben den bereits eingangs erwähnten Bereichen der Gynäkologie, allgemeinen Chirurgie und Thorakoskopie Eingang gefunden (Abb. 2). Sie befindet sich in einem starken Aufwärtstrend, weil die Vorteile für den Patienten so essentiell sind.

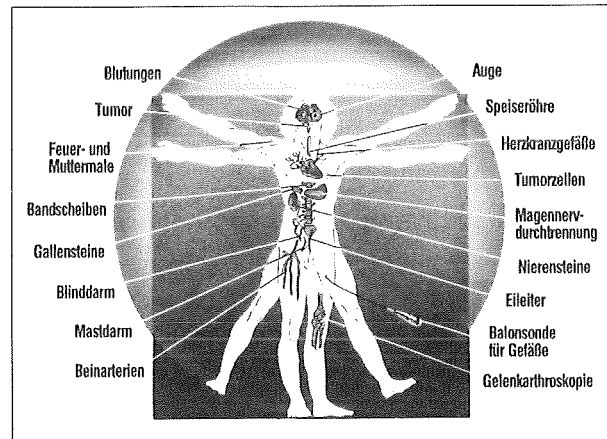


Abb. 2: Spektrum der Minimal-Invasiven Therapie und Chirurgie

Die entscheidenden Vorteile sind:

- Wegen der kleinen Körperöffnungen nur geringe traumatische Belastung während der Operation,
- geringe Infektionsgefahr,
- stark reduzierte Schmerzen nach der Operation,
- geringe Ermüdung des Patienten,
- kurze Rekonvaleszenzzeit, damit verbunden ein stark verkürzter Krankenhausaufenthalt,
- schnelle Rückkehr zum normalen Lebensrhythmus,
- kleine Narben.

Da sich einige Eingriffe, wie z.B. die Cholecystektomie [3], die Entfernung der Gallenblase, inzwischen in einer großen Zahl von Kliniken zum Standard entwickelt haben, existieren inzwischen kontrollierte klinische Studien, die die oben genannten

ten Vorteile bestätigen und zeigen, daß auch eine Verminderung der Gesundheitskosten zu erwarten ist [4].

Darüberhinaus erhoffen und erwarten die Chirurgen, daß durch eine Verbesserung der technischen Ausrüstung neue chirurgische Strategien entwickelt und weitere Operationsgebiete erschlossen werden können.

3. Entwicklungsprojekte

3.1 Vorgehensweise

Kurzfristiges Ziel ist die Verbesserung bestehender Instrumente und Geräte und aufbauend darauf, die schrittweise Neuentwicklung von handhabungstechnisch optimierten Systemlösungen.

Da das Spektrum der endoskopischen Chirurgie sehr unterschiedlich ist, haben wir uns zunächst auf den Bauchraum (Gallenblase, Dickdarm, Blinddarm, Magen), Mastdarm und die Speiseröhre beschränkt. Dies sind auch die Gebiete, auf denen die UNI-Tübingen bevorzugt entwickelt und ausgebildet.

Die MIC-Operationssysteme bestehen im wesentlichen aus folgenden Teilbereichen:

1. Instrumentarium (Zange, Schere, Greifer usw.)
2. Geräte (Optik, Hochfrequenz-Gerät, Videosystem usw.)
3. Operations-Umfeld (OP-Vorbereitung, Kommunikation, Operationstechnik usw.)

Um den Ablauf endoskopischer Operationen zu verstehen, wurden 1991 verschiedene Operationen untersucht (Abb. 3) und ausgewertet [5].

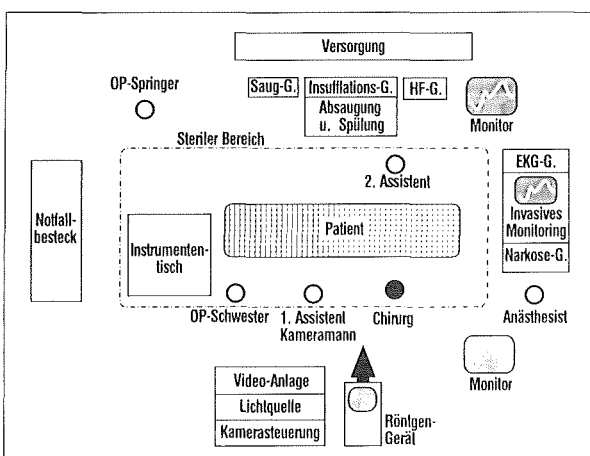


Abb. 3: Anordnung von Personal und Geräten bei einer endoskopischen Gallenblasenentfernung in Tübingen.

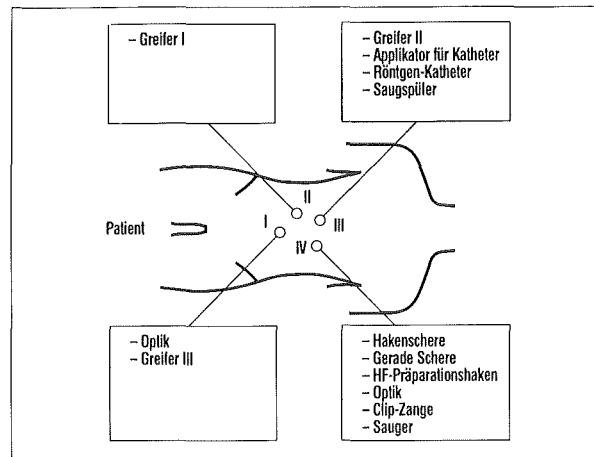


Abb. 4: Einsatz der Instrumente in den verschiedenen Trokaren I-IV bei einer endoskopischen Gallenblasenentfernung

Analysiert wurden endoskopische Operationen an der Gallenblase (Abb. 4), am Blinddarm sowie an der Speiseröhre.

Grundsätzlich wurden Antworten auf folgende Fragen gesucht:

- Welche Geräte und Instrumente kamen zum Einsatz ?
- Wie wurde die Operation durchgeführt ?
- Wo traten Probleme auf ?

Durch diese Untersuchungen im Human- und Tieroperationssaal sowie durch die ständige Diskussion mit dem Personal und den Chirurgen wurden verschiedene Probleme erkannt und als Aufgabe formuliert.

So wurden neben der Weiterentwicklung vorhandener Instrumente insbesondere neuartige Geräte entwickelt, die eine Kombination mehrerer Funktionen oder neue Arbeitstechniken sowie die Erhöhung der Freiheitsgrade ermöglichen. Alle Instrumente haben einen maximalen Außendurchmesser von 10 mm, da sie durch eine entsprechende Trokarhülse eingeführt werden müssen.

3.2 Laufende und bereits durchgeführte Entwicklungen

Das Kombinationsgerät (Abb. 5) vereinigt folgende instrumentelle Basisfunktionen: Koagulieren, Schneiden, Spülen und Absaugen. Das Koagulieren geschieht mit bipolarem HF-Strom. Für eine sichere Lösung mußten neue Wege der Bearbeitungs- und Verbindungstechnik sowie neuer Werkstoffkombinationen beschrritten werden. Inzwischen wurden Prototypen im Phantom- und Tierversuch mit vollem Erfolg erprobt. Für den Humaneinsatz wird durch das Kombinationsgerät ein Zeit- und Sicherheitsgewinn erwartet, da häu-

figurer Instrumentenwechsel entfällt und die Trennung des Gewebes genau in der Mitte der Koagulationszonen erfolgt.

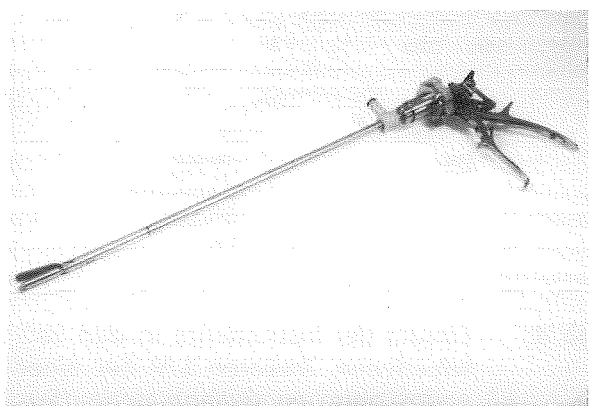


Abb. 5: Kombinationsinstrument zum Koagulieren und Schneiden

Für die Verbesserung der intrakorporalen Nahttechnik wurden Nähgeräte (Abb. 6) in drei Ausführungsformen entwickelt, gebaut und erprobt. Die Geräte zeichnen sich dadurch aus, daß eine an beiden Enden angespitzte Nadel in der Mitte den Faden trägt und während des Nähens zwischen entsprechend ausgebildeten Backen eines zangenähnlichen Instrumentes hin- und hergereicht wird. Nach Durchstechen einer Gewebeportion der beiden Wundränder wird die Nadel in der Backe so fixiert (mechanisch oder pneumatisch), daß sie für den nächsten Nahtstich auf die Befestigungsvorrichtung der gegenüberliegenden Backe ausgerichtet bleibt. Das Nähgerät wurde im Phantom- und Tierversuch erfolgreich getestet. Verhandlungen mit interessierten Industriepartnern, auch in USA, laufen. Eine weitere Nähmaschine für kurze fortlaufende Drahtnähte zum Verschluß von Gewebeläsionen oder -inzisionen ist als Prototyp in der Fertigung.

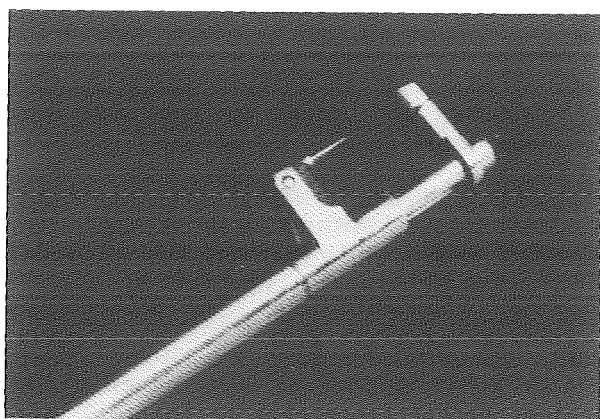


Abb. 6: Distales Ende eines achsparallelen Nähgerätes

Für die Zerkleinerung großer Gallensteine wurde ein mechanischer Lithotripter (Abb. 7) als Prototyp gebaut. Zwischen zwei um 90° zueinander versetzten Drahtschlingen wird der Stein eingefangen. Mit Hilfe von zentral eingeführten Werkzeugen und den Schlingen wird er anschließend zerkleinert.

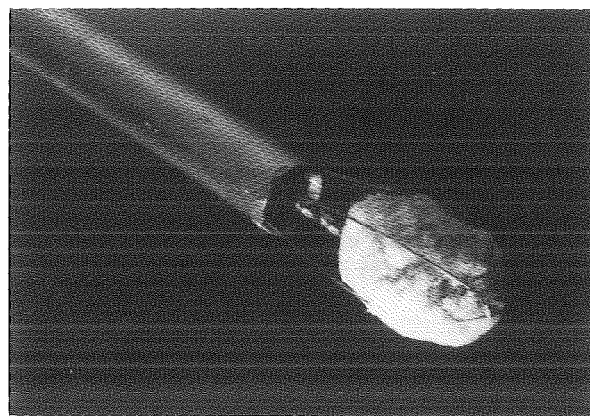


Abb. 7: Mechanischer Lithotripter

Zur Verbesserung der Clip-Technik (Abb. 8) sind zwei Prototypen in der Entwicklung. Das Clip-System besteht im wesentlichen aus der Clipzange oder dem Applikator und einem ein- oder zweiteiligen Clip. Das Clip-System muß eine sichere und schnelle Approximierung und Fixierung von Geweberändern oder Gefäßen gewährleisten.

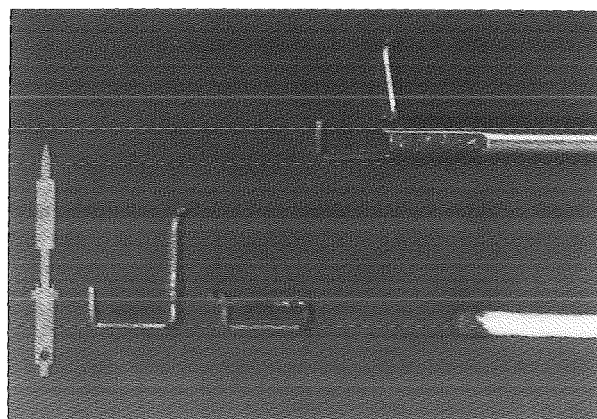


Abb. 8: Clipapplikator

Für die kombiniert laparoskopisch-rektoskopisch ausgeführte Sigma- und Colonsegment-Resektion muß das in der Regel stark entzündete resezierte Darmsegment sicher aus dem Körper gebracht werden, um die Infektionsgefahr in der Operationsumgebung zu minimieren. Hierzu wurde in mehreren Ausführungen ein Resektat-Extraktor entwickelt und gefertigt. Die Prototypen befinden sich z.Zt. im Phantomversuch.

Das Wasserstrahlschneiden ist eine mögliche, schonende Trenntechnik für Gewebe, jedoch bisher technisch nicht ausgereift. Ein erstes Labormuster eines Wasserstrahlschneidgerätes wurde gebaut und im Phantomtest erprobt. Weitere Verbesserungen, insbesondere die Düsegestaltung zur Strahlbegrenzung und -regelung sind notwendig und werden z.Z. in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrostrukturtechnik des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KfK) ausgeführt. Darüber hinaus werden Untersuchungen zur Blutgerinnung gemacht.

Um die Arbeitsbedingungen und die Geschicklichkeit des Chirurgen zu verbessern, müssen flexible und steuerbare Instrumente mit mehreren Freiheitsgraden entwickelt werden.

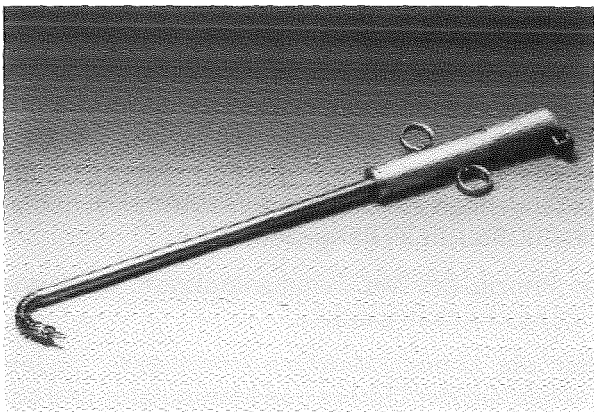


Abb. 9: Steuerbare Greifzange

Im Rahmen der Kooperation mit der Uni Tübingen wurden einige Geräte mit einem flexiblen distalen Ende entwickelt, das um $\pm 180^\circ$ zur Instrumentenachse gebogen und um die Achse rotiert werden kann. Das erste mechanisch steuerbare flexible Instrument ist eine Greifzange. Der flexible Teil ist 60 mm lang und mit sieben Kugelgelenken versehen. Über superelastische Drähte aus einer NiTi-Legierung (SMA) werden die Bewegungen des flexiblen Endes und der Greifzange mechanisch von einem Handgriff aus gesteuert. Das Verschweißen dieser Drähte mit sich selbst sowie mit anderen Legierungen wird von dem Institut für Materialforschung des KfK untersucht. Beim Bau des ersten Gerätes zeigte es sich als vorteilhaft, die flexiblen Instrumente (Abb. 10) in einer modularen Bauweise (Abb. 11) weiterzuentwickeln.

Die vier modularen Komponenten sind das Werkzeug (Effektor) für die chirurgische Aufgabe, der flexible Teil (Gelenkmechanismus), der steife Instrumentenschaft und die Antriebseinheit.

Der so konstruierte Prototyp (Abb. 9) ist ebenfalls mechanisch gesteuert dergestalt, daß Zeige- und

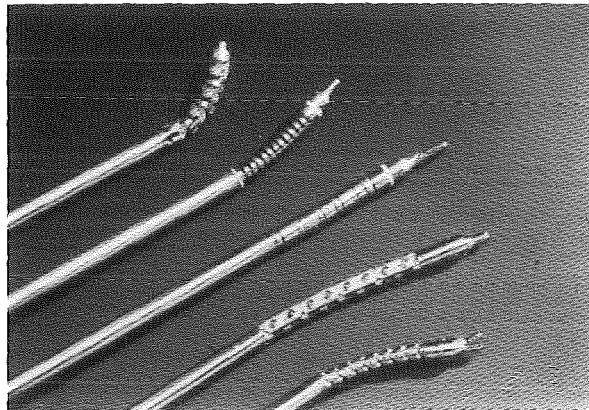


Abb. 10: Steuerbare Instrumente

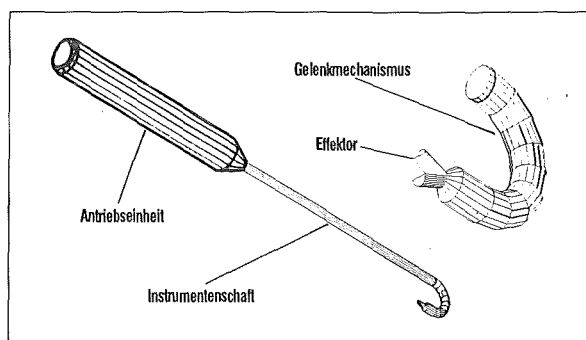


Abb. 11: Modulare Komponenten des MIC-Instrumentes

Mittelfinger das flexible Ende steuern und der Daumen das Öffnen und Schließen der Zange bewirkt. Beide Prototypen wurden inzwischen in Phantom- und Tierversuchen mit Erfolg erprobt.

Um die Geschicklichkeit und den Komfort des Chirurgen zu erhöhen, werden die manuellen Antriebe durch elektromotorische ersetzt. Der erste Prototyp befindet sich in der Erprobung. Das elektromotorisch getriebene Instrument ist eine wesentliche Voraussetzung für die Integration in ein Teleskopsystem. Um die Eigenschaften dieser Instrumente, wie Steifigkeit, Positioniergenauigkeit und Feinfühligkeit, zu verbessern, werden verschiedene Ausführungen und Konzepte von Sensoren, Gelenken, Motoren und Getriebe getestet.

Um Auslegungsdaten für die Dimensionierung neuer Instrumente und Manipulatoren zu ermitteln, wurde eine endoskopische Faßzange zur Messung der Handhabungskräfte und Beschleunigungen entwickelt. Die im KfK und an der Uniklinik Tübingen durchgeführten Phantomversuche (Abb. 12) geben Aufschluß über den zeitlichen Verlauf der Handhabungskräfte und Beschleuni-

gungen während ausgewählter Operationsvorgänge.

Neben den gewonnenen Daten für die Entwicklung neuartiger endoskopischer Gelenkstrukturen und Auslegung der benötigten Antriebe wurde den Operateuren eine erste quantitative Kontrolle der ausgeübten Kräfte ermöglicht.

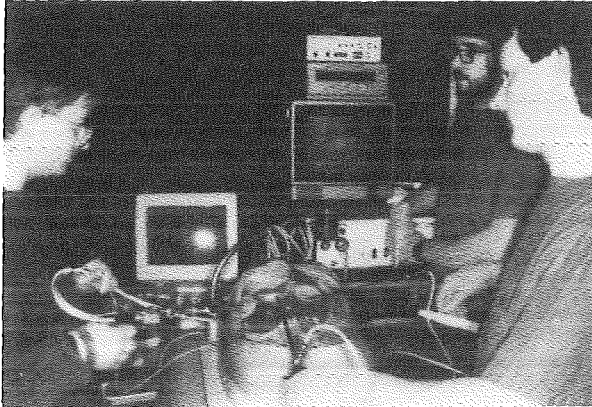


Abb. 12: Erprobung der Sensorzange am Phantom

In Kooperation mit der Universität Heidelberg, Orthopädische Klinik Mannheim werden Operations-Instrumente für die Minimal-Invasive Chirurgie des Spinalkanals und Epiduralraums entwickelt. Als erstes Entwicklungsziel wurden verschiedene steuerbare Führungshülsen zur Einführung und Positionierung von mechanischen Werkzeugen wie Zangen und Scheren sowie von optoelektronischen Elementen, wie z.B. Laserfasern und Bildleitern festgelegt.

Eine weitere Kooperation mit der Orthopädischen Klinik Mannheim wurde im Jahre 1991 aufgenommen. Ziel dieser Arbeiten ist es, ein Implantatsystem für die menschliche Lendenwirbelsäule zu entwickeln, welches leicht flektiert (entlordosiert), eine gewisse Beweglichkeit bezüglich Flexion/Extension und Seitenneigung ermöglicht, aber die Torsion und die gekoppelte Translation auch bei bilateralem Bogendefekt limitiert. Entwickelt wurden Prototypen von Pedikelschrauben sowie steife wie flexible Implantate, die es gestatten einzelne Freiheitsgrade gezielt zu unterdrücken. Die Überbrückung einzelner wie mehrerer Segmente ist möglich ohne die Pedikelschrauben austauschen zu müssen.

Mit Hilfe der Computersimulation werden verschiedene Modelle getestet und optimiert. In Prüfmaschinen werden die mechanischen Eigenschaften und die Lebensdauer der Implantate bestimmt. Die Prototypen werden am Biomechanik-

institut der Universität in Bern an Kadaverpräparaten getestet.

4. Telemanipulator als Zukunftsentwicklung

In unseren Diskussionen mit deutschen und internationalen Chirurgen und auf den Konferenzen zur endoskopischen oder Minimal-Invasiven Chirurgie der letzten Jahre ist ein großes und ständig wachsendes Interesse an einem Telemanipulatorsystem zu beobachten. Dies ist eine interdisziplinäre Aufgabe, die nur unter Einsatz von Steuerungs-, Informations- und Sensortechnik, der Mikrosystemtechnik (Mikrosensoren und -aktoren), der Werkstofftechnik und der Simulationstechnik neben der Integration bekannter und der Entwicklung neuer kinematischer Strukturen gelöst werden kann. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten finden in enger Kooperation mit dem Institut für Angewandte Informatik des KfK statt. Die Arbeiten bauen auf den systemtechnischen Entwicklungen der Manipulatoren und Handhabungstechnik für die Kerntechnik in der Vergangenheit auf und werden ausführlich in diesem KfK-Bericht [6] dargestellt.

Das Prinzip des MIC-Telemanipulators kann wie folgt beschrieben werden:

Über die Mensch/Maschine-Schnittstelle steuert und bedient der Chirurg den Manipulator und das über ein Verbindungselement angekoppelte flexible oder starre Instrument. Ein 3D-Videoendoskop könnte z.B. automatisch nachgeführt oder durch Spracheingabe gesteuert werden.

Die notwendige Feinfühligkeit des Arbeitens bei chirurgischen Eingriffen wird durch die Sensorik an Manipulator und Instrument gewährleistet: Die Sensorinformation wird über die Steuerung und die Mensch/Maschine-Schnittstelle an den Operateur (Chirurg) vermittelt; dieser wird dadurch in die Lage versetzt, ausgeübte Kräfte und Momente zu fühlen und Tastinformationen zu berücksichtigen.

Das Erreichen eines maximalen Arbeitsraumes wird durch die Nutzung aller 6 Freiheitsgrade des Manipulators außerhalb des Bauchraumes gewährleistet. Die Beschränkung auf die zulässigen Bewegungsfreiheitsgrade der herkömmlichen Operationstechnik kann z.B. durch eine entsprechende mechanische Führung des Manipulators oder steuerungstechnisch durch die Berechnung zulässiger Bewegungen realisiert werden (Konzept des "virtual joint"). Die je nach operativer Aufgabenstellung eingesetzten Endeffektoren oder Instrumente werden über eine mechanische Schnittstelle im Wechsel an das Manipulatorsy-

stem angefügt. Diese Schnittstelle, die notwendige Wechsellautomatik für die unterschiedlichen Endeffektoren müssen entwickelt werden.

Über Schnittstellen zum Einlesen von CAD- und Tomographiedaten werden in einem graphischen Simulator Modelle des Bauchraumes und der Operationsinstrumente in realitätsnaher Darstellung erzeugt, die zur Überprüfung der Instrumentenentwicklung, zum Training von Chirurgen (weniger Tierversuche) und zur Operationsplanung genutzt werden könnten.

Diese Telemanipulation wird der Beginn einer weitreichenden technischen Entwicklung im Operationssaal sein. Erfolge sind nur in enger Zusammenarbeit zwischen Medizin, Forschung und Industrie zu erzielen.

Trotz allen technischen Fortschritts muß nach wie vor der Mensch mit seinen ethischen Wertvorstellungen im Mittelpunkt der Entwicklungen stehen.

Literatur

- [1] F. Götz, et al.
"Laparoskopische Chirurgie"
1991, Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- [2] A. Cuschieri, et al.
"Minimal-Invasive Chirurgie der Gallenblase"
1991, Blackwell Wissenschaftsverlag, Berlin
- [3] C. Schwing
"Operation ohne Narben"
TK aktuell, August 1992, S. 4-5
- [4] C. Klaiber, A. Metzger
"Manual der laparoskopischen Chirurgie"
1992, Hans Huber Verlag, Bern
- [5] P.A. Grace, et al.
"Reduced postoperative hospitalization after laparoscopic cholecystectomy"
The British Journal of Surgery
1991 Feb.; 78 (2): 160-2
- [6] E. Holler, R. Trapp
"Ein experimenteller Telemanipulator für die Minimal-Invasive Chirurgie"
1. Statuskolloquium des PMT, Tagungsband (1993)

Demonstratoren

LIGA-Sensoren und intelligente Sensorsysteme zur Messung von Beschleunigungen

M. Strohmänn¹, O. Fromhein², W. Keller¹, K. Lindemann³, J. Mohr¹

1) Institut für Mikrostrukturtechnik, 2) Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik, 3) Institut für Angewandte Informatik

Zusammenfassung

Am Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) wird ein Mikrosystem zur dreidimensionalen Messung von Beschleunigungen aufgebaut, zu dessen Entwicklung verschiedene Institute des KfK mit ihrem spezifischen Sachverstand beitragen. Durch die Neuentwicklung von Sensoren konnten Sensorarrays mit Sensoren unterschiedlicher Empfindlichkeit und geringem Temperaturgang hergestellt und charakterisiert werden. Mit auf dem Markt erhältlichen Auswerteschaltkreisen aufgebaute Sensorsysteme zeigen, daß die Sensoren durch diese vorhandenen Schaltkreise ausgewertet werden können. Eine optimale Auswertung kann jedoch nur mit einem an den Sensor angepaßten Schaltkreis erreicht werden. Eine programmierbare Verarbeitung der Sensorsignale durch einen Mikro-Controller verbessert die Zuverlässigkeit durch Selbsttests der Sensoren und die Meßgenauigkeit durch eine Mittelwertbildung über die in jeder Raumrichtung gemessenen Sensorsignale. Eine Reduktion der anfallenden Meßdaten auf die für die jeweilige Anwendung notwendige Information kann durch die flexible Programmierung des Mikro-Controllers erreicht werden.

1. Einleitung

In der modernen Meßtechnik werden immer kleinere und intelligenter Meßsysteme aus mikromechanischen Sensoren und integrierten Schaltungen entwickelt. Die parallele Fertigung von Schaltkreisen und Sensoren im Batch-Betrieb ermöglicht eine kostengünstige Produktion, die Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz ist. Wegen der kleinen Abmessungen und des geringen Kostenaufwands können anstelle eines teuren hochpräzisen Sensors mehrere Sensoren parallel betrieben werden. Eine Auswertung von solchen Sensorarrays mit mikroprozessorgesteuerten Datenverarbeitungssystemen läßt die Zuverlässigkeit und Meßgenauigkeit ansteigen. Sonderwünsche, wie z.B. ein großer Meßbereich mit hoher Empfindlichkeit, lassen sich durch eine Kombination von Sensoren unterschiedlicher Charakteristika und einer entsprechenden Auswertelogik ohne großen Aufwand realisieren. Insbesondere bei sicherheitsrelevanten Systemen bietet ein Mikrosystem, das die anfallende Datenflut auf die für die Applikation notwendige Information reduziert, die Möglichkeit, verschiedene Meß- und Steuerinformationen über einen Feldbus zu kontrollieren. Zum Beispiel wird in der Automobilbranche ein Computer-Area-Network (CAN) eingeführt, ein Feldbus der sämtliche elektronischen Komponenten im Kraftfahrzeug miteinander koppeln soll. Auf diesem Bus könnte dann auch die reduzierte, sicherheitsrelevante Information übertragen werden, ohne den Bus zu überlasten. Grundlage für die Herstellung von Mikrosystemen

ist deshalb die Entwicklung von mikromechanischen Sensoren, angepaßten Auswerteschaltkreisen und der Hard- und Software zur intelligenten Signalverarbeitung.

Ein Beispiel für ein solches Mikrosystem stellt das Mikrosystem zur dreidimensionalen Messung von Beschleunigungen dar, das am Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) entwickelt wird.

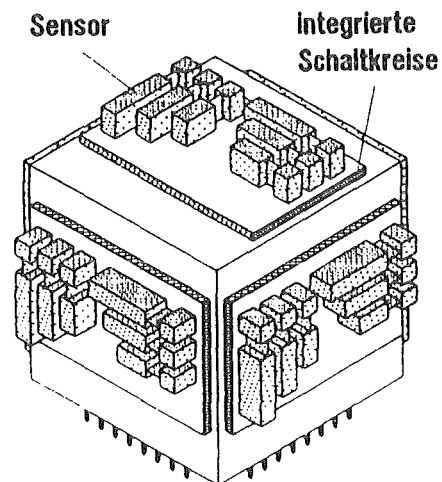


Abb. 1: Mikrosystem zur Messung von Beschleunigungen

Auf den Flächen eines Würfels, der als Systemträger dient, werden nach dem LIGA-Verfahren (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung und Kunststoff Abformung) unter Verwendung der Opferschichttechnik hergestellte Beschleunigungssensoren unterschiedlicher Charakteristika, entsprechende Auswerteschaltkreise und ein

Mikro-Controller montiert. In einer ersten Stufe sind die Beschleunigungssensoren und Auswerteschaltkreise auf ein Dickschichtsubstrat aufgebracht und über Bondverbindungen miteinander verbunden. Langfristig sollen die Sensoren direkt auf dem Auswerteschaltkreis durch einen Abformprozeß integriert gefertigt werden, was zu einer drastischen Kostenreduktion und einer Verminderung der Störkapazitäten und damit zu einer Verbesserung der Meßgenauigkeit führen wird. Der Entwicklungsstand zur Abformung auf prozessierten Wafern wird in [1] vorgestellt.

Die Datenerfassung und -aufbereitung mit dem Mikro-Controller (μC) bietet durch eine programmierbare Auswertung die Möglichkeit, die aufgenommenen Meßsignale durch Filterung, Mittelwertbildung und anwendungsspezifischen Operationen flexibel an verschiedene Applikationen anzupassen. Als Beispiel zeigt Abb. 2 den Signalfluß des am KfK als Vorstufe realisierten 2D-Sensorsystems.

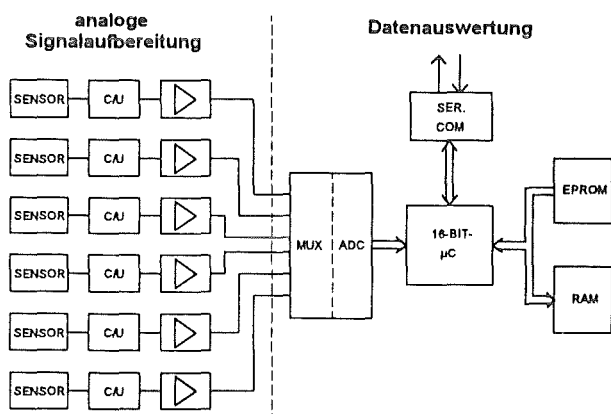


Abb. 2: Aufbau des Mikro-Controller-Moduls für ein bereits realisiertes zweidimensionales Meßsystem, dargestellt als Blockschaltbild

Bei der Bewegung des Systemträgers wird die in verschiedenen Richtungen angreifende Beschleunigung von den Sensorelementen erfaßt und von entsprechenden Auswerteschaltkreisen in analoge Signale transformiert (C/U). Die analogen Signale werden der Mikro-Controller-Einheit zugeführt und über einen Multiplexer (MUX) mit einem Analog-Digital-Converter (ADC) verbunden. Nach der Wandlung der analogen Meßwerte in digitale Größen erfolgt eine Zwischenspeicherung in einem internen Datenspeicher (RAM), der die Meßdaten für nachfolgende Operationen zur Verfügung stellt. Mit einem im Programmspeicher (EPROM) abgelegten Programm wird die weitere Signalverarbeitung vorgenommen. Die dadurch stark komprimierte Information wird über eine serielle Schnittstelle (SER.COM) an den Host-Rechner übertragen. Alternative Methoden für die

digitale Signalverarbeitung werden in [2] vorgestellt.

Mit der Entwicklung des Beschleunigungssensorsystems wird zum ersten Mal eine Kombination von LIGA-Strukturen mit intelligenter Signalverarbeitung demonstriert. Außerdem wird an den Beschleunigungssensoren die Integration von LIGA-Strukturen und elektronischen Schaltkreisen erprobt. Dies verdeutlicht, daß dieser Demonstrator als eine Art Technologietreiber anzusehen ist und Pilotfunktion für das Projekt Mikrosystemtechnik am KfK hat. Verschiedene Institutionen am KfK tragen mit ihrem spezifischen Sachverstand zum erfolgreichen Abschluß dieses Demonstrators bei.

2. Sensorelement

Grundlage für das präzise Meßsystem bilden die Sensoren, die die zu messende Beschleunigung erfassen. Bei dem Sensor handelt es sich um einen mikromechanischen, kapazitiven Differentialsensor, der mit Hilfe der LIGA-Opferschichttechnik hergestellt wird [3,4]. Der Sensor ist aus Nickel aufgebaut und befindet sich auf einem Keramiksubstrat.

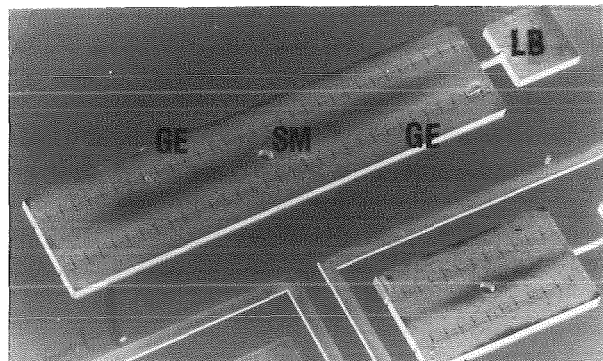


Abb. 3: Aufnahme eines LIGA-Beschleunigungssensors erstellt mit einem Raster-Elektronen-Mikroskop (REM)

An einem Lagerblock (LB) ist über eine Blattfeder (BF) eine frei bewegliche seismische Masse (SM) aufgehängt. Sie kann sich zwischen zwei ortsfesten Gegenelektroden (GE) bewegen, die zusammen mit der seismischen Masse als Mittelelektrode einen Differentialkondensator bilden. Sowohl die seismische Masse, als auch die Gegenelektroden werden in einem Prozeßschritt gefertigt. Damit sind Ungenauigkeiten in der Spaltweite aufgrund von Verbindungs- und Montageschritten auszuschließen.

Die in Abb. 3 dargestellte Sensorstruktur hat bei einer Länge von $3000\ \mu\text{m}$, einer Höhe von etwa $200\ \mu\text{m}$ und einer Spaltweite von $4\ \mu\text{m}$ eine Grundkapazität von $1.3\ \text{pF}$. Da der Sensor im low-g-Bereich ($1\text{g} = \text{Erdbeschleunigung}$) arbeiten soll, wurde die Empfindlichkeit des Sensors mit $20\ \%/g$

ausgelegt. Durch die damit verbundene Dimensionierung des Feder-Masse-Systems ergibt sich eine Resonanzfrequenz von 550 Hz. Durch eine einfache Veränderung der Blattfedergeometrie können mit dem LIGA-Verfahren auch Sensoren anderer Empfindlichkeit hergestellt werden, woraus sich mit sinkender Empfindlichkeit eine steigende Resonanzfrequenz ergibt. Wird der Beschleunigungssensor senkrecht zur Symmetrieachse beschleunigt, treten an der seismischen Masse Trägheitskräfte auf und lenken sie aus. Die Veränderung der Spaltbreite bewirkt eine Kapazitätsänderung, die mit einer entsprechenden Auswerteeinheit detektiert werden kann. Zur Charakterisierung der Sensoren wurden durch umfangreiche statische Messungen, bei denen die Sensorelemente im Schwerfeld der Erde gedreht werden, und dynamische Messungen mit einem Stoßversuch und an einem Schwingtisch durchgeführt. Dabei wurde die Sensortemperatur über Peltierelemente zwischen -10°C und 100°C variiert. Ein statisch aufgenommenes Ausgangskennlinienfeld eines Sensorkondensators über der zu messenden Beschleunigung und der Temperatur als Störgröße zeigt Abb. 4.

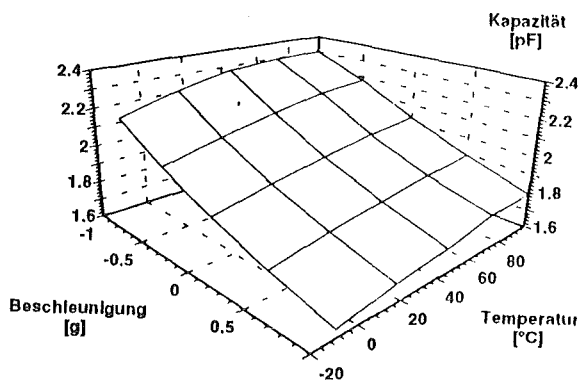


Abb. 4: Ausgangskapazität eines Sensorkondensators über der Beschleunigung und der Temperatur als Störgröße

Aus diesen Messungen ergibt sich eine Empfindlichkeit des Sensors von 0.25pF/g , was bei der Grundkapazität von 1.3pF zu der erwarteten relativen Empfindlichkeit von 19.2 %/g führt. Der mittlere Temperaturkoeffizient des Nullpunktes beträgt $6.8 \cdot 10^{-3}\text{ g/K}$.

Abb. 5 zeigt das Ergebnis einer Messung der Empfindlichkeit über der Anregungsfrequenz. Wie zu erkennen ist, zeigt der Sensor bis ca. 200 Hz ein konstantes Meßverhalten und besitzt eine Resonanzfrequenz von 580 Hz. Aus der Resonanzüberhöhung läßt sich eine Dämpfungskonstante $d = 0.1$ ermitteln.

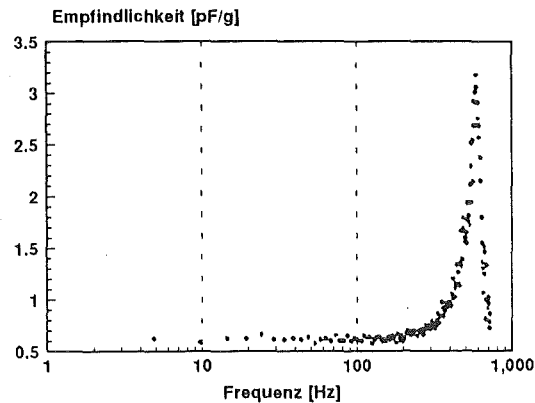


Abb. 5: Frequenzgang des LIGA-Beschleunigungssensors, ermittelt über einen Impulsversuch

Der Temperaturgang des Beschleunigungssensors ist auf die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von dem isolierenden Keramiksubstrat ($8.1 \cdot 10^{-6} /\text{K}$) und der Nickelstruktur ($13.8 \cdot 10^{-6} /\text{K}$) zurückzuführen. Dadurch wird die Kondensatorspaltweite zum einen durch die Ausdehnungsunterschiede von seismischer Masse und darunterliegendem Substrat, zum anderen durch eine thermische Verformung der Gegenelektrode verändert. Dies bestätigt sich dadurch, daß der Temperaturkoeffizient für die Sensoren mit geringer Breite der seismischen Masse am kleinsten ist (Tab.1).

B (μm)	y (μm)	TKO (10^{-3}g/K)
400	3	11,7
400	4	9,2
400	5	8,6
200	4	7,6
100	4	4,9
50	4	2,4

Tabelle 1: Darstellung der gemessenen Temperaturkoeffizienten des Nullpunktes TKO in Abhängigkeit von der Breite der seismischen Masse B und des Kondensatorspaltes y, Sensor in Ruhelage.

Um die Temperaturkoeffizienten grundlegend zu reduzieren, wurde ein temperaturkompensiertes Sensordesign entwickelt (Abb.6).

Bei einer Temperaturerhöhung dehnt sich die schwarz eingezeichnete seismische Masse stärker als das darunterliegende Substrat. Deshalb wird im linken Sensorteil die Spaltweite verringert, wäh-

rend sich die Spaltweite im rechten Sensorteil durch eine Aufspreizung der Gabelstruktur vergrößert. Bei einer Parallelschaltung der Elektroden mit einer idealen Längenanpassung l_1/l_2 heben sich diese Effekte gerade auf, und die effektive Spaltweite bleibt weitgehend konstant, was zu extrem kleinen Temperaturgängen der Sensorkapazität führt. Komplexere Sensordesigns ergeben sich aus dem Wunsch nach einer parallelen Auslenkung, einer Grundkapazität von ca. 5pF, einer hohen Rotationssteifigkeit und Anschlägen zur Detektion einer Überlast (Abb.7).

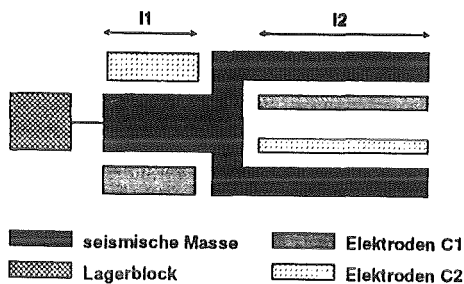


Abb. 6: Beschleunigungssensor mit temperaturkompensiertem Sensordesign

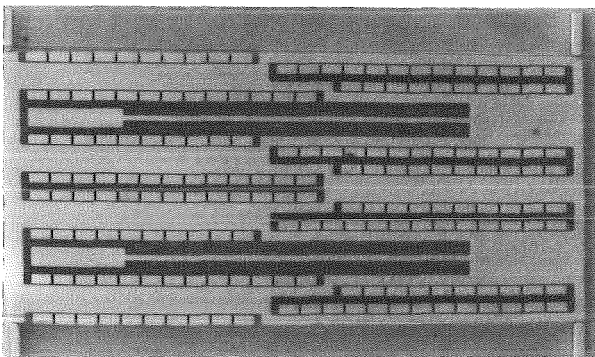


Abb. 7: Temperaturkompensierter Beschleunigungssensor mit paralleler Auslenkung, hoher Grundkapazität, hoher Rotationssteifigkeit und Anschlägen zur Überlastdetektion

Erste Messungen wurden an temperaturkompensierten Sensordesigns durchgeführt. Dabei war die Federkonstante so ausgelegt, daß sich eine Empfindlichkeit der Sensoren von 3 %/g ergibt. Abb. 8 stellt die Sensorkapazität über der Beschleunigung und der Temperatur als Störgröße dar.

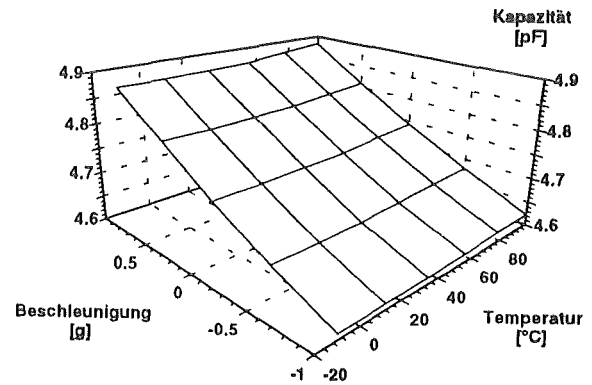


Abb. 8: Ausgangskapazität eines Sensorkondensators des temperaturkompensierten Sensors über der Beschleunigung und der Temperatur als Störgröße

Aus diesen Messungen errechnet sich die Empfindlichkeit von 2.9 %/g und ein Temperaturgang von $1.18 \cdot 10^{-3}$ g/K. Berechnet man den Temperaturkoeffizienten des Nullpunktes für einen temperaturkompensierten Sensor mit einer Empfindlichkeit von 20 %/g, die vergleichbar mit der des Sensors ist, dessen Meßergebnisse in Abb.4 dargestellt sind, erhält man einen Wert von

$$TK_0 = 1,72 \cdot 10^{-4} \text{ g/K,}$$

der bereits die Güte eines Präzisionssensors erreicht.

Die Dämpfung des Sensors errechnet sich aus

$$d = \frac{\delta}{\sqrt{k \cdot M}}$$

δ = Strömungskonstante

k = Federkonstante

M = Gewicht der seismischen Masse

Da die Masse des temperaturkompensierten Sensors kleiner ist, sollte sich ein höherer Dämpfungswert ergeben, was an den vermessenen Sensoren bestätigt werden konnte. Die über einen Schwingungsversuch bestimmte Dämpfung d des Sensors mit der Empfindlichkeit von 2.9 %/g beträgt $d = 0.25$. Wird der Sensor mit einer Empfindlichkeit von 20 %/g ausgelegt, muß die Federkonstante k um einen Faktor 6.8 verkleinert werden. Damit wird nach obiger Gleichung eine Dämpfung von

$$d^* = 2,63 \cdot d = 0,65$$

erreicht, die bereits sehr nahe an dem idealen Wert von 0.7 liegt.

3. Sensorverhalten mit Auswerteschaltkreis

Das Meßverhalten eines Sensorsystems wird neben dem Sensorelement maßgeblich durch die Auswahl eines geeigneten Auswerteschaltkreises festgelegt. Für eine Linearisierung des Meßverhaltens ist eine Quotientenauswertung wünschenswert, da bei ihr das Meßsignal direkt proportional zur Auslenkung Δy der seismischen Masse ist.

$$u_m = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot u_0 = \frac{\Delta y}{y_0} \cdot u_0 = E \cdot a$$

Besitzen die Sensorkondensatoren eine ähnliche Temperaturfunktion, so läßt sich durch die Auswertung nach dem Quotientenverfahren eine Verbesserung des Temperaturgangs erreichen. Abb. 9 zeigt ein Ausgangskennlinienfeld eines Sensorsystems bestehend aus dem einfachen LIGA-Sensorelement und dem Auswerteschaltkreis ht104 [5] über der Beschleunigung als Meß- und der Temperatur als Störgröße.

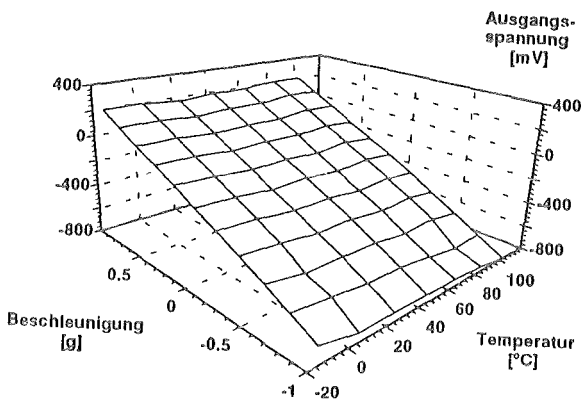


Abb. 9: Ausgangskennlinienfeld eines einfachen LIGA-Sensors mit Auswerteschaltkreis über der Beschleunigung als Meß- und der Temperatur als Störgröße.

Ein Vergleich mit Abbildung 4 macht deutlich, daß das Meßsignal durch die Quotientenauswertung linearisiert und das Temperaturverhalten verbessert wurde. Tabelle 2 vergleicht die Meßergebnisse des Sensorelementes mit dem Sensorsystem.

Die Empfindlichkeit des Sensors bleibt erwartungsgemäß konstant. Auch die dynamischen Kenngrößen Resonanzfrequenz und Dämpfung bleiben bei einer Auswertung des Sensorelementes mit dem Schaltkreis ht104 erhalten, da die 3dB-Grenzfrequenz des Schaltkreises mit 3500 Hz deutlich über der des Sensors liegt. Durch die Quotientenauswertung wird der Temperaturgang des Nullpunktes um einen Faktor 30 und der der Empfindlichkeit um einen Faktor 4.8 verbessert. Da der digital arbeitende Schaltkreis nicht an den Sensor angepaßt ist, entsteht ein Quantisierungsfehler, der 0.036 g beträgt und

die Auflösung festgelegt. Dieser Fehler kann bei einer Anpassung der Auswerteschaltung an den LIGA-Sensor reduziert werden. Ein Sensorsystem mit temperaturkompensierten Sensoren und weitgehend an die Quantisierungsstufen des Schaltkreises angepaßten Kapazitäten befindet sich in Vorbereitung.

Zur Verbesserung der dynamischen Eigenschaften wird ein Schaltkreis, der auf dem Prinzip der Lageregelung beruht, entwickelt. Dabei werden die angreifenden Trägheitskräfte durch elektrostatische Kräfte kompensiert. Es zeichnet sich ab, daß mit Einsatz dieses Schaltkreises die Dämpfung des Sensors auf einen gewünschten Wert von 0.6 - 0.7 eingestellt und die 3dB-Grenzfrequenz des Sensors über die mechanische Resonanzfrequenz gehoben werden kann. Weiterhin bietet dieser Schaltkreis die Möglichkeit, die Lage der seismischen Masse durch elektrostatische Kräfte zu beeinflussen, was die Grundlage für intelligente Selbsttest und eine Selbstkalibrierung ist.

	Sensorelement	Sensorsystem
Empfindlichkeit (%/g)	20	20,3
Resonanzfrequenz (Hz)	550	550
Dämpfung	ca. 0,1	ca. 0,1
TKO (10^{-3} g/K)	9,2	0,32
TKE (10^{-3} /K)	7,8	1,6
Auflösung (g)	-	0,036

Tabelle 2: Vergleich des Sensorelementes mit einem Sensorsystem, bei dem derselbe Sensor eingebaut wurde. Temperaturkoeffizient des Nullpunktes = TKO, Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit = TKE.

4. Mikrosystem zur Detektion der Beschleunigung in zwei Raumrichtungen

Die Möglichkeiten, die sich aus dem Einsatz intelligenter Signalverarbeitung direkt bei dem Sensor ergeben, werden anhand eines Demonstrationsaufbaus eines Meßsystems für Beschleunigungen in zwei Raumrichtungen am KfK demonstriert. Bei dem Demonstrator findet eine Signalverarbeitung auf zwei Ebenen statt. Zunächst werden mit den redundant aufgezeichneten Meßdaten Plausibilitätstests durchgeführt, um defekte Sensoren zu erkennen und von der weiteren Signalverarbeitung auszu-

schließen. Anschließend werden die Meßergebnisse der funktionstüchtigen Sensoren gemittelt und ein Beschleunigungswert für jede Raumrichtung ausgegeben. Abbildung 10 zeigt den Vergleich von korrigierten und unkorrigierten Meßergebnissen anhand eines Beispiels. Nach diesem Schritt werden die Meßdaten in Mittelwerte für jede Beschleunigungsrichtung komprimiert.

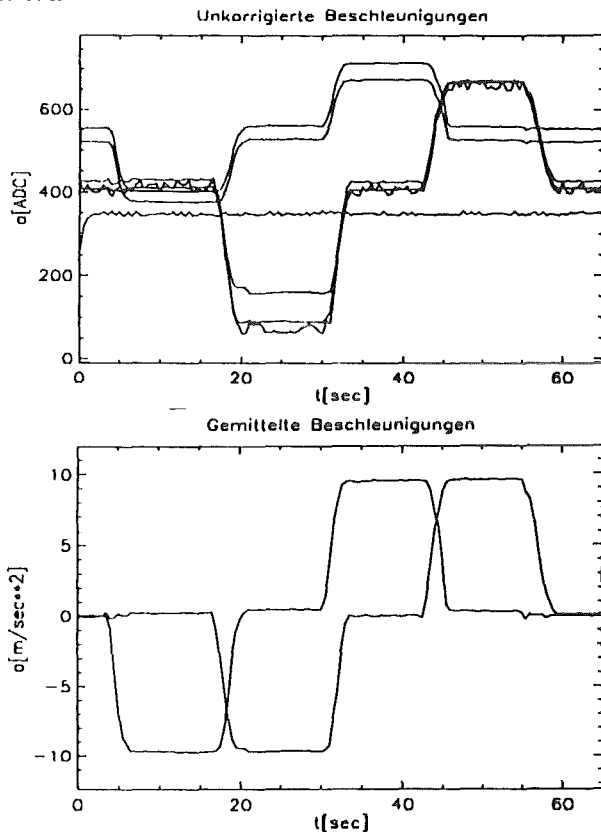


Abb. 10: Beispiel für die Korrektur von Sensorrohdaten, ein defekter Sensor und ein stark verrauschtes Meßsignal wurden zur Auswertung nicht herangezogen, die übrigen Meßsignale für eine Richtung gemittelt.

Die so vorbereiteten Meßdaten können in einer zweiten Signalverarbeitungsebene mit Hilfe von Fourier-Transformationen oder anderen, speziell an die Aufgabe angepaßten Algorithmen verarbeitet werden. Z.B. könnte ein Lagerschaden an einer Turbine, der sich durch eine Verschiebung charakteristischer Lagerfrequenzen äußert, vorzeitig erkannt werden. Dazu müßte quasi-kontinuierlich das Spektrum der aufgenommenen Signale mit Hilfe einer Fast-Fourier-Transformation errechnet und mit einem Normalspektrum verglichen werden. Bei einer Abweichung der Spektren voneinander erkennt das System, daß das Lager nicht mehr einwandfrei arbeitet und meldet dies an den Host-Rechner.

5. Diskussion

Über den Nachweis der prinzipiellen Tauglichkeit von LIGA-Sensoren hinaus zeigen die Ergebnisse, daß der temperaturkompensierte LIGA-Sensor Meßeigenschaften besitzt, die im Bereich von Präzisionssensoren liegen. Besonders der geringe Temperaturgang des Nullpunktes von $1.8 \cdot 10^{-4} \text{g/K}$ macht den Sensor bereits jetzt für einen Einsatz in der Präzisionsmeßtechnik attraktiv. Durch die Entwicklung eines angepaßten Schaltkreises auf dem Prinzip der Lageregelung kann die Dämpfung des Sensors eingestellt und die Grenzfrequenz über die mechanische Resonanzfrequenz des Sensors angehoben werden.

Obwohl das Sensorelement bereits jetzt durch die Batch-Fabrikation in großer Stückzahl preisgünstig hergestellt werden kann, wird eine Abformung des Sensors direkt auf dem Auswerteschaltkreis die Montagekosten verringern und die Meßgenauigkeit weiter erhöhen. Dadurch wird der Sensor bei höherer Meßgenauigkeit wirtschaftlich konkurrenzfähig gegenüber anderen auf dem Markt erhältlichen Beschleunigungssensoren.

Die an dem 2D-Aufbau gewonnenen Ergebnisse machen zwei Vorteile der Mikrosystemtechnik deutlich. Zum einen können bei gleichen Kosten Meßergebnisse durch den Einsatz vieler preisgünstiger Sensoren verbessert, zum anderen kann eine Reduktion der Meßwerte auf eine für die Anwendung wirklich notwendige Information erreicht werden.

Literatur:

- [1] R.Ruprecht, W.Bacher, A.Both: Darstellung einfacher Mikrosysteme durch Kunststoffabformung und Galvanoformung auf integrierten Schaltkreisen; 1. Statuskolloquium des PMT, Tagungsband (1993)
- [2] H. Gemmeke, M. Balzer, O. Fromhein, T. Kühner, O. Kröhmer: Schaltungsentwurf für Mikrosysteme; 1. Statuskolloquium des PMT, Tagungsband (1993)
- [3] C. Burbaum, J. Mohr: Herstellung von mikromechanischen Beschleunigungssensoren in LIGA-Technik; KfK-Bericht 4859, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1991)
- [4] M.Strohrmann, J.Mohr: Untersuchung des Verhaltens von mikromechanischen kapazitiven Beschleunigungssensoren in LIGA-Technik; Diplomarbeit Universität Karlsruhe, Fakultät Elektrotechnik, (1991)
- [5] ht-Mikroelektronik GmbH, Pappenstr. 36, 47057 Duisburg

Mikrooptischer Schalter als Bypass-Element in optischen Datennetzwerken

J. Mohr, J. Götttert, M. Kohl, A. Müller

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Im Rahmen des BMFT-Verbundprojektes AVT-KEO (Aufbau- und Verbindungstechnik als Basistechnologie elektrischer und optischer Mikrosysteme) arbeitet das Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) an der Realisierung eines mikromechanischen Schaltelementes, das als Bypass-Element in einem faseroptischen Netzwerk eingesetzt werden soll. Zur Realisierung des Schaltelementes sind zwei Entwicklungsrichtungen notwendig. Einerseits müssen Konzepte erarbeitet und deren Tauglichkeit überprüft werden, die eine Abbildung von von Monomodefasern abgestrahltem Faserlicht auf eine zweite Monomodefaser erlauben. Dies erfordert die Realisierung von mikrooptischen gestuften Aufbauplatten, die die Integration von Kugellinsen neben LIGA-Elementen erlauben. Für deren Herstellung wird der Weg des Aufbaues von LIGA-Elementen (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung, Kunststoff Abformung) auf geätzten Siliziumwafern gegangen. Damit kombiniert dieses Element zum erstenmal Komponenten der Silizium-Mikromechanik mit LIGA-Technik. Andererseits muß ein mikromechanischer Aktor entwickelt werden, der Wege bis 200 µm erlaubt bei Ansteuerspannungen kleiner 70 Volt. Hierzu wurde ein konisches Plattendesign entwickelt, das nicht nur die Realisierung größerer Stellkräfte zuläßt, sondern auch die mit prozeßtechnischen Schwierigkeiten verbundene Erzeugung möglichst kleiner Kondensatorspaltweiten mit wenigen Mikrometern vermeidet. Der derzeit im Test befindliche Aktor erreicht bei einer Aktorfläche von 4 x 4 mm² Stellkräfte knapp unter einem Millinewton. Bei kürzeren Stellwegen läßt sich diese Kraft erhöhen.

1. Einleitung

In zunehmendem Maße wird in der modernen Nachrichten- und Kommunikationstechnik die optische Signalübertragung in Fasernetzen aufgrund ihrer spezifischen Vorteile, wie hohe Datenübertragungsraten, Multiplex-Betrieb, geringes Gewicht oder elektromagnetische Verträglichkeit eingesetzt [1]. Erste Glasfasernetzwerke werden zumindest bis in die Nähe des Endteilnehmers realisiert und machen den Aufschwung der Fasertechnik deutlich. Ein Beispiel stellt das Bundespostprojekt dar, bei dem die Telephonnetze in den neuen Bundesländern mit Glasfasern aufgebaut werden sollen.

Während heutzutage die Verteilung auf die einzelnen Teilnehmer z.B. in einem Bürogebäude noch über Kupferleitungen erfolgt, muß langfristig angestrebt werden, auch diese Strecken durch Lichtleiternetze zu ersetzen. Da dabei die Verteilung der Information im Gebäude über Ringleitungen erfolgen soll, in denen jeder Apparat nicht nur Sender und Empfänger der Informationen ist, sondern auch gleichzeitig zur Aufbereitung der Information eingesetzt werden soll, muß sichergestellt sein, daß die Information auch dann weiterläuft, wenn ein Teilnehmer ausfällt. Hierzu sind optische Schaltelemente notwendig, die eine Bypass-Funktion erfüllen können. Dabei

müssen die Verluste gering und die Schaltzeiten kurz gehalten werden. Außerdem müssen diese Elemente billig herstellbar sein, sowie klein genug sein, daß sie in die faseroptischen Netzwerke integriert werden können.

Zur Herstellung solcher Bypass-Strukturen existieren verschiedene Möglichkeiten. Im Bereich der integrierten Optik können interferometrische Strukturen realisiert werden, die z.B. durch thermische Anregung derart verstimmt werden, daß die gesamte Information entweder nur in der einen oder der anderen Lichtleiterbahn zur Verfügung steht [2]. Eine andere Möglichkeit zur Realisierung solcher Elemente, die auch am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) unter Einsatz des LIGA-Verfahrens untersucht wird, besteht darin, über einen Mikroaktor einen Spiegel zu bewegen und damit den Verlauf des Lichtweges zwischen festen Fasern zu verändern. Das IMT führt diese Forschungsarbeiten im Rahmen des Verbundprojektes AVT-KEO des BMFT durch.

Verschiedene Ansätze mit Siliziummikrostrukturen wurden bereits verfolgt, um solche Schaltelemente zu realisieren [3]. Dabei besteht jedoch das Problem, daß bei Verwendung von Siliziummikromechanik verschiedene Einzelkomponenten miteinander kombiniert werden müssen, was eine aufwendige Aufbau- und Verbindungstechnik er-

fordert. Das LIGA-Verfahren bietet dagegen den Vorteil, daß die verschiedenen Elemente wie Faserschächte, elektrostatischer Aktor mit Spiegelfläche sowie Halteelemente für externe Komponenten in einem Arbeitsschritt strukturiert werden können.

Die Herstellung dieser Elemente nach dem LIGA-Verfahren erfordert die Verwendung gestufter Aufbauplatten, auf denen der LIGA-Prozeß durchgeführt werden muß. Andererseits müssen Aktorelemente realisiert werden, die Wege über 100 µm erlauben. Im vorliegenden Bericht werden die Konzepte zur Lösung dieser Problemstellungen diskutiert sowie erste Ergebnisse vorgestellt.

2. Aufbau und Funktionsweise des Schaltelementes

In Abb. 1 ist der prinzipielle Aufbau des faseroptischen Schalters dargestellt. Wesentliche Einheit ist dabei der elektrostatische Linearantrieb, der in einer LIGA-Struktur endet, die neben den feststehenden Flächen auch als Spiegelfläche zur Umlenkung des Faserlichtes dient. Die weiteren optischen Elemente wie Fasern und abbildende Kugellinsen werden über Haltestrukturen auf der mikrooptischen Aufbauplatte zum Schaltelement positioniert, wobei die Justierung der Komponenten bereits durch den Prozeß erfolgt.

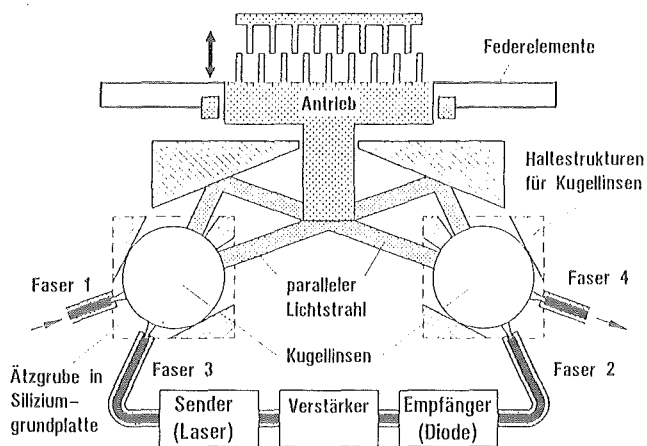


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau des optischen Bypass-Schaltelementes

Im aktivierten Zustand, dem Normalzustand, wird Licht, das von Faser 1 abgestrahlt wird an der feststehenden LIGA-Struktur reflektiert und in Faser 2 eingekoppelt. Von dort wird es einem Verstärker zugeführt und über Faser 3 und einer Reflektion an der zweiten LIGA-Seitenwand wieder in das Fasernetz (Faser 4) eingekoppelt. Im nichtaktivierten Zustand, dem Bypass-Zustand, wird das von Faser 1 abgestrahlte Licht an der Spiegelfläche des Aktors reflektiert und direkt in das Fasernetz über-

tragen. Zur Verminderung von Verlusten bei Monomodefasern ist es aufgrund der langen Lichtwege notwendig, eine Abbildung der Faserstirnflächen aufeinander zu realisieren. Hierzu müssen in den Strahlengang Kugellinsen eingesetzt werden, die zu einer Parallelisierung des Strahles führen [4].

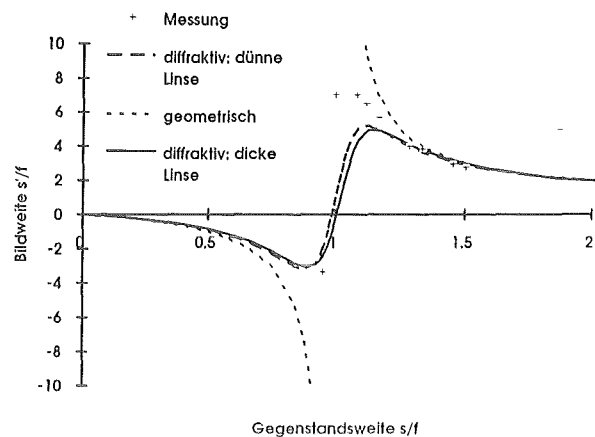


Abb. 2: An 900 µm dicken Kugellinsen gemessenes Abbildungsverhältnis im Vergleich zur geometrischen und zur Beugungskorrigierten Theorie

Die Abstrahlung von Monomodefasern kann als gaußförmig angesehen werden, so daß zur Analyse des Strahlverlaufes die aus der Lasertheorie bekannte Gaußsche Strahl-optik angewendet werden kann. Zur Beschreibung der dicken Linsen muß die Theorie für dünne Linsen erweitert werden, um Beugungseffekte mit einzubeziehen. In Abb. 2 werden die an 900 µm dicken Kugellinsen ermittelten Ergebnisse zu den Abbildungsverhältnissen den sich aus der geometrischen Theorie und der Beugungstheorie ergebenden Abbildungsverhältnissen gegenübergestellt. Wie zu erkennen, stimmen die erzielten Abbildungsergebnisse gut mit der für dicke Linsen korrigierten Theorie überein. Die noch vorhandenen Abweichungen, insbesondere im Fokalbereich, sind auf chromatische und sphärische Abberation zurückzuführen.

Aus technischer Sicht wäre zur Abbildung der Faserstirnflächen die Verwendung von Kugellinsen mit einem Durchmesser von 125 µm am vorteilhaftesten. Wie jedoch aus der Theorie ersichtlich und auch anhand von Experimenten bestätigt werden konnte, kann mit diesen Linsen das Licht nicht kollimiert werden, da sie im Vergleich zum Felddurchmesser zu klein sind. Aus diesem Grunde müssen Linsen mit größerem Durchmesser verwendet werden. Es bieten sich Linsen mit 900 µm Durchmesser an, wie sie auf dem Markt auch in entspiegelter Version erhältlich sind.

Dadurch besteht jedoch die Notwendigkeit, Platten mit Vertiefungen zu verwenden, in die die Linsen eingefügt werden können. Da für den Einsatz von Monomodefasern nur sehr geringe Positionsabweichungen der Kugellinsen relativ zur Fasermittelpunkt sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung toleriert werden können, müssen die Vertiefungen mit hoher Genauigkeit gefertigt werden. Es bieten sich hierfür sehr genau herstellbare Ätzgruben in Siliziumwafer an, mit denen die vertikale Position sehr genau eingestellt werden kann.

Für die horizontale Positionierung der Kugellinsen ergeben sich zwei Konzepte, die unterschiedliche Anforderungen an den LIGA-Prozeß besitzen. Im ersten Fall werden die Ätzgruben soweit geätzt, daß die Kugellinse auf den Seitenflächen aufliegt. Diese Auflage definiert die horizontale und die vertikale Position. Um die horizontale Positionierung der Faser relativ zur Linse sicherzustellen, muß eine justierte Strukturierung nach dem LIGA-Prozeß relativ zur Ätzgrube mit sehr hoher Genauigkeit durchgeführt werden. Derzeit liegen die Genauigkeiten bei der justierten Bestrahlung im Mikrometerbereich. Außerdem führen Maskenverzüge zu lokalen Positionsänderungen. Es ist deshalb in diesem Fall mit starken Positionsabweichungen zu rechnen. Die zweite Möglichkeit besteht darin, den Ätzboden als Auflagefläche der Kugellinse zu nutzen und die Grube breiter zu ätzen. Die horizontale Positionierung erfolgt dann über LIGA-Haltelemente, die direkt und positioniert zu den Faserführungsstrukturen strukturiert werden. Damit kann eine exakte Positionierung von Faser und Kugellinse sichergestellt werden. Diese Variante stellt weniger Anforderungen an die Justiergenauigkeit. Da die Tiefe der Ätzgrube auf ein Mikrometer genau eingestellt werden kann, verspricht diese Variante höhere Positionsgenauigkeiten.

In den derzeitigen Untersuchungen wird geprüft, wie groß die Verluste als Funktion des auftretenden Höhenversatzes zwischen Kugel- und Fasermittelpunkt bei einer 1:1-Abbildung sind. Abb. 3 zeigt eine dem Schaltelement nachempfundene Teststruktur in Polymethylmethacrylat (PMMA) mit in die Ätzgruben eingelegten Kugellinsen und Fasern, die positionsgenau in den Faserführungsstrukturen liegen. Die Lichtumlenkung erfolgt bei diesen passiven Polymerstrukturen durch Totalreflexion an der Hypothenuse des Prismas.

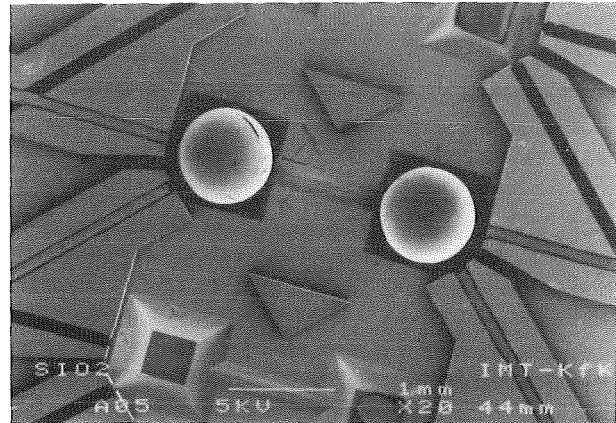


Abb. 3: Teststruktur in PMMA zur Vermessung der optischen Verluste beim Aufbau des Bypass-Schaltelementes mit in die Aufbauplatte eingelegten Kugellinsen und Fasern

Für die Bestimmung des notwendigen Akkorweges und der Optimierung des zukünftigen Aufbaus wurden Messungen zum Fokussierungsverhalten einer Kugellinse durchgeführt. In Abb. 4 sind die Ergebnisse dieser Experimente als Funktion der Faserposition relativ zur Kugellinse dargestellt. Wie zu erkennen, ergibt sich ein quasi paralleler Strahl bei einem Abstand von ca. 600 μm mit einem $1/e^2$ -Durchmesser von ca. 80 μm .

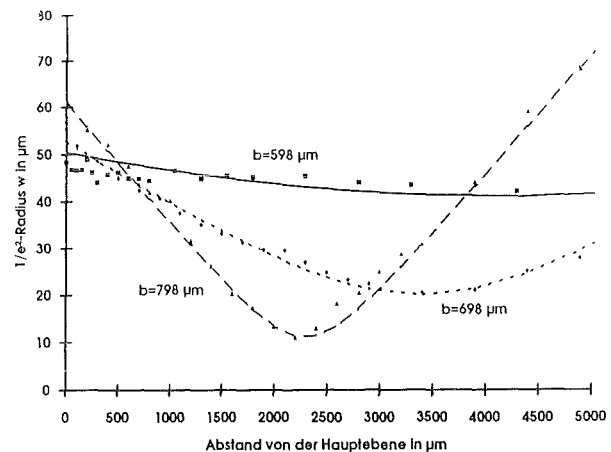


Abb. 4: Strahlbreite des kollimierten Gaußstrahles als Funktion des Abstandes zur Kugel und des Abstandes zwischen Faser und Kugellinse

Während die bisherigen Experimente an Strukturen der Version 1 durchgeführt wurden, konnte gleichzeitig gezeigt werden, daß es möglich ist, die gewünschten Haltestrukturen für die Kugellinsen in Metall entlang der Ätzgruben zu erzeugen. Abb. 5 zeigt eine Teststruktur mit der die Galvanik über eine Grabenkante realisiert wurde (linker Galvanikstreifen).

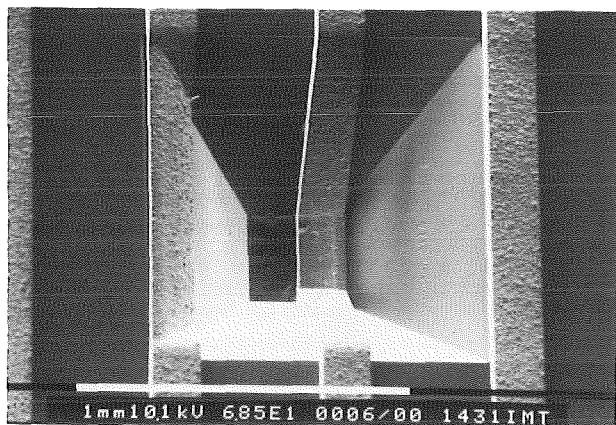


Abb. 5: Teststruktur zur Demonstration der Erzeugung von metallischen Haltestrukturen über der Kante einer Ätzgrube

Obwohl die bisherigen optischen Experimente orientierenden Charakter hatten, ist davon auszugehen, daß die geforderten optischen Eigenschaften, wie sie für den Schalter notwendig sind, erreicht werden können. Die zu erwartende optische Performance des Schaltelements muß in weiteren Untersuchungen erarbeitet werden.

3. Elektrostatischer Aktor für das Bypass-Element

Die Realisierung der Schaltfunktion des Bypass-Elementes soll mit einem elektrostatischen Antrieb, der an Federelementen aufgehängt ist erfolgen, wobei Stellwege von mehr als 100 µm realisiert werden müssen und die antreibende Spannung nicht größer als 70 Volt sein sollte. Wie aus Abb. 1 ersichtlich wird die Antriebseinheit in der Form einer kammartigen Anordnung von Plattenkondensatoren realisiert [5]. Bei anliegender Spannung ist die Anordnung bestrebt, den energetisch günstigsten Zustand zu erreichen, was dazu führt, daß die Platten des Kammes ineinander eintauchen. Bei einer konventionellen parallelen Anordnung der Platten ergibt sich in Bewegungsrichtung die Kraft

$$f_x(d) = \frac{1}{2} \epsilon \cdot H \cdot U^2 \cdot 1/d$$

während sich quer zur Bewegungsrichtung folgende Kraftkomponente ergibt.

$$f_y(x, d) = -\frac{1}{2} \epsilon \cdot H \cdot U^2 \cdot (x_0 + x) \cdot 1/d^2.$$

Dabei bezeichnen H die Höhe der Strukturen, d die Spaltweite des Kondensators, U die anliegende Spannung und $x_0 + x$ die Eintauchtiefe bei einer Bewegung um den Weg x.

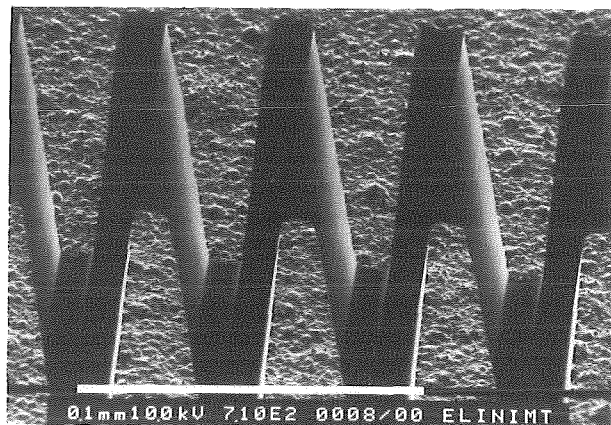


Abb. 6: REM-Aufnahme des konischen Designs der Kondensatoranordnung

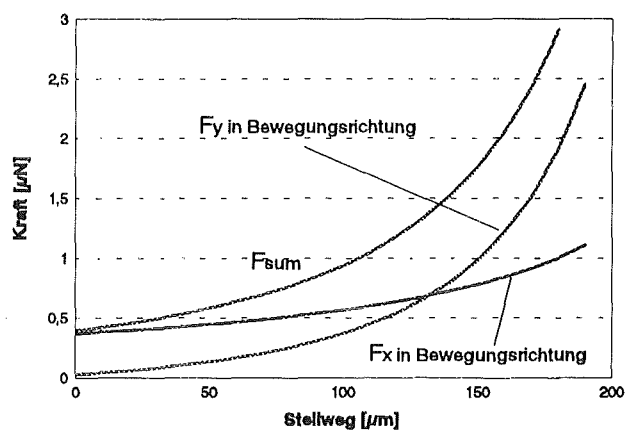


Abb. 7: Kraftkomponenten des konischen Plattendesigns als Funktion des Stellweges (Anfangseintauchtiefe: 20 µm, Konizitätswinkel: 2,4°, Endabstand: 4 µm)

Eine im Vergleich zur Parallelplattenanordnung wesentlich bessere Kraftbilanz ergibt sich bei einem konischen Design der Kondensatorplatten (Abb. 6). Die konische Anordnung hat zwei Vorteile. Zum ersten verengt sich mit zunehmender Eintauchtiefe der Plattenabstand, was zu einer Zunahme der Kraft in Bewegungsrichtung führt. Wesentlicher dagegen ist die Tatsache, daß auch von der senkrecht zu den Kondensatorplatten wirkenden Kraft ein je nach dem Winkel der Kondensatorplatten mehr oder weniger großer Anteil zur Bewegung genutzt werden kann. Dieser Anteil nimmt mit der Eintauchtiefe stark zu. Abb. 7 zeigt ein Kraft-Weg-Diagramm für die einzelnen Komponenten. Wie zu erkennen, ist nach der Hälfte des Weges der Anteil der Querkraft dominierend. Er kann zudem über die Anfangseintauchtiefe und den Konizitätswinkel gesteuert werden. Beide Größen müssen unter dem Gesichtspunkt der tolerierbaren Querkraft optimiert werden.

Die tolerierbare Querkraft ergibt sich aus der Federsteifigkeit und den tolerierbaren Verschiebungen in Querrichtung. Damit die Verschiebung in Querrichtung $1 \mu\text{m}$ nicht überschreitet, wurde für die Federn des Bypasselementes eine Federsteifigkeit in Querrichtung von 9500 N/m ermittelt. Für die gefalteten Biegebalken des Designs ergibt sich daraus eine Steifigkeit in Bewegungsrichtung von 4 N/m . Um einen Stellweg von $200 \mu\text{m}$ zu erreichen ist ohne Berücksichtigung von Reibung am Ende des Stellweges eine Kraft von 0.8 mN erforderlich. Um diese Kräfte zu erreichen, ist es notwendig ca. 500 der konischen Kondensatorelemente parallel zu schalten. Damit ergibt sich eine Aktorfläche von $4 \times 4 \text{ mm}^2$.

Abb. 8 zeigt eine REM-Aufnahme (Rasterelektronenmikroskop) des kompletten Aktors mit dem Spiegelement. Erste Tests des Schaltverhaltens werden derzeit an Elementen durchgeführt, die für Multimodefasern konzipiert wurden. Aus diesem Grunde taucht das Spiegelement in den Kreuzungspunkt T-förmig angeordneter Multimodefasern ein. Im ausgefahrenen Zustand wird das Licht von der in den unteren Schacht einzulegenden Faser direkt in die gegenüberliegende Faser übertragen. Im eingefahrenen Zustand erfolgt eine Umlenkung um 90° in die horizontal angeordnete Faser.

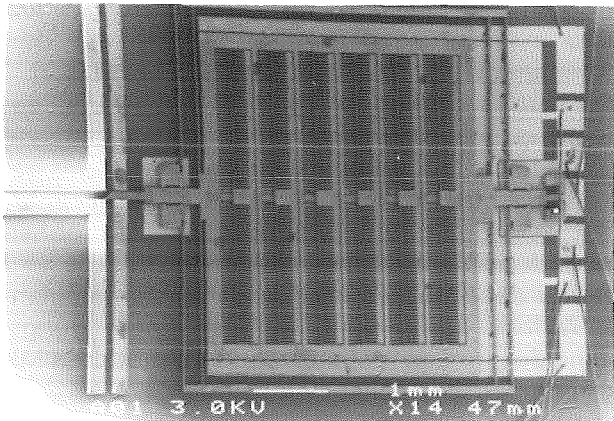


Abb. 8: REM-Aufnahme der ca. $100 \mu\text{m}$ hohen Nickelstruktur des gesamten Linearaktors

Mit diesen Tests sollen Erfahrungen über die auftretenden Verluste bei Reflexion an metallischen Oberflächen gewonnen werden. Diese sollten nach Simulationsexperimenten und je nach verwendeter Faser zwischen 10% und 35% liegen. Wie bisherige Untersuchungen an passiven Elementen zeigten wird dazu allerdings eine Beschichtung der Spiegelfläche mit Silber notwendig sein.

4. Diskussion

Die bisher durchgeführten Voruntersuchungen zur Realisierung des optischen Bypass-Elements lassen erwarten, daß dieses gemäß den geforderten Spezifikationen realisiert werden kann. Sowohl die Abbildung der Faserstirnflächen aufeinander mit Hilfe von gestuften mikrooptischen Aufbauplatten auf der Basis von geätzten Siliziumsubstraten als auch die Realisierung von Mikroaktoren mit großen Stellwegen sind mit den vorgestellten Konzepten aufgrund bisheriger Erfahrungen möglich. Die verfolgten Konzepte sind nicht nur für die Realisierung des Bypass-Elementes interessant, sondern stellen auch für andere Anwendungen Lösungsansätze dar. Damit erweitert sich die Anwendungspalette des LIGA-Verfahrens. Insbesondere die Verbindung Silizium-ätztechnik und LIGA-Technik kann für die Herstellung von Strukturen mit variierender Geometrie über der Strukturhöhe eingesetzt werden [6]. Die elektrostatischen Linearaktoren sind von allgemeiner Bedeutung, wenn es darum geht, Mikrosysteme mit Aktorfunktionen auszustatten.

5. Literatur

- [1] J.R. Cirillo, K.L. Jennings, M.A. Lynn, D.A. Messury, R.E. Steele: Local Area Network Applications of Plastic Optical Fiber; SPIE Vo. 1592, Plastic Optical Fibers, (1991) pp. 42
- [2] M.F. Dautartas et al: A Silicon-Based Moving Mirror Optical Switch, IEEE Journal of Lightwave Technology 10, 8 (1992), pp. 1078
- [3] R. Müller-Fiedler: Silizium als Material der integrierten Optik, Beitrag zum ersten Statusseminar des Verbundprojektes AVT-KEO, Karlsruhe, Jan. 1993
- [4] A. Müller, J. Göttert, J. Mohr: LIGA Microstructures on Top of Micromachined Silicon Wafers Used to Fabricate a Microoptical Switch, wird veröffentlicht in: Proc. MME 93, Neuchatel, Sept. 1993
- [5] J. Mohr, M. Kohl, W. Menz: Micro Optical Switching by Electrostatic Linear Actuators with Large Displacements, Proc. Transducer 1993, Yokohama, June 1993, pp. 120
- [6] A. El-Kholi, W. Bacher, B. Menz, J. Mohr, R. Stransky: Entwicklungen und Erweiterungen der Strukturierungsmöglichkeiten in der Röntgentiefenlithographie, dieser Band

Mikromembranpumpen als Elemente eines optochemischen Mikroanalysesystems

W.K. Schomburg¹, R. Rapp¹, B. Büstgens¹, J. Reichert², O. Fromhein³

¹) Institut für Mikrostrukturtechnik

²) Institut für Radiochemie

³) Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik

Zusammenfassung

Am Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) wird im Institut für Mikrostrukturtechnik eine Mikromembranpumpe für die Förderung kleiner Flüssigkeits- und Gasmengen entwickelt. Die Mikropumpe wird durch eine Kombination des LIGA-Verfahrens (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung, Kunststoff Abformung) mit Prozessen zur Herstellung von Mikromembranen gefertigt. Der Antrieb erfolgt bisher durch einen externen pneumatischen Aktor. Mit diesem Aktor wurde für Luft eine maximale Förderrate von 86 µl/min und ein erzeugbarer Unterdruck am Einlaß der Pumpe von 47 hPa ermittelt. Mit Wasser wurde eine Förderrate von bis zu 70 µl/min erreicht.

Im vorliegenden Beitrag wird die Mikromembranpumpe beschrieben, die in einem optischen Mikroanalysesystem eingesetzt werden soll, das im KfK entwickelt wird. Durch die Kombination der Mikropumpen mit chemischen Mikrosensoren zu einem Mikrosystem werden die Einsatzmöglichkeiten der Sensoren wesentlich erweitert. Durch den definierten Zu- und Abtransport können sehr kleine Probenmengen untersucht werden und der Mikrosensor kann zwischen zwei Messungen gespült und kalibriert werden. Über diese Anwendung hinaus bieten sich viele weitere Einsatzmöglichkeiten für die Mikropumpe an, bei denen kleine Flüssigkeits- oder Gasmengen gehandhabt werden müssen.

1. Einleitung

Die Einführung von Mikrosensoren eröffnet im Prinzip die Möglichkeit zur kostengünstigen chemischen Analyse immer kleinerer Probenmengen. Dies bietet in vielen Bereichen Vorteile gegenüber konventioneller Meßtechnik. So steht z.B. in der Medizin oft nur eine sehr kleine Menge Körperflüssigkeit zur Verfügung, aus deren Analyse auf den Gesundheitszustand des Patienten geschlossen werden soll. Im Umweltschutz ist die flächendeckende Messung von Schadstoffen in großen Gebieten von Interesse, die erst durch die wegen ihrer geringen Größe preisgünstig zu fertigenden Mikrosensoren realisierbar wird.

Die kleinste Gas- bzw. Flüssigkeitsmenge, die noch chemisch analysiert werden kann, ist oft dadurch bestimmt, daß die Handhabung sehr kleiner Proben schwierig ist. Deshalb werden die Einsatzmöglichkeiten von chemischen Mikrosensoren wesentlich erweitert, wenn sie mit Mikropumpen zu Systemen kombiniert werden, die die zu analysierende Probe auf definierte Weise an den Ort der Messung bringen.

Ein weiterer Vorteil eines solchen Mikrosystems besteht darin, daß die Probe nach erfolgter Messung wieder sicher abtransportiert wird und der Sensor vor der nachfolgenden Messung mit einem Spülmedium gereinigt bzw. mit einem Referenzmedium neu kalibriert wird. Außerdem kann eine Probe nacheinander verschiedenen Sensoren zugeführt und damit besser charakterisiert werden. Die Menge der für eine chemische Analyse benö-

tigten und unter Umständen teuren und toxischen Reagenzien kann drastisch reduziert werden, wenn es gelingt, durch ein mikrofluidisches Transportsystem kleinste Probenmengen definiert zu mischen und einem Sensor zuzuführen. Deshalb wird in verschiedenen Arbeitsgruppen an den Komponenten für Mikrosysteme gearbeitet [1,2]. Am Kernforschungszentrum Karlsruhe ist die Realisierung eines Mikrosystems zur Elektrolytanalyse [3] und eines optochemischen Analysesystems geplant, die durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Spezialisten verschiedener Institutionen möglich werden soll. Im vorliegenden Bericht wird der für das optochemische Analysesystem geplante Aufbau beschrieben. Auf den Entwicklungsstand der für den Probentransport benötigten Mikropumpen wird näher eingegangen.

2. Aufbau des optochemischen Analysesystems

Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau des geplanten optochemischen Analysesystems. Das System soll in der Lage sein, Gase oder Flüssigkeiten auf ihren Gehalt an chemischen Inhaltsstoffen hin zu untersuchen.

Die rechte Pumpe in Abb. 1 saugt eine kleine Probenmenge an, so daß sie in einer Küvette von einer Lichtquelle durchstrahlt wird. In der Küvette befindet sich ein optochemischer Sensor, bestehend aus einem immobilisierten Farbindikator, dessen spektrale Charakteristik von der Konzentration des zu messenden Stoffes abhängt (siehe

8.). Das durch den Sensor transmittierte Licht wird über eine Glasfaser in ein Gitterspektrometer weitergeleitet. Das Mikrospektrometer (siehe 9.) zerlegt das Licht in seine Spektralfarben und fokussiert es auf eine Fotodiodenzelle. Die elektronischen Signale der Fotodioden werden dann von einem Mikrokontroller analysiert und daraus die Konzentration der zu untersuchenden Substanz bestimmt.

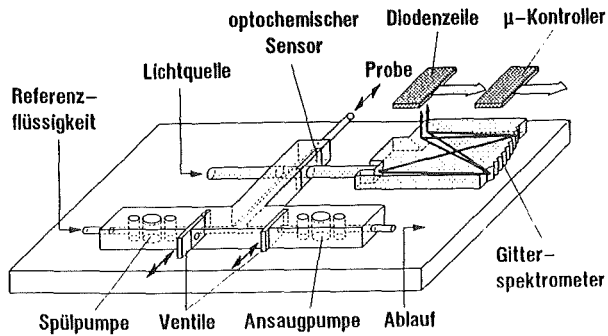


Abb. 1: Schematische Darstellung des geplanten optochemischen Mikroanalyseystems: Die rechte Pumpe transportiert die Probe in die Meßküvette. Das Transmissionsspektrum eines mit der Probe in Kontakt stehenden optochemischen Sensors wird mit einem Gitterspektrometer und einer Diodenzelle aufgezeichnet und vom Mikrokontroller werden die Konzentrationen der zu analysierenden Stoffe bestimmt. Die Probe wird durch die linke Pumpe abtransportiert und die Meßküvette wird vor der nächsten Messung mit einer Referenzlösung gespült und der Sensor recalibriert.

Nach Abschluß der Messung wird die Probe durch die linke Pumpe in Abb. 1 wieder aus dem Mikrosystem entfernt. Gleichzeitig wird eine Referenzflüssigkeit in die Küvette gepumpt, die zur Recalibrierung dient. In der Referenzflüssigkeit ist ein Farbstoff enthalten, an dessen Spektrum der Mikrokontroller erkennen kann, wie lange sich noch Referenzflüssigkeit in der Küvette befindet. Auf diese Weise kann die rechte Pumpe in Abb. 1 vom Mikrokontroller bei der nächsten Probenentnahme angehalten werden, sobald die Probe den Meßort erreicht hat.

Der hier dargestellte Aufbau hat den Vorteil, daß die möglicherweise mit Partikeln verschmutzte Probe nicht durch die Mikropumpen hindurchgeführt zu werden braucht, deren Funktion durch die Probe somit nicht beeinträchtigt wird.

Das Mikrosystem soll zunächst hybrid aufgebaut werden, das heißt, die einzelnen Komponenten werden getrennt gefertigt. Dies hat den Vorteil, daß die Komponenten vor dem Einbau ins System einzeln getestet werden können.

3. Aufbau und Funktion der Mikromembranpumpe

Für den Transport der zu untersuchenden Probe und für die Spülung des Sensors vor der nächsten

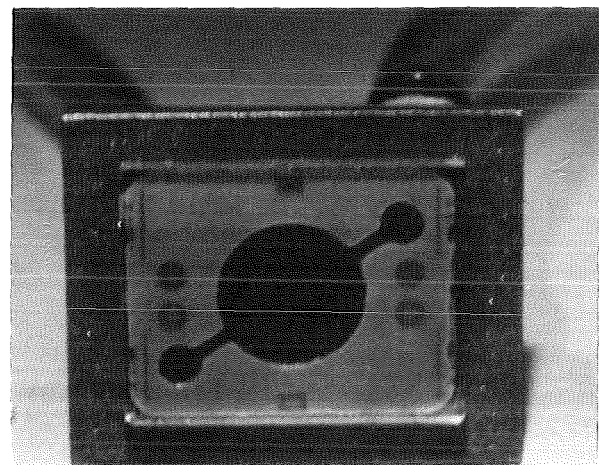
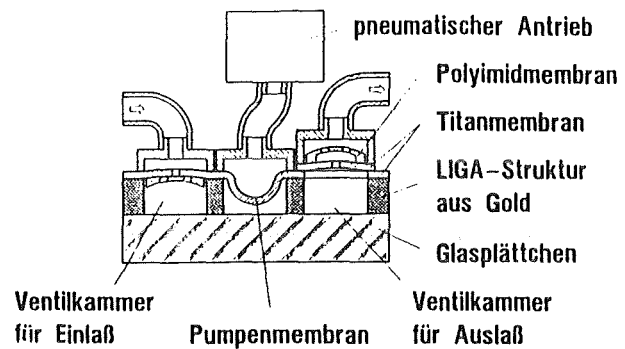


Abb. 2: Schematische Darstellung der Mikromembranpumpe (oben) und Fotografie einer montierten Pumpe (unten): Die Pumpenkammer wird von einer 100 µm hohen LIGA-Struktur aus Gold gebildet. Sie wird auf einer Seite durch Glasplättchen und auf der anderen Seite durch eine 2 µm dünne Titanmembran mit einem Durchmesser von 5 mm verschlossen. In den Ventilkammern sind Mikroventile angebracht, die von einer Öffnung im Titan und einer leicht dehnbaren Polyimidmembran gebildet werden.

Messung werden im geplanten Mikroanalyseystem zwei Pumpen benötigt. Aus der Literatur sind

mehrere Arbeitsgruppen bekannt, die sich mit der Entwicklung von Mikropumpen beschäftigen [6-9]. Diese Mikropumpen werden meist durch anisotropes Ätzen von Siliziumeinkristallen gefertigt.

Im KfK wurde ein Fertigungsverfahren für Mikropumpen entwickelt, das durch die Kombination von Techniken zur Membranherstellung und dem LIGA-Verfahren eine große Materialvielfalt und eine weitgehende Freiheit in der Formgebung erlaubt [10,11]. So war es z.B. möglich, das Pumpengehäuse aus chemisch weitgehend inertem Gold herzustellen und für die Pumpenkammer die günstige runde Form zu wählen.

Der Aufbau der Mikromembranpumpe ist in Abb. 2 oben schematisch dargestellt. Das Pumpengehäuse besteht aus einer 100 µm hohen Mikrostruktur aus Gold, die eine Pumpenkammer und zwei Ventilkammern umschließt. Das Gehäuse ist

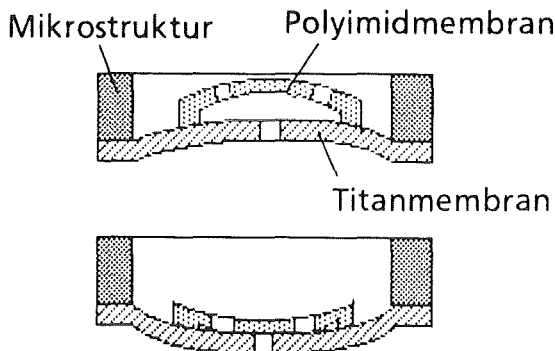
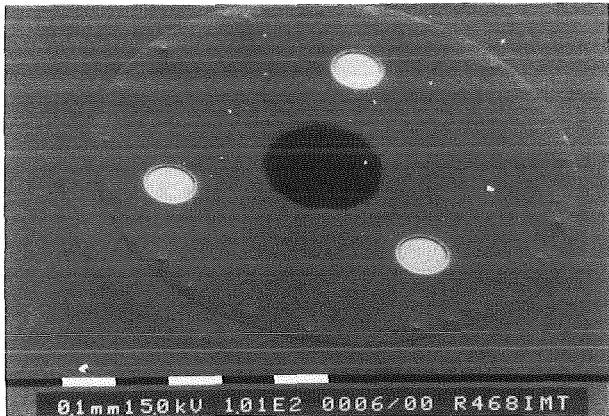


Abb. 3: Rasterlektromikroskopische Aufnahme eines Mikroventils (oben) und schematische Darstellung der Funktionsweise (unten) [12]: Die Polyimidmembran des Mikroventils ist sehr viel dehnbarer als die Titanmembran und öffnet bzw. verschließt deshalb eine Öffnung in der Titanmembran.

auf einer Seite durch ein Glasplättchen und auf der anderen Seite durch eine 2,7 µm dünne Titanmembran verschlossen. Die passiven Ventile der Mikropumpe werden von Öffnungen in der Titan-

membran gebildet, über denen eine flexible, mit Öffnungen versehene Polyimidmembran angebracht ist [12]. Der Durchmesser der Pumpenkammer beträgt 5 mm, derjenige der Ventile ca. 1 mm. Die Pumpenmembran wird durch einen externen pneumatischen Antrieb bis in die Nähe des Bodens der Pumpenkammer ausgelenkt. Dadurch wird ein relativ hohes Kompressionsverhältnis erreicht, das die Förderung von Gasen ermöglicht. Durch den Druckanstieg, der bei Auslenkung der Pumpenmembran in der Pumpe entsteht, wölbt sich die im Vergleich zur Titanmembran dehnbarere Polyimidmembran des Auslaßventils von der Titanmembran weg und öffnet so das Ventil (vgl. Abb. 2 bzw. 3). Das Einlaßventil wird durch die größere Auslenkung der Polyimidmembran verschlossen. Bei der Aufwärtsbewegung der Pumpenmembran kehren sich die Druckverhältnisse und die Ventilstellungen um, so daß das zu fördernde Medium in die Pumpe eingesaugt wird.

4. Herstellungsverfahren

Das Herstellungsverfahren der Mikromembranpumpe ist in Abb. 4 schematisch dargestellt. Auf einer Siliziumscheibe wird durch Magnetronzerstäubung eine ca. 100 nm dünne Trennschicht aus Kohlenstoff aufgebracht, die von einer 2,7 µm dünnen Titanschicht überdeckt wird. In der Titanschicht wird durch Fotolithografie und selektives Auflösen in einer Säure eine runde, ca. 180 µm breite Öffnung angebracht (Abb. 4a). Die Probe wird durch Magnetronzerstäubung mit einer 1 µm dünnen Opferschicht aus Kupfer beschichtet, die auf ähnliche Weise wie zuvor die Titanschicht strukturiert wird. Es entsteht eine Kupferscheibe mit einem Durchmesser von ca. 1 mm, die die Öffnung im Titan überdeckt. Darüber wird eine 2,2 µm dünne Polyimidschicht aufgeschleudert, die fotolithografisch so strukturiert wird, daß versetzt zur Öffnung im Titan Öffnungen im Polyimid entstehen (Abb. 4b). Die Öffnung im Titan bildet später zusammen mit der Polyimidstruktur das Einlaßventil der Mikromembranpumpe. Um die Ventilstruktur herum wird mit dem LIGA-Verfahren das Pumpengehäuse aus Gold aufgebaut und die Kupferschicht im Ventil wird selektiv gegen die übrigen Materialien aufgelöst. Das Pumpengehäuse wird mit Hilfe der Aufbau- und Verbindungstechnik durch ein aufgeklebtes Glasplättchen verschlossen [13]. Um das Pumpengehäuse herum wird die Titanschicht durchtrennt (Abb. 4c). Die Kohlenstoffschicht ermöglicht jetzt die Trennung zwischen Titan und Siliziumscheibe. Abschließend werden Anschlüsse für Zu- und Ablauf und für den pneumatischen Antrieb aufgeklebt [13].

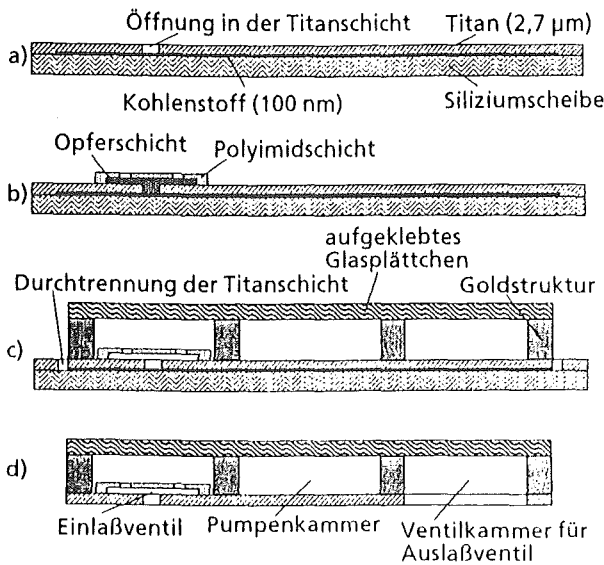


Abb. 4: Herstellungsverfahren für die Mikro-membranpumpe: a) Siliziumscheibe mit Trennschicht aus Kohlenstoff und Titanschicht mit Öffnung, b) Ventilstruktur bestehend aus Opferschicht und Polyimidschicht, c) um die Ventilstruktur herum aufgebaute Goldstruktur, die mit einem aufgeklebten Glasplättchen verschlossen wurde, d) Hohlstruktur mit Einlaßventil, Pumpenkammer und Ventilkammer für den Auslaß nach der Trennung von der Siliziumscheibe.

5. Test der Ventile

Durchfluß und Dichtigkeit der Mikroventile wurden in verschiedenen Medien getestet. Abb. 5a und 5b zeigt die Kennlinien der Mikroventile beim Test mit Helium und Wasser in Abhängigkeit der Dicke der Polyimidmembran. Erwartungsgemäß wird eine dünnere Membran mehr gedehnt und führt zu einem größeren Durchfluß. In der Mikro-pumpe wurden aber trotzdem 2,2 μm dicke Polyimidmembranen eingesetzt, da der mit dieser Membrandicke erreichte Durchfluß für die Pumpe ausreicht und die größere Dicke die Mikroventile unempfindlicher gegen Beschädigungen macht. Abb. 5c zeigt den Argonfluß durch die Mikroventile als Funktion der Ventilgröße. Um mit der Mikro-membranpumpe relativ große Förderraten zu erzielen, wurden bisher Ventile mit Durchmessern von 1 und 1,5 mm in den Pumpen eingesetzt. Die Leckrate durch die geschlossenen Mikroventile erreichte bei einem Argondruck von 320 hPa maximal 2 $\mu\text{l/s}$ und war bei einem Wasserdruck von 230 hPa in jedem Fall kleiner als 0,4 $\mu\text{l/s}$.

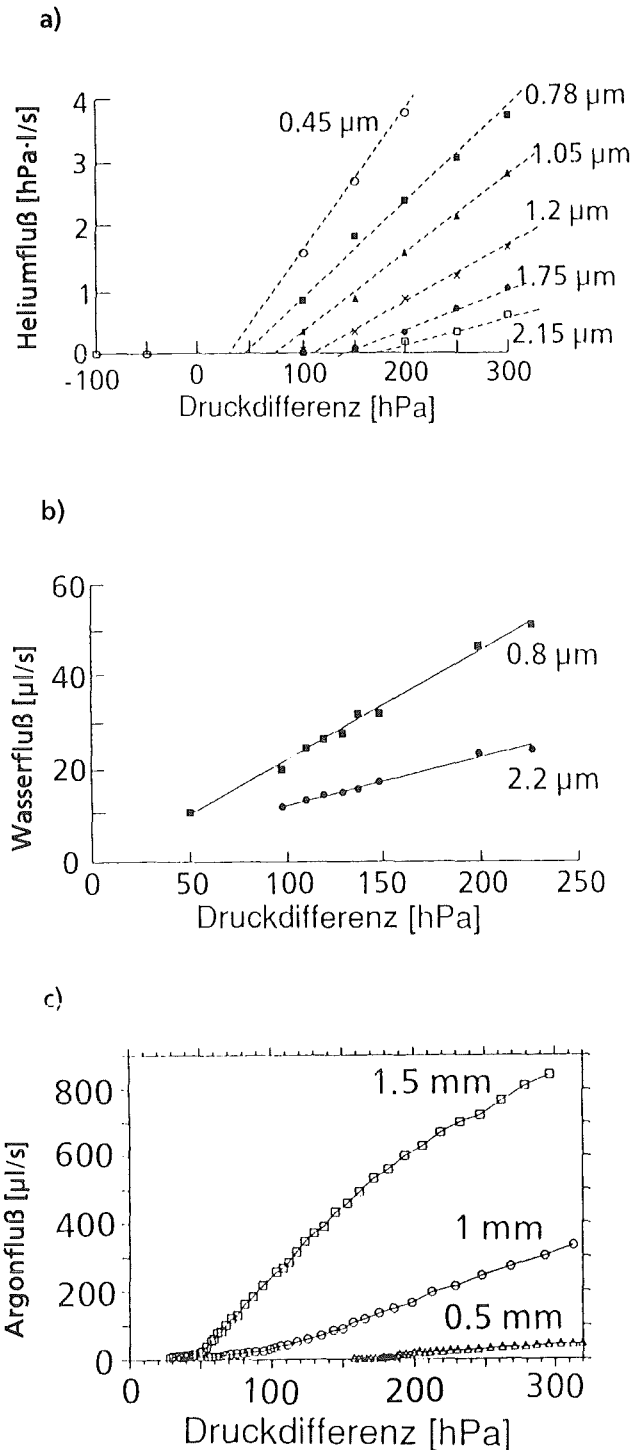


Abb. 5: Kennlinien von Mikroventilen: a) Heliumfluß durch die Mikroventile als Funktion des über dem Ventil abfallenden Druckunterschiedes in Abhängigkeit von der Dicke der Polyimidmembran; b) Wasserfluß durch zwei Mikroventile aus a); c) Durchfluß durch Mikroventile in Abhängigkeit vom Durchmesser der Polyimidmembran.

6. Test der Mikromembranen

Um die Dauerbelastbarkeit der 2,7 µm dünnen Pumpenmembranen aus Titan zu testen, wurde eine Pumpenmembran über 56 Stunden einer Wechselbelastung von 500 hPa mit einer Frequenz von 5 Hz ausgesetzt. Nach einer Million Lastwechseln konnte keine Undichtigkeit oder Beschädigung an dieser Mikromembran festgestellt werden. Bei einem statischen Belastungstest konnte eine andere Mikromembran mit einem Druck von 6000 hPa belastet und um 300 µm ausgelenkt werden, ohne daß Beschädigungen festgestellt wurden.

7. Test der Mikropumpe

Zum Test der Mikropumpe wurde an ihrem Einlaß ein Mikroschlauch montiert und in ein Glas Wasser eingehängt. Die Mikropumpe saugte dann das Wasser in den Schlauch ein und die Höhe der Wassersäule wurde in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. Aus diesen Meßdaten wurde gemäß folgender Gleichung die pro Zeiteinheit Δt von der Pumpe geförderte, auf Normalbedingungen bezogene Gasmenge Φ_{norm} berechnet:

$$\Phi_{norm} = \frac{pV - p'V'}{RT \Delta t} V_{mol} \quad (1)$$

(R := Gaskonstante = 8,31 J/mol K; T := Temperatur [K]; p, p' := aus der Höhe der Wassersäule berechneter Druck vor bzw. nach dem Zeitintervall Δt ; V, V' := aus der Höhe der Wassersäule berechnetes Gasvolumen im Ansaugschlauch der Mikropumpe; V_{mol} := Volumen eines Mols unter Normalbedingungen ($p = 1013 \text{ hPa}$, $T = 273 \text{ K}$) = 22,4 l)

Abb. 6 zeigt den Gasfluß Φ_{norm} als Funktion des am Einlaß erzeugten Unterdruckes Δp_E und des durch den pneumatischen Antrieb aufgebrauchten Aktordruckes p_A . Bei einer Pumpfrequenz von 5 Hz und einem Aktordruck von 500 hPa wurde ein maximaler Gasfluß von 86 µl/min und ein maximal erzeugbarer Unterdruck am Einlaß von 47 hPa erreicht.

Wird in die Berechnung der Leistung der Mikropumpe nur das Anheben der Wassersäule einbezogen und die am Gas geleistete Arbeit nicht berücksichtigt, so ergibt sich der in Abb. 7 dargestellte Zusammenhang zwischen dem am Einlaß erzeugten Unterdruck und der Leistung der Pumpe. Die maximale Leistung beim Betrieb der Mikropumpe mit einer Frequenz f von 5 Hz und einem Aktordruck von 500 hPa betrug ca. 1 µW und wurde bei einem Unterdruck am Einlaß von 17,4 hPa erreicht. Zur Berechnung des Wirkungsgrades der Mikropumpe wurde die in die Pumpe eingespeiste Leistung aus dem Produkt von Aktordruck und Volu-

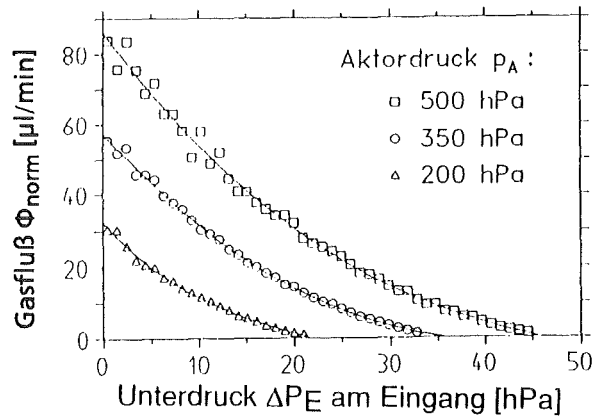


Abb. 6: Gasfluß Φ_{norm} bei einer Pumpfrequenz von 5 Hz als Funktion des am Einlaß erzeugten Unterdruckes Δp_E in Abhängigkeit des vom pneumatischen Antrieb erzeugten Aktordruckes Δp_A .

menänderung durch die Membranauslenkung V_{Mem} abgeschätzt. Der maximal erreichte Wirkungsgrad W der Pumpe berechnet sich damit gemäß folgender Gleichung zu ca. 1%:

$$W = \frac{\rho gh}{p_A} \frac{\Delta V}{V_{Mem} f \Delta t} \quad (2)$$

(ρ := Dichte des Wassers = 1 Kg/l; g := Erdbeschleunigung = 9,81 m/s²; h := Höhe der Wassersäule; $\Delta V/\Delta t$:= pro Zeiteinheit gefördertes Wasservolumen)

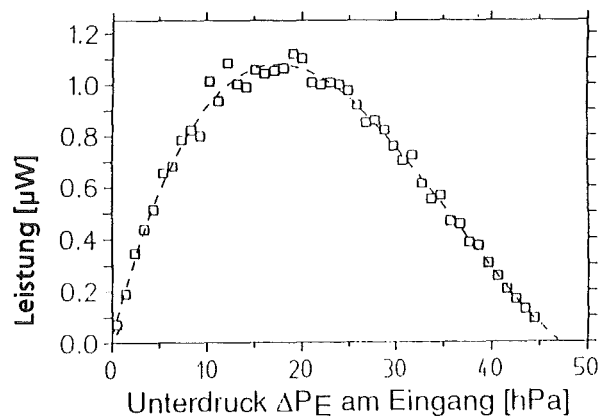


Abb. 7: Durch die Mikromembranpumpe erbrachte Leistung als Funktion des am Einlaß erzeugten Unterdruckes Δp_E .

Der Mikroschlauch vom Einlaß einer anderen Mikromembranpumpe wurde so in ein mit Wasser gefülltes Glas eingehängt, daß sich der Wasserspiegel 200 mm unterhalb der Pumpe befand. Die

spiegel 200 mm unterhalb der Pumpe befand. Die Mikropumpe wurde dann mit einem Aktordruck von 300 hPa und einer Frequenz von 2 Hz betrieben und saugte das Wasser selbst ein. Unter dem Mikroskop wurde beobachtet, wie sich die Pumpe über das Einlaßventil befüllte. Am Auslaß der Pumpe wurde anschließend eine 40 mm hohe Wassersäule erzeugt. An einer weiteren Mikropumpe wurde bei einem Aktordruck von 500 hPa und einer Frequenz von 5 Hz zunächst eine maximale Förderrate für Luft von ca. 55 $\mu\text{l}/\text{min}$ gemessen. Danach wurde die Pumpe mit Wasser gefüllt und bei den gleichen Antriebsverhältnissen eine maximale Förderrate von ca. 70 $\mu\text{l}/\text{min}$ erzielt.

8. Optochemischer Mikrosensor

Die optochemischen Sensorelemente des Mikroanalyse-Systems, die in der Küvette aufgebracht sind, werden auf der Basis von immobilisierten Porphyrinderivaten (Farbindikatoren) aufgebaut. Diese verändern in Abhängigkeit von der Konzentration der zu bestimmenden Substanzen die spektrale Charakteristik des transmittierten Lichts. Am Institut für Radiochemie des KfK wurden die Möglichkeiten des Einsatzes dieser Farbstoffklasse als optochemische Rezeptorkomponente intensiv untersucht und Sensoren für Schwermetall-Ionen entwickelt. Die Vorteile der Porphyrine sind darin zu sehen, daß sie mit zweiwertigen Metallen und Übergangsmetallen spektral deutlich unterscheidbare Komplexe ausbilden, so daß verschiedene Schwermetall-Ionen mit einem einzigen Sensor simultan detektiert werden können. Bei Verwendung von Metalloporphyrinen als optochemische Rezeptoren kann das System auch zum sehr spezifischen und sensitiven Nachweis von toxischen Gasen eingesetzt werden.

Zur Sensorherstellung werden die Rezeptorfarbstoffe in verschiedenen Matrices immobilisiert. Hierzu werden Polymere und poröse Gasfilter verwendet, die mittels modifizierter Lift-off-Verfahren vertikal synthetisiert und lateral strukturiert werden. Hierdurch ist die Möglichkeit gegeben, eine Vielzahl von Sensorelementen auf einem Substrat in wenigen Prozeßschritten herzustellen. Eine ausführliche Darstellung zur Entwicklung und Herstellung optochemischer Sensoren wird in einem der nachfolgenden Beiträge dieses Bandes gegeben [4].

9. Gitterspektrograph

Das durch die optochemischen Sensoren spektral modulierte Licht wird im Analysesystem mit einem Mikrospektrometer in seine spektralen Anteile zerlegt und über eine mit dem Spektrometer ver-

bundene Diodenzeile detektiert. Das Mikrospektrometer wird mit Hilfe der LIGA-Technik hergestellt und über einen Lichtleiter mit der Meßküvette verbunden. Das ins Spektrometer einfallende Licht wird durch ein Reflexionsgitter spektral zerlegt und auf die Diodenzeile fokussiert. Da der gesamte Spektralbereich von 400 nm bis 1100 nm abgedeckt wird, können auch weit auseinanderliegende Absorptionsbanden in die Messung einbezogen werden. Die derzeitigen Spektrometerbausteine erreichen eine Transmission von etwa 20 % und eine Auflösung von etwa 10 nm. Darüber hinaus sind Bausteine in Bearbeitung, für die Auflösungen von bis zu 2 nm erwartet werden. Eine genauere Beschreibung des Mikrospektrometers und der bisher erzielten Ergebnisse erfolgt in einem der nachfolgenden Beiträge dieses Bandes [5].

10. Diskussion und Ausblick

Durch die Kombination von Mikropumpen mit optochemischen Mikrosensoren zu einem Mikroanalyse-Systemen werden die Einsatzmöglichkeiten der Sensoren wesentlich erweitert. Der definierte Zu- und Abtransport von zu untersuchender Probe und Referenz- und Spülmedien ermöglicht die Reinigung und Rekalibrierung der Mikrosensoren zwischen aufeinander folgenden Messungen. Die Fertigung des geplanten Mikrosystems kann prinzipiell mit preisgünstigen Verfahren der Dünnfilmtchnik, Abformung und Aufbau- und Verbindungstechnik erfolgen. Erste Versuche haben bereits gezeigt, daß die Herstellung von Mikromembranpumpen mit Hilfe der Abformung möglich ist. Ziel der hier beschriebenen Entwicklung ist ein einfach zu fertigendes, preiswertes Mikroanalyse-System, das zudem die Untersuchung sehr kleiner Probenmengen gestattet. In einem ersten Vorversuch wurden Mikroproben von der hier beschriebenen Mikromembranpumpe in eine Meßzelle [13] transportiert, auf der ein chemisch sensitiver Feldeffekttransistor [3] angebracht war, der pH-Wert wurde gemessen und die Proben wurden wieder abtransportiert.

Für die Herstellung der für das Mikrosystem benötigten Mikropumpen wurde das LIGA-Verfahren mit Prozessen zur Fertigung von Mikromembranen kombiniert. Die 2,7 μm dünne Pumpenmembran wurde durch eine externe Pneumatik ca. 100 μm weit bis in die Nähe des Kammerbodens ausgeleitet. Wegen des dadurch erreichten relativ großen Kompressionsverhältnisses konnte selbst Luft gefördert werden. Die Mikromembranpumpe saugte selbständig Wasser aus einem Glas an und erzeugte dabei eine 240 mm hohe Wassersäule. Ohne Druckabfall über der Pumpe wurden Förderaten von 86 und 70 $\mu\text{l}/\text{min}$ für Luft bzw. Wasser

erreicht. Bei der Förderung von Luft konnte im Einlaßschlauch der Pumpe ein Unterdruck von 47 hPa erzeugt werden. Die mit der externen Pneumatik erreichten Pumpleistungen erfüllen die Anforderungen, die für das Mikroanalyzesystem zu erfüllen sind. Zur Zeit wird an der Entwicklung eines integrierten Antriebs gearbeitet.

Ein preisgünstiges Mikroanalyzesystem würde viele neue Untersuchungsmöglichkeiten eröffnen. Die sich heute abzeichnenden Anwendungen in Medizin und Umwelttechnik lassen die große Bedeutung erahnen, die Mikrosysteme zukünftig erlangen werden. Am Beispiel des optochemischen Mikroanalyzesystems wird deutlich, wie wichtig eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit für die Realisierung von Mikrosystemen ist.

Literatur

- [1] B. H. van der Schoot, S. Jeanneret, A. van den Berg, N. F. de Rooij: Modular Setup for a Miniature Chemical Analysis System; Sensors and Actuators B6 (1992) 57 - 60
- [2] R. Miyake, T. S. J. Lammerink, M. Elwenspoek, J. H. J. Fluitman: Micro Mixer with Fast Diffusion; Proceedings des 6th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (1993) 248 - 253
- [3] W. Hoffmann, H. Eggert, W. K. Schomburg, D. Seidel: Elektroanalytisches Mikrosystem für die Ionometrie von Flüssigkeiten (Elektrolyt-Analysator); in diesem Band
- [4] J. Reichert, R. Czolk, G. Heinzmann, S.C. Kraus, A. Morales-Bahnik, H.J. Ache: Optochemische Mikrosensoren für umweltanalytische Aufgaben; in diesem Band
- [5] C. Müller, H. Hein, J. Mohr: Mikrospektrometer für spektrale Analyseaufgaben im sichtbaren Infrarotbereich; in diesem Band
- [6] F. C. M. van de Pol, H. T. G. van Lintel, M. Elwenspoek, J. H. J. Fluitman: A Thermopneumatic Micropump based on Micro-engineering Techniques; Sensors and Actuators, A21 - A23 (1990) 198 - 202
- [7] S. Shoji, M. Esashi, B. van der Schoot, N. de Rooij: A Study of a High-Pressure Micropump for Integrated Chemical Analysing Systems; Sensors and Actuators A32 (1992) 335 - 339
- [8] R. Zengerle, A. Richter: Mikropumpen als Komponenten für Mikrosysteme; Physik in unserer Zeit 2 (1993) 86 - 90
- [9] J. Urban, P. Lange, K. Forke: Design and Simulation of Membrane Pump Components; Proceedings der Micro Systems Technologies 91 (1991) 249 - 254
- [10] R. Rapp, P. Bley, W. Menz, W. K. Schomburg: Micropump Fabricated with the LIGA Process; Proceedings des 6th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (1993) 123
- [11] R. Rapp, K. Kadel, W. K. Schomburg, G. Stern: Mit dem LIGA-Verfahren hergestellte Mikromembranpumpe; Tagungsband des Dritten Symposium Mikrosystemtechnik (1993) 124 - 133
- [12] W. K. Schomburg, B. Scherrer: 3.5 µm Thin Valves in Titanium Membranes; J. Micro-mech. Microeng. 2 (1992) 184 - 186
- [13] W. Keller, D. Maas, D. Seidel: Arbeitsergebnisse aus der Aufbau- und Verbindungstechnik für die Integration mikrosystemtechnischer Komponenten; in diesem Band

Analytisches Mikrosystem auf der Basis von Surface Acoustic Wave Bauelementen

M. Rapp¹, M. Balzer², W. Coerdts¹, O. Fromhein², T. Kühner², J. Reichert¹, A. Voigt¹

¹) Institut für Radiochemie

²) Hauptabteilung für Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik

Zusammenfassung

Ausgehend von einem Array chemischer Mikrosensoren, die eine sensitive und spezifische Erfassung diverser organischer Gase gestatten, soll ein automatisch arbeitendes, sich selbst kalibrierendes analytisches Mikrosystem realisiert werden. 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 solche 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.

Was die Arbeiten am Sensorkopf betrifft (SAW-Sensoren und deren elektronische Ansteuerung) werden seitens des Instituts für Radiochemie (IRCh) zwei Varianten eines aus acht Sensoren bestehenden Arrays als erstes Labormuster vorgestellt. Sie unterscheiden sich durch ihre elektronische Schaltungskonzeption für die Sensoransteuerung. Zur Signalaufbereitung, Messwerterfassung (8-fache Frequenzzählung) und -weitergabe sowie zur Arraysteuerung wird seitens der Hauptabteilung für Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (HPE) eine elektronische Schaltung vorgestellt, die ein kompaktes mikroelektronisches Modul in Dickfilmtechnik und einen programmierbaren ASIC-Baustein (Application Specific Integrated Circuit, hier: free programmable gate array) enthält.

1. Meßprinzip

SAW-Bauelemente haben ein großes Anwendungsspektrum in der signalverarbeitenden Elektronik und sind inzwischen zu einem Massenprodukt in der industriellen Mikrochipfertigung avanciert. In modifizierter Form können sie zur hochsensitiven Detektion von Gasen verwendet werden. Mit einer selektiven Sorptionsschicht versehen dienen sie hierbei als frequenzbestimmendes Element einer Oszillatorschaltung. Die dabei ausgenutzte Arbeitsfrequenz liegt im Hochfrequenz (HF)-bereich, typischerweise zwischen 100 und 500 MHz. Die durch die Sorption eines Analyten hervorgerufene Massenänderung der Beschichtung verursacht eine dazu proportionale Frequenzverschiebung des Oszillators. Um Temperatureinflüsse auszuschließen wird ein zweiter Oszillator mit einem unbeschichteten SAW als Referenz betrieben. Mittels HF-Mischer wird aus den Signalen dieser beiden Oszillatoren ein Differenzfrequenzsignal erzeugt, das, weitgehend temperaturunabhängig, als Signal im Niederfrequenzbereich durch eine simple Digitalelektronik erfaßt werden kann. Abb.1 zeigt das grundlegende Meßprinzip, den sogenannten "Dual Delay Line Oscillator", welcher in dieser Form seit längerem bekannt ist [1].

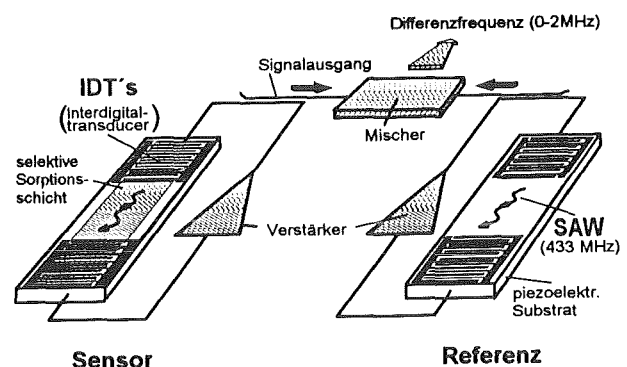


Abb. 1: Dual Delay Line Oscillator. Als typische Meßanordnung werden zwei sog. "Delay line oscillators" verwendet: Ein mit einer selektiven Sorptionsschicht versehenes SAW-Bauelement dient als frequenzbestimmendes Element einer Oszillatorschaltung (links). Die Sorption des Analyten verursacht eine Frequenzverschiebung. Zur Temperaturkompensation wird ein Referenzoszillator (rechts) mit einem unbeschichteten SAW betrieben. Eine HF-Mischung erzeugt ein Differenzfrequenzsignal, das der weiteren Auswertung zugeführt wird.

2. Motivation und Zielrichtung

Durch eine entsprechende Wahl von Sorptionschichten lassen sich mit dieser Technik eine nahezu beliebige Vielzahl von gasförmigen Analyten untersuchen. Hauptinteresse finden hierbei solche Stoffe, die mit anderen chemischen Mikrosensoren nur schwer einer qualitativen und quantitativen Bestimmung zugänglich sind: Organische Lösungsmittel, wie verschiedene Kohlenwasserstoffe (Hexan, Oktan, Decan, versch. Kraftstoffe), Alkohole (Methanol, Ethanol), halogenierte Kohlenwasserstoffe und Aromaten (Benzol, Toluol). Für die genannten Verbindungen existiert ein großes Interesse für kostengünstige in-situ Meßverfahren, wie es das hier vorgestellte Sensorsystem ermöglichen wird. Eine weitere wichtige Anwendung ist in der medizinischen Diagnostik zu sehen, wo, beispielsweise während eines chirurgischen Eingriffes, die direkte Analyse der Atemluft inclusive der Narkosegaszusammensetzung gefordert ist.

Mit dem Einsatz kostengünstiger Bauteile, wie SAW-Bauelemente, SMD(surface mounted device)-Verstärker und gängige Mikrochips, läßt das vorgestellte Sensorsystem niedrige Herstellungskosten erwarten.

3. Chemische Voraussetzungen

Um die oben genannten Stoffe analysieren zu können, werden die SAW-Sensoren mit Substanzen beschichtet, die mit dem betreffenden Analyten eine reversible Sorptionsreaktion eingehen. Hierfür kommen meist Polymerfilme in Betracht, die je nach Erfordernis mit verschiedenen Verfahren, wie Spin-Coating, Sol-Gel-Beschichtung oder reaktive Abscheidung auf die SAW-Substrate aufgebracht werden. Das Sorptions- und Lösungsverhalten der Analyten wird durch ihre Polarität, Azidität/Basizität und Strukturparameter bestimmt, so daß konventionelle Polymere eine gewisse Selektivität hinsichtlich verschiedener organischer Komponenten aufweisen. Durch Kombination mehrerer Sensoren mit Beschichtungen unterschiedlicher Selektivität lassen sich Sensitivitätsmuster gewinnen, die nach einer chemometrischen Auswertung (Partial Least Square-Algorithmus, Neuronale Netze) auch aus einer Analytmischung die geforderte qualitative und quantitative Bestimmung zulassen. Unter Zuhilfenahme des Linear Solvation Energy Relationship (LSER) Modells läßt sich eine theoretische Vorhersage der Sorptionseigenschaften verschiedenster Schichtmaterialien treffen [2]. Dadurch wird eine gezielte Optimierung durch Auswahl von Schichtmaterialien bzw. deren Kombination möglich. Mit dem so konzipierten Schichtsystem sind selektive Bestimmungen einer großen Vielfalt von gasförmigen organischen Analyten erreichbar [3].

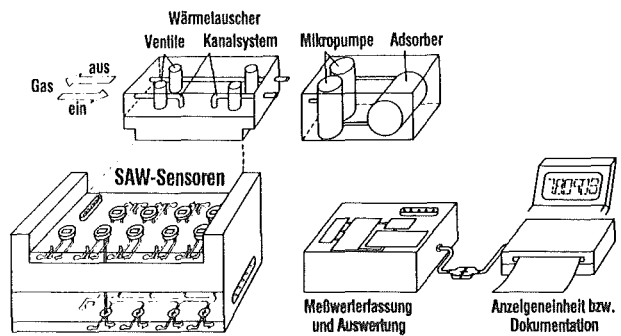


Abb. 2: Gesamtkonzeption des analytischen Mikrosystems.

Das System besteht aus dem SAW-Sensorkopf samt Ansterelektronik und Analysekamern (links unten im Bild, IRCh), dem Signalaufbereitungs- und Meßwerterfassungs-Modul inclusive der Auswerte-, Steuer- und Anzeigeeinheit (rechts unten im Bild, HPE). Darüber befinden sich periphere Einheiten zur Gas-konditionierung (IRCh), die Komponenten der Mikrofluidik (Mikropumpen und -ventile) und einen Mikrowärmetauscher zur Thermostatisierung der Meßgase enthalten.

4. Technische Beschreibung des Analytischen Mikrosystems und aktueller Stand

Das Gesamtkonzept ist in Abbildung 2 dargestellt. Es besteht aus vier Systemkomponenten, die nachfolgend beschrieben sind. Entsprechend dem Entwicklungsstand werden die Punkte 4.1 und 4.2 sodann detaillierter diskutiert.

- 4.1) Der SAW-Sensorkopf mit Ansterelektronik und Analysekamern (IRCh) liegt in Form zweier Varianten mit unterschiedlichem SAW-Oszillator-Modul als Labormuster vor. Sie enthalten neben der Thermostatisierung der Sensoren auch den gesamten hochfrequenztechnischen Teil der Elektronik.
- 4.2) Der Signalaufbereitungs- und Meßwerterfassungs-Modul (HPE) enthält als zentralen Baustein ein sogenanntes "Free Programmable Gate Array" (FPGA) und befindet sich in der Testphase. Die interaktive Ablaufsteuerung und die arithmetische Bearbeitung der Auswertung der Meßdaten werden vorläufig von einem Hostrechner ausgeführt. Die dazu notwendige Kommunikationsschnittstelle ist ebenfalls in dem ASIC-Baustein integriert und erlaubt eine Datentransferrate von 19,2 kBaud.

- 4.3) Auswerte-, Anzeige- und Steuereinheit (HPE): In einem weiteren Schritt soll die zur Auswertung und Steuerung vorläufig benötigte externe Hostrechnerleistung ebenfalls mit auf dem oben beschriebenen Modul integriert werden. Diese Version enthält dann einen modul-internen On-Board-Microcontroller, der neben der Rechnerleistung und Arraysteuerung (siehe nächster Punkt) auch die Ansteuerung der Anzeigeeinheit übernimmt.
- 4.4) Die Einheit für die Gaskonditionierung (IRCh) wird derzeit noch geplant. Durch darin enthaltene Komponenten der Mikrofluidik (Mikropumpen und -ventile) wird das System in der Lage sein, alternierende Meß- und Kalibrierzyklen selbstständig vorzunehmen. Eine exakte Thermostatisierung der Meßgase erfolgt über einen Wärmetauscher, gefertigt mit Mitteln der Mikromechanik.

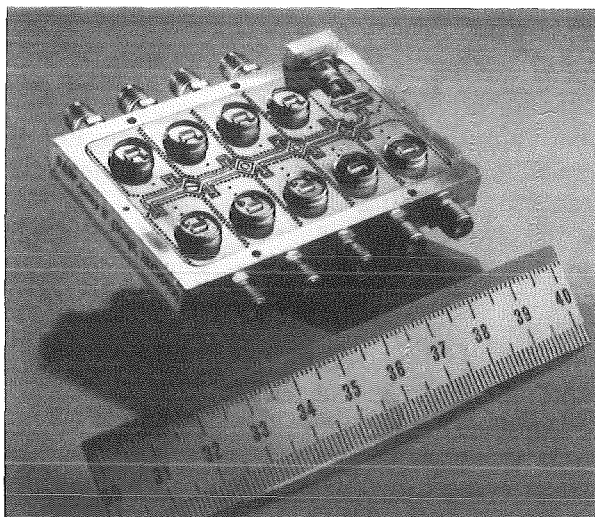


Abb. 3: Abbildung des Sensorkopfes (Array 2) mit vom IRCh entwickelten aktiven neun HF-Oszillatorschaltkreisen. Die Größe beträgt 64mm*40mm*25mm.

zu 4.1: SAW-Sensorkopf (IRCh)

Das Sensorarray (Abbildung 3) gliedert sich in einzelne funktionelle Baugruppen, die hier separat erläutert werden. Die beiden vorgestellten Array-Varianten unterscheiden sich durch die Art der HF-technischen Ansteuerung der SAW-Sensorelemente (Punkte a+b), während die anderen Baugruppen keiner Änderung bedürfen. Beide SAW-Sensorarrays enthalten jeweils neun SAW-Oszillatoren, wobei ein Oszillator als gemeinsame Referenz für die anderen acht Sensor-Oszillatoren benötigt wird. Alle Oszillatoren befinden sich auf einem gemeinsamen Board (SAW-Oszillator-Modul), das gleichzeitig die HF-Elektronik beinhaltet. Jeder Oszillator ist in einer separaten Kammer unterge-

bracht, so daß eine ausreichende HF-Abschirmung sowohl gegenseitig wie auch nach außen gewährleistet ist. Zusammen mit dem darüber befindlichen Gehäusedeckel, in dem sich die einzelnen Meßkammern zur Gasanalyse befinden, ergibt sich ein kompaktes Gehäuse mit den Maßen 64mm*40mm*25mm, welches den eigentlichen Sensorkopf des SAW-Arrays darstellt.

a) SAW-Oszillator-Modul / Array 1

Hierzu wurden kommerzielle "Microtransmitter" der Firma RF-Monolithics (Dallas, USA) verwendet. Sie enthalten SAW-Resonatoren mit einer Resonanzfrequenz von 433,92 MHz. Mit einem unmittelbar daneben befindlichen HF-Mikroverstärker (Größe etwa 1 mm²) befindet sich im SAW-Bauteilgehäuse bereits ein kompletter Mikro-Oszillator! Die für die Ansteuerung der Microtransmitter notwendige Elektronik (Pegel- und Impedanzanpassungen) wurde im IRCh entwickelt und befindet sich auf der Unterseite des Moduls.

b) SAW-Oszillator-Modul / Array 2

Für diesen Modul werden handelsübliche SAW-Resonatoren von den Firmen Siemens (München) oder MuRata (Kyoto, Japan) verwendet, die ebenfalls eine Resonanzfrequenz von 433,92 MHz aufweisen. Die für diese passiven Elemente erforderliche aktive Oszillatorelektronik wurde im IRCh entwickelt und optimiert. Sie befindet sich auf der Unterseite des Moduls und konnte auf dieselbe Größe wie die Ansteuerelektronik im Falle von Array 1 gebracht werden. Beide Oszillatormodule sind somit von vergleichbarer Größe.

c) Frequenzmisch-Modul

Unter dem Oszillatormodul befindet sich eine Mischplatine, die das Signal vom Referenzoszillator erhält und dieses an acht HF-Mischstufen führt, welche ihrerseits zusammen mit den jeweiligen Sensorsignalen acht Differenzfrequenzen liefern. Die einzelnen Mischstufen befinden sich ebenfalls in separaten Kammern und bilden zusammen mit dem Oszillator-Modul eine HF-technisch abgeschirmte Einheit. Die generierten acht Differenzfrequenzsignale im Frequenzbereich von 0-2 MHz werden dann dem Meßwerterfassungsmodul (HPE) zugeführt.

d) Analysekkammern und Sensoranströmung

Neben der HF-dichten Abschirmung enthält der Deckel des Sensorkopfes einzelne, aus Teflon bestehende Analysekkammern. Für die Zu- und Abfuhr des Meßgases weist jede Kammer zwei Bohrungen auf, die den Gastrom parallel über die jeweiligen Sensoren leiten. Für Labor- und Testzwecke wird die Gaskonditionierung vorläufig noch extern vorgenommen.

e) Thermostatisierung

Das SAW-Oszillator-Modul wird vorläufig mithilfe eines kleinen Wasserkreislaufes extern thermostatisiert. Dies geschieht mit einer gemeinsamen Kup-

ferplatte, die sich unmittelbar unterhalb der SAW-Sensoren befindet. Durch diese Position wird eine Heizung der Sensoren durch die Oszillatorschaltkreise vermieden und gleichzeitig die gewünschte träge Temperaturregelung der Sensoren erreicht. Die Solltemperatur der Sensoren beträgt hierbei 40°C und kann so auf $\pm 0,1^\circ\text{C}$ genau gehalten werden. In einer späteren Version wird der Wasserkreislauf durch eine Thermometrie mit geregelten Peltierelementen ersetzt. Die Steuerung hierfür wird vom HPE-Modul übernommen.

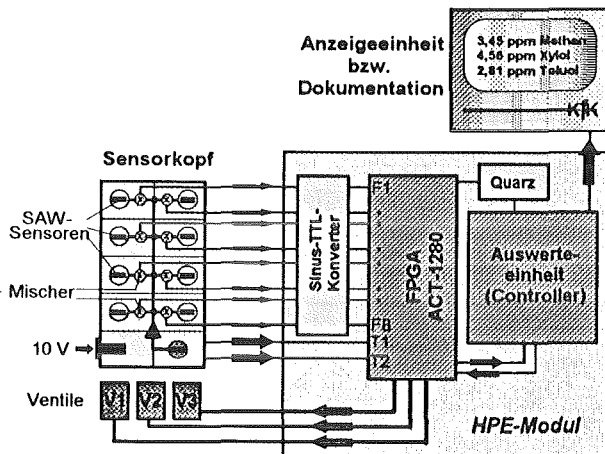


Abb. 4: Prinzipdarstellung aller elektronischen Komponenten. Links der HF-elektronische Aufbau innerhalb des Sensorkopfes (IRCh), rechts das Signalaufbereitungs- und Meßwerterfassungs-Modul (HPE) inklusive der geplanten Contollereinheit, oben die von ihr angesteuerte Anzeigeeinheit.

zu 4.2: Signalaufbereitungs- und Meßwerterfassungs-Modul (HPE)

Dieses Modul ist zusammen mit dem HF-elektronischen Aufbau innerhalb des Sensorkopfes (IRCh) in Abbildung 4 dargestellt. Wie beschrieben, liegt der informationstragende Inhalt der Sensorsignale in der Frequenzverschiebung der HF-Oszillatoren. Zur Kompensation von unerwünschten Temperatureinflüssen wird die Frequenz des Meßkreises mit der eines Referenzoszillators multiplikativ gemischt. Es entsteht eine untere Mischfrequenz, die Differenzfrequenz, mit dem informationsrelevanten Inhalt zur weiteren Signalverarbeitung und eine unerwünschte obere Mischfrequenz, die durch Filtermaßnahmen unterdrückt wird. Insgesamt ergeben sich also acht sinusförmige Signale mit einer Frequenzvariation von 2 MHz. Wie aus der Namensgebung ersichtlich ist, gliedert sich das Modul entsprechend seiner Aufgaben in zwei Teile, die im folgenden beschrieben werden.

a) Signalaufbereitung

Für die meßtechnische Extraktion müssen diese Signale zunächst auf einen einheitlichen Pegel transformiert werden, ehe sie für die Frequenzmessung in einem Zähler/Timer-System weiterverarbeitet werden können.

Der Entwurf von mikroelektronischen Schaltungen ist vor allem bestimmt durch die Forderung nach geringster Verlustleistung, verbunden mit der Vorstellung kleinster Bauweise. Für die 8-kanalige TTL-Pegelanpassung wurde eine Dickfilmschaltung entwickelt, die mit einem Flächenbedarf von 1000 mil x 500 mil und einer Verlustleistung von 500 mW die obigen technischen Anforderungen erfüllt. Diese Technologie stellt bei sehr kostengünstigem Aufwand die bei HPE kleinste Realisierung von analogen Schaltungen dar.

b) Meßwerterfassung

Im Hinblick auf die spätere kostengünstige Umsetzung wurde für das Zähler/Timer-System eine neuartige frei programmierbare ASIC-Technologie eingesetzt. Das bedeutet, daß alle für die 8-fache Frequenzzählung erforderlichen Funktionen samt Temperaturerfassung und Ventilsteuerung von einem Chip übernommen werden können. Bei dem gewählten Chip handelt es sich um ein sogenanntes Free Programmable Gate Array (FPGA) der Firma ACTEL (Typ ACT1280). Bei HPE programmiert, beinhaltet dieses FPGA nicht nur das aufwendige Zähler/Timer-System einschließlich zwei weiteren 16 Bit-Systemen für die Temperaturerfassung, sondern auch die Befehlsdekodierung für die Ablaufsteuerung, die Parametereinstellung (Ventile, u.a.) und die vorläufig noch notwendige serielle Kommunikationsschnittstelle zum Hostrechner bei einer Übertragungsgeschwindigkeit von 19,2 kBaud. Dieses Schaltungskonzept benötigt eine eingehäuste Fläche von 25 mm * 25 mm und verbraucht nur eine Leistung von ca. 250 mW.

5. Literatur

- [1] H. Wohltjen: Mechanism of Operation and Design. Considerations for Surface Acoustic Wave Device Vapour Sensors; Sensors and Actuators, 5, 305 (1984)
- [2] J. W. Grate, M. H. Abraham: Solubility Interactions and the Design of Chemically Selective Sorbent Coatings for Chemical Sensors and Arrays; Sensors and Actuators B, 3, 85 (1991)
- [3] J. Reichert, W. Coerdts, M. Rapp, H. J. Ache: Vapour Detection With Surface Acoustic Wave Sensor Arrays; vorgestellt bei: EUROSENSORS VI, 5.-7. Oct. 1992, San Sebastian, Spanien.

Elektrochemisches Mikroanalysensystem (ELMAS) für die Ionometrie von Flüssigkeiten

W. Hoffmann¹, H. Eggert³, W. Schomburg², D. Seidel²

¹Institut für Radiochemie, ²Institut für Mikrostrukturtechnik

³Institut für Angewandte Informatik

Zusammenfassung

Durch die Kombination von elektrochemischen Mikrosensoren mit Mikroaktoren zu einem Mikrosystem ist eine verbesserte Zuverlässigkeit der chemischen Analyse zu erwarten. Selbstkalibrierung und Selbstüberwachung sind bei den bisher in großer Anzahl auf dem Markt vorhandenen chemischen Makro-Sensoren für die Ionometrie von Lösungen nicht realisiert. Mit dem ELMAS-Konzept wird ein Ansatz zur Schaffung eines solchen Mikrosystems unter Nutzung der für das Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) spezifischen Voraussetzungen vorgestellt. Es beinhaltet die Integration von potentiometrischen Sensoren (ionensensitive Feldeffekttransistoren), aktiven (Mikropumpen und Ventile) und passiven (Mikrodurchflußzelle) Mikrofluidikkomponenten sowie computerkontrollierte Datenerfassung, -verarbeitung, -speicherung und Systemsteuerung. Erste Ergebnisse zu den Systemkomponenten werden vorgestellt.

1. Einleitung

Der stetig wachsende Bedarf der modernen Industriegesellschaft an chemischen Informationen aus einem breiten Anwendungsspektrum der Analytik - von der Kontrolle chemischer Prozesse über den Umweltschutz und die medizinische Diagnostik bis hin zur Haustechnik - hat zu vielfältigen Entwicklungen von chemischen Mikrosensoren geführt, die bei geringen äußeren Abmessungen auch ökonomisch kostengünstig herstellbar sind [1;2].

Elektrochemische Sensorprinzipien genießen dabei besonderes Interesse, da die Signalwandlerfunktion direkt an die Signalverarbeitung gekoppelt werden kann. Die nachzuweisenden Spezies modulieren den Strom oder die Spannung bzw. den Widerstand eines elektronischen Bauelementes. Dadurch wird die Anzahl der Schnittstellen zwischen dem Meßmedium und den für die Signalverarbeitung erforderlichen Elektronikkomponenten minimiert. Zu diesem wichtigen meßprinzipiellen Vorteil kommen günstige technologische - und damit ökonomische - Voraussetzungen: Die große Vielfalt der Mikrotechniken der Elektronik ist für elektrochemische Mikrosensoren nutzbar.

Ein herausragendes Beispiel für diesen Entwicklungstrend ist der ionensensitive Feldeffekttransistor (ISFET), der vom Basis-Bauelement der Elektronik, dem MOSFET (Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor), abgeleitet ist.

Die Metall-Gateelektrode des MOSFET's ist durch eine chemisch sensitive Membran substituiert, die im Kontakt mit dem Meßmedium ein von der Ionenkonzentration abhängiges Potential liefert, welches den Transistor-Kanalstrom in analoger Weise wie die Gatespannung moduliert [3]. Die sensitive Fläche von ISFET's kann auf wenige μm^2 reduziert werden [4]; die Sensorherstellung kann weitestgehend kompatibel zu CMOS (Complementary Metal Oxid Semiconductor)-Standardtechnologien der Halbleiterindustrie gestaltet werden [5].

Trotz dieser offensichtlichen und vielversprechenden Vorteile sind ISFET's - wie auch generell alle anderen chemischen Mikrosensoren - bisher kaum marktwirksam geworden. Die Probleme betreffen insbesondere die Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der Mikrosensoren neben der oftmals zu geringen Selektivität, da die bei konventioneller chemischer Analyse durchgeführten Arbeitsgänge der Probenkonditionierung und Vortrennung der Spezies bei Mikrosensoren in der Regel nicht erfolgen.

Zur Behebung dieser Nachteile werden gegenwärtig in einigen Laboratorien Forschungs- und Entwicklungs-Aktivitäten gestartet [6;7], welche die Integration von chemischen Mikrosensoren mit Mikroaktoren und Mikroelektronik-Komponenten zu einem miniaturisierten chemischen Analysensystem zum Ziel haben.

Wesentliche Merkmale dieser Systeme sind alternierende Meß- und Kalibrierzyklen sowie die Integration von diskreten Sensoren zu Sensorarrays zur Verbesserung der Meßsicherheit. Aus technologischer Sicht sind die bisher bekannt gewordenen Mikrosysteme auf die Anwendung der Si-Technologie konzentriert.

Aufbauend auf im KfK vorhandenem Know-how zur elektrochemischen Mikrosensorik [8;9], Mikrostrukturtechnik [10] und Systeminformatik [11] wird in enger Kooperation der beteiligten Institute und darüber hinaus mit Industriepartnern eine Modell-Lösung für ein elektrochemisches Mikroanalysensystem (ELMAS) geschaffen, das insbesondere für die Komponenten der Mikrofluidik nicht primär auf die Silicium-Technik orientiert ist.

2. Das ELMAS-Konzept

Als Zielfunktionen für das ELMAS werden angestrebt:

- Selbstüberwachung und Selbstkalibrierung
Der Einsatz von Kalibrierflüssigkeiten (Vergleichsmedien) wird damit notwendig, ebenso die Kombination von Mikrofluidik-Bausteinen und mikroelektronischer Signalanalyse und Systemsteuerung mit den elektrochemischen Sensoren.
 - Multiionenendetektion
Der Nachweis verschiedener Ionen verlangt die Integration von elektrochemischen Sensoren (IS-FET's, ionenselektiven Elektroden) verschiedener Sensitivität in das System. In ersten Demonstrator-Mustern sollen pH und pNa bestimmt werden. Die Entwicklung von Sensoren für z.B. Schwermetallionen ist mit einbezogen.
 - Optimierung des elektrochemischen Meßsystems
Durch bevorzugten Einsatz von chemisch sensitiven anorganischen Festkörper-Membranen sollen im Vergleich zu organischen Polymermembranen größere Robustheit und eine kurze Konditionierungszeit erreicht werden. Zugleich soll aber auch der für viele Applikationsfälle unverzichtbare Einsatz von organischen chemisch sensitiven Membranen möglich sein (z.B. für Biosensoren).
Das für elektrochemische Sensoren kritische Problem einer miniaturisierten Referenzelektrode soll gelöst werden durch die gezielte Entwicklung von ionensensitiven Membranen mit eingestellter Ionensensitivität für Referenz-ISFET's bzw. durch Differenzmessung mit Sensoren gleicher Sensitivität, die an verschiedenen Orten innerhalb der (fließenden) Flüssigkeiten positioniert sind.
 - Messung kleiner Probenvolumina
Vielfach - z.B. im Bereich der medizinischen Diagnostik - sind nur geringe Probemengen verfügbar; weiterhin wird prinzipiell aus ökonomischen und ökologischen Gründen ein geringer Chemikalienverbrauch angestrebt.
 - Quasikontinuierliche Messungen
Rascher Wechsel von Probelösung und Kalibrierlösung soll einen quasikontinuierlichen Meßbetrieb ermöglichen (Meßwerte im Abstand von ca. 1 Minute).
 - Modularer Systemaufbau
Die leichte Auswechselbarkeit von Komponenten erlaubt flexibel die ELMAS-Anpassung an spezielle Meßprobleme, z.B. den Wechsel zu IS-FET's für andere Ionen, und ist außerdem günstig bezüglich Servicearbeiten. Evtl. sind Komponenten des Systems als Low-Cost-Einwegartikel vorzusehen.
 - Geringe äußere Gesamtabmessungen, Batteriebetrieb, Datenschnittstelle
Diese generell für ein Mikrosystem geltenden Merkmale sind für das ELMAS ebenfalls zu realisieren.
 - Geringe Herstellungskosten
Diese selbstverständliche Forderung wird durch den Einsatz von Mikrosystemtechniken erfüllt, die generell in Batch-Prozessen die gleichzeitige Herstellung einer Vielzahl von Komponenten ermöglichen.
- Für die Applikation wird zunächst keine enge Begrenzung auf einen Anwendungsfall erwogen, um das Systemkonzept nicht mit anwendungsspezifischen Problemen zu überladen (Bsp. Biokompatibilität im Falle von Vollblutmessungen) und um gleichzeitig offen zu bleiben für generelle chemisch-analytische Meßaufgaben, die eine erhöhte Meßwertzuverlässigkeit durch ein sich selbst überwachendes Meßsystem verlangen.
- Die Variabilität des Systems ist gegeben durch die mögliche Adaption der geeigneten ionensensitiven Membranen, die für ein breites Spektrum analytischer Aufgaben relevant sind (mit analogen ionenselektiven Makroelektroden sind z.Z. mehr als 50 verschiedene Ionenarten nachweisbar!). Durch die zusätzliche Integration von biologisch sensitiven Membranen in das ELMAS sind schließlich auch Applikationen im Bereich der Biosensorik möglich.
- Den Aufbau und die Funktion des ELMAS verdeutlicht schematisch Abb.1.

Dargestellt ist das Meßsystem ohne die notwendige umfangreiche elektronische Peripherie (Signal-erfassung und -verarbeitung, Mikrokontroller für die Systemsteuerung, Datenspeicher sowie Schnittstelle für externe Programmierung, Datenabfrage etc.).

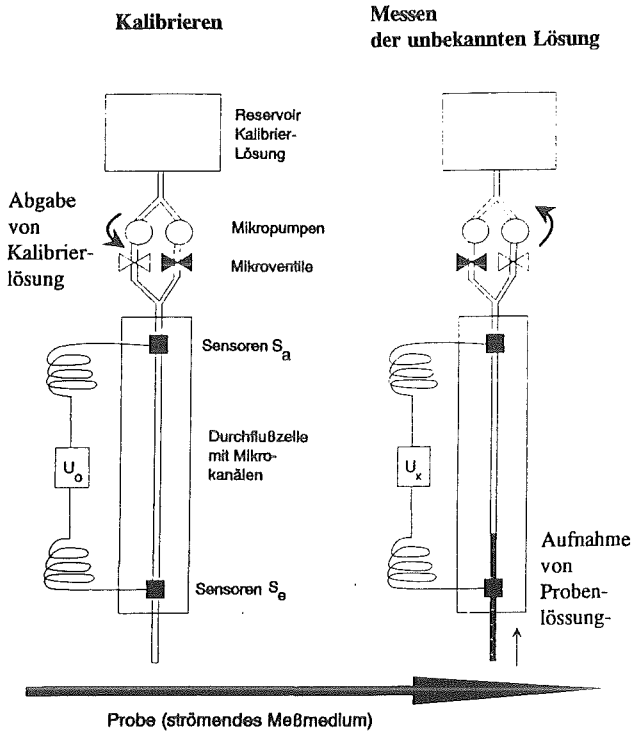


Abb. 1: ELMAS-Prinzip für alternierende Sensorkalibrierung und Probenmessung

In einer mit Mikrokanälen versehenen Durchflußzelle sind am Eingang und Ausgang jeweils ein - oder mehrere - elektrochemische Sensoren S_e bzw. S_a angeordnet. 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 (den) Sensor(en) am Eingang der Durchflußmeßzelle.

Im Fall des Kalibrierens sind die Sensoren am Eingang und Ausgang der Durchflußzelle gleichermaßen der Kalibrierlösung ausgesetzt. Dabei wird am elektronischen Meßgerät die Spannung U_o als Differenzsignal der Sensoren S_e und S_a gemessen. Im Falle der angesaugten Probelösung wird bei entsprechender Sensitivität die der Differenz der Ionenkonzentrationen am Eingang und am Ausgang der Durchflußzelle proportionale Spannung U_x registriert. Bei $U_o = \text{const.}$ ist das Meßsystem stabil. Selbst bei einer Drift dieses Wertes kann durch das zyklische Kalibrieren und das Messen der unbekannt Probe die Ionenkonzentration in der Probe aus der jeweils aktuellen Differenz $U_o - U_x$ bestimmt werden. Diese Methode erinnert an das in der analytischen Chemie

etablierte Verfahren der Fließinjektionsanalyse (FIA) [12], bei der die unbekannt Probe in einen Lösungs-Trägerstrom bekannter chemischer Zusammensetzung injiziert wird. Dieser Injektion entspricht beim ELMAS das Ansaugen der Probelösung.

3. Aktueller Entwicklungsstand der Komponenten des ELMAS

Elektrochemische Sensoren bestimmen entscheidend das Analysensignal. Eingesetzt werden potentiometrische Sensoren, zunächst vom Typ der ISFET's. In Kooperationen mit dem Industriepartner Centrum für intelligente Sensorik (CIS) in Erfurt/Thüringen wurde ein ISFET-Sensorchip entwickelt, der den Anforderungen des ELMAS gerecht wird. Es ist gekennzeichnet durch folgende Merkmale:

- **Dual-ISFET-Struktur on chip**
Für Redundanzmessungen wie auch die Bestimmung von zwei Ionenarten.
- **Temperatursensor**
Zur Temperaturmessung und Kompensation des Temperaturfehlers des Analysensignals.
- **Wahlweise Vorderseiten- oder Rückseitenkontaktierung des Chips**
Zur Ankopplung des Chips an die Mikro-Durchflußmeßzelle und wegen unterschiedlicher Präparationsmöglichkeiten für die ionensensitive Membran ist diese technologische Variabilität erforderlich.
- **Stark vereinfachte Montagemöglichkeit für das komplettierte Chip**
Damit wird der modulare Aufbau des ELMAS für eine flexible Anpassung an die jeweilige Meßaufgabe und auch eine einfache Auswechselbarkeit der elektrochemischen Sensoren gewährleistet.
- **Abmessungen der sensitiven Gebiete: $16 \times 400 \mu\text{m}^2$.**
Diese Abmessungen sind bei hinreichender Miniaturisierung entsprechend den bisherigen Erfahrungen für die meisten Einsatzgebiete ausreichend und erlauben zugleich die weitere Verwendung des im CIS Erfurt entwickelten ISFET-Meßgerätes "ECS Meter" einschließlich der dafür vorhandenen Computersoftware.

Ein Beispiel für die elektronische Transferfunktion dieses neuen Chips zeigt Abb.2.

Die Entwicklung der **ionensensitiven Membranen für ISFET's** auf der Basis anorganischer Materialien zählt zu den Schwerpunktaufgaben des Demonstrators ELMAS. Ausgehend von Erkenntnissen zur Vakuumbeschichtung von ISFET's mit Silberjodid-Filmen für Jodid-Sensoren [9] und aufbauend auf Erfahrungen im KfK bei der Herstellung dünner oxidischer

Schichten definierter Stöchiometrie für Hochtemperatursupraleiter [13] wurde im Institut für Radiochemie eine Basisausrüstung zur Magnetronsputterbeschichtung (Planar- und Zylindermagnetron) installiert sowie eine Präparationstechnik

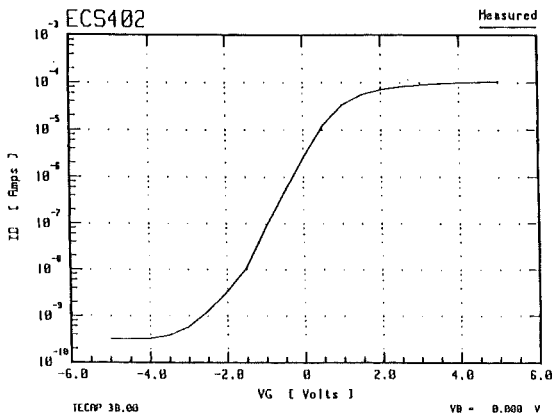


Abb. 2: Elektronische ISFET-Übertragungskennlinie, gemessen am Chips ECS 402. Dargestellt ist die Abhängigkeit des Transistor-Kanalstroms (I_D) von der Referenz-Spannung der Lösung (V_G) bei einer Drainspannung von + 0,2 V.

zur Herstellung der erforderlichen Sputtertargets auf der Basis des Sol-Gel-Verfahrens entwickelt. Gegenwärtig werden Silikat-Membranen definierter Stöchiometrie reproduzierbar hergestellt. Oberflächenanalytische Untersuchungen haben wesentlich zur Technologieentwicklung beigetragen und unterstützen die aktuelle Technologiekontrolle. Elektrochemische Messungen zeigten die Na-Sensitivität dieser Schichten (Abb. 3).

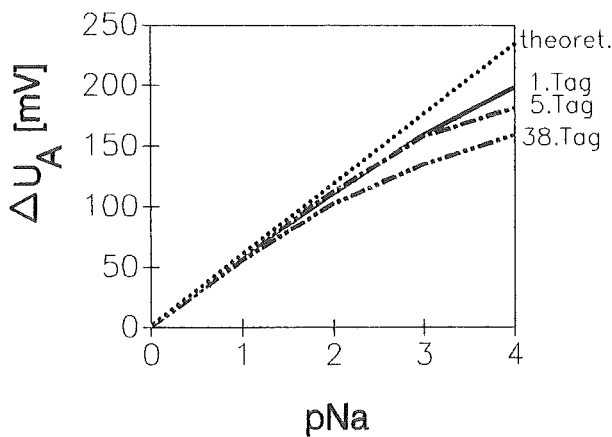


Abb. 3: Na^+ -Sensitivität einer gesputterten Natrium-Alumosilikat-Schicht (Langzeitmessung bei Zwischenlagerung in Pufferlösung pH 7, pNa 1)

Parallel zu diesen Untersuchungen erfolgten die Tests der bisher bereits für die pH-Messung im CIS Erfurt optimierten H^+ -ionensensitiven Membranschichten auf der Basis Siliciumnitrid und Silicium-

oxinitrid. Letzere zeigen im pH-Bereich < 7 eine verringerte pH-Empfindlichkeit (s. Abb. 4) und können damit in diesem Bereich als Referenzsensoren für eine pH-Bestimmung auf der Basis des ISFET-Differenzmeßprinzips dienen.

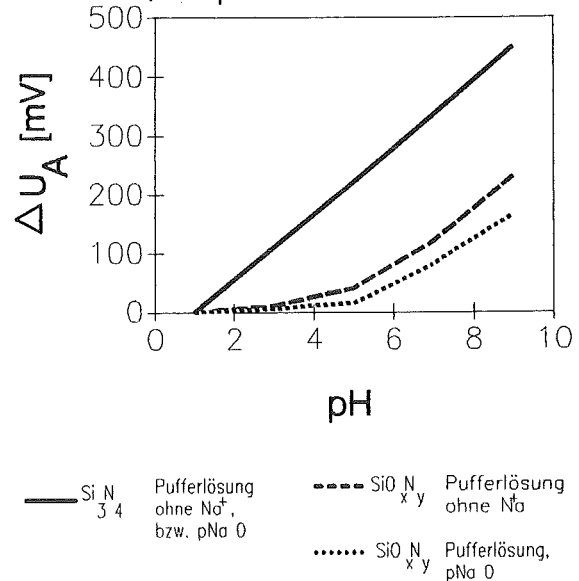


Abb. 4: Vergleich der pH-Sensitivität einer Siliciumnitrid- und einer Siliciumoxinitrid-Membran (Sensortyp ECS 02.1)

Bezüglich der pNa-Querempfindlichkeit bestehen bei Siliciumnitrid-Membranen im Bereich pH 1 - 9 und pNa 0 - 4 keine meßbaren Einflüsse, während für Siliciumoxinitrid-Membranen generell bei pNa < 1 und bei pH > 5 eine nicht zu vernachlässigende pNa-Querempfindlichkeit zu beobachten ist, d.h. in diesen Konzentrationsbereichen ist eine Referenzfunktion nur bei Berücksichtigung der Na^+ -Ionenkonzentration möglich (siehe Abb. 5).

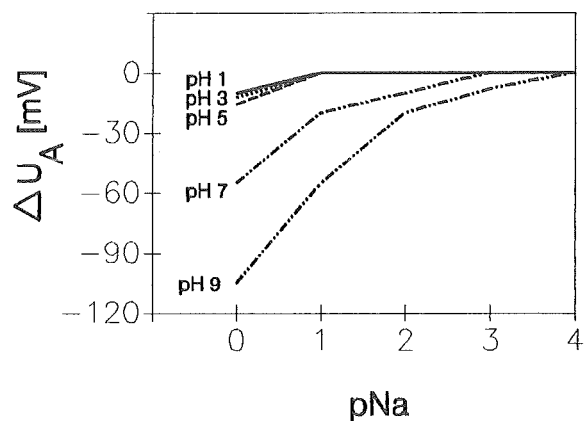


Abb. 5: pNa-Querempfindlichkeit der Siliciumoxinitrid-Membran in Abhängigkeit vom pH-Wert der Lösung

Die Mikrodurchflußzelle dient dem Lösungstransport und der Ankopplung an die Sensoren. Die Geometrie der Mikrokanäle bestimmt das Anströmen der Sensoroberfläche und die Ausdehnung der Übergangsschicht Kalibrierlösung/Probelösung. Bei-

de Faktoren haben Einfluß auf die Signalform. Für eine hohe Meßfrequenz und zugleich als Indikator für eine minimale Vermischung von Kalibrierlösung und Probelösung wird dabei eine stufenförmige Signalform mit steilen Kanten angestrebt.

Für erste Untersuchungen wurde eine Durchflußzelle mit minimalen Abmessungen in Glas-Klebertechnik realisiert, wobei der elektrochemische Sensor direkt im Lösungsstrom des zum Ansaugen der Probelösung bestimmten Kapillarschlauches positioniert wurde [14]. Zur Simulation der Funktion des ELMAS wurden Pufferlösungen mit unterschiedlichem pH-Wert durch die Mikrozelle geleitet, wobei jeweils die Strömungsrichtung gewechselt wurde. Es wurde eine sehr gute Kantensteilheit der Signale beobachtet (siehe Abb. 6), die auch bei einer Meßfrequenz von 3 Proben je Minute eindeutige Plateauform erkennen läßt und damit eine sichere Meßwert-Aussage erlaubt. Die weiteren Arbeiten sind auf den Aufbau einer Mikrodurchflußzelle unter Nutzung von Techniken des LIGA-Verfahrens gerichtet.

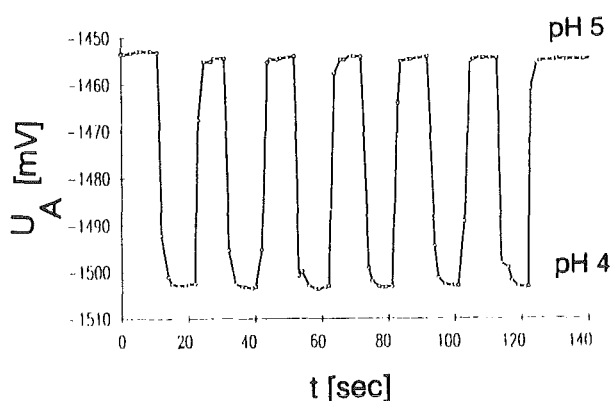


Abb. 6: Simulation der ELMAS-Funktion durch alternierende Messung von zwei pH-Pufferlösungen, wobei die eine die Kalibrierlösung darstellt und die andere als die "unbekannte" Lösung gilt

Die Mikroaktoren, Mikropumpen und Ventile, werden als wichtige Fluidikkomponenten von ELMAS ebenfalls unter Einsatz von Techniken des LIGA-Verfahrens entwickelt. Dabei wird eine Kompatibilität der Herstellung mit der Mikrodurchflußzelle angestrebt, so daß passive und aktive Fluidik-Komponenten eine Einheit bilden können. Erste funktionsfähige Muster einer LIGA-Pumpe mit externem Aktor zur Förderung von Flüssigkeiten liegen vor [15] und konnten bereits zur Demonstration des ELMAS-Funktionsprinzips ebenfalls mit einer Mikrodurchflußzelle kombiniert werden.

4. Literatur

- [1] R. S. Muller, R. T. Howe, S. D. Senturia, R. L. Smith, R. M. White: *Microsensors*; IEEE Press, New York (1990)
- [2] R. W. Murray, R. E. Dessy, W. R. Heineman J. Janata, W. R. Seitz: *Chemical Sensors and Microinstrumentation*; ACS Symposium Series 403, Washington (1989)
- [3] P. Bergveld: Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements; *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 17, 70 (1970)
- [4] S. Shoji, M. Esashi, T. Matsuo: Micro ISFET's of 10 μm tip size; *Proc. Int. Meet. Chem. Sens., Tokyo*, 473 (1983)
- [5] T. Matsuo, M. Esashi: Methods of ISFET fabrication; *Sensors & Actuators*, 1, 77 (1981)
- [6] B. H. van der Schoot, S. Jeanneret, A. van den Berg, N.F. de Rooij: A Modular Chemical Analysis System; *Int. Meet. Chem. Sensors*; Tokyo, 3B09 (1992)
- [7] S. Shoji, M. Esashi, T. Matsuo: Integrated blood gas monitoring system fabricated on a siliconwafer; *Sensors & Actuators*, 14, 101 (1988)
- [8] H. J. Ache: Entwicklung von analytischen Mikrosonden und chemischen Mikrosensoren im Institut für Radiochemie; *KfK-Nachrichten*; 23, 148 (1991)
- [9] M. Schöning, M. Bruns, W. Hoffmann, H. J. Ache, B. Hoffmann: Iodide ion sensitive field effect structures; *Eurosensors VI*, San Sebastian (1992)
- [10] P. Bley, W. Menz: Stand und Entwicklungsziele des LIGA-Verfahrens zur Herstellung von Mikrostrukturen; *KfK-Nachrichten*, 23, 69 (1991)
- [11] I. Brauch, H. Eggert, K. P. Scherer, P. Stiller: Unterstützung des LIGA-Herstellungsprozesses mit wissensbasierten Methoden; *Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung*; Carl Hanser Verlag, (1993)
- [12] B. Karlberg, G. E. Pacey; *Flow injection analysis*; Elsevier Amsterdam, (1989)
- [13] J. Geerk, G. Linker, O. Meyer: Epitaxial growth and properties of YBaCuO thin films; *Mat. Sci. Rep.* 4, 193 (1989)
- [14] W. Keller, D. Maas, D. Seidel: Arbeitsergebnisse aus der Aufbau- und Verbindungstechnik für die Integration mikrosystemtechnischer Komponenten; dieses Heft
- [15] W. K. Schomburg, B. Büstgens, R. Rapp, J. Reichert, O. Fromhein: Mikromembranpumpen als Elemente eines optochemischen Mikroanalytensystems für Schwermetalle; dieses Heft.

Ein experimenteller Telemanipulator für die Minimal-Invasive Chirurgie

E. Holler¹⁾, R. Trapp²⁾

¹⁾Institut für Angewandte Informatik

²⁾Hauptabteilung Ingenieurtechnik

Zusammenfassung

Der Demonstrator "MIC-Telemanipulator" des Projekts Mikrosystemtechnik (PMT) hat zum Ziel, auf der Grundlage des im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) vorhandenen Potentials auf den Gebieten Manipulortechnik, Telepräsenztechniken und Computergraphik einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung der Minimal-Invasiven Chirurgie (MIC) zu leisten. In Kooperation mit der Chirurgischen Abteilung der Universitätsklinik in Tübingen wird ein neues Systemkonzept für den MIC-Operationsaal (OP) entwickelt, das auf die Ablösung des konventionellen Instrumentariums der Minimal- Invasiven Chirurgie durch Telemanipulationssysteme zielt. Im ersten Schritt soll bis Ende 1995 der Prototyp eines solchen MIC-Telemanipulators entwickelt und erprobt werden. Ein derartiger Manipulator soll sowohl zur Führung adaptierter Instrumente als auch als Endoskopführungssystem zum Einsatz kommen. Ein aus mehreren dieser Manipulatoren bestehendes MIC-System soll vom Chirurgen über eine speziell an die Aufgabe angepaßte Mensch/Maschine-Schnittstelle bedient werden und ihn so in die Lage versetzen, auch komplexe Eingriffe mit hohem Qualitätsstandard sicher durchführen zu können.

Der zunächst für dieses neue MIC-Systemkonzept ins Auge gefaßte Anwendungsbereich ist die Laparoskopie, die bereits hohe Anforderungen an die Miniaturisierung der mechanischen Komponenten stellt und dem Chirurgen die erforderliche Feinfühligkeit über die mittels Mikro-Sensor-Anordnungen aufgenommenen Kräfte und Momente vermittelt. Die Verfügbarkeit geeigneter Mikro-Aktuatorik wird dann weitere Anwendungsgebiete wie die Neurochirurgie und Gynäkologie erschließen. Wesentliche Erkenntnisse zur Auslegung eines MIC-Manipulators konnten durch eine umfangreiche Systemanalyse und anhand von Vorversuchen mit einem an die Erfordernisse der medizinischen Anwendung angepaßten, im KfK vorhandenen Telemanipulatorsystem gewonnen werden.

1. Einleitung

Der bisherige Erfolg der endoskopischen Chirurgie, vor allem bei Standardeingriffen im Bauchraum (Laparoskopie) hat einerseits eine rapide Verbreitung der Techniken der Minimal-Invasiven Chirurgie bewirkt und andererseits dazu geführt, daß zunehmend komplexere Aufgabenstellungen angegangen werden [1]. Dies darf nicht darüber hinwegtäuschen, daß gegenwärtig die Minimal- Invasive Chirurgie eine Technik ist, die vom Chirurgen verlangt, daß er mit seiner Geschicklichkeit Informationsverluste und mangelnde Zugänglichkeit kompensiert:

- Kräfte, Momente, Drücke die der Chirurg mit seinen Instrumenten ausübt, können nicht empfunden werden
- die Tastsinne der Hand können nicht für diagnostische Zwecke eingesetzt werden
- durch die Art des Zugangs und die starren Instrumente ist das Manipulieren stark eingeschränkt
- die fehlende 3-D-Sicht gestaltet präzises Arbeiten schwierig.

Dem Wunsch nach breitem Einsatz der MIC bei gleichzeitiger Risikobegrenzung und Qualitätssicherung kann nur entsprochen werden, wenn es gelingt, im MIC-OP ein Systemkonzept zu realisieren, das dem Chirurgen MIC-Operationen mit hohem Qualitätsstandard bei geringem Sicherheitsrisiko möglich macht. Ein vielversprechender Ansatz für ein solches Systemkonzept basiert auf der Kombination von Telemanipulation/Telerobotik mit Techniken wie "virtual reality" und 3-D-Video.

Durch Integration der genannten Techniken zu einem "Telepräsenz-System" wird es möglich sein, den Chirurgen seine Eingriffe so durchführen zu lassen, als hätte er direkten Zugang zu allen Objekten im Arbeitsraum. Wie in Abb. 1.1 dargestellt, ist der Telemanipulator wesentliches Element des neuen Systemkonzeptes.

Mehrere solcher Manipulatorsysteme werden in einem MIC-System für die Aufgaben Instrumentenführung und Endoskopführung zum Einsatz kommen, vom Chirurgen über eine an die Aufgabenstellung angepaßte Mensch/Maschine-Schnittstelle bedient. Die erforderliche Feinfühligkeit muß durch Über-

mittlung der ausgeübten Kräfte und Momente an den Operateur realisiert werden; die dazu notwendige Erfassung dieser physikalischen Größen kann über Mikro-Sensoren erfolgen, die an Schaft und Effektoren der Manipulatoren angebracht sind.

Die prototypische Realisierung eines Manipulatorsystems für die Minimal-Invasive Chirurgie des Bauchraumes als Demonstrator ist Gegenstand des PMT-Vorhabens "MIC-Telemanipulator", das in Kooperation mit der Chirurgischen Abteilung der Universitätsklinik Tübingen (Prof. Bueß) durchgeführt wird.

Zwischen der Universitätsklinik Tübingen und dem KfK besteht seit 1990 ein Kooperationsvertrag, dessen Ziel es ist, optimierte Systemlösungen für die endoskopische Chirurgie zu erarbeiten. Basis dafür ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Medizinern, Ingenieuren und Informatikern. Die bisher im Rahmen dieser Zusammenarbeit auf den Gebieten Instrumentenentwicklung, 3-D-Videotechnik und Systemanalyse erzielten Ergebnisse sind in das Anfang 1993 begonnene PMT-Vorhaben "MIC-Telemanipulator" eingeflossen. In der gegenwärtigen Phase der Kooperation ist Tübingen zuständig für Anforderungsspezifikationen, Tests und Prototypenerprobung während das KfK für die Entwicklung der Prototypen verantwortlich zeichnet.

Neben der Kooperation mit Tübingen bestehen intensive Kontakte zu anderen chirurgischen Kliniken. Insbesondere die Kontakte zur Universitätsklinik in Freiburg haben schon wesentliche Impulse für die KfK-Arbeiten geliefert.

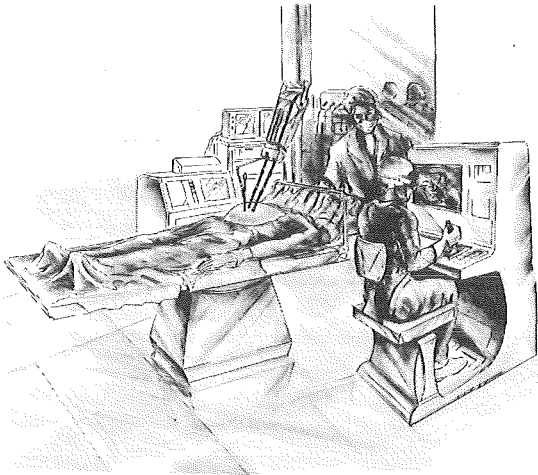


Abb. 1.1: MIC-OP der Zukunft: Telemanipulatorsystem im Einsatz

2. Vorgehensweise

Die erprobte Vorgehensweise bei der Durchführung eines Entwicklungsprojektes [2] vollzieht sich, wie hinreichend bekannt, in mehreren Phasen:

- zunächst sind die aus der zu lösenden Problemstellung resultierenden Anforderungen zu spezifizieren. Dies geschieht in der Regel schon unter Berücksichtigung eines existierenden Grobkonzeptes für die zu realisierende technische Lösung.
- Anhand der Anforderungen ist die technische Lösung im Detail zu spezifizieren.
- Prototypentwicklung, Systemintegration und Test des Gesamtsystems schließen sich an, wobei die letzten vier Phasen solange zu iterieren sind, bis die Anforderungen erfüllt werden.

Die hier zu skizzierende Vorgehensweise bei der Entwicklung eines Telemanipulatorsystems für die MIC weicht von dem oben beschriebenen Standard in folgenden Punkten ab:

- Problemdefinition, Konzeptfindung und die Spezifikation von Anforderungen waren zu einem großen Teil bereits Ergebnisse einer im Rahmen der Kooperation mit den Tübinger Chirurgen durchgeführten und durch die Kontakte zu anderen Kliniken validierten Systemanalyse.
- Die Entwicklung des in der Systemanalyse geforderten und konzipierten MIC-OP-Systems kann auf einer Vielzahl von Vorentwicklungen aufbauen, die im KfK im Rahmen des früheren Arbeitsschwerpunktes Handhabungstechnik erarbeitet wurden.
- Aus den Vorentwicklungen resultieren eine Reihe von implementierten technischen Konzepten, wie beispielsweise das Telemanipulator-System DISTEL oder diverse Simulationswerkzeuge für Simulation des kinematischen, dynamischen und regelungstechnischen Aufbaus von Manipulatorsystemen, die bei der Vervollständigung von Anforderungsspezifikationen und zur Bewertung von Konzepten eingesetzt werden können.

Abb. 2.1 zeigt die resultierende Phasenstruktur des Entwicklungsprojektes MIC-Telemanipulator. Es wird verdeutlicht, daß im Rahmen der Systemanalyse nicht alle Anforderungen an ein MIC-System präzise definiert werden konnten. Hier sollen zusätzliche Vorversuche helfen, Fragestellungen wie z.B. nach den Anforderungen an die Mensch/Maschine-Schnittstelle zu klären.

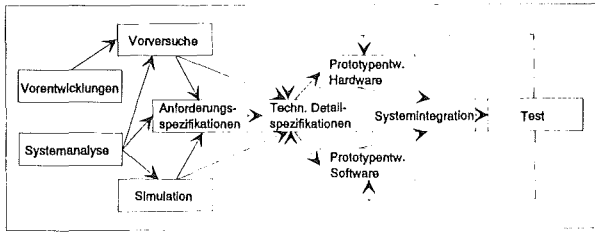


Abb. 2.1: Phasenstruktur des MIC-Telemanipulator-Entwicklungsprojekts

2.1 Systemanalyse

Als Ausgangssituation wurde ein Standard-Operationssaal betrachtet inklusive der darin vorhandenen Geräte und Anschlüsse sowie der Funktionen der an der Operation beteiligten Personen. Die für die MIC erforderlichen zusätzlichen Geräte und Instrumente sowie die durch MIC geänderte Funktion der beteiligten Personen wurden analysiert. Dabei zeigten sich je nach Operationsschule Unterschiede in der Anordnung der Geräte und des Personals sowie in der Operationsdurchführung.

Ein wesentlicher Punkt war die Untersuchung des dynamischen Operationsablaufs im Normalfall und in Störfallsituationen. Hier wurden zwei Betrachtungsweisen gewählt: personenbezogen und arbeitsmittelbezogen. Anhand der Analyse konnte festgestellt werden, wofür die meiste Zeit benötigt wird und wo sich, z.B. durch Kombinationsgeräte, eine Zeiterparnis erreichen läßt. Die Analyse der verbalen und physischen Interaktionen zwischen den beteiligten Personen ergab große Unterschiede zwischen eingeübtem und neuem Team sowie zwischen komplikationsfreiem und komplikationsbehaftetem Operationsablauf. Die Darstellung des Instrumentenflusses gab Hinweise auf Engpässe und Verbesserungsmöglichkeiten. In der Störfallanalyse zeigten sich neben "normalen" Operationsstörungen solche, die durch MIC-spezifische Geräte und Instrumente verursacht werden.

Als Problemfelder wurden z.B. das Absaugen, das Bergen von Gewebe, die unzureichende Sensorik, die eingeschränkten Freiheitsgrade, sowie die mangelhafte Standardisierung und Verknüpfung - Inselösung - der Geräte aufgezeichnet.

Damit ergaben sich neue Aufgabenstellungen in einigen Themenbereichen wie z.B. Ergonomie, Mensch/Maschine-Schnittstelle, 3D-Video, Instrumentenentwicklung, Sensorik, Mikrotechnik, Modellierung, Qualitätssicherung und Zuverlässigkeit.

2.2 Vorentwicklungen

Im Zuge der früheren handhabungstechnischen Aktivitäten der Hauptabteilung Ingenieurtechnik (HIT) und des Institutes für Angewandte Informatik (IAI) entstanden mehrere Entwicklungsergebnisse, die die

Entwicklung des MIC-Telemanipulator direkt beeinflussen:

- Zur Gewinnung von Erfahrungen in der MIC-spezifischen Instrumenten- und Geräteentwicklung wurde von der HIT 1990 die Weiterentwicklung von MIC-Instrumenten aufgegriffen. Im allgemeinen werden die chirurgischen Funktionen von den Effektoren in einer Vielfalt von verschiedenen Instrumenten bereitgestellt. Zur Präparation einer Gewebestruktur ist es oft erforderlich zuerst die kleinen Gefäße mit Hochfrequenzstrom zu koagulieren und nach erfolgtem Instrumentenwechsel mit einer Schere zu durchtrennen. Die Beobachtungen und Analysen mehrerer Operationen zeigen, daß Instrumentenwechsel und Wiederaufsuchen des Operationsfeldes sehr zeitaufwendig sind. Gerade bei unerwarteten Blutungen bedeutet der Instrumentenwechsel ein erhöhtes Risiko für den Patienten. Im Effektor des entwickelten Kombinationsinstrumentes werden die chirurgischen Funktionen bipolarer Koagulation, Schneiden sowie Saugen und Spülen integriert. Auf diese Weise wird nur ein Instrument benötigt, um das Gewebe genau in der zu koagulierenden Zone zu durchtrennen. Zeiterparnis und Patientensicherheit werden erhöht. Das Anfertigen endoskopischer Nähte mit Hilfe einer gebogenen Nadel und zweier konventioneller Nadelhalter ist selbst für erfahrene Chirurgen ein sehr schwieriges Verfahren. Zur Vereinfachung dieser Nahttechnik wurden Nadelübernahmen entwickelt, die eine Nadel zwischen zwei Aufnahmen hin und her führen. Der Faden, der in der Mitte der Nadel befestigt ist, läßt sich auf diese Weise mit nur einem Instrument zu fortlaufenden Nähten verarbeiten. Die entwickelten chirurgischen Effektoren (2.2) wurden in Phantom- und Tierversuch an der Uni-Klinik Tübingen mit Erfolg erprobt.

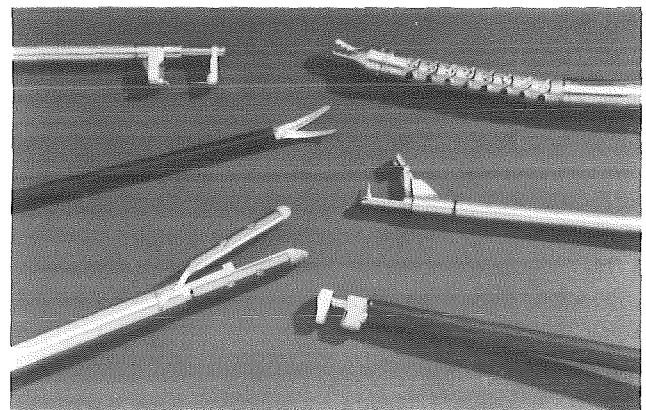


Abb. 2.2 Im HIT entwickelte chirurgische Effektoren

- Für den industriellen Einsatz wurde das rechnergesteuerte Telemanipulationssystem DISTEL entwickelt. DISTEL ist eines der weltweit ersten "Telepräsenz"-Systeme, das in Verbindung mit

einem ebenfalls im IAI entwickelten 3-D-Video-Überwachungssystem für Hantierungsaufgaben über nahezu beliebige Entfernungen eingesetzt werden kann. DISTEL verfügt ferner über eine experimentelle Mensch/Maschine-Schnittstelle, die die Erprobung unterschiedlicher Mensch/Maschine-Interaktionen, von der Sprach-Ein/Ausgabe bis hin zum "Touch-Screen", ermöglicht.

- Auf der Grundlage der mit DISTEL gewonnenen Erfahrungen wurde das MONSUN-Konzept entwickelt, das die Bedienung von Manipulatoren verschiedenster Kinematik über ein und dieselbe Mensch/Maschine-Schnittstelle ermöglicht. Wesentliches Merkmal dieser Entwicklung ist, daß die Teleoperation unter Verwendung standardisierter Schnittstellen über schnelle Kommunikationsmedien, z.B. lokale Netze (LAN) erfolgt. Abb. 2.3 zeigt eine typische MONSUN-Konfiguration, bei der mehrere entfernt installierte Arbeitseinheiten und eine Video-Überwachungseinheit über LAN von einem zentralen Leitstand aus bedient werden können.
- Die ursprünglich für die industrielle Telemanipulation entwickelte 3-D-Video-Technologie war Ausgangsbasis für die IAI-Entwicklungen zur 3-D-Videoendoskopie, die bereits 1991 zu einem ersten Prototyp führten. 1992 wurde ein 3-D-Videoendoskop erstmals klinisch erprobt; mittlerweile werden 3-D-Video-Endoskopiesysteme, die auf der KfK-Entwicklung basieren, von einem Lizenzpartner vermarktet.

2.3 Vorversuche

Einige wichtige Anforderungen an MIC-Telemanipulationssysteme, die im Rahmen der Systemanalyse nicht ermittelt werden konnten, bedürfen zusätzlicher experimenteller Untersuchungen anhand von Vorversuchen:

- Von zentraler Bedeutung für ein Telepräsenzsystem ist die Auslegung der Mensch/Maschine-Schnittstelle. Hier existierten auf der Seite der potentiellen Anwender nur eingeschränkte Vorstellungen, da Erfahrungen im Umgang mit Telemanipulationssystemen bei Chirurgen nicht vorlagen. Das Telemanipulatorsystem DISTEL sowie der MONSUN-Prototyp wurden daher für entsprechende Vorversuche umgerüstet.

Mit DISTEL ist es nun möglich, simulierte MIC-Operationen fernbedient durchzuführen und dabei Erfahrungen hinsichtlich der Auslegung der Bedieneinrichtungen, des 3-D-Videoeinsatzes, der erforderlichen Feinfühligkeit (Kraftreflexion), etc., zu gewinnen [3], [4].

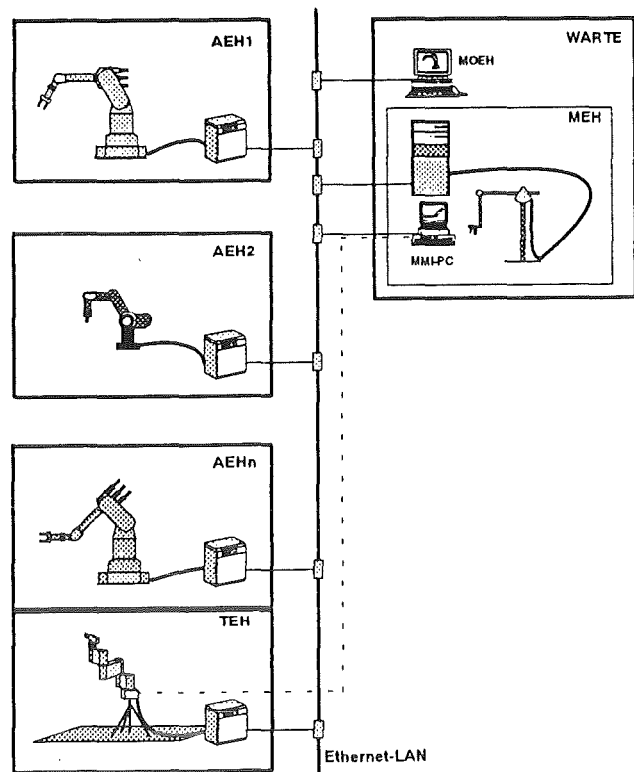


Abb. 2.3: Typische MONSUN-Konfiguration mit mehreren Arbeitseinheiten und einer Warte, bestehend aus Mastereinheit und Monitoreinheit

Die Vorversuche mit MONSUN konzentrieren sich auf die Untersuchungen zur Auslegung der Mensch/Maschine-Schnittstelle für die Endoskopführung. Erprobt werden die Verwendung graphischer Bedieneroberflächen kombiniert mit Spracheingabe oder Sensorsignaleingabe über Kopfbewegungen.

- Um einen Überblick über die bei MIC-Operationen auftretende Kräfte, Momente und Beschleunigungen zu erhalten, wurde im HIT eine laparoskopische Sensorzange entwickelt. In Phantomversuchen konnten die Handhabungskräfte, Biegemomente, die Greifkraft im Effektor sowie die Beschleunigungen ermittelt werden. Für die relativ hohen Handhabungskräfte von bis zu 10 N wurden ebenfalls im HIT spezielle endoskopische Gelenkstrukturen (Abb. 2.4) entwickelt, die eine reproduzierbare Bewegung unter Last gewährleisten [5].

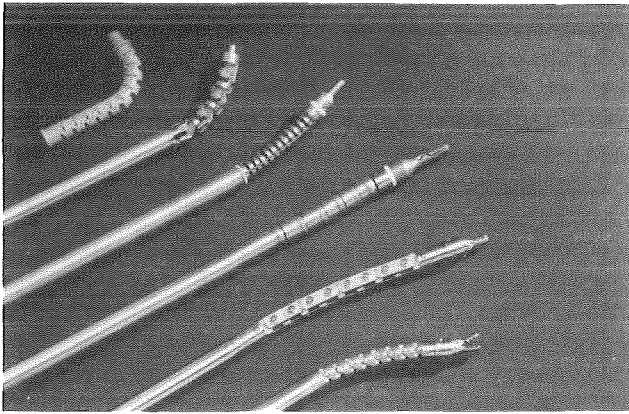


Abb. 2.4: Endoskopische Gelenkstrukturen

2.4 Simulation

Simulationswerkzeuge bieten die Möglichkeit, Systemeigenschaften relativ präzise zu bewerten, ohne sofort in die aufwendige Prototypentwicklung gehen zu müssen.

Im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Handhabungstechnik entstanden insbesondere Simulationswerkzeuge zur Untersuchung der kinematischen, dynamischen und regelungstechnischen Eigenschaften unterschiedlicher Telemanipulator-Systemkonzepte. Ergänzt um wenige kommerziell verfügbare Werkzeuge existiert damit ein Instrumentarium, das für die MIC-Telemanipulatorentwicklung eingesetzt werden kann, um die gestellten Anforderungen an das technische System und die Auslegung des Systems selbst in Einklang zu bringen.

Als KfK-Entwicklungen stehen die Simulationswerkzeuge KISMET, MANDY und SIMAN zur Verfügung. KISMET [6] dient dazu, CAD-Modelle der entwickelten Kinematiken in graphische 3-D-Modelle umzusetzen, deren Bewegungsverhalten in Realzeit auf dem Bildschirm dargestellt werden kann. Konstruktive Änderungen können interaktiv vorgenommen und in einer nachfolgenden Bewegungssimulation in ihrer Wirkung veranschaulicht werden.

KISMET ermöglicht die realitätsnahe Visualisierung von MIC-Telemanipulator-Komponenten und deren Bewegung um definierte Achsen. Durch die Modellierung der Arbeitsumgebung im Bauchraum wird es möglich, endoskopische Bewegungsvorgänge realitätsnahe zu untersuchen [7].

Dazu wird KISMET mit zusätzlichen Programmteilen ausgebaut, die eine Darstellung komplexer Organmodelle in Echtzeit ermöglichen. Mit Hilfe sensorbestückter Instrumente als Eingabegeräte können dann die ausgeführten Handhabungsvorgänge in einer visuellen, laparoskopischen Arbeitsumgebung auf dem Bildschirm verfolgt werden (MIC-Simulator). MANDY ist ein hybrides Simulations-System zur Untersuchung der dynamischen und regelungstechnischen Eigenschaften, das die gemeinsame Betrachtung einer zeitdiskreten Steuerung/Regelung und

des kontinuierlichen Verhaltens eines Manipulatorarms ermöglicht. Das dazu erforderliche mathematische Modell des Manipulators einschließlich seiner Antriebe wird von MANDY automatisch aus den Parametern (Abmessungen, Massen, Schwerpunkte, etc.) erstellt.

Bei der Untersuchung des Verhaltens unterschiedlicher Regler mit MANDY, können Störerauschen, Reibung, etc. als Störgrößen aufgeschaltet werden; ferner können zeitvariante Parameter wie Lastmassenänderung und Stellwertbegrenzung berücksichtigt werden.

SIMAN ist eine offene Simulationsumgebung für Regler von Eingelenksystemen, in der nichtsteife Getriebe untersucht und analoge Reglerkarten auf dem Rechner nachgebildet werden können.

3. Stand der Arbeiten

Die Ergebnisse der Systemanalyse und Erkenntnisse aus den Vorversuchen haben dazu geführt, das MONSUN-Konzept (vgl. Abb. 2.2) als Basis für ein MIC-Telemanipulator-System festzuschreiben: MONSUN als offenes Systemkonzept ermöglicht einerseits, MIC-Arbeitseinheiten unterschiedlicher Kinematik von einem Leitstand aus zu betreiben, andererseits bietet das Konzept den notwendigen Spielraum für die experimentelle Untersuchung unterschiedlich ausgelegter Mensch/Maschine-Schnittstellen.

Der Stand der Telemanipulator- und MIC-Instrumentationstechnik bietet nur eine Grundlage für die Entwicklung eines MIC-Telemanipulator-Systems; ergänzende Entwicklungsarbeiten im Rahmen des Vorhabens konzentrieren sich zur Zeit auf folgende Gebiete:

- Kinematik der Arbeitseinheit und Effektor-Adaptierung
- Realisierung einer sensorbasierten Kraftreflexion
- Experimente zum Design der Mensch/Maschine-Schnittstelle sowie Konzeptentwicklung für die Endoskopführung mit Navigationsunterstützung
- Adaptierung der Fähigkeiten des Steuerungs- und Regelungssystems an die speziellen Erfordernisse der miniaturisierten Mechanik und der Sensorik der Arbeitseinheiten.

Bei der kinematischen und mechnischen Auslegung der MIC-Arbeit sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Minimierung der Zahl der im Körperinneren für ein effizientes Arbeiten benötigten Freiheitsgrade. Zur Realisierung dieser Forderung bietet sich für laparoskopische Eingriffe eine Anleihe bei der "manuellen" MIC-Technik an: Unter Ausnutzung der Beweglichkeit der durch den Trokareinstichpunkt führenden Trokarhülse

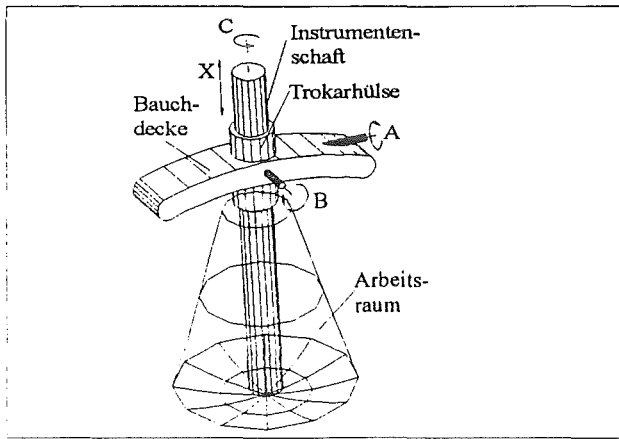


Abb. 3.1: *Gestalt des Arbeitsraumes bei laparoskopischen Eingriffen*

wird es möglich, einen kegelförmigen Arbeitsraum im Körperinneren durch äußere Freiheitsgrade zu realisieren.

Abb. 3.1 zeigt die Gestalt des Arbeitsraumes bei laparoskopischen Eingriffen. Der Zugang zu diesem Arbeitsraum erfolgt über die Trokarhülse im Einstichpunkt (\varnothing bis 15mm). Eine Vergrößerung dieses Arbeitsraumes und eine Verbesserung des Zugangs zu den Objekten in diesem Arbeitsraum wird durch das Konzept des "flexiblen Instrumentes" mit zwei zusätzlichen Freiheitsgraden erreicht. Die Versuche mit von Hand steuerbaren Instrumenten, haben die Vorteile der zusätzlichen Bewegungsachsen überzeugend dargestellt [8]. Durch das Schwenken der endoskopischen Gelenkstruktur ist es möglich, den chirurgischen Effektor in weiten Bereichen zu orientieren und beispielsweise ganze Gewebestrukturen zu umfahren. Die Drehung des Effektors um seine Längsachse stellt eine weitere Orientierungsachse bereit.

- Der Einstichpunkt in die Bauchdecke ist bei allen Bewegungen der Arbeitseinheit als invariant bezüglich seiner Lage im Raum zu berücksichtigen. Dies kann dadurch geschehen, daß die Bewegungen der Arbeitseinheit durch mechanische Führungen eingeschränkt werden, wie in Abb. 3.2 dargestellt. Die Randbedingungen der Invarianz des Durchdringungspunktes der Bauchdecke kann auch durch Maßnahmen im Bereich der Steuerungssoftware realisiert werden, wenn eine universelle 6-achsige Kinematik (Abb. 3.3) zum Einsatz kommen soll: Bei der Berechnung der inversen Kinematik ist darauf zu achten, daß der Teil des Manipulators, der über die Trokarhülse in den Arbeitsraum reicht, dies nur über den invarianten Punkt P_B tut. Dies erfordert, daß bei allen Transformationen der Ortsvektor P_B im Raum invariant bleibt.
- Wie die Ergebnisse der Systemanalyse zeigen, werden bei laparoskopischen Eingriffen gleichzeitig mindestens zwei Arbeitseinheiten mit

MIC-Effektoren benötigt, die die manuellen MIC-Instrumente ersetzen. Hinzu kommt eine weitere Arbeitseinheit, die das Endoskop führt. Der mechanische Aufbau dieser Arbeitseinheiten muß daher möglichst platzsparend realisiert werden und mittels eines am Operations-tisch befestigten Trägersystems in alle benötigten Arbeitspositionen gebracht werden können.

- Der mechanische Aufbau der Arbeitseinheiten muß robust genug sein, die in allen Phasen des Einsatzes auftretenden Kräfte und Momente aufnehmen zu können. Darüber hinaus müssen die an die Sicherheit und Zuverlässigkeit gestellten Anforderungen erfüllt werden.

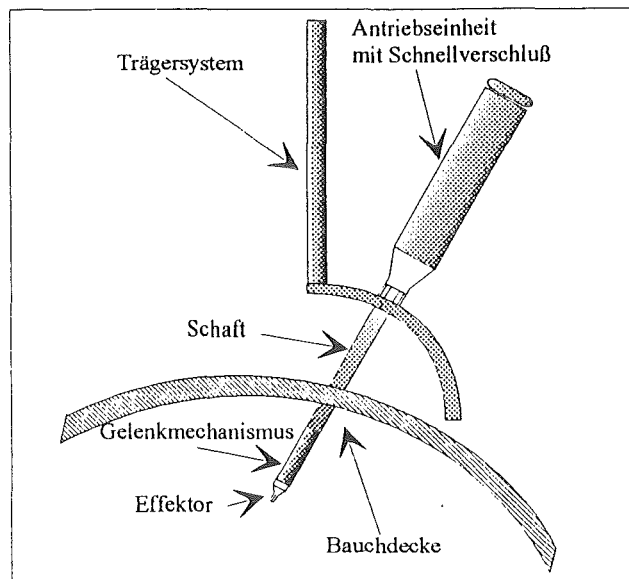


Abb. 3.2: *Arbeitseinheit eines MIC-Telemanipulators mit mechanischer Führung*

Die Realisierung der vorstehend genannten Anforderungen kann durch unterschiedliche technische Lösungen erfolgen. Zur Zeit werden zwei Prototypen für Arbeitseinheiten, die mit unterschiedlich konzipierter mechanischer Führung arbeiten, fertiggestellt und Erprobungen als Instrumenten- bzw. Endoskopträger unterzogen. Ferner wird gegenwärtig als Wechselteil der MIC-Arbeitseinheit ein flexibles Instrument realisiert. Die Weiterentwicklung dieses Instrumentes sieht eine Schnellwechsellvorrichtung für endoskopische Schäfte mit verschiedenen Effektoren sowie den elektrischen Antrieb aller Effektorfunktionen und Bewegungsachsen vor [9]. Eine softwarebasierte Lösung zur Realisierung des in Abb. 3.3 dargestellten Konzeptes das "virtual joint" wird z.Zt. mit dem DISTEL Telemanipulatorsystem erprobt. Der als Instrumententräger eingesetzte Manipulator muß den Operateur, der ihn bedient, ein extrem feinfühliges Arbeiten ermöglichen; d.h., das MIC-Telemanipulatorsystem muß nicht nur sehr exakt positionierbar sein, sondern dem Operateur auch sehr kleine Kräfte und Momente "reflektieren" können.

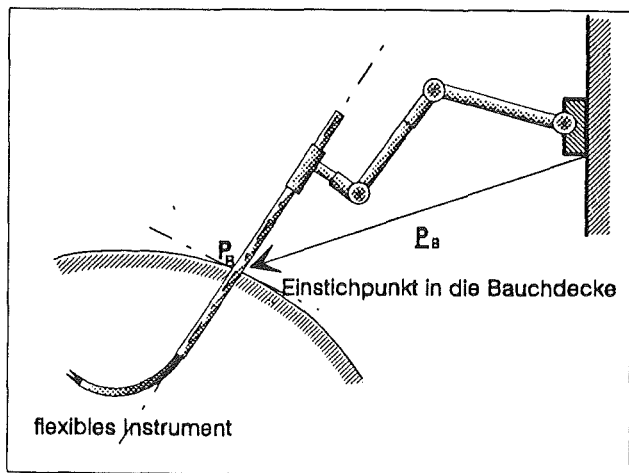


Abb. 3.3: Konzept des "virtual joint"

Dies kann nur über die Integration einer sehr empfindlichen Kraft/Momenten-Sensorik in die Systemsteuerung erfolgen. Ein Laborteststand zur Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen der sensorbasierten Kraftreflexion wird gegenwärtig konzipiert. Ausgangspunkt dazu sind die in den Vorversuchen mit der "Sensorzange" erzielten Ergebnisse.

Die zur Zeit durchgeführten Experimente zur Auslegung der Mensch/Maschine-Schnittstelle haben bereits erfolversprechende Möglichkeiten zur Integration des 3-D-Video und der Endoskopführung aufgezeigt. Das MONSUN-Konzept gestattet es, Prototypen spezialisierter Bedienerchnittstellen mit relativ geringem Aufwand zu realisieren. So konnte eine auf Spracheingabe und Kopfbewegung des Chirurgen reagierende Endoskopführung als Prototyp in wenigen Tagen realisiert und getestet werden. Ein weiterer Schwerpunkt der gegenwärtigen Experimente zur Mensch/Maschine-Schnittstelle sind Untersuchungen zur Ergonomie der Bedieneinheiten. Dabei wird mit unterschiedlich ausgelegten Bedieneinheiten (Mastermanipulator, Joystick, Bewegungssensorik etc.) gearbeitet, es werden aber auch unterschiedliche Navigationsprinzipien zur Steuerung der Arbeitseinheit, insbesondere des MIC-Effektors untersucht.

Zur Adaptierung des Steuerungs- und Regelungssystems an die speziellen Erfordernisse der miniaturisierten Mechanik werden neuere Regelungskonzepte [10], [11], [12] unter Einsatz der weiter oben beschriebenen Simulationswerkzeuge realisiert. Diese Konzepte berücksichtigen:

- den bei miniaturisierten Mechaniken besonders hohen Anteil der Reibungskräfte an den aufzubringenden Kräften
- die schnelle Schwankung der Belastung der Arbeitseinheit
- den hohen Anteil des Rauschens an den gemessenen Sensorsignalen

- die bei miniaturisierten Antrieben besonders wichtige Stellwertbegrenzung und die daraus resultierenden Konsequenzen für präzises Bewegen der Arbeitseinheit [13]
- die besonders hohen Anforderungen an die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Steuerungs- und Regelungssystems.

Neben der Entwicklung neuer Algorithmen für die Steuerung und Regelung wird an der Konzipierung einer Hardware-Plattform für die Steuerung des MIC-Telemanipulators gearbeitet, die folgende Anforderungen erfüllt:

- Realisierbarkeit schneller Regelungsalgorithmen
- Unterstützung der Regelungs-Software-Entwicklung durch Software-Werkzeuge
- "low cost"-System
- Unterstützung der zur Integration in MONSUN erforderlichen Standardschnittstellen.

Diese Hardwareplattform wird Bestandteil eines Laborteststandes zur Ermittlung der für die dynamische Simulation benötigten Parameter und zur Verifizierung der Simulationsergebnisse.

4. Ausblick

Telemanipulationssysteme können der Beginn einer weitreichenden technischen Entwicklung sein, welche die Chirurgie nachhaltig beeinflusst. Ziel dieser Entwicklung ist das integrierte MIC-OP-System. Notwendig zur Erreichung dieses Zieles ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit und die Verknüpfung aller technologischen und logistischen Einheiten zu einem Gesamtsystem.

Die erste Anwendung eines MIC-Telemanipulatorsystems wird aus Gründen der Überschaubarkeit und der Geometrie auf den Bauchraum beschränkt bleiben. Wenn es gelingt, Mikroaktoren und -sensoren für die Kraft-Momentenmessung sowie für die intraoperative Analyse herzustellen, so ist eine weitere Ausdehnung auf andere Gebiete der Medizin möglich. Parallel dazu müssen auch neue Verfahren des Trennens und Verbindens von Gewebe gefunden werden, die sich von den herkömmlichen Verfahren der klassischen Operationslehre vollständig lösen.

Literatur:

- [1] Cuschieri A., Bueß G., Perissat J.: Operative manual of endoscopic surgery. Springer-Verlag, 1992
- [2] Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Richtlinien 2221 vom Nov. 1986

- [3] Breitwieser, H. et al.: DISTEL used as an Experimental Setup for Requirements Specification for a MIC Telemanipulator System. 1st Europ. Congress of the Europ. Association for Endoscopic Surgery. Cologne, June 3-5, 1993
- [4] Vollmer, T.: Linguistische Regeln zur Beschreibung der Bewegungsvorgabe durch einen Operateur in einem Master-Slave-Manipulator-System. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1993
- [5] Mueglitz J., Kunad G., Dautzenberg P., Neisius B., Trapp R.: Kinematic problems of Manipulators for minimal invasive surgery. Endoscopic Surgery and Allied Technologies, Volume 3, 1993
- [6] Kühnapfel, U.: "Grafische Realzeitunterstützung für Fernhandhabungsvorgänge in komplexen Arbeitsumgebungen im Rahmen eines Systems zur Steuerung, Simulation und Off-Line-Programmnutzung", Dissertation Universität Karlsruhe (1991), KfK-Bericht 5052 (1992)
- [7] Kühnapfel, U., Neisius, B.: "CAD-based graphical simulation in endoscopic surgery", Endoscopic Surgery and Allied Technologies, Vol. III, 1993
- [8] Schurr M.O., Melzer A., Dautzenberg P., Neisius B., Trapp R., Bueß G.: Development of steerable instruments for minimal invasive surgery in modular conception. Acta chir. belg. 1993, in press
- [9] Neisius B., Dautzenberg P., Trapp R.: Development of powerd, dexterous instruments for endoscopic surgery. 1st Europ. Congress of the Europ. Association for Endoscopic Surgery. Cologne, June 3-5, 1993
- [10] An, C.H., Atkeson, C.G., Hollerback, J.U.: Model-based Control of a Robot Manipulator. MIT Press, Cambridge, 1989
- [11] Weber, W.: Regelung von Manipulator- und Roboterarmen mit reduzierten, effizienten inversen Modellen. VDI-Verlag, Fortschritts-Bericht 8/183, Düsseldorf, 1989
- [12] Landau, Y.D.: Adaptive Control. Marcel Dekker, New York, 1979
- [13] Weber, W., Dietze, S.: Geometrietreue Roboterbahnen durch Manipulation der Bewegungssollwerte mit Fuzzy-Logik. Proc. 8th Workshop Autonome Mobile Systeme, Karlsruhe, 26.-27.11.1992, p 140-155

Mikrostrukturierung

Mikrospektrometer für spektrale Analyseaufgaben im sichtbaren und nahen Infrarotbereich

C. Müller, H. Hein, J. Mohr

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Das LIGA-Verfahren (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung, Abformung) bietet aufgrund der freien Geometriewahl die Möglichkeit, Komponenten mit beliebigen lateralen Abmessungen im Mikrometerbereich mit Strukturhöhen von einigen hundert Mikrometern und einer Strukturgenauigkeit über der Höhe im Submikrometerbereich zu strukturieren. Diese Eigenschaften des Verfahrens erlaubt die Fertigung von optischen Bausteinen. Durch den Einsatz eines lichtleitenden Dreischicht-Resistaufbaues werden planare Gitterspektrographen mit einem selbstfokussierenden, geblazten Reflexionsgitter für einen Wellenlängenbereich von 500 nm bis 1100 nm aufgebaut. Die übertragene Intensität betrug für in 1. Ordnung arbeitende Bausteine 24 %. Das Auflösungsvermögen beträgt derzeit 10 nm/25 µm. Die Kombination eines Spektrometerbausteins mit einer Photodiodenzeile und einem Fluidhandling-System eröffnet die Möglichkeit, ein miniaturisiertes Analysesystem herzustellen. Eine kostengünstige Massenfertigung der optischen Komponenten ist durch die entwickelte Mikroabformtechnik gewährleistet.

1. Einleitung

Das LIGA-Verfahren erlaubt sowohl in seinem ersten Prozeßschritt, der Röntgentiefenlithographie, als auch durch Mikroabformung die Herstellung von mikrooptischen Komponenten in Polymeren. Voraussetzung dafür ist sowohl die geringe Rauigkeit der LIGA-Seitenwände, die im Bereich von 30 nm liegt, als auch die geringe Dämpfung der eingesetzten Materialien im sichtbaren Spektralbereich.

Als Röntgenresist und Abformmaterial wird bei dem LIGA-Verfahren überwiegend Polymethylmethacrylat (PMMA) eingesetzt. Die Materialdämpfung, die an Bulkproben bestimmt wurde, liegt im Wellenlängenbereich von 600 nm bis 1100 nm bei etwa 0.2 dB/cm, wobei bei 900 nm ein Peak von 0.4 dB/cm auftritt. Diese Werte können aufgrund der kleinen Abmessungen von mikrooptischen Strukturen von wenigen Zentimetern durchaus toleriert werden. Für den Bereich oberhalb von 1100 nm, in dem PMMA deutliche Absorptionsbanden mit mehreren dB/cm aufweist, kann deuteriertes PMMA eingesetzt werden. Für dieses Material wurde über den Spektralbereich von 600 nm bis 1300 nm eine Dämpfung von ca. 0.1 dB/cm gemessen. Deuteriertes PMMA kann wie PMMA durch Röntgenstrahlung defektfrei strukturiert werden [1].

Unter Verwendung eines geeigneten 3-Schicht-Resistaufbaus, der in gleicher Strukturqualität mit Röntgentiefenlithographie strukturiert werden kann [2], können auch lichtleitende Strukturen realisiert werden. Ein Beispiel einer etwas kom-

plexeren Struktur ist ein Gitterspektrograph, dessen zentrale Struktur ein selbstfokussierendes, geblaztes Reflexionsgitter (siehe 2.) darstellt [2,3].

2. Aufbau des Gitterspektrographen

Abb. 1 zeigt den schematischen Aufbau des Gitterspektrographen, wie er im lichtleitenden Dreischicht-Resistaufbau gefertigt wird. Das von einer Multimode-Glasfaser (50/125 µm) in die Kernschicht des Dreischicht-Resistaufbaus eingestrahlte polychromatische Licht wird an dem Gitter, das mit Silber bzw. Gold besputtert ist, spektral aufgeteilt und auf die Fokuszeile abgebildet. Das spektral aufgeteilte Licht kann entweder mit verschiedenen Multimode-Fasern oder mit einer linearen Photodiodenzeile, die auf dem Baustein angebracht wird und in die das Licht durch Totalreflexion an einer um 45° geneigten Auskoppelzeile umgelenkt wird, ausgekoppelt werden. Die über die Diodenzeile ausgelesene Information steht an einer intelligenten Bus-Schnittstelle zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung. Da der Faserführungsschacht für die Einkoppelfaser, die Fokuszeile und das Reflexionsgitter in einem Prozeßschritt strukturiert werden, entfallen kostenintensive, aufwendige Justierarbeiten. Durch die Verbindung des Spektrometerbausteins mit einer Diodenzeile können hochauflösende, kompakte Gitterspektrographen für den sichtbaren und nahen Infrarot-Bereich gefertigt werden.

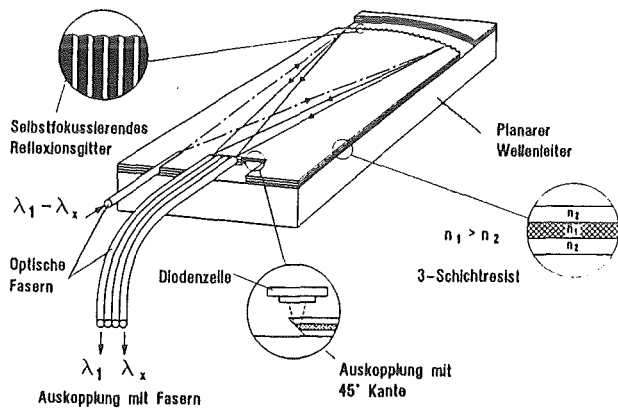


Abb. 1: Schematische Darstellung eines im Dreischicht-Resistaufbau hergestellten Spektrometerbausteins mit einem selbstfokussierenden Reflexionsgitter

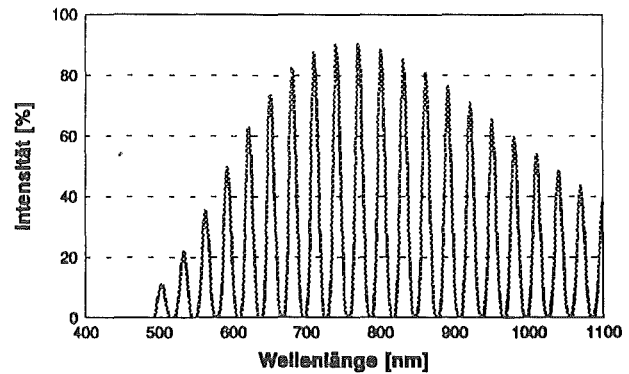


Abb. 2: Simulierte Intensitätsverteilung für ein Gitter, das in der 1. Ordnung auf eine Wellenlänge von 740 nm geblazt wurde

Bei der Auslegung des selbstfokussierenden Reflexionsgitters ist darauf zu achten, daß die Intensität in dem zu detektierenden Wellenlängenbereich möglichst hoch ist. Außerdem sollten für eine hohe Auflösung die Abbildungsfehler, wie Koma und sphärische Aberration, minimiert werden.

Um eine möglichst hohe Intensität in einer bestimmten Beugungsordnung zu erhalten, müssen die Gitterstufen des Reflexionsgitters so ausgerichtet werden, daß der an der Stufe reflektierte Strahl mit dem in die gewünschte Ordnung gebeugten Strahl zusammenfällt. Solche Gittertypen werden als geblazte Reflexionsgitter bezeichnet. Dies ist durch die freie Geometriewahl bei dem LIGA-Verfahren gewährleistet und ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen Herstellungsmethoden.

Bei einem selbstfokussierenden Reflexionsgitter gilt für den Beugungswinkel β und die Wellenlänge λ in einem Material mit dem Brechungsindex n folgende Beziehung:

$$\sin \alpha + \sin \beta = m \cdot \lambda / (g \cdot n) \quad \text{Gl. 1}$$

Wobei m der Beugungsordnung, α dem Gittereinfallswinkel und g den Gitterkonstanten entspricht. Für die Gitterstufenhöhe h ergibt sich für die Blaze-Wellenlänge λ_M folgende Gleichung:

$$h = m \cdot \lambda_M / (2 \cdot n) \quad \text{Gl. 2}$$

Eine optimale Anpassung der Winkel der Gitterstufen ist nur für eine Wellenlänge, der sogenannten Blaze-Wellenlänge, möglich. Aus diesem Grunde ergibt sich ein starker Abfall der Intensität mit zunehmendem Abstand von der Blaze-Wellenlänge. Wie aus Gl. 2 abgeleitet werden kann, ist der Abfall um so stärker je höher die Ordnung ist, in die geblazt werden soll und je geringer die Blaze-Wellenlänge ist. Abb. 2 zeigt den theoretischen Verlauf der Intensität für ein Gitter, das in 1. Ordnung auf eine Wellenlänge von 740 nm

geblazt ist. Bei einem Abstand von 140 nm von der Blazewellenlänge senkt sich die Intensität auf 50 % ab.

Üblicherweise erfolgt die Abbildung der Stirnfläche der Einkoppelfaser auf einen Punkt auf der Gitterfokuskurve. Für eine Reduzierung der Abbildungsfehler bei gleichzeitigem Wunsch nach einer linearen Fokuszeile, wie sie für eine hochaufgelöste Auskopplung der Signale unerlässlich ist, ist es notwendig, den Gittergrundkreis zu deformieren. Dies erfolgt durch eine Variation der Gitterkonstanten über dem gesamten Gitter. Auch hierbei kommt der Vorteil der freien Geometriewahl des LIGA-Verfahrens voll zum Tragen.

Die theoretischen Überlegungen gehen von ideal spitzen Stufenkanten aus. Aufgrund prozeßbedingter Grenzen werden immer leicht verrundete Gitterzähne entstehen. In Abb. 3 ist der Einfluß der Eckverrundung auf die Effizienz eines Gitters, das in die 2. Ordnung bei einer Gitterkonstanten von 3.5 μm geblazt wurde, dargestellt. Es ist zu erkennen, daß bei einer Eckverrundung von 0.9 μm die Effizienz des Gitters auf die Hälfte sinkt. Mit zunehmendem Eckverrundungsradius überlagert sich immer stärker der Einfluß des Sinusgitters, so daß der größte Anteil der Intensität in die 1. Ordnung gebeugt wird. Damit erscheint es günstiger, die Gitterbausteine in 1. Ordnung zu blazen. Wie aus Gl. 1 und Gl. 2 ersichtlich, muß in diesem Fall jedoch bei gleicher Auflösung eine wesentlich kleinere Gitterkonstante und Stufenhöhe gewählt werden. Beispielsweise beträgt für eine Blaze-Wellenlänge von 600 nm die Stufenhöhe 0.2 μm . Dies stellt sehr hohe Anforderungen sowohl an den Prozeß zur Herstellung der Masken als auch an die Röntgentiefenlithographie und verlangt eine Optimierung der im folgenden diskutierten Prozeßschritte.

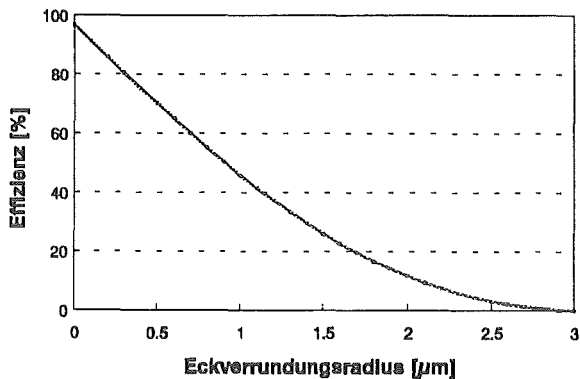


Abb 3: Einfluß der Eckverrundung auf die Effizienz des Gitters als Funktion des Eckverrundungsradius für ein Gitter in 2. Ordnung mit einer Gitterkonstanten von $3.5 \mu\text{m}$.

3. Prozeßoptimierung

Zur Strukturierung der Gitterbausteine wird eine Röntgenmaske verwendet, die durch Kopie einer sogenannten Röntgenzwischenmaske hergestellt wird. Sowohl bei der Herstellung der Röntgenzwischenmaske und der Röntgenmaske als auch bei der Strukturierung der Gitterbausteine muß sichergestellt sein, daß die feinen Gitterstrukturen mit möglichst geringer Eckverrundung übertragen werden.

Für die Herstellung der Röntgenzwischenmaske wird eine ca. $3 \mu\text{m}$ dicke Resistschicht mit Hilfe eines Elektronenstrahlschreibers strukturiert. Bei der Herstellung der Gitterstufen muß eine Strukturverrundung so weit wie möglich vermieden werden. Hier wirkt sich die Verwendung des am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) verfügbaren 100 keV -Elektronenstrahlschreibers positiv aus. Da neben Strukturverrundungen auch keine Riefen entlang der Gitterstufen auftreten dürfen, wurde eine Schreibstrategie entwickelt, die beiden Anforderungen gerecht wird. Abb. 4 zeigt die Absorberstruktur eines Gitters mit einer Stufenhöhe von 540 nm und einer Gitterkonstanten von $3,5 \mu\text{m}$. Wie zu erkennen, ist die Eckverrundung äußerst gering.

Bei der Röntgentiefenlithographie führen geringste thermische Verzüge zu einer Vergrößerung der Verrundung. Aufgrund der ungleichmäßigen Goldverteilung auf der Maske und der Tatsache, daß die Gitterbausteine auf thermisch isolierenden Grundplatten aufgebaut werden, ergeben sich sehr starke thermische Verzüge der Maske, wenn unter normalen Bedingungen und damit bei einem Leistungseinfall von ca. 0.25 Watt/cm^2 strukturiert wird.

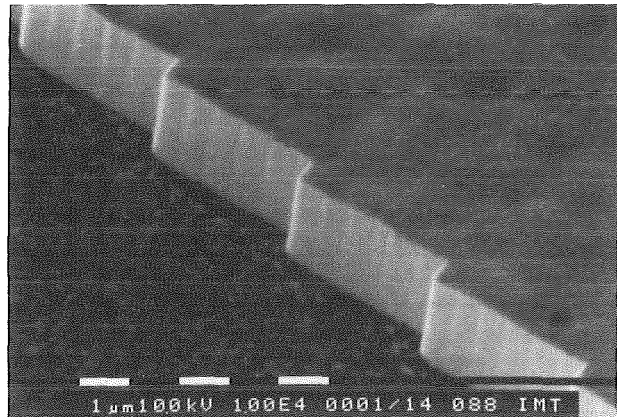


Abb. 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Absorberstruktur einer Zwischenmaske. Mit einer Gitterkonstanten von $3,5 \mu\text{m}$ und einer Stufenhöhe von 540 nm .

Es muß deshalb eine Leistungsreduktion vorgenommen werden. Als besonders günstig erwies es sich, die Leistung mit Hilfe von Kantenfiltern optimal zu reduzieren und damit den Anteil harter Strahlung, die wesentlich zu einer Erwärmung im Goldabsorber beiträgt, stärker herauszufiltern.

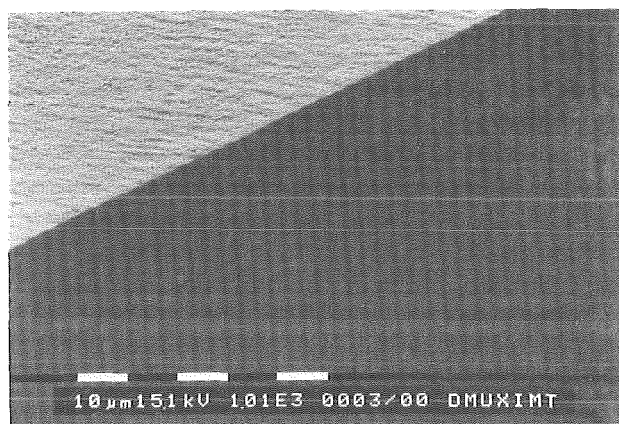


Abb. 5: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Reflexionsgitters in einem $125 \mu\text{m}$ dicken Dreischicht-Resistaufbau

Abb. 5 zeigt einen Ausschnitt des Reflexionsgitters in einem $125 \mu\text{m}$ dicken Dreischicht-Resistaufbau.

4. Experimentelle Ergebnisse verschiedener Gitterbausteine

In der Tab. 1 sind die wichtigsten Designdaten für verschiedene Gitterbausteine mit unterschiedlicher Auflösung und für unterschiedliche Spektralbereiche aufgeführt, die bisher hergestellt wurden.

	Baustein Nr. 1	Baustein Nr. 2	Baustein Nr. 3	Baustein Nr. 4
Gitterkonstante [μm]	2.5	0.9	3.5	4.8
Gitterstufenhöhe [μm]	0.256	0.257	0.544	0.640
Beugungsordnung	1	1	2	2
Spektralbereich [nm]	500-1100	400-1100	700-900	800-1100
Gitterauflösung [nm/ μm]	0.23	0.08	0.14	0.22
Bausteinlänge [mm]	17.2	18.6	18.2	16.8
Bausteinbreite [mm]	6.4	14.4	6.4	6.4
Maximalintensität [%]	24	noch nicht vermessen	16	22

Tab. 1: Charakteristische Designdaten verschiedener Gitterbausteine

4.1 Bestimmung der Effizienz

Um die Qualität der Spektrometer zu überprüfen, wird an jedem Spektrometer eine Messung mit monochromatischem Licht durchgeführt. Dazu wird Licht von einem Monochromator mit einer Multimode-Faser mit einem Kerndurchmesser von $50\ \mu\text{m}$ in einen Spektrometerbaustein eingekoppelt. Das Licht wird am Gitter spektral aufgeteilt und reflektiert. Mit Hilfe einer weiteren Multimodefaser mit einem Kerndurchmesser von $85\ \mu\text{m}$, die im Auskoppelschacht positioniert ist, wird das Signal aus dem Baustein ausgekoppelt und zu einem Detektor geführt. Die ausgekoppelte Intensität wird als Funktion der Wellenlänge gemessen. Nach jeder Messung wird die Auskoppelfaser um eine Faserbreite von $125\ \mu\text{m}$ verfahren. Um aus der gemessenen Intensität die Effizienz zu bestimmen, wird die gemessene Intensität auf die Intensität bei einer Stirn- Stirnkopplung der beiden Fasern bezogen.

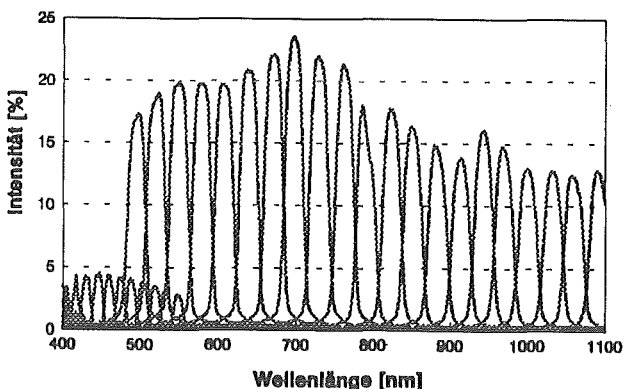


Abb. 6: In den einzelnen Spektralkanälen mit Glasfasern detektierte Intensität eines in 1. Ordnung auf eine Wellenlänge von $740\ \text{nm}$ geblazten Gitterspektrometers in Abhängigkeit von der Wellenlänge

In Abb. 6 ist das Ergebnis einer Messung für einen Gitterspektrographen der in 1. Ordnung arbeitet und auf eine Wellenlänge von $740\ \text{nm}$ geblazt ist (Gitterbaustein Nr. 1 aus Tab. 1), dargestellt.

Sowohl die Kanaltrennung als auch die Übersprechdämpfung stimmen sehr gut mit den theoretisch ermittelten Werten überein. Auch die gemessene Transmission des Bausteins von $24\ \%$ für die Blaze-Wellenlänge ist sehr gut.

Die gemessenen Intensitäten sind im Vergleich zu den Bausteinen in der 2. Ordnung, die größere Gitterkonstanten und größere Stufenhöhen haben, etwas besser. Dies ist, wie im theoretischen Teil bereits erläutert, darauf zurückzuführen, daß dem Stufengitter aufgrund der Eckverrundung ein Sinusgitter überlagert wird. Bestätigt wird diese Interpretation auch dadurch, daß die Abnahme der Intensität für stark von der Blaze-Wellenlänge abweichenden Wellenlängen geringer ist, als dies bei einem ideal geblazten Gitter der Fall wäre. Da die geringeren Stufenhöhen prozeßtechnisch noch realisierbar sind, werden die Vorteile der Gitter in 1. Ordnung auch experimentell offensichtlich. Zum einen sind die Gitter toleranter gegen Eckverrundungen, zum anderen kann mit ihnen ein größerer Wellenlängenbereich abgedeckt werden.

4.2 Vermessung mit Diodenzeile

Da eine 45° Kante mit optischer Qualität mit Hilfe der Röntgentiefenlithographie strukturiert werden kann [4], ist es möglich, das Licht durch Totalreflexion in vertikaler Richtung aus dem Baustein auszukoppeln. Damit ist eine einfache Möglichkeit der Anbindung einer Diodenzeile an den Baustein gegeben, indem die Diodenzeile einfach auf der Höhe der Fokuszeile auf den Baustein aufgelegt wird. Derzeit werden Diodenzeilen verwendet, die dem IMT von der Firma Hewlett Packard bereitgestellt wurden und die aus 1024 Einzeldioden mit einer Pixelgeometrie von $25 \times 500\ \mu\text{m}$ bestehen. Aufgrund der großen Pixellänge und der Anzahl der Einzeldioden ist die Positionierung der Zeile auf dem Baustein unkritisch. Mit Hilfe der Diodenzeile kann die Information über den gesamten Wellenlängenbereich in einigen Millisekunden erfaßt werden. In Abb. 7 sind die Ergebnisse dargestellt, die mit einem Bausteinerzielt wurden, der in der 1. Ordnung arbeitet und auf $740\ \text{nm}$ geblazt ist. Mit dem Baustein kann der Wellenlängenbereich von $500\ \text{nm}$ bis $1100\ \text{nm}$ abgedeckt werden.

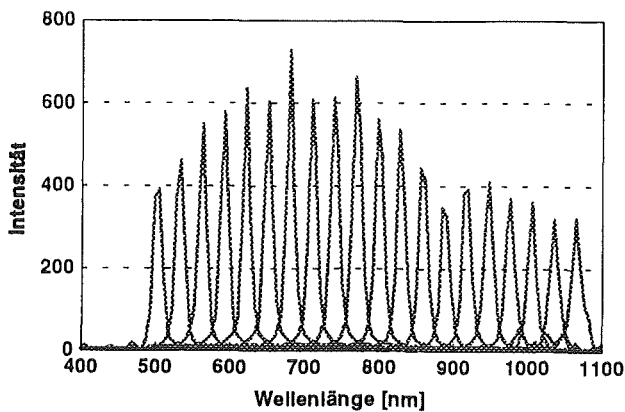


Abb. 7: In den einzelnen Spektralkanälen mit einer Diodenzelle detektierte Intensität eines in 1. Ordnung auf eine Wellenlänge von 740 nm geblazten Gitterspektrometers in Abhängigkeit von der Wellenlänge

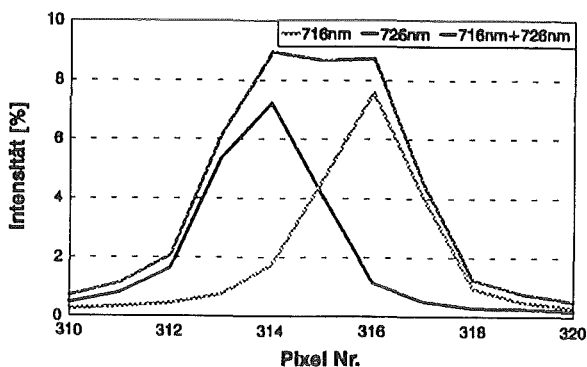


Abb. 8: Intensitätsverlauf von zwei Wellenlängen, die mit dem Gitterspektrometer in 1. Ordnung gerade noch aufgelöst werden können.

Abb. 8 zeigt den Intensitätsverlauf für zwei Wellenlängen, die gerade noch aufgelöst werden können. Der Abstand der Wellenlängen beträgt 10 nm. Dieser relativ große Wert rührt daher, daß die 50 µm breite Faserstirnfläche 1:1 auf zwei Diodenpixel abgebildet wird. Das theoretische Auflösungsvermögen beträgt 5.75 nm/Pixel.

Derzeit werden vielversprechende Konzepte untersucht, um die Auflösung zu steigern, wobei Werte von 2 nm/Pixel angestrebt werden. Hierzu sind einerseits Bausteine mit kleinerer Gitterkonstante in Bearbeitung, die damit eine größere Dispersion aufweisen. Andererseits werden Konzepte untersucht, mit denen der Durchmesser der Stirnfläche auf optischem Wege verkleinert abgebildet wird. Hierzu zählen direkt beim Strukturieren erzeugte Blenden und abbildende Elemente.

Erste Ergebnisse hierzu, die schließlich das weitreichende Potential der LIGA-Gitterspektrographen aufzeigen, sind gegen Ende dieses Jahres zu erwarten.

4.3 Erste Versuche zur Abformung der Gitterbausteine

Für eine kostengünstige Massenfertigung der Gitterbausteine muß die Abformtechnik qualifiziert werden. Wichtigste Fragen sind dabei, inwieweit die feinen Gitterstrukturen durch den Abformprozeß übertragen werden können und ob Mehrschichtaufbauten für den Abformprozeß geeignet sind.

In ersten Abformversuchen, die an einem Einschichtresistaufbau durchgeführt wurden, konnte gezeigt werden, daß für die Abformung die Gitterstruktur kein prinzipielles Problem darstellt und sauber übertragen werden kann. Messungen wurden an abgeformten Bausteinen, bei denen sich noch eine Restschichtdicke von 20 µm ergab, durchgeführt. In Abb. 9 ist die Transmission eines Bausteins, der für die 1. Ordnung mit einer Gitterkonstanten von 2.5 µm ausgelegt wurde, dargestellt. Es ergeben sich Werte für die Transmission im Bereich von bis zu 8 %. Die hohe Transmission spiegelt die gute Qualität der Zahnstruktur des Reflexionsgitters wieder.

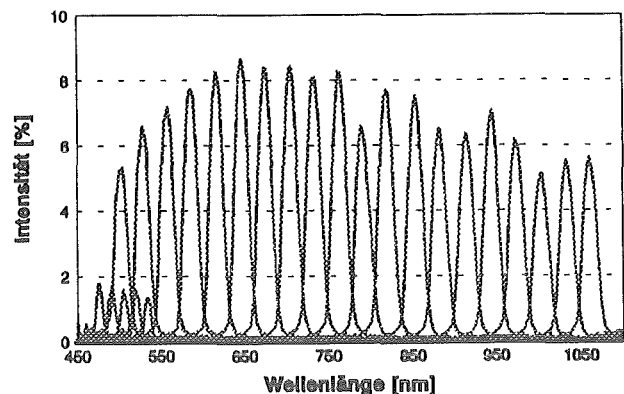


Abb. 9: In den einzelnen Spektralkanälen detektierte Intensität eines abgeformten Gitterspektrometers in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Eine weitere Steigerung der Intensität konnte durch die Abformung eines Zweischichtresistaufbaus erreicht werden.

Mit diesen Versuchen wurden erste Ansatzpunkte für die Abformung von Mehrschichtaufbauten erarbeitet. Um die Transmission der Bausteine weiter zu steigern, sind noch weitere Optimierungsarbeiten und Prozeßmodifikationen notwendig. Im Hinblick auf eine wirtschaftliche

Fertigung der Bausteine durch Abformung muß auch ein geeignetes Konzept für die kostengünstige und effiziente Herstellung der Mehrschichtaufbauten erarbeitet werden.

5. Diskussion

Es wurde gezeigt, daß es möglich ist, Gitterspektrometer mit Hilfe der Röntgentiefenlithographie sowie durch Abformtechniken für einen Spektralbereich von 500 nm bis hin zu 1100 nm herzustellen. Eine weitere Steigerung des Auflösungsvermögen ist durch eine Reduzierung des Querschnittes der Einkoppelfasern möglich. Dazu werden derzeit verschiedene Varianten untersucht. Bei der Abformung werden Konzepte zur Abformung von Mehrschichtaufbauten untersucht, um die Intensität auf die Werte der Bausteine, die durch Röntgenlithographie strukturiert wurden, zu steigern.

Literatur

- [1] J. Götttert, J. Mohr, C. Müller: Mikrooptische Komponenten aus PMMA, hergestellt durch Röntgentiefenlithographie Werkstoffe der Mikrotechnik -Basis für neue Produkte-, VDI/VDE Gesellschaft Feinwerktechnik, Karlsruhe (Okt. 91) Tagungsbericht 933, S. 249-263.
- [2] B. Anderer, W. Ehrfeld, D. Münchmeyer: Development of a 10-Channel Wavelength Division Multiplexer/Demultiplexer Fabricated by an X-Ray Micromachining Process. Int. Congress on Optical Science and Engineering, Sept. 19-23, 1988, Hamburg, Proc. SPIE Micro-Optics, 1014 (1988), pp. 17-24.
- [3] C. Müller, J. Mohr: A Microspectrometer Fabricated by the LIGA Process, June. 7-10, 1993, Yokohama, Proc. Transducers.
- [4] J. Götttert, J. Mohr, C. Müller: Examples and Potential Applications of LIGA Components in Microoptics Workshop "Integrierte und Mikrooptik mit Polymeren", Mainz, 12.-13. März 1992 Teubner-Taschenbuch der Physik.

Fluidische Mikrostrukturen in LIGA-Technik am Beispiel fluidischer Elemente

J. Vollmer, H. Hein, W. Menz, F. Walter

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Im Bereich der Mikroaktorik bieten fluidische Prinzipien gute Möglichkeiten, relativ große Kräfte auszuüben. Zur Steuerung von Fluidströmen, mit denen ein fluidischer Aktor betrieben werden kann, werden am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) spezielle Typen fluidischer Elemente, die bistabilen Wandstrahlelemente, untersucht. In bistabilen Wandstrahlelementen kann ein Fluidstrahl aufgrund des Coanda-Effektes an einer von zwei Haftwänden haften. Der Strahl kann durch einen kurzzeitigen Steuerimpuls von einer Position in die andere geschaltet werden.

Mit Mitteln der LIGA-Technik wurden solche bistabilen Wandstrahlelemente mit Düsenweiten von minimal $d = 30 \mu\text{m}$ und Höhen bis zu $h = 500 \mu\text{m}$ hergestellt. Die Funktion der Elemente wurde mit den Gasen Argon, Stickstoff und Kohlendioxid nachgewiesen und der Einfluß der Düsenweite und der Elementhöhe wurde untersucht. Zum Betreiben der Elemente sind Drücke $p_v = 300 \text{ hPa}$ nötig. Die Elemente können mit Steuerdrücken $p_e = 15 \text{ hPa}$ geschaltet werden und die Ausgangsdrücke liegen bei $p_a = 40 \text{ hPa}$.

1. Einleitung

Die Herstellung von Mikrobauteilen hat in den letzten Jahren einen großen Aufschwung erfahren. Von den verschiedenen Bauteilen, die hergestellt werden, sind besonders die Mikrosensoren und die Mikroaktoren interessant, da sie zusammen mit einer intelligenten Signalverarbeitung, einem Mikrochip, die Realisierung eines kompletten Mikrosystems erlauben.

Während es für Mikrosensoren schon viele Beispiele gibt, ist der Bereich der Mikroaktorik noch nicht weit ausgebaut. Das liegt u. a. daran, daß kleine Bauteile auch nur kleine Kräfte ausüben können. Hier bieten fluidische Prinzipien gute Möglichkeiten, dennoch relativ große Kräfte zu erzeugen, da die Leistungsdichte fluider Medien relativ groß sein kann. Am IMT werden zur Steuerung von Fluidströmen, mit denen ein fluidischer Mikroaktor betrieben werden kann, spezielle Typen fluidischer Elemente, die bistabilen Wandstrahlelemente, untersucht [1]. In diesem Bericht werden die mit dem LIGA-Verfahren hergestellten bistabilen Wandstrahlelemente vorgestellt. Die Funktion der Elemente mit den Gasen Argon, Stickstoff und Kohlendioxid wird nachgewiesen, der Einfluß der geometrischen Abmessungen auf die Elementeneigenschaften wird vorgestellt.

2. Funktionsweise eines bistabilen Wandstrahlelementes

Fluidische Elemente (=Fluidiks) sind Bauglieder der Signaltechnik, in denen fluide Medien strömen, also Gase oder Flüssigkeiten [2]. Hier werden spezielle Typen von fluidischen Elementen, die bistabilen

Wandstrahlelemente, zur Steuerung von Fluidströmen benutzt.

Ein bistabiles Wandstrahlelement (WSE) besteht aus einer strukturierten Platte, die von zwei weiteren Platten abgedeckt wird. In Abb. 1 ist der innere Teil der strukturierten Platte von oben gesehen schematisch dargestellt.

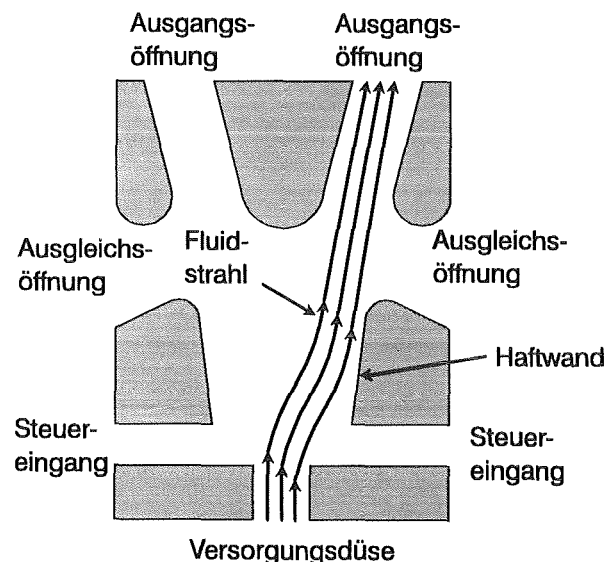


Abb. 1: Prinzip eines bistabilen Wandstrahlelementes (WSE), Haften eines ebenen Freistrahles durch den Coanda-Effekt (Skizze).

Aus einer Versorgungsdüse, an der ein Versorgungsdruck p_v angelegt wird, tritt ein Strahl des Fluides in einen Raum. Aufgrund der Viskosität des Fluides reißt der Strahl aus der Umgebung weiteres

Fluid mit sich. Das mitgerissene Fluid strömt z. B. durch die Ausgleichsöffnungen nach.

Durch kleine Fluktuationen gelangt der Strahl sofort in eine asymmetrische Lage. In dieser Lage kann, beengt durch die begrenzende Wand, auf der einen Seite nicht soviel Fluid nachströmen, wie der Strahl mit sich reißt. Es bildet sich ein Unterdruck, der den Strahl an die Haftwand zieht. Diesen Haft-effekt bezeichnet man als Coanda-Effekt.

Der Strahl kann durch Anlegen eines kurzzeitigen Druckimpulses an den entsprechenden Steuereingang von einer Position in die andere geschaltet werden. Entsprechend den zwei Strahlpositionen sind Ausgangsöffnungen angebracht, an welchen ein Druck bzw. ein Fluß nutzbar ist. Damit bei verschlossenen Ausgängen die Strahlposition im Haft-raum stabil bleibt, sind Ausgleichsöffnungen vorhanden, durch die das Fluid abfließen kann.

3. Bistabile Wandstrahlelemente in LIGA-Technik

Zur Herstellung der vorgestellten bistabilen WSE wurde die Geometrie eines makroskopischen Elementes aus der Literatur entnommen [3] und auf Düsenweiten von $d = 30 \mu\text{m}$ und $d = 60 \mu\text{m}$ verkleinert. Mit Mitteln der LIGA-Technik [4] wurden bistabile WSE in PMMA (Plexiglas) mit Höhen im Bereich $h = 100 \mu\text{m} \dots 500 \mu\text{m}$ hergestellt. In Abb. 2 ist ein REM-Foto des Innenbereiches eines solchen Elementes zu sehen. Man kann sehen, daß sich das LIGA-Verfahren gut für die Herstellung von Mikrostrukturen mit einer freien lateralen Form und senkrechten Wänden eignet.

Ausgang Ausgleichs- Ausgang
öffnung öffnung

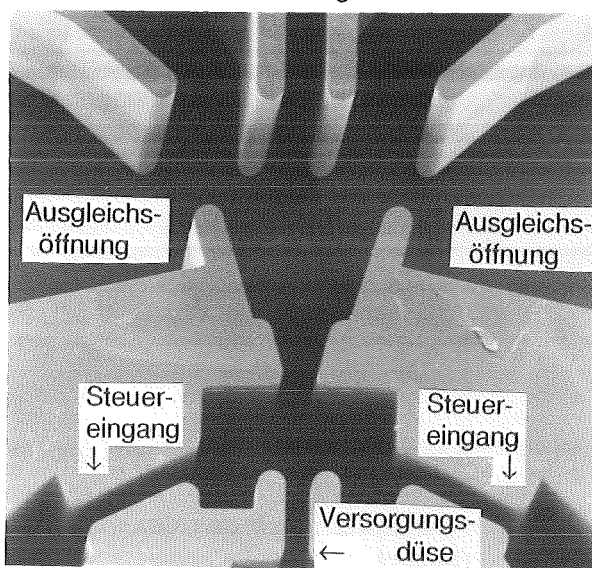


Abb. 2: Bistabiles WSE, das als fluidischer Mikro-aktor eingesetzt werden kann. In LIGA-Technik aus PMMA (Polymethylmethacrylat) hergestellt, Höhe $500 \mu\text{m}$, Düsenweite $30 \mu\text{m}$. Werkbild KfK, Karlsruhe

4. Experimentelle Ergebnisse

Die Funktion der hergestellten bistabilen WSE wurde mit verschiedenen Gasen nachgewiesen. Dazu wurde ein Versorgungsdruck p_v an die Versorgungsdüse angelegt (alle Drücke in diesem Beitrag sind Differenzdrücke zur Atmosphäre). Der Steuerdruck p_e an einem der beiden Steuereingänge wurde verändert und der Ausgangsdruck p_a am Ausgang diagonal gegenüber dem betrachteten Steuereingang wurde gemessen. In Abb. 3 ist der Ausgangsdruck p_a in Abhängigkeit des Steuerdruckes p_e für Stickstoff als Fluid dargestellt.

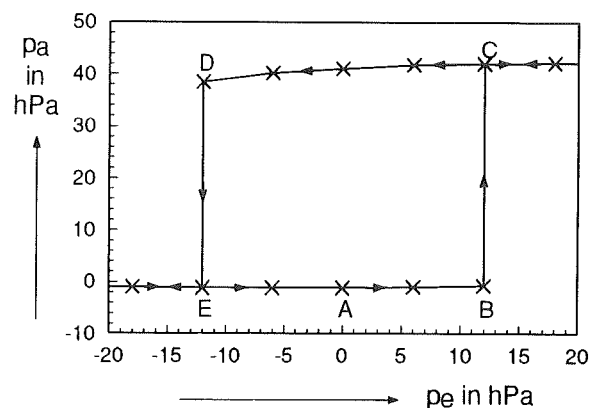


Abb. 3: Schaltverhalten eines bistabilen WSE, dargestellt ist der Ausgangsdruck p_a in Abhängigkeit vom Steuerdruck p_e ($h = 500 \mu\text{m}$, $d = 32 \mu\text{m}$, $p_v = 300 \text{ hPa}$, Fluid: Stickstoff).

In Punkt A des Diagrammes haftet der Strahl an der Seite des betrachteten Steuereinganges, der Ausgangsdruck am gegenüberliegenden Ausgang ist etwa Null. Erhöht man p_e , so ändert sich nichts, bis Punkt B erreicht wird. Dort schaltet der Strahl in die andere Position, der Ausgangsdruck p_a erhöht sich wesentlich (wir sind nun in Punkt C). Erhöht man p_e weiter, so ändert sich nichts, der Strahl bleibt stabil. Auch bei Erniedrigen von p_e bleibt der Strahl stabil, bis Punkt D erreicht wird. Dort wird der Strahl durch den Unterdruck am Steuereingang in seine ursprüngliche Position geschaltet (Punkt E). Die Dauer, die der Steuerdruck zum Schalten des Strahles angelegt werden muß, wird auf unter 1 msec geschätzt.

Der bistabile Zustand, bei dem das oben beschriebene Verhalten beobachtet werden kann, ist erst ab einem bestimmten Versorgungsdruck p_{v}^{stab} zu beobachten. In Tab. 1 ist p_{v}^{stab} und die aus dem Fluß an diesem Punkt berechnete mittlere Geschwindigkeit v^{stab} für die Gase Argon, Stickstoff und Kohlendioxid dargestellt ($h = 250 \mu\text{m}$). Die Geschwindigkeiten v^{stab} sind relativ groß, in Tab. 1 sind zum Ver-

Gas	Dichte ρ in kg/m ³	Viskosität η in $\mu\text{Pa}\cdot\text{sec}$	p_v^{stab} in hPa	v^{stab} in m/sec	v^{schall} in m/sec
N ₂	1.15	17.8	260	115	351
Ar	1.63	22.8	300	105	322
CO ₂	1.81	14.8	165	75	273

Tab. 1: Versorgungsdruck p_v^{stab} am Stabilitätsbeginn für verschiedene Gase ($h = 250 \mu\text{m}$, $d = 32 \mu\text{m}$).

gleich die Schallgeschwindigkeiten in den verschiedenen Gasen angegeben.

Die Abhängigkeit der Geschwindigkeit v^{stab} von der Elementhöhe wurde für Elemente mit Düsenweiten $d = 30 \mu\text{m}$ und $d = 60 \mu\text{m}$ mit Stickstoff als Fluid untersucht. In Abb. 4 ist die Machzahl $M^{\text{stab}} = v^{\text{stab}} / v^{\text{schall}}$ in Abhängigkeit der Elementhöhe dargestellt. Man sieht, daß M^{stab} mit größer werdender Düsenweite d sinkt. Für $d = 30 \mu\text{m}$ ($60 \mu\text{m}$) ändert sich M^{stab} nur wenig mit h für $h > 170 \mu\text{m}$ ($250 \mu\text{m}$). Für $h < 170 \mu\text{m}$ ($250 \mu\text{m}$) wächst M^{stab} . Bei dem Element mit $d = 60 \mu\text{m}$ und $h = 100 \mu\text{m}$ konnte keine Stabilität beobachtet werden.

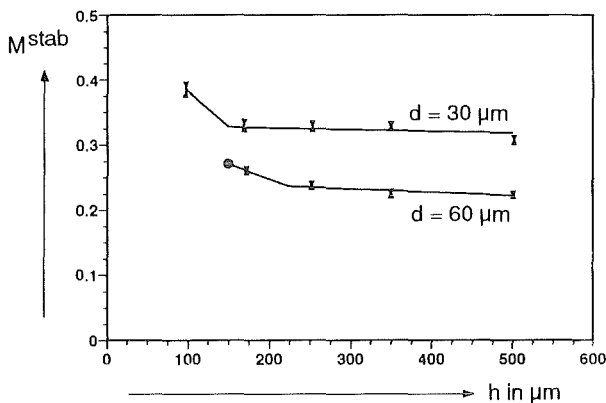


Abb. 4: Machzahl M^{stab} am Stabilitätsbeginn für Elemente verschiedener Höhe h und Düsenweite d (Fluid: Stickstoff, ● es wurde keine Stabilität für kleinere h beobachtet).

Man kann sich nun fragen, ob der Strömungszustand am Stabilitätsbeginn für verschieden skalierte Elemente als ähnlich bezeichnet werden kann. Ähnlich heißt hier, daß es Ähnlichkeitszahlen gibt, die gleiche Werte annehmen. Im betrachteten Fall, bei variabler Düsenweite d und variabler Strahlgeschwindigkeit v , betrachten wir die Machzahl M und die Reynolds-Zahl Re (Gl. (1)) als Ähnlichkeitszahlen. Es ist üblich, die Düsenweite d als geometri-

schen Parameter bei der Definition der Reynoldszahl von bistabilen WSE zu nehmen.

$$Re^{\text{stab}} = \rho / \eta \cdot d \cdot v^{\text{stab}} \quad (1)$$

mit ρ Dichte des Fluids

η Viskosität des Fluids

d Weite der Versorgungsdüse

Wie in Abb. 4 zu sehen ist, ist die Machzahl am Stabilitätsbeginn abhängig von der Düsenweite d . Die Reynolds-Zahl hat bei $d = 30 \mu\text{m}$ (mit $h > 250 \mu\text{m}$) den Wert $Re^{\text{stab}} = 240 \pm 10$ und bei $d = 60 \mu\text{m}$ ist $Re^{\text{stab}} = 320 \pm 20$. Weder Machzahl noch Reynoldszahl haben gleiche Werte am Stabilitätspunkt, der Strömungszustand am Stabilitätsbeginn für verschieden skalierte Elemente kann also nicht als ähnlich bezeichnet werden.

Das Schaltverhalten der Elemente wurde mit Argon, Stickstoff und Kohlendioxid für verschiedene Versorgungsdrücke p_v untersucht. Der Steuerdruck p_e^s , der zum Schalten des Strahles nötig ist, wurde für verschiedene Versorgungsdrücke p_v gemessen. In Abb. 5 sind die Ergebnisse aufgetragen. Man erkennt, wie p_e^s mit wachsendem p_v steigt, dabei gibt es zwei Bereiche mit unterschiedlicher Steigung von p_e^s .

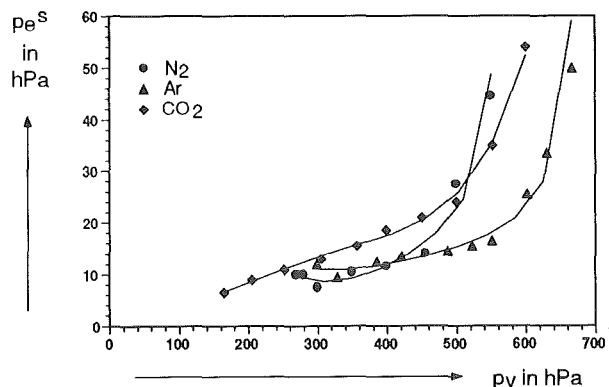


Abb. 5: Schaltdruck p_e^s in Abhängigkeit vom Versorgungsdruck p_v für verschiedene Gase (Die Ausgänge sind geschlossen, $h = 250 \mu\text{m}$, $d = 32 \mu\text{m}$).

Die Abhängigkeit des Ausgangsdruckes p_a am beschalteten Ausgang vom Versorgungsdruck p_v wurde für die verschiedenen Gase untersucht. In Abb. 6 sind die Ergebnisse dargestellt. Man erkennt, wie der Ausgangsdruck linear mit dem Versorgungsdruck ansteigt. Der Druckrückgewinn p_a / p_v liegt im Bereich 10 %.

Zu bemerken ist, daß die Ausgangsdrücke in Abb. 6 bei geschlossenen Steuereingängen gemessen wurden. In diesem Fall sind die Drücke etwa 20 % niedriger als bei geöffneten Steuereingänge.

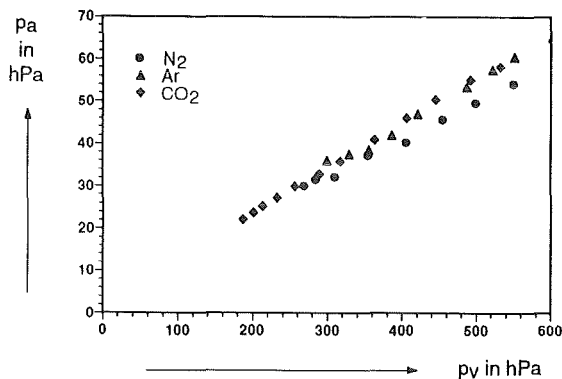


Abb. 6: Ausgangsdruck p_a am beschalteten Ausgang in Abhängigkeit vom Versorgungsdruck p_v für verschiedene Gase (Steuereingänge geschlossen, $h = 250 \mu\text{m}$, $d = 32 \mu\text{m}$).

Der Fluß F_a aus dem beschalteten Ausgang liegt für ein mit Stickstoff betriebenes Element ($h = 500 \mu\text{m}$, $d = 32 \mu\text{m}$, $p_v = 260 \text{ hPa}$) bei $F_a = 2.5 \text{ cm}^3/\text{sec}$. Leitet man diesen Fluß auf einen Kolbenzylinder von 1 cm Durchmesser, so kann man damit Kräfte im Bereich 10^{-1} N erreichen. Die Kolbengeschwindigkeit beträgt dabei einige cm/sec. Aufgrund der Fluideigenschaften können mit dem mikroskopischen bistabilen WSE sogar makroskopische Bauteile gesteuert werden.

Der Flußrückgewinn, d. h. das Verhältniss von Ausgangsfluß zu Versorgungsfluß beträgt etwa 150 %. Das liegt daran, daß der Fluidstrahl aufgrund seiner Viskosität Fluid mit sich reißt, welches durch die Ausgleichöffnungen und die Steuereingänge nachfließen kann.

Die bistabilen WSE können wegen ihres bistabilen Verhaltens zum Aufbau von logischen Schaltungen benutzt werden. Um solche Schaltungen herzustellen, ist es wichtig zu wissen, wieviel weitere Elemente mit einem einzigen Element geschaltet werden können. Die Anzahl der Elemente, die mit einem Element geschaltet werden können, bezeichnet man als Fan-out. Der Fan-out von bistabilen WSE in LIGA-Technik ($h = 500 \mu\text{m}$, $d = 32 \mu\text{m}$, $p_v = 330 \text{ hPa}$) ist gleich acht, was mit dem Fan-out makroskopischer Elemente vergleichbar ist.

5. Theoretische Ergebnisse

Der Strömungszustand innerhalb eines bistabilen WSE wurde mit dem Finite-Elemente-Programm FLOTRAN simuliert [5]. Dabei stimmten die simulierten Werte, z. B. die Flüsse durch die verschiedenen Öffnungen, bis auf 10 % mit den experimentell gemessenen Werte überein. Die Simulationen zeigen, daß die Temperatur innerhalb der Elemente konstant ist ($\Delta T / T < 0.5\%$).

Die Stromlinien innerhalb eines bistabilen WSE sind in Abb. 7 dargestellt. Man erkennt deutlich, wie der Strahl an der oberen Haftwand haftet und in der oberen Ausgang trifft.

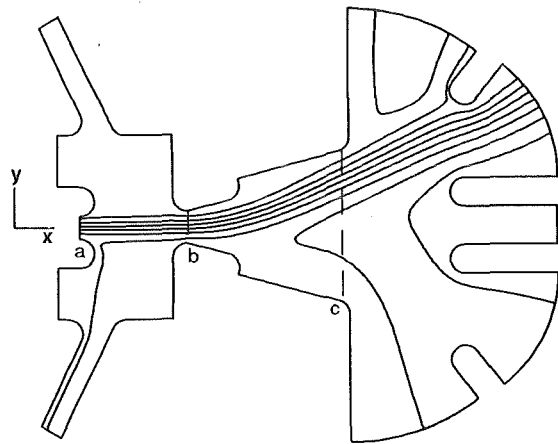


Abb. 7: Stromlinien innerhalb eines bistabilen WSE simuliert mit dem FEM-Programm FLOTRAN ($d = 30 \mu\text{m}$, $p_v = 300 \text{ hPa}$, 2-D-Simulation).

Die Geschwindigkeitsprofile an verschiedenen Stellen innerhalb des bistabilen WSE sind in Abb. 8 dargestellt. Dort ist der Betrag der Geschwindigkeit, multipliziert mit dem Vorzeichen der x-Komponente aufgetragen; bei einem negativen Wert ist eine Rückströmung vorhanden. Die maximale Geschwindigkeit liegt etwa im Bereich $v = 155 \text{ m/sec}$. Die Strömung in einem bistabilen WSE hat ein ausgeprägtes Geschwindigkeitsprofil. Man erkennt, wie die Maximalgeschwindigkeit stömabwärts abnimmt und wie sich das Geschwindigkeitsprofil verbreitert. Am Ende der Haftwand (c) ist der Strahl zur oberen Haftwand abgelenkt, dort ist im unteren Bereich ($y < 0$) eine Rückströmung erkennbar.

Mit diesen Simulationen soll eine Geometrieoptimierung erreicht werden, z. B. soll der Druckrückgewinn von 10 % verbessert werden. Aus Abb. 7 kann schon ein erster Ansatz dazu gewonnen werden. Dort ist zu sehen, daß der Strahl nicht mittig in den oberen Ausgang trifft; dadurch werden unnötige Verluste verursacht, die durch eine leicht veränderte Geometrie vermieden werden können.

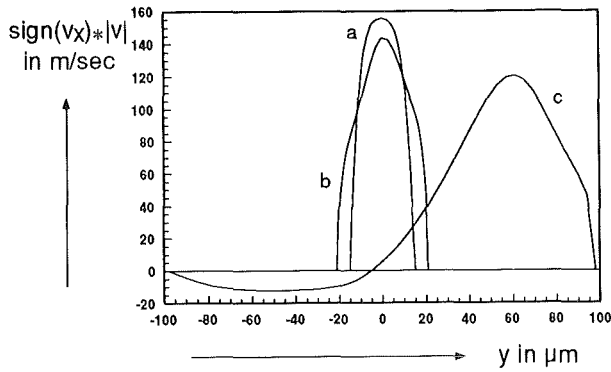


Abb. 8: Geschwindigkeitsprofile $\text{sign}(v_x) \cdot |v|$ an verschiedenen Stellen innerhalb eines bistabilen WSE, vgl. Abb. 7 ($d = 30 \mu\text{m}$, $p_v = 300 \text{ hPa}$, 2-D-Simulation).

6. Zusammenfassung und Ausblick

Bistabile Wandstrahlelemente mit Düsenweiten von minimal $d = 30 \mu\text{m}$ und Höhen bis zu $h = 500 \mu\text{m}$ wurden mit Mitteln der LIGA-Technik, hergestellt. Die Elemente arbeiten mit den Gasen Argon, Stickstoff und Kohlendioxid bei Drücken von etwa $p_v = 300 \text{ hPa}$. Mit diesen Elementen kann der Fluß zum Betrieb makroskopischer Bauteile gesteuert werden.

In weiteren Arbeiten soll eine elektrische und optische Steuerung dieser bistabilen WSE realisiert werden. Solche Elementekönnen dann ein Interface zwischen der Mikroelektronik und der Fluidtechnologie sein. Es soll eine Anwendung der bistabilen WSE in der Medizintechnik untersucht werden.

Literatur

- [1] A. Schwarz, B. Schmidt, P. Bley, H. Hein, W. Menz, J. Vollmer, "Techniken zur Entwicklung fluidischer Mikroaktorelemente", 10. Aachener Fluidtechnisches Kolloquium, 17.-19. März 1992
- [2] A. W. Rechten, "Fluidik", Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 1976
- [3] G. König, D. Lang, "On features of new wall-attachment module devices", 4. Int. Fluidics Conf., Paper B5, Varna, 14.-18. Okt. 1972
- [4] P. Bley, J. Göttert, M. Harmening, M. Himmelhaus, W. Menz, J. Mohr, C. Müller, U. Wallrahe, "The LIGA-Process for the fabrication of micromechanical and microoptical components", Micro System Technologies '91, 2nd Int. Conf. Micro, Electro, Opto, Mechanic Systems and Components, Krahn R., Reichl H. eds, VDE-Verlag GmbH, Berlin 1991, Seite 302ff
- [5] FLOTRAN User's Manual, Swanson Analysis Systems Inc., Houston, PA, USA, 1992

Entwicklungen und Erweiterungen der Strukturierungsmöglichkeiten in der Röntgentiefenlithographie

A. El-Kholi, W. Bacher, B. Menz, J. Mohr, R. Stransky *

Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Mikrostrukturtechnik,
* Universität Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau

Zusammenfassung

Das LIGA-Verfahren ermöglicht, mit Hilfe von Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung und Abformung durch Schattenproduktion Mikrostrukturen herzustellen, die beliebige laterale Abmessungen, Strukturhöhen von mehreren hundert Mikrometern, Detailstrukturen und Strukturgenauigkeiten im Submikrometerbereich aufweisen. Durch Modifikation des Bestrahlungsprozesses werden Mikrostrukturen mit geneigten Seitenwänden durch Bestrahlung unter einem frei wählbaren Winkel, konische Mikrostrukturen durch doppelte Bestrahlung, Mikrostrukturen mit unterschiedlicher Querschnittsgeometrie über der Strukturhöhe durch Verwendung von Substraten die bereits eine Topographie enthalten und gestufte Mikrostrukturen durch Kombination von Röntgentiefenlithographie und Abformung hergestellt.

Durch das Aufkleben von Kunststoffschichten auf metallischen Substraten können Mikrostrukturen mit deutlich verbesserter Strukturqualität hergestellt werden. Durch Ultraschallentwicklungen kann bei kleinen Strukturgeometrien deutlich tiefer entwickelt werden.

1. Einleitung

Das am Institut für Mikrostrukturtechnik des Kernforschungszentrums Karlsruhe entwickelte LIGA-Verfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen aus Kunststoffen, Metallen und Keramiken beruht im wesentlichen auf den drei Verfahrensschritten Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung und Abformung [1].

Im ersten Schritt des LIGA-Verfahrens, wird eine röntgenempfindliche Kunststoffschicht (Resist), die auf einem Substrat mit metallischer Oberfläche aufgebracht ist, durch eine Röntgenmaske bestrahlt, wodurch ein exaktes Abbild der Maske in den Kunststoff übertragen wird. Die bestrahlten Bereiche werden anschließend mit einem organischen Lösungsmittelgemisch in einem Tauchverfahren freigelegt.

Als strukturbegrenzende Größen erweisen sich dabei prozeßtechnische Probleme wie die Spannungsrißbildung insbesondere im Falle dicker Resistschichten und bei Strukturen mit spitzen Strukturecken oder der diffusionsbegrenzte Transport aus engen und tiefen Strukturen, der ein sauberes Entwickeln dieser Strukturen verhindert. Im vorliegenden Bericht werden Verfahrensvariationen vorgestellt, die dazu beitragen, die Strukturgrenzen zu erweitern, indem die genannten Schwierigkeiten vermindert werden. Desweiteren werden Verfahrensvarianten beschrieben, die es erlauben, Mikrostrukturen mit variierenden Seitenwänden entlang der Strukturhöhe herzustellen.

2. Verbesserungen des Strukturierungsprozesses

2.1 Kleben von PMMA-Kunststoffschichten

Zur Herstellung der Kunststoffschicht wird üblicherweise ein Gießharz bestehend aus Polymethylmethacrylat (PMMA) gelöst in Methylmethacrylat (MMA), direkt auf dem Substrat ausgehärtet. Der während des Aushärtungsprozesses auftretende Polymerisationsschwind führt zu Schwankungen in der Resisthöhe und zu erheblichen inneren Spannungen. Weitere Eigenspannungen werden in den Resist durch den anschließenden Temperprozeß aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Resist und Metall eingebracht. Wie Untersuchungen zeigten, liegen die Eigenspannungen bei 29 N/mm^2 , was etwa 30 % der Zugfestigkeit von PMMA entspricht. Diese Eigenspannungen führen unter Einwirkung des Entwicklers zu den störenden Spannungsrissen in den Resiststrukturen.

Beim Aufkleben von Resistfolien können die herstellungsbedingten Eigenspannungen der Resistfolien durch vorheriges Tempern abgebaut werden. Es treten somit nur die durch die Klebeschicht verursachten Spannungen auf. Aus diesem Grund wurde das Aufkleben von röntgenempfindlichen Resistfolien aus PMMA auf Metallsubstraten mit Klebstoffen auf Basis der Gießharze zur Herstellung von Mikrostrukturen nach dem LIGA-Verfahren entwickelt [2].

Die Verwendung des Gießharzes als Klebstoff hat den Vorteil, daß die Röntgenempfindlichkeit identisch ist zu den bisher verwendeten Resisten, sowie zu den Resistfolien. Wie Untersuchungen zeigen, führt ein Anpreßdruck von 36 bar, wie er zum Kleben aufgewendet wird, zu Eigenspannungen von nur 1.1 N/mm² in der gesamten Resistschicht. Durch den Polymerisationsschwund während des Aushärtvorgangs treten in der Klebeschicht Eigenspannungen von ca. 19 N/mm² auf. Die wesentlich geringeren Eigenspannungen zeigen sich auch daran, daß sich z.B. Siliziumwafer wesentlich weniger durchbiegen als beim Gießprozeß. Außerdem steigt die Durchbiegung nicht mit zunehmender Resistdicke an.

Die realisierbare Klebeschichtdicke hängt im wesentlichen von der Fügeflächengeometrie, dem Anpreßdruck und der Klebstoffviskosität ab. Bei Verwendung unverdünnter Klebstoffe (200-1500 mPas), können bei Resistabmessungen von 30x70 mm² und einem Anpreßdruck von 12 bar minimale Klebeschichtdicken von 10-30 µm für Gießharze unterschiedlicher Zusammensetzungen erreicht werden. Für eine mit dem Gießharz Plexidon M727 und 12 bar geklebte 500µm dicke Folie, beträgt die Schwankung in der Resisthöhe weniger als 6,5µm, während sie im Vergleich dazu für eine 500µm hohe, gegossene Resistschicht bis zu 50µm beträgt. Die Ergebnisse zeigen, daß insbesondere bei dicken Proben der Klebeprozess Vorteile gegenüber dem Gießprozeß aufweist.

Durch systematische Variation der Klebstoffzusammensetzung und des Anpreßdrucks wurde ein Klebprozeß entwickelt, bei dem Blasenbildung und Angriff unbestrahlter Bereiche in der Klebeschicht vermieden und hohe Haftung bei gleichzeitiger Vermeidung von Spannungsrißkorrosion erzielt werden konnte.

Mit Resistschichten, die nach dieser Methode hergestellt wurden, konnten Mikrostrukturen mit erheblich verbesserter Strukturqualität erzeugt werden, die versprechen, daß Mikrostrukturen bis zu Höhen von 1000 µm spannungsrißfrei herstellbar sind.

2.2 Ultraschallentwicklung

Im zweiten Schritt des LIGA-Verfahrens werden die bestrahlten und anschließend herausgelösten Bereiche galvanisch aufgefüllt, wobei die metallische Oberfläche des Substrates als Galvanikstartschicht fungiert.

Für eine defektfreie Galvanik muß eine rückstandsfreie Entwicklung gewährleistet werden. Sowohl auf der Galvanikstartschicht als auch an den Strukturwänden dürfen keine Resistrückstände verbleiben, weil beides zu Defekten bei der Galvanik führt und die Haftung der Mikrostrukturen negativ beeinflusst. Finden die Mikro-

strukturen aus Kunststoff selbst Verwendung, wie z.B. in der Optik, so bildet jeder Resistrückstand an den Strukturwänden ein unerwünschtes Streuzentrum. Dies führt zu einer Verringerung der nutzbaren Lichtintensität.

Bisher wurden die bestrahlten Substrate in Bechergläsern im Tauchverfahren in GG-Entwickler (2-(2-Butoxyethoxy)ethanol, Tetrahydro-1-4-Oxazin, 2-Aminoethanol und Wasser) entwickelt und anschließend in BDG (2-(2-Butoxyethoxy)ethanol und Wasser). Dies führt bei sehr tiefen, engen Strukturen zu extrem langen Entwicklungszeiten, eine vollständige Entwicklung wird trotzdem nicht gewährleistet.

Es konnte gezeigt werden, daß in entsprechender Tiefe das Entwicklungsverhalten in dem betrachteten Bereich zwischen 3,3 kJ/cm³ und 10 kJ/cm³ dosisunabhängig ist. Hingegen führen drastisch verlängerte Spülzeiten in BDG zu einem verbesserten Entwicklungsverhalten. Die zur Untersuchung benutzten Sacklöcher konnten 100 µm weiter durchentwickelt werden (Abb. 1).

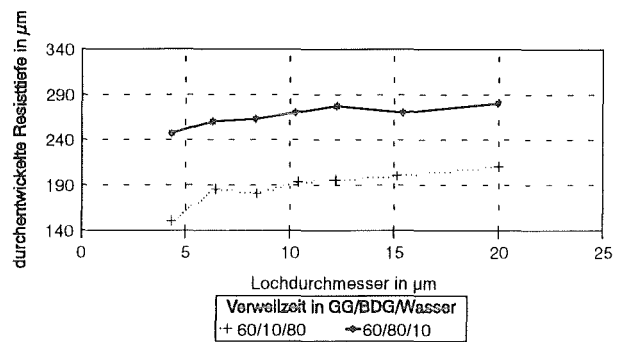


Abb. 1: Durchentwickelte Resisttiefe in Abhängigkeit vom Lochdurchmesser für unterschiedliche Spüldauern.

Wird hingegen bei gleichbleibender Gesamtentwicklungsdauer die Anzahl der Entwicklungsschritte erhöht, so ist kein signifikanter Unterschied bei Gräben ab 10 µm im Entwicklungsverhalten zu beobachten. Diese Beobachtungen weisen alle darauf hin, daß der Entwicklungsvorgang ab einer bestimmten Grabenbreite und entsprechender Tiefe ein reines Transportproblem darstellt. Der Transportvorgang ist ausschließlich diffusionskontrolliert. Aus diesem Grunde ist es notwendig, Methoden einzuführen, die das Transportverhalten beim Entwicklungsprozeß beeinflussen. Deshalb wurde der Einfluß unterschiedlicher Parameter auf das ultraschallunterstützte Entwicklungsverhalten untersucht [3].

Bei Betrachtung der Parameter die die Ultraschallentwicklung beeinflussen, stellt man fest, daß die wesentliche Einflußgröße die transiente Kavitation ist, die sich durch das Auftreten extremer Temperaturen und Drücke bedingt durch den Kollaps von Blasen auszeichnet. Eine Erhöhung der transienten Kavitation führt zu einer deutlichen Verbesserung des Entwicklungsverhaltens. Dies kann durch Erhöhung der Leistung oder Erniedrigung der Frequenz erreicht werden. Dies wird besonders deutlich, wenn man, bei sonst gleichbleibenden Parametern, die Frequenz von 850 kHz auf 40 kHz erniedrigt (siehe Abb 2).

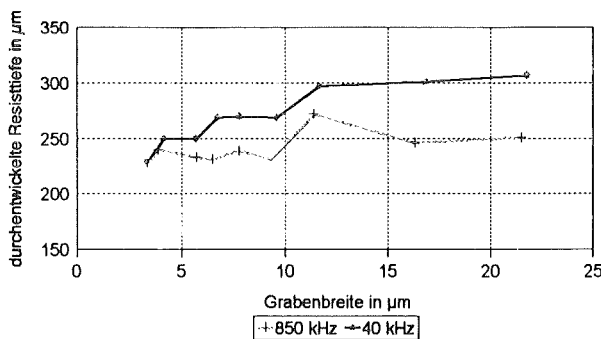


Abb. 2: Durchentwickelte Resisttiefe in Abhängigkeit von der Grabenbreite für unterschiedliche Frequenzen.

Während sehr robuste Strukturen wie Sacklöcher oder Gräben in massiven Resiststrukturen problemlos entwickelt werden konnten, erweist sich ein zu hoher Anteil an transienter Kavitation im Falle sehr fragiler Strukturen als schädlich. Bei zu niedriger Frequenz und zu hoher Leistung, wodurch die Schallintensität, die Erregeramplitude, die Druckamplitude und der Anteil an transienter Kavitation ebenfalls erhöht werden, werden z.B. 4 µm breite, 250 µm hohe und 100 µm lange Stege, während des Entwicklungsvorganges beschädigt. Aus diesem Grunde ist es notwendig, die Parameter des Ultraschallbades und damit den Anteil der transienten Kavitation auf die Strukturgeometrie abzustimmen.

Auch bei gleichbleibenden Entwicklungsbedingungen ist das Entwicklungsverhalten beim ultraschallunterstützten Entwickeln von der Geometrie der Mikrostruktur abhängig. Dies konnte anhand zweier Strukturen nachgewiesen werden. Bei den beiden verglichenen Geometrien handelt es sich um Sacklöcher mit Lochdurchmessern zwischen 4 und 20 µm und Wabenstrukturen mit Grabenbreiten zwischen 3 und 22 µm. Abbildung 3 zeigt, daß die Gräben bei identischen

Entwicklungsbedingungen 100 µm weiter durchentwickelbar sind als die Sacklöcher. Dies wird darauf zurückgeführt, daß bei Gräben sich parallel zur Strukturwand eine Strömung einstellen kann, was bei Sacklöchern nicht der Fall ist.

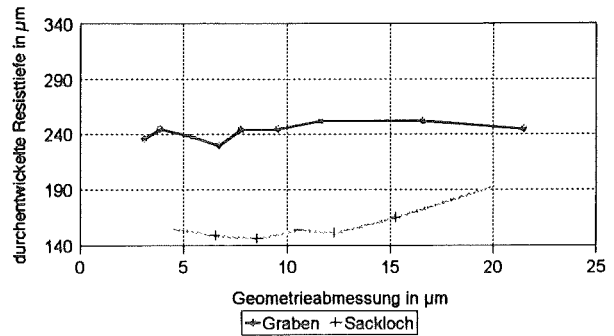


Abb. 3: Durchentwickelte Resisttiefe für unterschiedliche Geometrien

Um belastbare Voraussagen über das Entwicklungsverhalten zu machen, ist es deshalb notwendig, den Entwicklungsprozeß zu parametrisieren und für typische Strukturen die geeigneten Entwicklungsbedingungen und die realisierbaren Strukturturen zu ermitteln.

3. Erweiterungen der Strukturierungsmöglichkeiten

Da es sich bei der röntgentiefenlithographischen Strukturierung um eine einfache Schattenprojektion handelt, können durch den normalen LIGA-Prozeß hohe und in der Querschnittsgeometrie beliebige Strukturen hergestellt werden. In der dritten Dimension ist jedoch keine Variation der Geometrie möglich. Für eine Reihe von Anwendungen wäre eine solche Variation jedoch wünschenswert. Im Folgenden werden Möglichkeiten dargestellt, um solche Variationen zu erreichen.

3.1. Mikrostrukturen mit geneigten Seitenwänden

Durch Verkipfung der Probe und Maske um einen bestimmten Winkel während der Bestrahlung ist es möglich, Mikrostrukturen mit geneigten Seitenwänden herzustellen. Abbildung 4 zeigt solche Mikrostrukturen, die durch zweifache Bestrahlung unter einem Winkel von ± 20 Grad hergestellt wurden. Messungen haben gezeigt, daß die Seitenwandrauigkeit ca. 50 nm beträgt, was mit der Seitenwandrauigkeit von vertikalen Seitenwänden vergleichbar ist. Dies ist um so erstaunlicher, da im Kantenbereich der Absorber

während der geneigten Bestrahlung die Absorberdicke kontinuierlich abnimmt. Erreicht wird dies durch die schnelle Abnahme der Dosis unter den Absorberkanten und die steile Abnahme der Löslichkeitskurve des Entwicklers. Eine Nutzung finden Strukturen mit schrägen Seitenwänden bereits bei optischen Anwendungen, wo die Totalreflektion an einer 45° schrägen Kante ausgenutzt wird, um das Licht aus der horizontalen Ebene in die Vertikale umzulenken [4].

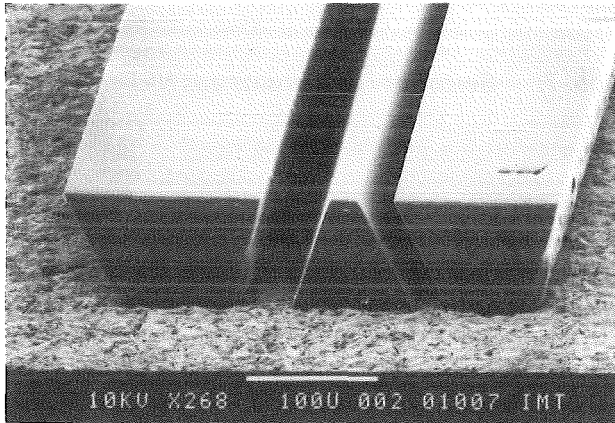


Abb. 4: Mikrostrukturen mit geneigten Seitenwänden hergestellt durch Bestrahlung unter einem Winkel vom $\pm 20^\circ$

3.2. Konische Strukturen

Während der Bestrahlung mit einer Maske werden abhängig vom Membranmaterial eine gewisse Anzahl von Fluoreszenzphotonen und Elektronen aus der Maskenmembran freigesetzt. Deren Verteilung ist in erster Näherung isotrop, so daß dadurch eine Schädigung der unbestrahlten Bereiche im oberen Strukturbereich erfolgt. Die Schädigung reicht um so weiter von der Kante weg, je größer der Abstand zwischen Maske und Probe ist. Üblicherweise ist die Schädigung für eine Entwicklung nicht ausreichend. Wird die Probe jedoch anschließend ohne Maske bestrahlt, wird der Resist in diesem vorgeschädigten Bereich durch die zusätzlich abgelagerte Dosis entwickelbar. Die Strukturkontur verläuft entlang der noch entwickelbaren Isodosislinie. Deren Lage wird durch die Intensität der zweiten Bestrahlung eingestellt. Auf diese Art und Weise sind Mikrostrukturen herstellbar, die im oberen Strukturbereich eine kontinuierlich ansteigende Konizität aufweisen. Abbildung 5 zeigt eine solche Struktur.

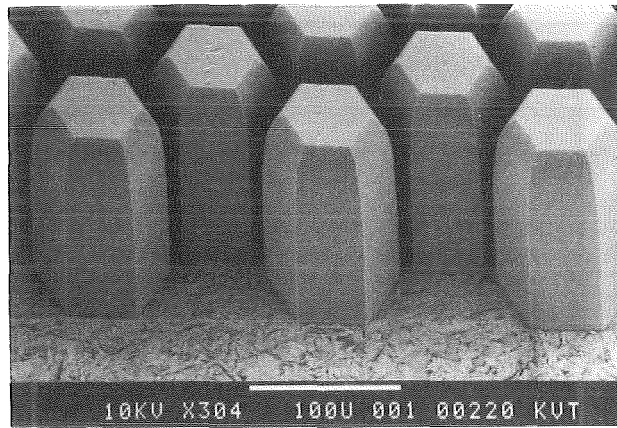


Abb. 5: Konische Struktur hergestellt durch doppelte Bestrahlung

3.3. Durchführung des LIGA-Prozesses auf vorstrukturierten Substraten

Eine weitere Möglichkeit der Herstellung von Strukturen mit unterschiedlicher Querschnittsgeometrie über der Strukturhöhe ergibt sich dadurch, daß der LIGA-Prozeß auf Substratplatten durchgeführt wird, die bereits eine Topographie der Oberfläche enthalten. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von Siliziumwafern mit entsprechenden Ätzgruben. Wird die Röntgentiefenlithographie justiert zu diesen Ätzgruben durchgeführt, so liegen nach dem Galvanoformungsprozeß Strukturen vor, die im oberen Teil die Geometrie der Ätzgruben und im unteren Teil die durch den LIGA-Prozeß erzeugten Geometrien aufweisen. Solche Strukturen können dann als Formeinsätze eingesetzt werden.

Es konnte gezeigt werden, daß die Resistpolymerisation unter Druck direkt auf dem vorstrukturierten Substrat problemlos durchgeführt werden kann und daß die Ätzgruben vollständig mit Polymer befüllt werden. In Abbildung 6 ist ein Ausschnitt eines vorstrukturierten Siliziumwafern mit durch Röntgentiefenlithographie hergestellten Polymerbahnen zu sehen. Es wurde auch nachgewiesen, daß die Galvanik entlang der strukturierten Oberfläche ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden kann. Anwendungsbeispiele ergeben sich im Bereich der Optik, wo zur Realisierung von mikrooptischen Aufbauten gestufte Aufbauplatten notwendig sind [5].

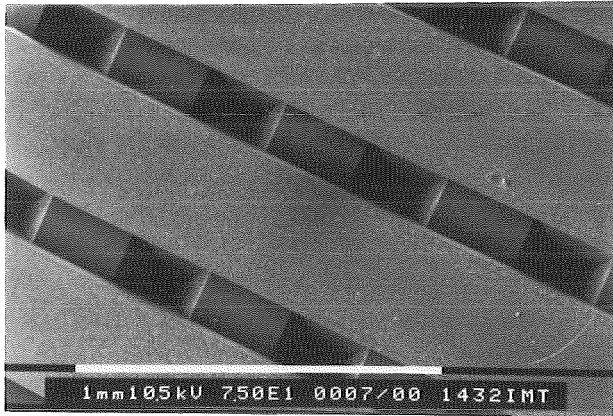


Abb. 6: Mikrostrukturen auf vorstrukturiertem Siliziumwafer

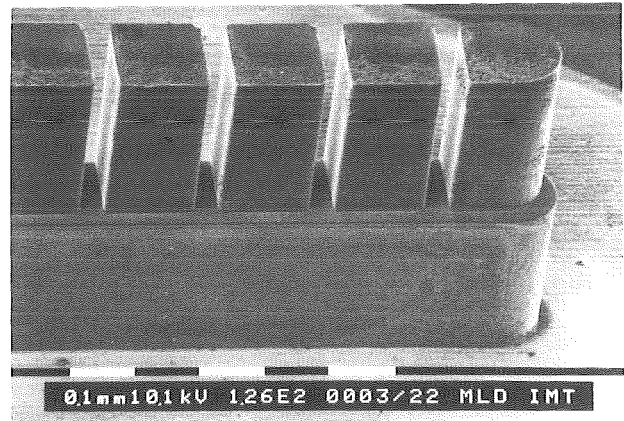


Abb. 7: Gestufter Formeinsatz aus Nickel

3.4. Gestufte Strukturen

Einfache gestufte Strukturen können dadurch hergestellt werden, daß vorbearbeitete Grundplatten verwendet werden. Je nach Anforderung bezüglich der Genauigkeit der Lage der Stufe werden Grundplatten eingesetzt, in denen die Stufe mechanisch eingearbeitet wurde. Bei höheren Genauigkeitsanforderungen können solche Grundplatten auch durch einen ersten Lithographie- und Galvanoformungsprozeß hergestellt werden.

Sollen gestufte Mikrostrukturen mit Genauigkeiten im Mikrometerbereich hergestellt werden, so wird der Abformungsprozeß mit einem anschließenden Bestrahlungsschritt kombiniert [6]. Im ersten Schritt wird mit einem nach dem LIGA-Verfahren hergestellten Abformwerkzeug die obere Schicht einer dicken Resistschicht durch ein Prägeverfahren strukturiert. Der untere Teil dieser strukturierten Resistschicht wird dann im zweiten Schritt durch eine Röntgenmaske, die zur strukturierten Resistschicht justiert ist, mit Synchrotronstrahlung belichtet. Zur Durchführung dieses Prozesses wird ein Zweischicht-Resistsystem benötigt. Die obere Schicht muß den Anforderungen der Abformung genügen und darf somit keine gute Haftung zu Metallen ausüben. Die untere Schicht dagegen muß den Anforderungen der Röntgentiefenlithographie genügen und somit eine sehr gute Haftung zu Metallen ausbilden. Die so erzeugten gestuften Polymerstrukturen werden galvanisch aufgefüllt und als Abformwerkzeug eingesetzt, so daß eine billige Massenfertigung gestufter Strukturen möglich wird (Abb. 7).

Diskussion

Zukünftige Anwendungen des LIGA-Verfahrens werden deutlich höhere Anforderungen an die Strukturgeometrie und -höhe stellen, als bisher realisierbar war. Ein bedeutender Schritt zur Erhöhung des Aspektverhältnisses wurde durch die Einführung der Ultraschallentwicklung erreicht. Durch Fortschritte in der Strukturierung der dritten Dimension können in LIGA-Technik konische, gestufte und schräge Strukturen hergestellt werden. Die ständige Prozeßweiterentwicklung des LIGA-Verfahrens wird die Strukturvielfalt und -qualität verbessern und erweitern.

Literatur

- [1] E.W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, D. Münchmeyer: Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural height by synchrotron radiation lithography, galvanofarming and plastic moulding (LIGA process) *Microelectronic Engineering*; 4, 35-56, (1986)
- [2] B. Menz: Untersuchungen zum Kleben von PMMA-Folien auf titanbeschichtete Substrate; Diplomarbeit, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Universität Karlsruhe, 1992

- [3] R. Stransky: Ultraschallunterstützte Entwicklung von Belichteten Resiststrukturen Diplomarbeit, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Universität Karlsruhe, 1993
- [4] J. Götttert, J. Mohr, C. Müller: Examples and Potential Applications of LIGA Components in Microoptics; Vortrag auf dem Workshop "Integrierte Optik und Mikrooptik in Polymeren"; Mainz (1992) wird veröffentlicht in: Teubner Texte zur Physik, Teubner-Verlag, Stuttgart
- [5] J. Götttert, J. Mohr, C. Müller: Coupling Elements for Multimode Fibers by the LIGA Prozess; Tagungsband Micro System Technologies, 20 - 23, (1992)
- [6] 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; Micro Electro Mechanical Systems '92, Travemünde (Germany), 1992

Darstellung einfacher Mikrosysteme durch Kunststoffabformung und Galvanoformung auf integrierten Schaltkreisen

R. Ruprecht, W. Bacher, A. Both, H. Dingreiter, H. Kalb

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Im Rahmen der Entwicklung des LIGA-Verfahrens (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung, Kunststoff Abformung) werden am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KfK) Kunststoffabformverfahren im Hinblick auf eine künftige Serienfertigung von Mikrostrukturen weiterentwickelt. Dabei werden sowohl Kunststoffmikrostrukturen als eigenständige Komponenten oder als verlorene Formen für die Galvanotechnik oder Keramiktechnik hergestellt als auch Verfahren entwickelt, um auf dem Weg über die Kunststoffabformung LIGA-Mikrostrukturen mit mikroelektronischen Schaltungen in quasi-monolithischer Integration funktional zu verknüpfen.

In diesem Beitrag werden Verfahren, die derzeit entwickelt werden, vorgestellt, wie mit Hilfe der positionierten Kunststoffabformung bewegliche LIGA-Mikrostrukturen direkt auf mikroelektronischen Schaltkreisen integriert werden können. Dazu wurde überprüft, ob prozessierte Siliziumwafer den mechanischen und thermischen Belastungen des Abformprozesses standhalten. Es wurden Mikrostrukturen aus Kunststoff durch Abformung direkt über mikroelektronischen Schaltungen auf der Oberfläche von prozessierten Siliziumwafern hergestellt. Bisher durchgeführte Tests an CMOS-Schaltkreisen, die den Abformprozeß durchlaufen haben, zeigen, daß der Abformprozeß selbst die Mikroelektronik nicht schädigt.

Auf weiteren prozessierten Wafern mit Testschaltungen wurden alle erforderlichen Verfahrensschritte zur Integration einer metallischen LIGA-Mikrostruktur mit der mikroelektronischen Schaltung durchgeführt. Durch Kunststoffabformung, Reaktives Ionenätzen und Galvanoformung wurden so auf den Wafern feststehende Mikrostrukturen aus Nickel neben den Testschaltungen erzeugt. Diese Testschaltungen werden momentan bei einem Industriepartner auf ihre elektrische Funktion überprüft.

1. Einleitung

Die Kunststoffabformung bietet die Möglichkeit, LIGA-Mikrostrukturen, die für praktische Anwendungen in verschiedenen Technikbereichen entworfen und bisher mittels Röntgentiefenlithographie oder Röntgentiefenlithographie und Galvanoformung hergestellt und ggf. optimiert wurden, in großen Stückzahlen zu fertigen und damit zum wirtschaftlichen Erfolg der LIGA-Technik entscheidend beizutragen. Es ist leicht ersichtlich, daß die Herstellung von LIGA-Strukturen durch Röntgentiefenlithographie anlagentechnisch aufwendig, personalintensiv und daher kostspielig ist. Aus diesem Grund ist ein wichtiges Ziel des IMT, die Herstellung von Mikrostrukturen in großen Stückzahlen durch die Kunststoffabformverfahren Spritzguß, Reaktionsguß, Vakuumprägen oder Kombinationen dieser Verfahren [1, 2, 3] weiter zu entwickeln. Eine Massenfertigung selbst aufzubauen und zu betreiben, ist jedoch nicht die Aufgabe des KfK. Diese Funktion wird die Industrie übernehmen, wie die Firma MicroParts, deren Ziel die Kommerzialisierung des LIGA-Prozesses ist.

Neben der Entwicklung der Abformverfahren für Mikrostrukturen aus Kunststoff werden Konzepte und Verfahren erarbeitet, wie mit Hilfe der Abformtechnik Mikrosysteme hergestellt werden können, bei denen LIGA-Mikrostrukturen mit Mikroelektronik verknüpft bzw. integriert sind. Hybride Integration kann so stattfinden, daß Kunststoffmikrostrukturen, die durch Abformung hergestellt wurden, mit Hilfe der Methode der Aufbau- und Verbindungstechnik in das Mikrosystem eingefügt werden.

Für die quasi-monolithische Integration der LIGA-Technik mit der Mikroelektronik, die einen interessanten Weg zur Herstellung von Mikrosystemen bietet, werden derzeit Verfahrensvarianten entwickelt. Untersuchungen haben gezeigt, daß bei der Herstellung von LIGA-Mikrostrukturen durch Röntgentiefenlithographie auf CMOS-Schaltungen die Schaltkreise durch die Röntgenstrahlung zerstört werden können. Daher sollen zur Erzeugung von LIGA-Mikrostrukturen direkt auf prozessierten Wafern mit mikroelektronischen Schaltkreisen Abformprozesse eingesetzt werden, die zudem eine kostengünstige Methode zur Massenfertigung sind.

2. Integration von LIGA-Strukturen mit Mikroelektronik durch positionierte Kunststoffabformung auf prozessierten Siliziumwafern

Ein wichtiges Ziel bei der Abformung von Mikrostrukturen ist, die LIGA-Mikrostruktur mit anderen Funktionselementen zu verknüpfen und so mit einem geringen Aufwand an Aufbau- und Verbindungstechnik einfache Mikrosysteme zu erzeugen. Ein spezieller Fall ist die Abformung direkt auf vorstrukturierten Substraten, insbesondere auf prozessierten Siliziumwafern, um in quasi-monolithischer Integration z. B. Sensoren direkt mit ihren Auswerteschaltkreisen funktional zu verbinden.

Im folgenden werden Verfahrenskonzepte und wesentliche Entwicklungen des LIGA-Verfahrens vorgestellt, die z. B. die Herstellung von kapazitiven Beschleunigungssensorsystemen [7] direkt auf integrierten elektronischen Schaltungen ermöglichen sollen. Dabei müssen die LIGA-Strukturen auf wenige Mikrometer genau positioniert zu den elektrischen Kontaktflächen der mikroelektronischen Schaltkreise aufgebaut werden.

2.1. Positionierte Abformung als Voraussetzung zur Herstellung von LIGA-Mikrostrukturen in quasi-monolithischer Integration

Für die quasi-monolithische Integration von LIGA-Mikrostrukturen direkt auf einem vorstrukturierten Substrat ist eine wesentliche Voraussetzung die positionsgenaue Abformung von Mikrostrukturen zu den Kontaktflächen der elektronischen Schaltkreise. Deshalb muß vor dem eigentlichen Abformvorgang das vorstrukturierte Substrat gegenüber dem Abformwerkzeug ausgerichtet werden. Dazu werden derzeit die technischen Voraussetzungen geschaffen.

Da weder das Abformwerkzeug noch das vorstrukturierte Substrat bei der LIGA-Technik lichtdurchlässig sind, scheiden die gängigen Justiertechniken aus der Lithographie, bei denen eine Maske auf das Substrat aufgelegt und durch die teilweise durchsichtige Maske justiert wird, für die positionierte Abformung aus. Die Positionierung muß durchgeführt werden, solange Substrat und Werkzeug räumlich voneinander getrennt sind. Mit Anschlägen in der Abformmaschine, an die das Substrat zur Positionierung angelegt werden könnte, kann nicht gearbeitet werden, da die Strukturen auf dem Substrat nicht gegenüber dem Substratrand, sondern, wie es in der Halbleitertechnik üblich ist, gegenüber Justiermarken innerhalb der Mikrostruktur ausgerichtet sind. Die Technik mit Anschlägen erlaubt außerdem kein temperaturunabhängiges Positionieren, das

erforderlich ist, weil das Positionieren bei einer anderen Temperatur erfolgt als der eigentliche Umformvorgang.

Nach der Diskussion mehrerer möglicher Verfahren zur positionierten Abformung wurde eines ausgewählt, bei der das Positionieren des Substrats zu den Justiermarken innerhalb der Mikrostruktur mit einer Positioniervorrichtung außerhalb der Abformmaschine stattfindet. Damit werden die Maschinenbelegzeiten pro Abformvorgang durch den Positionieraufwand nicht wesentlich erhöht werden.

Für die positionierte Abformung wird parallel zur Positioniervorrichtung eine Abformmaschine in Zusammenarbeit mit der Hauptabteilung Ingenieurtechnik (HIT) des KfK und Industriepartnern entwickelt, in der Substrat und Werkzeug ohne seitlichen Positionsverlust einander angenähert werden können. Bis eine für diese Aufgabe geeignete Abformmaschine zur Verfügung steht, werden zur positionierten Abformung mit den am IMT derzeit zur Verfügung stehenden Geräten Vorversuche mit geringeren Genauigkeitsanforderungen an die Position durchgeführt, die mit herkömmlichen Passungssystemen der Abformtechnik erreicht werden können.

2.2. Verfahren zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen mit Hilfe der Abformung

Parallel zur Entwicklung der positionierten Abformung werden Verfahren entwickelt, die es unter Einsatz der Abformtechnik erlauben, Metallmikrostrukturen auf vorstrukturierten Substraten herzustellen. Im folgenden werden zwei mögliche Verfahrensvarianten der positionierten Abformung zur Herstellung von beweglichen Metallstrukturen erläutert.

2.2.1. Verfahrensvarianten zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen am Beispiel der Abformung eines Beschleunigungssensors

Als erste Verfahrensvariante wird die positionierte Abformung auf Substraten mit vorstrukturierter Opferschicht entwickelt [6,7,10]. Auf ein vorstrukturiertes Substrat werden eine Haftschiicht aus Polymethylmethacrylat (PMMA), der ein interner Haftvermittler zugegeben werden kann, und der Formstoff zur Kunststoffabformung aus PMMA, der zur besseren Entformbarkeit ein internes Trennmittel enthält, aufpolymerisiert [9,11]. Ein zweischichtiger Aufbau des Kunststoffs wird gewählt, da zwei gegensätzliche Forderungen erfüllt werden müssen. Zum vorstrukturierten Substrat, das eine Topographie mit Höhenunterschieden im Mikrometerbereich aufweist, soll eine gute Haf-

tung erzielt werden, um die beim Entformvorgang auftretenden Zugkräfte übertragen zu können. Dem gegenüber wird eine sehr geringe Haftung zum stark strukturierten Abformwerkzeug mit einigen hundert Mikrometern Strukturtiefe gefordert.

Der Formstoff wird im Vakuum oberhalb seiner Glasübergangstemperatur durch Eindrücken des Abformwerkzeugs strukturiert, das zuvor gegenüber der vorstrukturierten, elektrisch leitfähigen Opferschicht positioniert wurde. Um das Substrat nicht durch den Kontakt mit dem Abformwerkzeug zu beschädigen, wird bei der Formgebung der Formstoff zwischen dem Substrat und dem Abformwerkzeug nicht vollständig verdrängt. Deshalb verbleibt nach dem Entformen am Fuße der abgeformten Kunststoffstruktur über dem Substrat mit der Opferschicht eine dünne elektrisch isolierende Restschicht. Diese Restschicht wird durch Reaktives Ionenätzen im Sauerstoffplasma entfernt.

Diese Kunststoffstrukturen können entweder direkt Verwendung finden oder als verlorene Form zur Galvanoformung von feststehenden oder beweglichen Metallstrukturen dienen. Zur Herstellung von Metallmikrostrukturen wird die freigelegte leitfähige Schicht als Kathode kontaktiert. Der galvanische Niederschlag wächst zwischen der Kunststoffstruktur auf und invertiert diese. Nach dem Auflösen des Kunststoffes wird die Opferschicht, die sich zwischen und teilweise unter den Strukturen befindet, naßchemisch weggeätzt. Hierbei werden die Mikrostrukturteile, die auf der Opferschicht galvanisch abgeschieden wurden, beweglich, wie z. B. die seismische Masse des Beschleunigungssensors, die über eine Feder an einem feststehenden Lagerblock hängt [6,7,10].

Die zweite Verfahrensvariante verwendet größtenteils dieselben Prozessschritte. Es wird jedoch keine vorstrukturierte Opferschicht benötigt. Stattdessen soll ein zweistufiges Abformwerkzeug eingesetzt werden [8,9]. Dieses Werkzeug strukturiert einen Formstoff zu einer zweistufigen Mikrostruktur aus Kunststoff. Im Beispiel des Beschleunigungssensors wird der Bereich, in dem der Lagerblock galvanisch abgeschieden wird, tiefer in den Formstoff eingepreßt als der Bereich der Feder und der seismischen Masse (vgl. Abb. 1). Während der Behandlung im Sauerstoffplasma bleiben die Stufen in der Kunststoffstruktur erhalten. Bei der anschließenden Galvanoformung werden die Zwischenräume in der Kunststoffstruktur vom Substrat startend mit Metall gefüllt. Wird nach der Galvanoformung der Kunststoff aufgelöst, so stehen Teile der Metallstruktur, wie der Lagerblock des Beschleunigungssensors, fest auf dem Substrat, während die Biegezone und

die seismische Masse über dem Substrat schweben und damit beweglich sind [8,10].

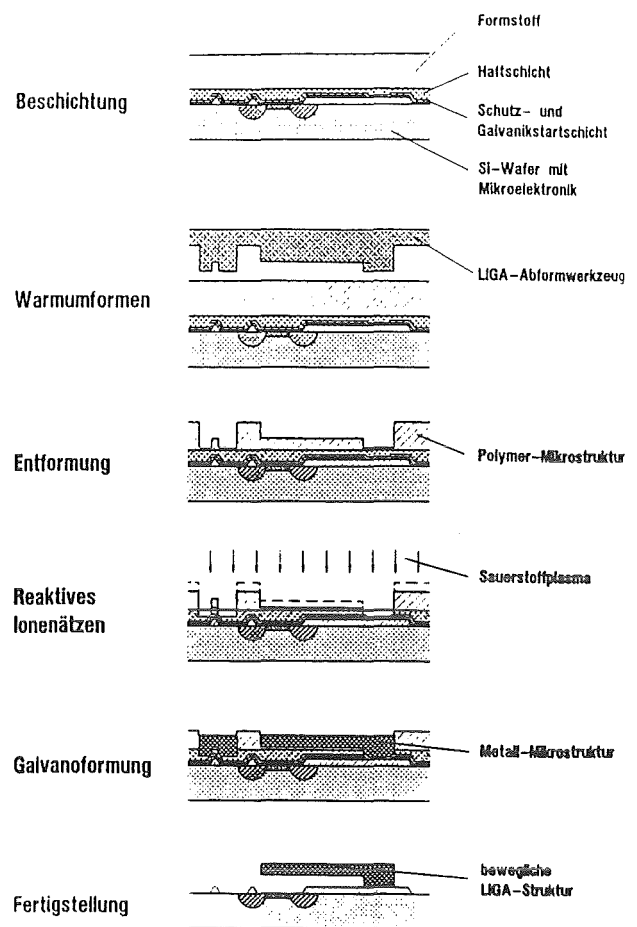


Abb. 1: Schematische Darstellung der wichtigsten Schritte des in Entwicklung befindlichen Verfahrens zur Herstellung beweglicher Beschleunigungssensoren auf prozessierten Siliziumwafern mit mikroelektronischen Schaltkreisen unter Verwendung eines zweistufigen Abformwerkzeugs durch positionierte Kunststoffabformung und Galvanoformung.

In Abb. 1 ist das Prinzip dieser Verfahrensvariante zur Herstellung beweglicher Strukturen auf einem prozessierten Siliziumwafer dargestellt, auf dem sich CMOS-Schaltkreise befinden. Zusätzlich zu den zuvor beschriebenen Verfahrensschritten werden die prozessierten Wafer vor dem ersten Verfahrensschritt zunächst mit einer Schicht aus SiO_2 oder Si_3N_4 zum Schutz der Mikroelektronik versehen. Darauf wird dann eine leitfähige Schicht als Galvanikstartschicht aufgebracht. Nachdem das gesamte zuvor beschriebene Verfahren durchgeführt wurde und der Kunststoff zwischen den Metallmikrostrukturen entfernt ist, wird abschließend die anfangs aufgebrachte Galvanikstartschicht zwischen den Mikrostrukturen selektiv naßchemisch weggeätzt.

2.2.2 Anforderungen an das Verfahren zur Herstellung von Beschleunigungssensoren auf prozessierten Wafern

Mit diesen Verfahren, die zur Zeit am IMT entwickelt werden, sollen kapazitive Beschleunigungssensoren [6, 7, 10] direkt auf prozessierten Siliziumwafern durch zu den mikroelektronischen Schaltkreisen positionierte Kunststoffabformung und Galvanoformung erzeugt werden [8]. In der abgeformten Kunststoffstruktur wird der spätere Kondensatorspalt des Beschleunigungssensors zwischen der seismischen Masse und den feststehenden Gegenelektroden durch eine nur 4 μm dünne Kunststoffwand gebildet, die die galvanisch aufwachsende seismische Masse von der Gegenelektrode trennt [7]. Für eine definierte Nennkapazität des Beschleunigungssensors wird eine glatte Kondensatoroberfläche und ein genauer Kondensatorplattenabstand gefordert.

Entscheidend für die Erzeugung glatter Kondensatorwände ist neben einem Abformwerkzeug mit möglichst glatten Wänden auch eine möglichst kurze Behandlung der abgeformten Mikrostrukturen im gerichteten Sauerstoffplasma, durch das die Restschicht am Fuße der Mikrostrukturen abgetragen wird. Dabei kann ein lateraler Strukturverlust durch geringe Anteile ungerichteter Sauerstoffradikale und Sekundäreffekte nicht vollständig verhindert werden [11]. Abb. 2 zeigt den lateralen Strukturverlust in Abhängigkeit von der Ätztiefe in die Restschicht beim Reaktiven Ionenätzen mit Sauerstoffionen. Bei einer Restschichtdicke von z. B. 20 μm ist mit einer Verringerung der Kondensatorspaltbreite durch beidseitigen Abtrag um insgesamt 0,8 μm zu rechnen. Dies kann durch einen Maßvorhalt der Strukturen bereits im Design berücksichtigt werden.

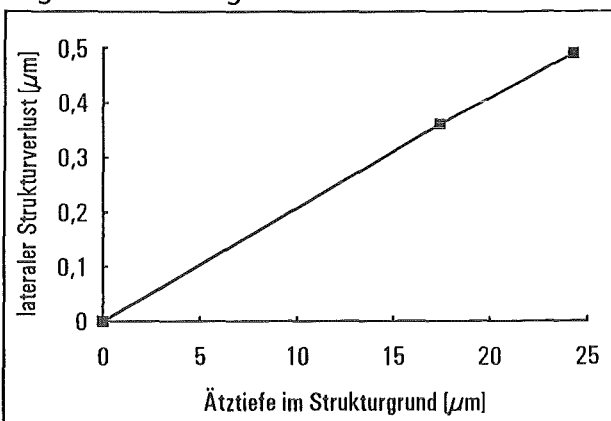


Abb. 2: Lateraler Strukturverlust von Mikrostrukturen aus PMMA als Funktion der Ätztiefe beim Reaktiven Ionenätzen mit Sauerstoffionen [11].

Bei der Kunststoffabformung muß dennoch eine möglichst dünne Restschicht mit gleichmäßiger

Dicke über der Waferoberfläche erzeugt werden, da mit steigender Ätzeit auch eine erhöhte Wandrauheit verbunden ist. Dazu ist zunächst eine ebene Stirnfläche des Abformwerkzeugs notwendig, das mit Hilfe der Röntgentiefenlithographie, der Galvanoformung und Verfahren der mechanischen Bearbeitung hergestellt wird [2 - 5]. Die Abformwerkzeuge, die nach dem heutigen Stand der Technik hergestellt werden, sind vor allem wegen der Verteilung der inneren Spannungen des galvanisch abgeschiedenen Metalls nicht vollständig eben. Sie weisen geringe, aber für den Abformprozeß direkt auf mikroelektronischen Schaltkreisen nicht tolerierbare Formabweichungen von bis zu 40 μm Durchbiegung auf der mikrostrukturierten Stirnfläche auf [4].

Um trotzdem die für die quasi-monolithische Integration von LIGA-Strukturen und Mikroelektronik notwendigen ebenen Abformwerkzeuge herzustellen, wurde eine Spannvorrichtung entwickelt, die eine beträchtliche Verringerung der Formabweichung auf der Stirnfläche des Abformwerkzeugs auf maximal $\pm 5 \mu\text{m}$ ermöglicht [5] (s. Abb. 3).

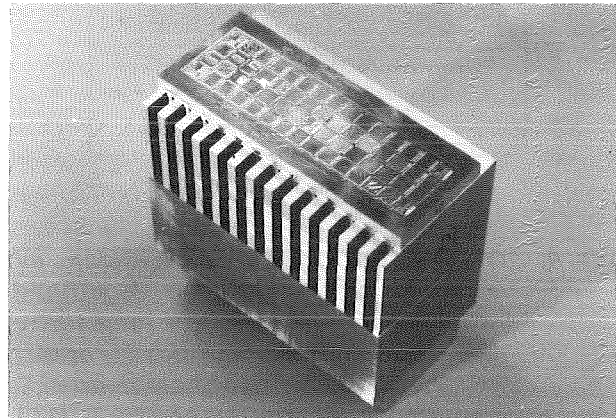


Abb. 3: LIGA-Abformwerkzeug, dessen Formabweichungen der Werkzeugstirnfläche mit Hilfe einer Spannvorrichtung auf weniger als $\pm 5 \mu\text{m}$ Durchbiegung reduziert wurde [5].

Die Dicke der Restschicht wird außer von der Form der Werkzeugstirnfläche hauptsächlich durch die Abformparameter bestimmt. Um eine möglichst geringe Restschichtdicke zu erreichen, muß der Formstoff zwischen Werkzeugstirnfläche und Substratoberfläche soweit als möglich verdrängt werden. Um die Mikroelektronik und den spröden, nur 300 bis 500 μm dünnen Siliziumwafer nicht zu beschädigen, muß ein Kontakt des Abformwerkzeugs mit dem prozessierten Wafer verhindert werden. Deshalb wird für die Abformung von Kunststoffmikrostrukturen auf prozes-

sierten Siliziumwafern derzeit eine Restschichtdicke von mindestens 10 μm angestrebt. Damit diese Restschichtdicke erreicht wird, muß die Viskosität des Formstoffs beim Umformen niedrig sein. Daher wurde die Viskosität des Formstoffs PMMA mit internem Trennmittel in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt. Im tiefen Temperaturbereich wurde die Dynamisch-Mechanische Thermo-Analyse eingesetzt. Für höhere Formstofftemperaturen ist diese Methode ungeeignet. Deshalb wurde in diesem Temperaturbereich die Viskosität in Analogie zum Umformvorgang aus der Verdrängung des Formstoff zwischen zwei Platten unter Druck bestimmt. Die Viskosität des Formstoffs nimmt mit zunehmender Temperatur stark ab [11] (s. Abb. 4).

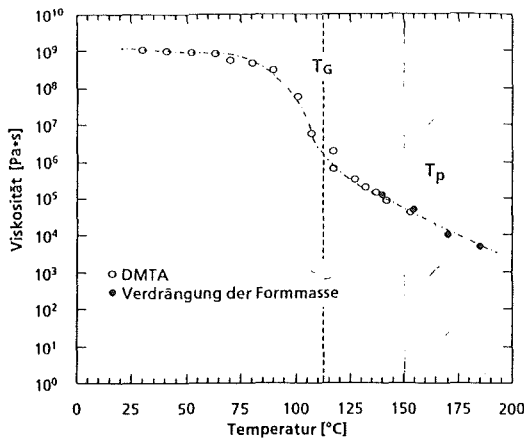


Abb. 4: Viskosität des Formstoffs PMMA mit internem Trennmittel in logarithmischer Auftragung über der Temperatur. Die Umformtemperatur des Formstoffs mit der Glasübergangstemperatur T_G liegt im Bereich der Temperatur T_p [11].

Deshalb ist zu erwarten, daß bei hohen Umformtemperaturen eine geringe Restschichtdicke erreicht werden kann. Neben der Umformtemperatur beeinflusst auch die Umformkraft wesentlich die Restschichtdicke. Der Zusammenhang zwischen der Restschichtdicke und den Parametern Umformtemperatur und Umformkraft wurde experimentell bestimmt (s. Abb. 5). Die Versuche wurden mit einem unstrukturierten Abformwerkzeug mit poliergefräster Stirnfläche (26 mm x 66 mm) durchgeführt. Die Restschichtdicke sinkt degressiv mit steigender Umformtemperatur und nahezu linear mit steigender Umformkraft. Dabei überwiegt im untersuchten Bereich der Einfluß der Umformtemperatur auf die Restschichtdicke. Die Unebenheiten in der Fläche, die durch die Meßpunkte aufgespannt wird, sind durch deren Streuung verursacht.

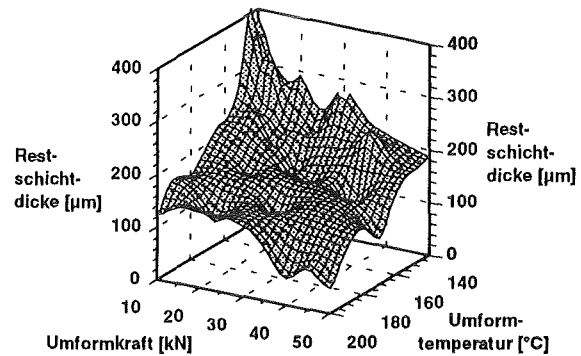


Abb. 5: Experimentell ermittelte Abhängigkeit der Restschichtdicke des Formstoffs PMMA von der Umformtemperatur und der Umformkraft.

2.3 Überprüfung der Kompatibilität des Verfahrens zur Herstellung von Metallstrukturen zu der Mikroelektronik auf prozessierten Wafern

Entscheidende Voraussetzung für die Realisierung von Mikrosystemen durch die quasi-monolithische Integration von LIGA-Mikrostrukturen auf mikroelektronischen Schaltungen nach den beschriebenen Verfahren ist, daß die Mikroelektronik auf den prozessierten Siliziumwafern den erforderlichen Verfahrensschritten standhält. In laufenden Untersuchungen wird geprüft, ob die mikroelektronischen Schaltkreise durch die benötigten Verfahrensschritte zerstört werden.

Die bisher durchgeführten Kompatibilitätstests wurden mit nach dem CMOS-Prozeß behandelten 4"-Wafern durchgeführt, auf die zum Schutz der mikroelektronischen Schaltungen zunächst eine Schicht aus SiO_2 oder Si_3N_4 aufgebracht wurde. Da letztlich LIGA-Metallstrukturen erzeugt werden sollen, wurde auf diese isolierende Schutzschicht eine leitfähige Galvanikstartschicht aufgebracht. Als Galvanikstartschicht hat sich eine naßchemisch oxidierte Wolframschicht bewährt [14]. Zwar wird seit langem eine oxidierte Titanoberfläche erfolgreich als Galvanikstartschicht in der Röntgenlithographie und Galvanoformung eingesetzt, die ebenfalls sowohl einen guten Galvanikstart ermöglicht als auch eine haftfeste Verbindung zu Mikrostrukturen aus Metall und PMMA gewährleistet [12-14]. Jedoch macht die Verwendung von Titan als Galvanikstartschicht einen internen Haftvermittler in der Haftschrift aus PMMA erforderlich. Die Verwendung eines Haftvermittlers weist den Nachteil auf, daß zur Realisierung einer geringen Restschichtdicke die Stirnfläche des Werkzeugs durch den Formstoff in die Haftschrift eindringen könnte und dadurch höhere Entformkräfte erforderlich werden. In diesem Fall würde die Kunststoffstruktur auch an der Formeinsatzstirnfläche haften und könnten nicht fehlerfrei

entformt werden. Um dieses Problem zu umgehen, wurde eine andere Galvanikstartschicht gesucht, die es ermöglicht, eine Haftschiicht aus PMMA ohne internen Haftvermittler zur Übertragung der Entformkräfte einzusetzen. Durch den Einsatz von oxidiertem Wolfram als Galvanikstartschicht [14] konnte dies erreicht werden.

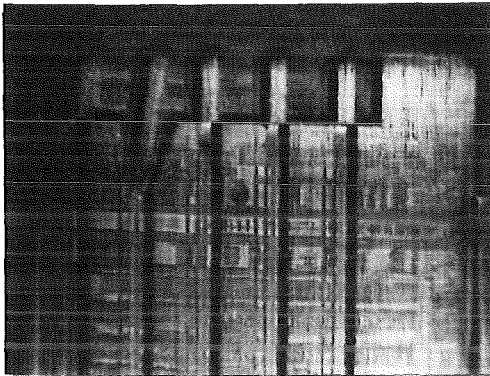


Abb. 6: Feststehende LIGA-Mikrostrukturen aus Kunststoff auf mikroelektronischen Schaltkreisen, hergestellt durch Kunststoffabformung auf prozessierten Siliziumwafern, fotografiert an einem Lichtmikroskop. Durch die geringe Tiefenschärfe des Lichtmikroskops ist es nicht möglich, gleichzeitig die Oberfläche der LIGA-Struktur, die eine Strukturhöhe von 160 μm aufweist, und die Oberfläche des prozessierten Wafers mit der Mikroelektronik scharf abzubilden.

Die Abformversuche wurden mit dem Schichtverbund von 1 μm dick aufgesputtertem Wolfram, das naßchemisch oxidiert wurde, einer aufpolymerisierten Haftschiicht aus PMMA ohne Haftvermittler sowie dem Formstoff aus PMMA mit internem Trennmittel durchgeführt. Der Formstoff wurde ca. 50 °C oberhalb der Glasübergangstemperatur umgeformt. Nach dem Abkühlen des Formstoffs und des Abformwerkzeugs auf ca. 50 °C unterhalb der Glasübergangstemperatur wurden die Mikrostrukturen aus dem Werkzeug entformt. Der Schichtverbund übertrug Entformkräften von über 1500 N über eine mikrostrukturierte Werkzeugstirnfläche von 20 mm x 60 mm. Die zwischen den Mikrostrukturen verbliebene ca. 30 μm dünne Restschicht wurde durch Reaktives Ionenätzen im Sauerstoffplasma entfernt (s. Abb. 6). Danach wurde Nickel auf der oxidierten Wolframschiicht festhaftend galvanisch abgeschieden (s. Abb. 7).

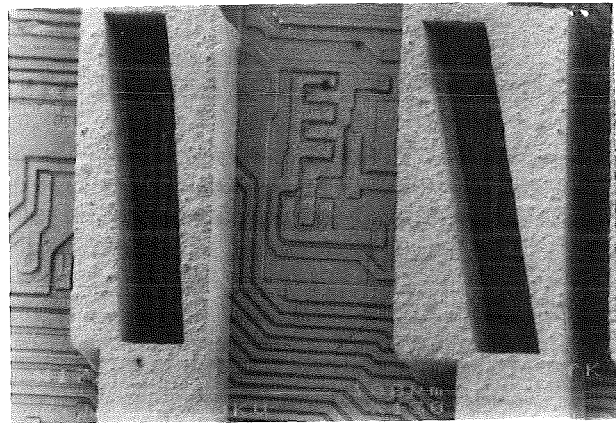


Abb. 7: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von feststehenden LIGA-Mikrostrukturen aus Nickel auf mikroelektronischen Schaltkreisen, hergestellt durch Kunststoffabformung und Galvanoformung auf prozessierten Siliziumwafern.

Durch Überprüfung von Testschaltungen auf prozessierten Wafern vor und nach den jeweiligen Prozeßschritten konnte gezeigt werden, daß folgende Prozeßschritte die nach dem CMOS-Verfahren hergestellten Schaltkreise nicht schädigen:

- Aufputtern der Galvanikstartschicht
- Aufpolymerisieren der Haftschiicht
- Aufpolymerisieren des Formstoffs
- Abformen und Entformen
- Reaktives Ionenätzen der Restschicht
- Auflösen des Formstoffs
- Ätzen der Galvanikstartschicht

Die Kompatibilität der Verfahrensschritte Galvanoformung und anschließendes Ätzen der Galvanikstartschicht sind noch nicht gezeigt worden. Mit dem vorgestellten Gesamtprozeß wurden jedoch bereits auf 360 μm dünnen prozessierten Wafern 100 μm hohe feststehende Mikrostrukturen aus Nickel erzeugt und die Galvanikstartschicht zwischen den Metallmikrostrukturen geätzt, ohne die Wafer mechanisch zu schädigen (s. Abb. 7). Momentan befinden sich die Wafer bei dem Industriepartner zur Überprüfung der mikroelektronischen Testschaltungen.

3. Literatur

- [1] W. Menz, P. Bley: Mikrosystemtechnik für Ingenieure; VCH - Verlag, Weinheim (1992).
- [2] M. Harmening, W. Ehrfeld: Untersuchung zur Abformung von galvanisierbaren Mikrostrukturen mit großer Strukturhöhe aus elektrisch isolierenden und leitfähigen Kunststoffen; KfK-Bericht 4711 (1990).
- [3] H. Vollmer, W. Ehrfeld, P. Hagmann: Untersuchungen zur Herstellung von galvanisierbaren Mikrostrukturen mit extremer Strukturhöhe durch Abformung mit Kunststoff im Vakuum-Reaktionsgießverfahren; KfK-Bericht 4267 (1987).
- [4] M. Müller: Entwicklung und Konstruktion einer Vorrichtung zur Verhinderung der Durchbiegung von Abformwerkzeugen; Diplomarbeit Universität Karlsruhe (1992).
- [5] J. Troeltsch: Untersuchungen zur Optimierung der Herstellung ebener Abformwerkzeuge; Diplomarbeit Universität Karlsruhe (1993).
- [6] J. Mohr, P. Bley, M. Strohrmann, U. Wallrabe: Microactuators Fabricated by the LIGA Process; Proc. Actuator 92, pp. 19-23, Bremen, Germany (1992).
- [7] M. Strohrmann, O. Fromhein, W. Keller, K. Lindemann, J. Mohr: LIGA-Sensoren und intelligente Sensorsysteme zur Messung von Beschleunigungen; dieses Heft.
- [8] R. Ruprecht, A. Both, W. Bacher: Plastic Molding and Electroforming of LIGA Microstructures onto Microelectronic Circuits; MME Neuchâtel, Switzerland (1993), (to be published).
- [9] M. Harmening, W. Bacher, P. Bley, A. El-Kholi, H. Kalb, B. Kowanz, W. Menz, A. Michel, J. Mohr: Molding of Three dimensional Microstructures by the LIGA Process; MEMS '92, Proc. IEEE Cat. Nr. 0-7803-0497-7/92 pp. 202-207, Travemünde, Germany (1992).
- [10] C. Burbaum, J. Mohr: Herstellung von mikromechanischen Beschleunigungssensoren in LIGA-Technik; KfK-Bericht 4859 (1991).
- [11] A. Michel, R. Ruprecht, M. Harmening, W. Bacher: Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern; KfK-Bericht 5171 (1993).
- [12] J. Mohr, W. Ehrfeld, D. Münchmeyer: Analyse der Defektursachen und der Genauigkeit der Strukturübertragung bei der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung; KfK-Bericht 4414 (1988).
- [13] W. Bacher, R. Ruprecht, A. Michaelis, J. W. Schultze, A. Thies: Metallabscheidung auf Substraten für Mikrogalvanik; Dechema-Monographien Band 125, S. 459-471, VCH - Verlag, Weinheim (1992).
- [14] K. Kadel: Entwicklung eines subtraktiven Strukturierungsverfahren zur Herstellung von Röntgenzwischenmasken für das LIGA-Verfahren; Dissertation Universität und Kernforschungszentrum Karlsruhe (1993).

Optische Lithographie als Strukturierungsmethode der Mikrotechnik und spezielle Anwendungen für den LIGA-Prozeß

J. Schulz, J. Mohr
Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Die optische Lithographie ist im Bereich der Halbleiterstrukturierung die am weitesten verbreitete Strukturierungsmethode. Nach einem kurzen Rückblick auf die Entwicklungsgeschichte werden die andersartigen Anforderungen im Bereich der Mikrosystemtechnik herausgestellt. Nach der Darstellung der technologischen Möglichkeiten am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) wird gezeigt, daß die optische Lithographie mit positiven Resists in vielen Fällen eine Alternative zur Röntgentiefenlithographie darstellen kann. So sind durch mehrfache Auftragung des Photolacks AZ4562 Resiststrukturen bis 64 µm Dicke mit einem Aspektverhältnis von 6 herstellbar. Weiterentwicklungen im Bereich der Resisttechnik können die Strukturqualität und damit das Anwendungspotential der optischen Lithographie in der Mikrostrukturtechnik noch beträchtlich erweitern. Die derzeitigen Beiträge der optischen Lithographie zum LIGA-Verfahren (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung, Kunststoff Abformung) werden am Beispiel einer weiteren Ebene über der LIGA-Ebene sowie an der optischen Strukturierung von Röntgenmasken dargestellt.

1. Historischer Rückblick

Unter den Strukturierungsmethoden wie z.B. Röntgen-, Elektronen- und Ionenstrahlolithographie ragt die optische Lithographie wegen des sehr günstigen Preises, der hohen Zuverlässigkeit und dem hohen Durchsatz deutlich hervor. Wegen der großen Wellenlänge der Photonen im Vergleich mit den Wellenlängen der oben genannten Teilchenstrahlen oder des Röntgenlichts ist die optische Lithographie auf dem Weg zu immer kleineren Strukturen (µm und Sub-µm-Bereich) jedoch am stärksten von Beugungserscheinungen betroffen.

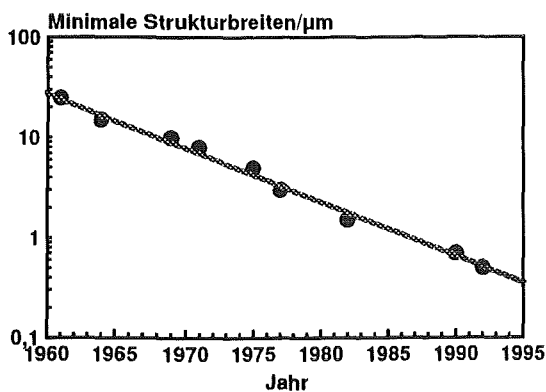


Abb. 1: Meilensteine der Entwicklung der optischen Lithographie

Veränderung	Jahr der Veränderung	Wirkung
Schleudern als Aufbringtechnik	~ 1970	homogene Schichten, gute Linienbreitenkontrolle
Reduktion der Wellenlänge, 650-436-405-365 nm	mehrfach	geringere Beugung
DQN- statt Negativ-Lacke	~ 1975	siehe Tabelle 2
Projektionsbelichtung statt Proximity	~ 1975	lange Lebensdauer der Masken, geringe Defekte auf Probe
Inkohärentes Licht	~ 1985	Auflösung
Trockenätzprozesse	~ 1987	Kantenschärfe
Phasenmasken	~ 1989	Auflösung
Mehrlagenprozesse	~ 1990	Auflösung und Tiefenschärfe

Tab. 1: Meilensteine der Entwicklung der optischen Lithographie

Das Bild einer Maske sowohl entlang der optischen Achse als auch in der Bildebene wird unscharf. Dennoch ist die optische Lithographie entgegen allen Unkenrufen auch im Sub- μm -Bereich weiterhin die bedeutendste Strukturierungsmethode. Immense Anstrengungen sowohl die Optik der Belichtungsgeräte als auch den Kontrast der Resists durch neuartige Prozesse zu verbessern, haben hierzu beigetragen [1]. Aus Tabelle 1 sind einige Meilensteine der technologischen Weiterentwicklung ersichtlich. Die Grafik stellt den zeitlichen Zusammenhang zur erreichten minimalen Strukturgröße dar.

2. Die Rolle der Optischen Lithographie in der Mikrosystemtechnik

Im Bereich der Silizium-Mikromechanik hat sich die optische Lithographie auf selbstverständliche Weise etabliert, da die Prozeßschritte weitgehend aus der Halbleitertechnologie, dem wesentlichen Motor der Innovationen auf dem Gebiet der Lithographie stammen. Da die Resiststrukturen vornehmlich der Maskierung bei Ätzprozessen dienen, liegen die Resistdicken typischerweise um $1\mu\text{m}$.

Die Anwendungsbreite der LIGA-Technik mit ihren großen Strukturhöhen bis $500\mu\text{m}$ und Aspektverhältnissen um 100 zeigt die Bedeutung der dritten Dimension für die Mikrostrukturtechnik. Weitere Vorteile der LIGA-Technik gegenüber der Silizium-Mikromechanik sind die frei wählbare Querschnittsgeometrie und die Möglichkeit, galvanisierbare metallische Werkstoffe einsetzen zu können. Mit Ausnahme des hohen Aspektverhältnisses und der guten Übertragung auch im μm -Bereich können diese Eigenschaften auch über die optische Lithographie nutzbar gemacht werden. Entsprechend liegt ein weites Potential der optischen Lithographie in der Mikrosystemtechnik bei der großflächigen, billigen und relativ schnellen Herstellung von Strukturen mit vergleichsweise geringen Anforderungen an das Aspektverhältnis und an die Strukturbreite. In Abschnitt 4 wird auf die diesbezüglichen Aktivitäten am IMT eingegangen.

3. Technologische Ausstattung am IMT

Die Ausstattung des Maskenlabors am IMT entspricht den heutigen Anforderungen an ein Entwicklungslabor. Neben halbautomatischen Geräten zum Belacken, Entwickeln und zur Strukturkontrolle (Schichtdicke, Linienbreite, etc.) ist der Maskaligner MA6 der Firma Süß hervorzuhelben. Mit dem Gerät können Masken und Substrate in 4" und 6" Format in Proximity- und Kontakt-

kopie belichtet werden. Im Gegensatz zur üblichen Technik, bei der die Maske ein Zoll größer sein muß als das Substrat, können mit dem Gerät am IMT Maske und Substrat gleich groß sein. Weiterhin können Substratdicken bis 10 mm verwendet werden. Um hohe Justiergenauigkeiten zwischen Maske und Substrat zu erreichen, müssen wegen der begrenzten Tiefenschärfe des Justiermikroskops die Justiermarke der Maske und diejenige im Substrat vertikal möglichst nahe beieinander liegen. Entsprechend sind die Anforderungen an die Ebenheit über die gesamte Substratfläche sehr hoch. Für den Fall einer Unebenheit von $10\mu\text{m}$ ist eine Justierung auf $\pm 1\mu\text{m}$ möglich.

Kriterium	DQN-Lacke (positiv)	Negativ-Lacke
Maximale Schichtdicke pro Auftrag	$\sim 15\mu\text{m}$	$\sim 60\mu\text{m}$
Haftung	schlecht auf Si, SiO ₂	meist gut
Empfindlichkeit	mäßig	sehr gut, Streulicht führt jedoch zur Hautbildung
Absorption	bleicht beim Belichten	wird opaker
Belichtungszeit reziprok zu Intensität	hervorragend	nur bei kleinen Intensitätsschwankungen
Entwicklungszeit	Linienbreite recht empfindlich	unempfindlich
Entwickler	basisch	organisch (belichteter Resist quillt)
Aspektverhältnis	> 3	< 1 wegen Quellen
Simulation	SAMPLE	nicht bekannt
Tonumkehr	möglich	nicht bekannt

Tab. 2: Vergleich der Eigenschaften positiver und negativer Photoresists

Am IMT werden nahezu ausschließlich Photolacke des Diazoquinon-Novolak-Typs (DQN) eingesetzt. Sie bestehen aus einem Novolakharz, geringen Mengen der photoaktiven Komponente (DQ) und einem Lösemittel, das bei einem Backschritt nach dem Aufschleudern thermisch ausgetrieben wird. Tabelle 2 gibt eine vergleichende Übersicht über die Eigenschaften dieses Typs gegenüber heute erhältlichen Negativlacken. Die meisten aufge-

listeten Kriterien weisen die DQN-Lacke als den geeigneten Lacktyp für die Mikrosystemtechnik aus. Leider ist die in einem Schleudervorgang aufbringbare Lackdicke vergleichsweise gering. Daher verwenden einige Forschungsgruppen Negativresists auf Polyimidbasis zur Strukturierung von z.B. magnetischen Mikromotoren [2] mit etwa 50 μm galvanisierter Strukturhöhe.

4. Mehrfachbelackung von DQN-Resists

Aus Tabelle 2 ist erkennbar, daß im allgemeinen DQN-Resists auch bei größeren Resistdicken bessere Eigenschaften als heutige Negativresists erwarten lassen. Auf die Eigenschaften derartiger Resiststrukturen wird im folgenden etwas genauer eingegangen. Hierbei kommen die Photolacke AZ4620 und AZ4562 der Firma Hoechst zum Einsatz, die sich sowohl im Nickelsulfamat- als auch im Kupfersulfatelektrolyten außerordentlich beständig zeigen. Mit dieser Technik der optischen Lithographie und anschließender Galvanik hergestellte Strukturen wurden vom IMT bereits an interessierte Kunden in verschiedenen Metallhöhen ausgeliefert.

Im Rahmen der Diplomarbeit [3] wurde festgestellt, daß AZ4562 einen etwas besseren Kontrast und höhere Transparenz besitzt als AZ4620, weshalb ersterer sich für die Strukturierung großer Resistdicken besser eignet. Durch mehrfache Belackung eines Substrats mit AZ4562 können Resistdicken bis 64 μm strukturiert werden.

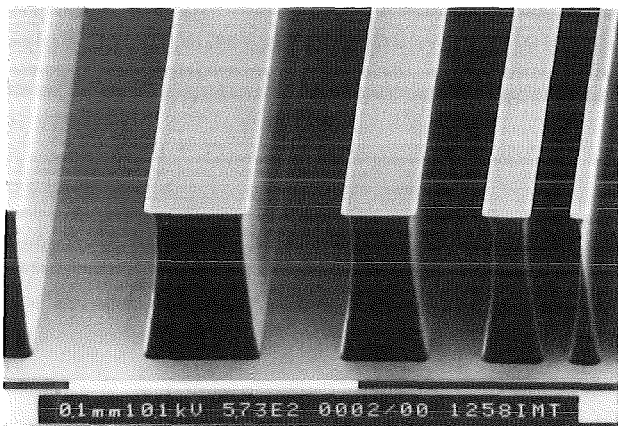


Abb. 2: 64 μm hohe Resiststruktur, die durch Mehrfachbelackung hergestellt wurde

Diese maximale Schichtdicke ergibt sich, weil einerseits die notwendige Backzeit mit der Lackdicke stark anwächst, andererseits eine thermische Zerstörung der photoempfindlichen Komponente des Lacks einsetzt. Abbildung 2 zeigt 64 μm hohe Resiststrukturen. Unabhängig von der Lackdicke

ist das Profil immer ausgeprägt tailliert, und die kleinsten übertragbaren Strukturen sind durch das Verschwinden der Taille gekennzeichnet.

Abbildung 3 zeigt die kleinsten Strukturbreiten in Abhängigkeit der Lackdicke. Das erreichte Aspektverhältnis liegt je nach Lackdicke zwischen 5 und 8. Die Breite der Maske und die Breite am Fuß der Strukturen stimmen sehr gut überein, während direkt unterhalb der Maske der Dunkelabtrag mit zunehmender Lackdicke ähnlich massiv anwächst wie die erforderliche Belichtungsdosis. Aus der Beugungstheorie für Kontaktbelichtung läßt sich ein Anstieg der Auflösung mit der Wurzel des Belichtungsabstandes ableiten. Um den qualitativ anderen Verlauf der beobachteten kleinsten Strukturen und das taillierte Profil erklären zu können, sind weitere Untersuchungen geplant. Sie werden u.a. den Einfluß der Lösemittelverteilung zum Thema haben.

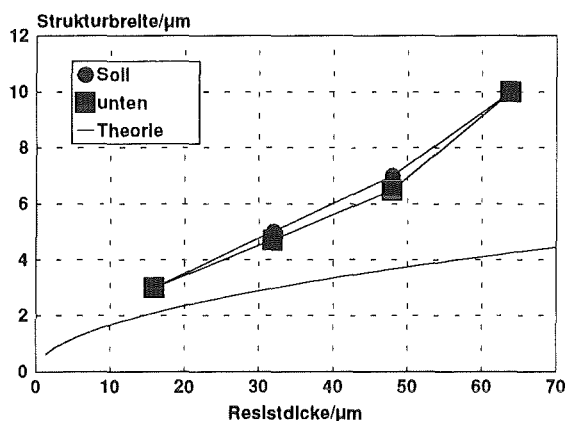


Abb. 3: Kleinste Resiststrukturen als Funktion der Resistdicke

Bezüglich Defekten ist der Belackungsschritt neben dem Kontaktbelichten der kritischste. Daher sollte auf mehrfache Belackungen verzichtet werden. Zur Erzielung größerer Schichtdicken in einem Vorgang werden z.Zt. neue Belackungstechniken und Lackansätze mit deutlich höherer Viskosität untersucht.

5. Optische Lithographie im LIGA-Verfahren

Die optische Lithographie leistet auch einen wesentlichen Beitrag für die Anwendungsbreite des LIGA-Verfahrens. Für bewegliche, elektrisch kontaktierbare Mikrostrukturen, wie z.B. den Beschleunigungssensor [4], erfolgt die Strukturierung der Opferschicht und der elektrischen Ebene durch optische Lithographie und anschließendes naßchemisches Ätzen der gesputterten Schichten.

Die Ebenen liegen also unter der LIGA-Struktur. Für die erreichbaren Justiergenauigkeiten gilt das in Abschnitt 2 genannte.

Eine Vielzahl weiterer Anwendungen eröffnet sich bei der Strukturierung einer weiteren Ebene über den LIGA-Strukturen. Ein Beispiel ist die Herstellung von Spulen, deren B-Feld in der Substratebene liegt.

Abbildung 4 zeigt 12 μm dicke Brücken aus Gold auf 100 μm hohen Nickel/Gold-Säulen. Zur Herstellung dieser Brücken wurden nach der röntgentiefenlithographischen Strukturierung von Polymethylmethacrylat (PMMA) die erzeugten Lochstrukturen durch Galvanoformung zur Hälfte mit Nickel und zur Hälfte mit Gold gefüllt. Nach der mechanischen Einebnung der Oberfläche durch Polierfräsen wurde eine durchgehend leitfähige Schicht aufgesputtert. Diese wurde mit Photolack beschichtet, der so lichtoptisch strukturiert wurde, daß über und zwischen je zwei Säulen ein Graben entstand. Danach wurde in diese Gräben galvanisch Gold abgeschieden. Anschließend wurden der Photolack, die leitfähige Schicht und das PMMA entfernt und damit die Brücken freigelegt.

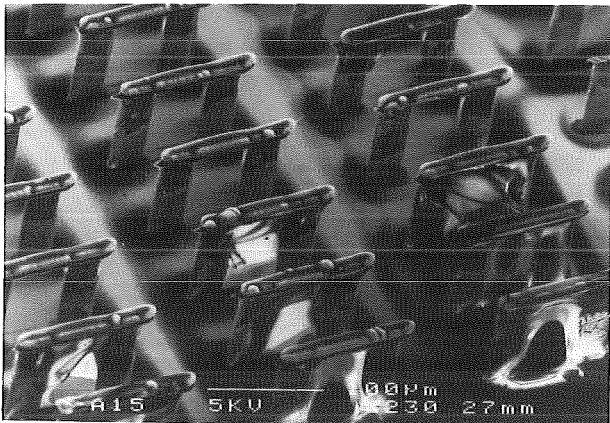


Abb. 4: 12 μm hohe Goldbrücken über 100 μm -Säulen, die zur Hälfte aus Nickel und zur anderen Hälfte aus Gold bestehen

Systematische Untersuchungen haben ferner gezeigt, daß sich schräge Absorberwände auf der LIGA-Maske bei der Röntgentiefenlithographie nur dann negativ auswirken, wenn entweder sehr enge Gräben sauber entwickelt werden müssen oder die Linienbreite kritisch ist [5]. Für viele Anwendungen können daher Röntgenmasken direkt lichtoptisch hergestellt werden, ohne daß sich die Kantenwinkel bei der Röntgentiefenlithographie störend auswirken.

So können z.B. Zwischenmasken mit Kantenwinkeln $>85^\circ$ optisch in 3 μm Resist hergestellt werden, deren 2.2 μm dicke Goldabsorber für eine

Röntgenstrukturierung von 30 μm PMMA ausreichen. Für die meisten Anwendungen stellt diese Zwischenmaskentechnik eine Alternative zur Strukturierung von Zwischenmasken mit dem Elektronenstrahlschreiber dar. Aus Abbildung 5a und 5b ist ersichtlich, daß die Auflösungsgrenze nicht durch die Röntgenmaske sondern durch Adhäsionskräfte nach der Entwicklung bedingt ist.

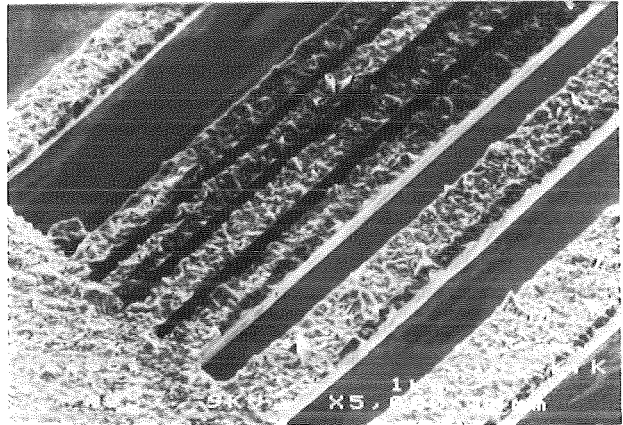


Abb. 5a: 2,2 μm dicke Goldabsorber als Röntgenzwischenmaske

Durch eine Strukturierung von 16 μm Photoresist werden Kantenwinkel von 83° erreicht. Die Schichten können galvanisch mit 12 μm Gold gefüllt werden. Als Röntgenarbeitsmaske ist der Kontrast dann zur Strukturierung von 300 μm PMMA ausreichend. Für recht viele Anwendungen halbiert sich daher etwa der Aufwand für eine Arbeitsmaske, da die Zwischenmaske entfallen kann. Zur weiteren Vereinfachung des Herstellungsprozesses wurden erste Versuche mit Polyimidmembranen statt der aufwendigen Titanmembranen erfolgreich abgeschlossen.

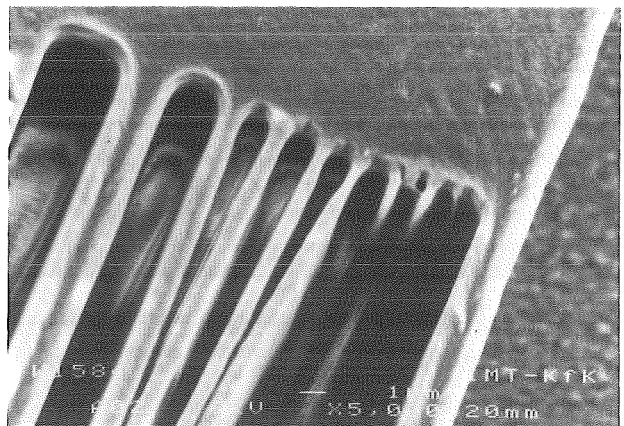


Abb. 5b: Mit obiger Zwischenmaske durch Röntgenlithographie hergestellte 30 μm hohe Resiststrukturen

6. Diskussion

Die optischen Lithographie am IMT ist vornehmlich orientiert an den Anforderungen der LIGA-Technik. So gehört die Vorstrukturierung von LIGA-Substraten wie z.B. elektrische Ebene und Opferschicht für bewegliche, elektrisch kontaktierbare Strukturen sowie die Röntgenmaskenherstellung zu den häufigsten Prozessschritten. Mit der Entwicklung von Prozessen mit dicken Resists stehen in gewissem Umfang bereits jetzt Alternativen zu LIGA zur Verfügung.

Für die nächste Zukunft gilt es, die Entstehung des taillierten Resistprofils zu verstehen, wobei die Intensitätsverteilung unter der Chrommaske, sowie der Einfluß der Lösemittelverteilung im Resist detailliert untersucht werden müssen. Bei der Resistentwicklung steht die Herstellung von Resists, die mit einem Beschichtungsvorgang in mehreren zehn μm Dicke aufgebracht werden können, im Vordergrund des Interesses. Dies sind die Voraussetzungen, um mittelfristig ein Aspektverhältnis von etwa 10 lichtoptisch realisieren zu können. Sind diese Ziele erreicht, so bleibt die optische Lithographie für zukünftige einfache Mikrosysteme die vielseitigste, zuverlässigste und billigste Technologie zur Strukturierung.

Literatur

- [1] W.M. Moreau: Semiconductor Lithography, NewYork, (1988), S.Wolf, R.N.Tauber: Silicon Processing, Sunset Beach, CA, (1986)
- [2] M.G. Allen: Polyimide-Based Processes for the Fabrication of Thick Electroplated Microstructures; Proceedings of the 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Yokohama, Japan, pp.60-65, (June 1993)
- [3] J. Schneider: Prozeß zur lichtoptischen Herstellung von Mikrostrukturen in positivem Photolack AZ4562; Diplomarbeit am Institut für Mikrostrukturtechnik, KfK, August (1992)
- [4] M. Strohrmann, O. Fromhein, W. Keller, K. Lindemann, J. Mohr: LIGA-Sensoren und intelligente Sensorsysteme zur Messung von Beschleunigungen; 1. PMT Statuskolloquium, Tagungsband (1993)
- [5] J. Schulz, A. El-Kholi, J. Götttert, K. Kadel, J. Mohr: The Influence of Sloped Absorber Sidewalls in Deep X-Ray Lithography; Microelectronic Engineering, Vol. 21, 117, (1993)

Mechanische Mikrofertigung - Verfahren und Anwendungen

W. Bier¹, A. Guber¹, G. Linder¹, Th. Schaller², K. Schubert²

1) Institut für Mikrostrukturtechnik

2) Hauptabteilung Versuchstechnik

Zusammenfassung

Metallische Oberflächen werden mit Mikrowerkzeugen aus Naturdiamant und Cermet sowie mit Mikrobohrern aus Hartmetall auf Hochpräzisions-Bearbeitungsmaschinen spanabhebend strukturiert. Bei Strukturfeinheiten von minimal ca. 10 µm sind Strukturturen von mehreren 100 µm möglich. Die erzeugten Mikrostrukturen dienen als Bausteine für den Aufbau dreidimensional strukturierter Mikrostrukturkörper oder als Werkzeuge für Ab- und Umformprozesse. Für eine Vielzahl von Anwendungen sind bereits Prototypen erfolgreich getestet worden, z.B. Mikrowärmeübertrager für Wärmeleistungen im kW-Bereich, Mikroreaktoren für chemische Prozesse, strukturierte Röntgenverstärkerfolien, Mikrowaben aus Kunststoff als Wirtsstrukturen für bio-medizinische Untersuchungen und Reflektorstrukturen. Bei mehreren Firmen werden in einer Explorationsphase im Rahmen von Zusammenarbeitsvereinbarungen Prototypen getestet.

1. Einleitung

Die Mechanische Mikrofertigung beruht auf der Oberflächenstrukturierung von Folien und Substraten durch Präzisionszerspanung mit profilierten Mikrowerkzeugen [1-3]. Hierbei haben sich besonders zwei Verfahren herausgebildet und bewährt. Beim ersten, dem sogenannten Bandverfahren, das gemeinsam mit der Firma MBB (heute Deutsche Aerospace AG, DASA) entwickelt wurde, werden Metallfolien mit profilierten Mikrodiamanten oder Hartmetallen an Hochpräzisions-Drehmaschinen spanabhebend profiliert und anschließend zu einem Mikrostrukturkörper zusammengefügt und verbunden. Als Verbindungstechnik wird dabei das Diffusionsschweißen angewendet, wobei die Verfahrensparameter für den Schweißprozeß den Erfordernissen der Mikrostrukturen gemäß für die bisher eingesetzten Metalle Silber, Kupfer und Edelstahl durch individuelle Versuchsreihen optimiert werden mußten. Bei dem zweiten mechanischen Strukturierungsverfahren, dem sogenannten Vakuumspanverfahren, werden die Oberflächen dickerer Substrate ebenfalls mit profilierten Mikrodiamanten an Hochpräzisions-Fräsmaschinen strukturiert. Hierbei lassen sich weitreichende Variationen der Strukturierung durch Kombinationen von Werkzeugquerschnitten und Anzahl der Bearbeitungsrichtungen durchführen. Die auf diese Weise in verhältnismäßig kleinen Stückzahlen und Flächen erzeugten Mikrostrukturen dienen beispielsweise als Werkzeuge für verschiedene Abformverfahren.

Für eine Vielzahl von Anwendungen sind bereits Prototypen erfolgreich getestet worden. In der vorliegenden Arbeit werden zunächst solche Anwendungsbeispiele ausführlicher beschrieben, von

denen bereits Industriepartnern, Instituten des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KfK) und der der Universität Karlsruhe sowie Kliniken Prototypen für Testzwecke zur Verfügung gestellt bzw. verkauft worden sind. Im Anschluß daran werden die seit dem Statusbericht 1991 zum Arbeitsschwerpunkt Mikrotechnik [3] erzielten Verbesserungen und Weiterentwicklungen in der Fertigungstechnologie der Mechanischen Mikrofertigung kurz beschrieben.

2. Anwendungsbeispiele

2.1 Mikrowärmeübertrager

Parallel strukturierte Folien können nach dem Bandverfahren wirtschaftlich in großen Stückzahlen hergestellt und mit weiteren Verfahrensschritten direkt zu Mikrostrukturkörpern verschiedenster Ausprägungen zusammengesetzt werden. Ein Beispiel dafür stellen Mikrowärmeübertrager in Kreuzstrombauweise dar, über deren Herstellung bereits früher ausführlich berichtet wurde [4-5]. Abb. 1 zeigt die Standardversion eines Mikrowärmeübertragers aus Edelstahl mit einem aktiven Übertragungsvolumen von 1 cm³, der bereits mit den Anschlußleitungen zur Medienversorgung der beiden voneinander getrennten Passagen versehen ist. Aus der Abbildung ist das Prinzip der Adaptierung des eigentlichen Mikrostrukturbauteiles, von dem ein Beispiel in Abb. 2 gezeigt wird, mit der Außenwelt erkennbar: Vier vertikale Ecknähte und eine untere und obere Ringnaht sind elektronenstrahlgeschweißt und verbinden hochvakuumdicht den vorher in einem getrennten Arbeitsgang hergestellten Mikrowärmeübertrager mit den in einem Kreuzstück eingeschweißten Anschlußrohren für die Medien-

versorgung. Auf diese Weise stehen Mikrowärmeübertrager in Kreuzstrombauweise aus Materialien wie Kupfer oder Edelstahl zur Verfügung, deren volumetrischer Wärmedurchgangskoeffizient für das Medium Wasser mit über $300 \text{ MW/m}^3\cdot\text{K}$ um 1 bis 2 Größenordnungen über den mit konventionellen Kompaktwärmeübertragern erreichten Werten liegt.

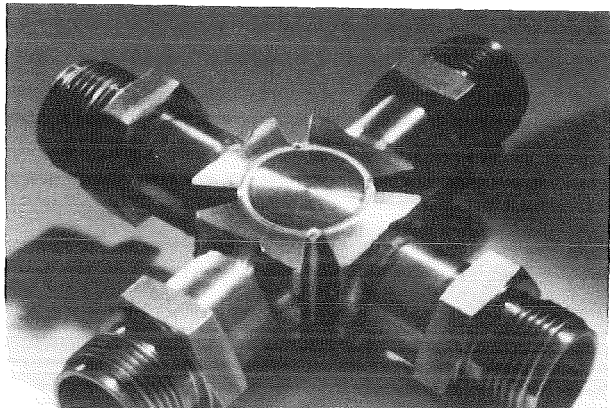


Abb. 1: Mikrowärmeübertrager aus Edelstahl, in ein Edelstahlkreuzstück eingeschweißt. Zwischen den Passagen und nach außen besteht Ultrahochvakuumdichtigkeit, die innere Überdruckfestigkeit beträgt mindestens 25 bar.

Gegenüber flüssigen Wärmeträgern zeigte sich bei Versuchen mit gasförmigen Wärmeträgern, daß die Strukturmaterialien Kupfer und Edelstahl aufgrund ihrer stark unterschiedlichen Wärmeleitkoeffizienten einen meßbaren Einfluß auf das Wärmeübertragungsverhalten besitzen. Mit dem aus Edelstahl hergestellten Wärmeübertrager wurden bereichsweise (bei kleinen Durchsätzen bzw. Reynoldszahlen) bessere Übertragungsleistungen gemessen als mit dem aus Kupfer gefertigten, was auf Effekte der Längswärmeleitung im Wand- und Rippenmaterial zurückgeführt werden konnte [6]. Im Falle gasförmiger Wärmeträger besitzen Mikrowärmeübertrager mit über $10 \text{ MW/m}^3\cdot\text{K}$ volumetrische Wärmedurchgangskoeffizienten, die wiederum um mindestens eine Größenordnung über den mit konventionellen Apparaten erreichbaren Werten liegen.

Im Institut für Technische Physik des KfK wurden Mikrowärmeübertrager aus Kupfer und Edelstahl erstmalig auf ihre Eignung bei den sehr tiefen Temperaturen des flüssigen Heliums untersucht. Bei sämtlichen Messungen lagen hier die Übertragerleistungen des Kupferapparates über denen des Edelstahlapparates [7].

Inzwischen ist das Interesse der Industrie an Mikrowärmeübertragern deutlich gewachsen. Mehrere Firmen erhielten im Rahmen von Zusammenarbeitsvereinbarungen Prototypen für Voruntersuchungen. Die Anwendungsbereiche erstrecken

sich dabei auf die Gebiete Energietechnik, Mikroelektronik und Medizintechnik.

Eine zukünftige Serienfertigung von Mikrowärmeübertragern kann vom KfK-Lizenzpartner DASA übernommen werden. Zur Auslegung und Vermarktung von kompletten Wärmeübertragungssystemen wird mit der Firma STN (Systemtechnik Nord) eine vertragliche Vereinbarung ausgearbeitet. Die Weiterentwicklung sowie die Herstellung von einzelnen Fertigungsmustern und Prototypen wird weiterhin dem KfK obliegen.

2.2 Mikroreaktoren

Parallel zur Nutzung als reiner wärmetechnischer Apparat findet der Mikrowärmeübertrager als Mikroreaktor zunehmendes Interesse in der chemischen Industrie. Dabei stehen zwei Zielrichtungen im Vordergrund. Durch die große spezifische Oberfläche von ca. 300 cm^2 pro cm^3 liegt es nahe, im Reaktorinneren heterogen katalysierte Reaktionen durchzuführen. Am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe konnte der Nachweis erbracht werden, daß Mikroreaktoren mit glatten Wänden in der Petrochemie prinzipiell für die katalysierte partielle Gasphasen-Oxidation von Kohlenwasserstoffen einsetzbar sind [8]. Für Grundlagenuntersuchungen an prinzipiell ähnlichen Reaktionen wurden Mikroreaktoren aus Reinsilber, Reinkupfer und Edelstahl im Rahmen von Zusammenarbeitsvereinbarungen an industrielle Anwender verkauft (vgl. Abb. 2).

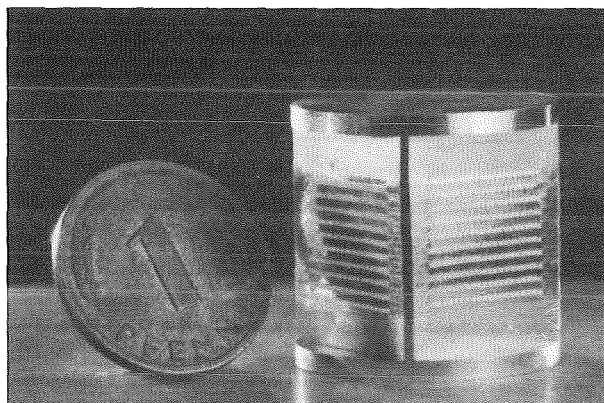


Abb. 2: Foto eines diffusionsgeschweißten Mikroreaktors in Kreuzstrombauweise aus Reinsilber. Für die technische Anwendung wird der Mikroreaktor nach dem Lecktest in ein Gehäuse ähnlich dem in Abb. 1 dargestellten eingeschweißt.

Für stark exotherme und schnelle Reaktionen ist der Mikroreaktor deshalb besonders gut geeignet, weil die anfallende Wärme in einer Kühlpassage äußerst effektiv und schnell abgeführt werden kann. Ein zusätzlicher Vorteil liegt darin, daß die Verweilzeiten im Reaktor im Vergleich zu konven-

tionellen Wärmeübertragungssystemen äußerst kurz gehalten werden können. Für Mikroreaktoren dieser Art ist es notwendig, daß die Reaktionspartner in einem besonderen Mikrovermischer laminar vermischt werden und nach einem sehr kurzen Vermischungsweg in den Reaktor eintreten. Ein solcher Mikroreaktor besitzt somit fünf Zu- und Abgänge für Edukte, Produkt und Kühlung bzw. Heizung. Erste Prototypen dieser fünfpoligen Bauart wurden an die chemische Industrie zum Test ausgeliefert.

2.3 Mikrostrukturierte Röntgenverstärkerfolien

Bei der Mikrostrukturierung von Substraten mit einem keilförmigen Diamantwerkzeug in zwei zueinander senkrechten Bearbeitungsrichtungen entstehen vierseitige Pyramiden. Benutzt man diese Oberfläche als Abformwerkzeug für Reproduktionen in Kunststoff, so enthalten die beispielsweise an einer Spritzgießmaschine hergestellten Kunststoffabformungen eine Oberfläche mit der inversen Pyramidenstruktur, d.h. einer Vielzahl von pyramidenförmigen Vertiefungen. Nach der Befüllung dieser Vertiefungen mit einem Röntgenleuchtstoff entsteht eine mikrostrukturierte Röntgenverstärkerfolie (Abb. 3).

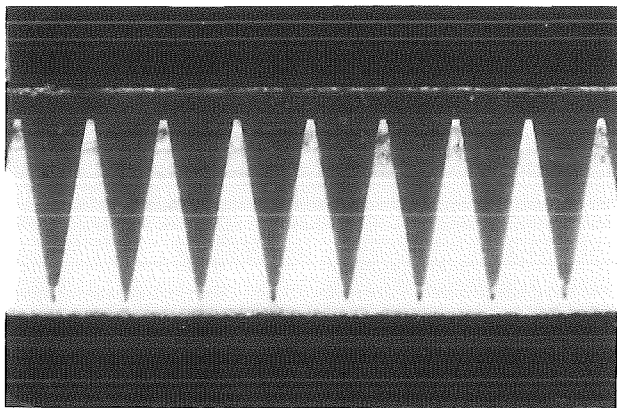
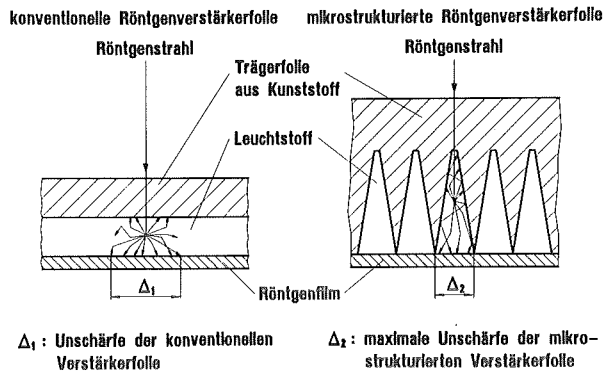


Abb. 3: Querschnitt durch eine mit dem Röntgenleuchtstoff Gadoliniumoxisulfid ($Gd_2O_2S:Tb$) und Bindemittel befüllte, strukturierte Kunststoffolie nach der mechanischen Endbearbeitung. Die hellen Bereiche entsprechen den befüllten Mikrokammern.

In der medizinischen Röntgendiagnostik werden fast ausschließlich Röntgenfilme in Kombination mit Verstärkerfolien eingesetzt, da diese eine ganz wesentliche Reduzierung der Strahlenbelastung des Patienten während einer Röntgenaufnahme bewirken. Der Röntgenleuchtstoff, z.B. Gadoliniumoxisulfid, wandelt Röntgenquanten in sichtbares Licht um, für welches die normalen Filmemulsionen wesentlich empfindlicher sind als für

Röntgenlicht. Bei diesen konventionellen Verstärkerfolien ist der Röntgenleuchtstoff in einer gleichmäßig dicken Schicht aufgebracht. Bei mikrostrukturierten Verstärkerfolien soll durch die Kammerung des Leuchtstoffs in diskreten Mikrozellen bei gleicher effektiver Leuchtstoffschichtdicke das Auflösungsvermögen verbessert werden. Das Prinzip dieses Vorgangs geht aus Abb. 4 hervor.



Δ_1 : Unschärfe der konventionellen Verstärkerfolie
 Δ_2 : maximale Unschärfe der mikrostrukturierten Verstärkerfolie

Abb. 4: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer mikrostrukturierten Röntgenverstärkerfolie. Im Gegensatz zur konventionellen Verstärkerfolie (links), bei der der Röntgenleuchtstoff flächig auf einer Trägerfolie aufgebracht ist, wird bei der mikrostrukturierten Verstärkerfolie (rechts) der Röntgenleuchtstoff in diskrete Mikrokammern eingefüllt. Die durch Streuung des Lumineszenzlichtes erzeugte Unschärfe kann in diesem Fall maximal in der Größenordnung der Öffnung der Mikrokammern liegen.

Die durch Lichtstreuung an den Kristallen des Leuchtstoffs im Leuchtstoff-Bindemittel-Gemisch erzeugte maximale Unschärfe des Lumineszenzlichtes liegt im Falle der strukturierten Röntgenverstärkerfolie in der Größe der Kammeröffnung. Es ist einsichtig, daß diese Unschärfe bei genügend kleinen Abmessungen der Mikrokammern prinzipiell kleiner sein kann als im Falle der nichtstrukturierten Verstärkerfolien, bei denen sich gestreutes Licht ungehindert in alle Richtungen ausbreiten kann.

Der Test der im Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) hergestellten mikrostrukturierten Verstärkerfolien mit pyramidenförmigen Mikrokammern wird im Zentralröntgeninstitut des Städtischen Klinikums Karlsruhe durchgeführt. Die ersten orientierenden Messungen zeigen, daß im Vergleich mit einer konventionellen hochauflösenden Verstärkerfolie mit praktisch gleicher effektiver Leuchtstoffschichtdicke, d.h. Empfindlichkeit, die strukturierten Verstärkerfolien ein deutlich besse-

res Auflösungsvermögen besitzen. Das Auflösungsvermögen wird üblicherweise in Linienpaaren pro Millimeter (LP/mm) mittels Lupenauswertung am Leuchtkasten ermittelt. Dieser charakteristische Wert für das Auflösungsvermögen von Röntgenverstärkerfolien konnte bisher unter konstanten Randbedingungen von 12,5 LP/mm bei der konventionellen Verstärkerfolie auf 16,6 LP/mm bei der strukturierten Verstärkerfolie gesteigert werden [9].

Zur Zeit werden weitere Tests zur Qualifizierung der strukturierten Verstärkerfolien durchgeführt wie z.B. die Bestimmung der Modulationsübertragungsfunktion und der Rauscheigenschaften dieser Systeme sowie vergleichende Aufnahmen an medizinischen Objekten.

Nach heutigem Kenntnisstand könnte die zukünftige Entwicklung in zwei Richtungen ablaufen: Entwicklung von Verstärkerfolien mit höherem Auflösungsvermögen bei gleichem Dosisbedarf für diejenigen Anwendungsfälle, bei denen ein Höchstmaß an Auflösung gefordert wird (z.B. Mammographie-Aufnahmen) und die Entwicklung von Verstärkerfolien mit weniger Dosisbedarf dort, wo das Auflösungsvermögen der bisherigen Verstärkerfolien ausreichend ist. Im zweiten Fall ist das Rastermaß der Feinstrukturen zu vergrößern. Das führt bei Beibehaltung der Bearbeitungswerkzeuge zu einer größeren Strukturhöhe und somit zu einer größeren effektiven Leuchtstoffschichtdicke und entsprechend zu einer höheren Empfindlichkeit.

Eine Kooperation mit einem Industriepartner zur Vermarktung der Röntgenverstärkerfolien wird vorbereitet. Darüber hinaus wird der Einsatz von strukturierten Leuchtschirmen in der industriellen Radiographie gemeinsam mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und interessierten Industriefirmen untersucht.

2.4 Mikrowaben als Wirtstrukturen für Zellkulturen in der Bio-Medizin

Im Institut für Toxikologie des KfK (ITOX) wird mit vom IMT hergestellten Kunststoffmikrostrukturen experimentiert [10]. Die Kunststoffstrukturen sind dreidimensionale, meist kubische Gehäuse mit dünnen Wänden und einem integrierten Boden mit Mikroporen. Durch dreidimensionale Kultivierung von Säugetierzellen in diesen wabenförmigen Mikrostrukturen aus gewebefreundlichem Material ist es möglich, Zellen und Gewebe unter möglichst organnahen Bedingungen zu untersuchen.

Die Herstellung der Mikrostrukturen aus Plexiglas (PMMA), das sich als ausreichend gewebefreundlich erwiesen hat, erfolgt durch Spritzgießabformung eines Werkzeuges, in welches die Negativform der gewünschten Struktur mit Metho-

den der Mechanischen Mikrofertigung eingebracht wurde. Abb. 5 zeigt die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (REM-Aufnahme) eines Messingwerkzeuges mit gestuften Strukturen, dessen PMMA-Abformung nach einem weiteren mechanischen Arbeitsschritt zu dem gewünschten Produkt (Abb. 6) führt.

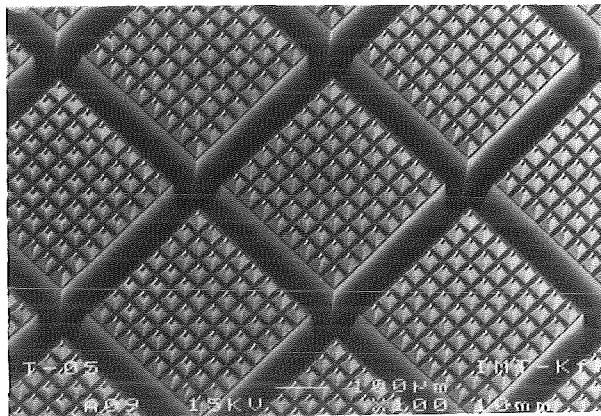


Abb. 5: REM-Aufnahmen eines Messingwerkzeuges mit gestuften Mikrostrukturen. Auf den quadratischen $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ großen Oberflächen der $300\ \mu\text{m}$ hohen Säulen befinden sich jeweils 64 Mikropyramiden.

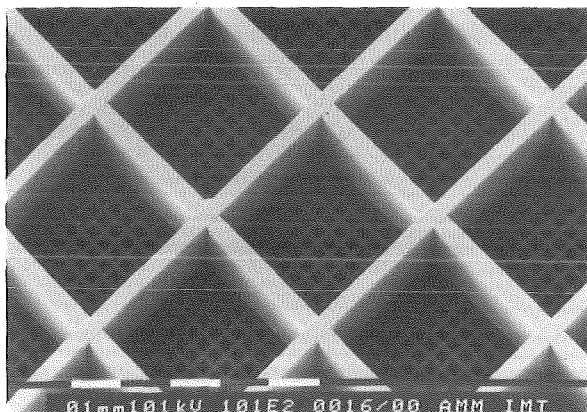


Abb. 6: REM-Aufnahme der Kunststoffabformung des in Abb. 5 gezeigten, gestuften Messingwerkzeuges. Die Aufnahme zeigt kubische Waben aus PMMA mit integrierter Bodenstruktur. Bei einer mechanischen Endbearbeitung der abgeformten Mikrostruktur werden pro Wabe 64 Mikroöffnungen von etwa $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ Querschnitt im integrierten Boden freigelegt.

Das Ergebnis sind kubische Waben mit einem Freivolumen von ca. $300 \times 300 \times 300\ \mu\text{m}^3$, Wandstärken von ca. $50\ \mu\text{m}$ und einem integrierten porösen Boden mit Mikrolöchern von ca. $10 \times 10\ \mu\text{m}^2$ Öffnungsquerschnitt, wobei diese Öffnungen im Zellexperiment zur nutritiven Versorgung der Zellaggregate dienen. In einer Reihe von Versuchen

mit Säugetierzellen wurden im ITOX sowohl Maus-L-Zellen als auch Rattenleberzellen im räumlichen Verband vital in Kultur gehalten. In weiteren Versuchen soll mit Polylactid als zellfreundlichem und im Organismus resorbierbarem Material experimentiert werden.

2.5 Reflektorstrukturen

Es ist ein wesentliches Merkmal von Reflektorstrukturen auf der Basis von Tripelspiegeln, daß Lichtstrahlen - abgesehen von einem geringen seitlichen Versatz - unabhängig vom Einfallswinkel in sich selbst reflektiert werden (Retrospiegel). Derartige Reflektoren, deren reflektierende Flächen Würfelflächen darstellen, finden im Alltag vielfältige Verwendung, z.B. in Rückstrahlern von Leitpfosten, an Fahrrädern und Kraftfahrzeugen. Die Größe der einzelnen Tripelspiegelelemente, also die Schlüsselweite der quadratischen Reflektorflächen, liegt üblicherweise im Bereich von Millimetern. Dies führt zu relativ dicken und starren Gebilden der Reflektoren, die generell durch Abformung eines entsprechenden metallischen Mutterwerkzeuges hergestellt werden.

Für eine hohe Flexibilität in der Anwendung und zur Materialersparnis ist es wünschenswert, Reflektoren in Folienstärke herzustellen. Die Kantenlänge der Würfelflächen von einigen Millimetern bei konventionellen Reflektoren konnte unter Ausnutzung der mechanischen Mikrofertigungstechniken um eine Größenordnung reduziert werden.

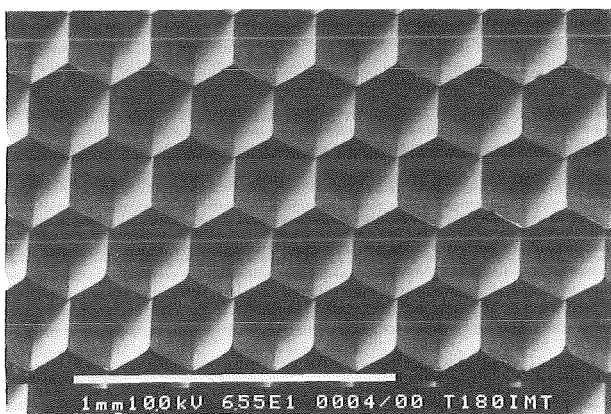


Abb. 7: REM-Aufnahme eines Mikro-Tripelspiegels aus kubischen Reflektorelementen. Die Kantenlänge der Kuben beträgt 180 μm .

Abb. 7 zeigt die REM-Aufnahme der PMMA-Abformung eines Mikro-Tripelspiegels aus kubischen Reflektorelementen mit 180 μm Kantenlänge. Aus der Abbildung ist ersichtlich, daß die Grundstruktur des kubischen Tripelspiegels ein über die einfachen Nutzenstrukturen hinausgehendes, echt drei-

dimensionales Oberflächenprofil aufweist, das sowohl im Mutterwerkzeug als auch im abgeformten Produkt identisch ist.

Ein Tripelspiegel aus PMMA mit 400 μm Kantenlänge zeigte sich im Vergleich mit einem konventionellen Tripelspiegel, der gleichartig geformte Reflektorelemente mit Kantenlängen von 4 mm enthielt, hinsichtlich Reflexionsvermögen und diffuser Rückstreuung überlegen. Die auf Anhieb gute Qualität des Labormusters hat gezeigt, daß mikrostrukturierte Reflektoren mit kubischen Tripelspiegeln bis zu einer Kantenlänge der Kuben von etwa 200 μm die Möglichkeit zur Herstellung hochwertiger Reflektorfolien eröffnen.

3. Weiterentwicklung der Fertigungstechnologie

Die eingangs erwähnten Strukturierungsmethoden der Mechanischen Mikrofertigung wurden zwischenzeitlich durch das Mikrobohren mit Bohrern aus Hartmetall ergänzt. Mit kommerziell erhältlichen Mikrobohrern verschiedener Durchmesser bis herunter zu 50 μm können Lochmuster mit hoher Lochdichte in Metallen erzeugt werden (Abb. 8). Sie eignen sich beispielsweise als optische Hochpaßfilter im infraroten Wellenlängenbereich [11]. Darüber hinaus ist es gelungen, durch galvanische Umwandlung der Lochstruktur die inverse Säulenstruktur zu bilden, die ihrerseits als Abformwerkzeug für Kunststoffabformungen weiterverwendet werden kann.

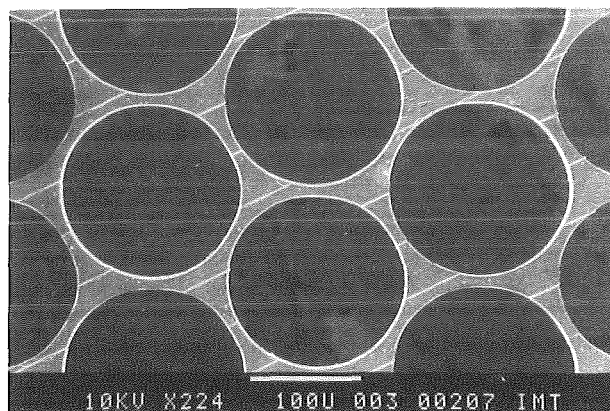


Abb. 8: REM-Aufnahme einer gebohrten IR-Filterstruktur aus Messing. Die Dicke des Filters beträgt 200 μm bei Lochdurchmessern von ebenfalls 200 μm . Der Lochabstand liegt bei 10 μm , d.h. die geometrische Transparenz des Filters beträgt 82 %.

Für das mechanische Bearbeiten von Siliziumwafern werden als Schneidwerkzeuge sogenannte Diamond Blades eingesetzt [12]. Die Siliziumwafer

können sowohl parallel als auch kreuzweise strukturiert werden, d.h. es werden rechteckförmige Kanäle sowie Quaderstrukturen erzeugt. Abb. 9 zeigt die REM-Aufnahme von Quaderstrukturen mit einem quadratischen Querschnitt von $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$. An derartigen Mikrosäulen-Arrays wurden im Institut für Materialforschung des KfK (IMF I) Festigkeitsprüfungen vorgenommen[13].

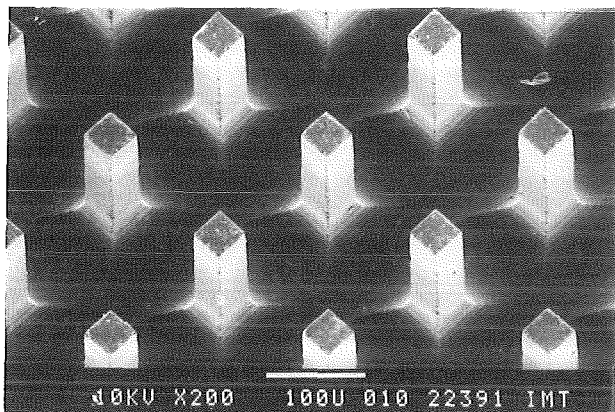


Abb. 9: REM-Aufnahme eines aus einer Siliziumwafer herausgefrästen Säulenfeldes. Die Säulen haben eine Höhe von $300\ \mu\text{m}$ bei einem Querschnitt von $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ und bei einem Rastermaß von $140\ \mu\text{m}$.

4. Ausblick

Die mechanischen Mikrostrukturierungsverfahren bieten derzeit für ausgewählte Anwendungen maßgeschneiderte Lösungen. Um die Strukturvielfalt zu erhöhen und die wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten zu verbessern, werden die Verfahren ständig weiterentwickelt und um neue ergänzt, z.B. um die Strukturierung an Hochpräzisions-Drehmaschinen. Durch Abformverfahren wie Spritzgießen, Prägen und Galvanisieren lassen sich Mikrostrukturwerkzeuge vielfach abformen. Intensiver Arbeit bedarf noch die Vervielfältigung der mikrostrukturierten Werkzeuge selbst durch Weiterentwicklung der Abformverfahren und deren Kombination mit speziellen mikrostrukturtauglichen Prozessschritten, z.B. Beschichtungsverfahren. Durch Zusammensetzen solcherart vielfältiger Mikrostrukturwerkzeuge zu einem großflächigen Abformwerkzeug ist die für die meisten Anwendungen geforderte Formatvergrößerung wirtschaftlich zu erreichen. In der Kombination mit anderen Strukturierungsverfahren, z.B. mit dem im KfK entwickelten LIGA-Verfahren, liegen weitere, heute noch kaum absehbare Möglichkeiten der Mikrotechnik.

Literatur

- [1] W. Bier, K. Schubert: Herstellung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis durch Präzisionszerspanung mit Formdiamanten; KfK-Bericht 4363, (1988)
- [2] K. Schubert, W. Bier, G. Linder, D. Seidel: Profilierte Mikrodiamanten für die Herstellung von Mikrostrukturen; Industrie Diamanten Rundschau IDR, Nr. 4, 204, (1989)
- [3] W. Bier, G. Linder, D. Seidel, K. Schubert: Mechanische Mikrotechnik; KfK-Nachrichten 23, 2-3, 165, (1991)
- [4] K. Schubert, W. Bier, G. Linder, D. Seidel: Herstellung und Test von kompakten Mikrowärmeübertragern; Chem.-Ing.-Tech. 61, Nr. 2, 172, (1989)
- [5] W. Bier, W. Keller, G. Linder, K. Schubert, D. Seidel: Manufacturing and Testing of Compact Micro Heat Exchangers with High Volumetric Heat Transfer Coefficients; Symposium Volume, DSC - Vol. 19, ASME, 189, (1990)
- [6] W. Bier, W. Keller, G. Linder, D. Seidel, K. Schubert, H. Martin: Gas-to-gas heat transfer in micro heat exchangers; Chemical Engineering and Processing, Vol. 32, No. 1, 33, (1993)
- [7] S. Wild: Untersuchung von Mikrowärmeübertragern bei LHe-Temperaturen; Diplomarbeit, Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik, Universität Karlsruhe, (1992)
- [8] G. Wießmeier: Untersuchungen zur heterogen katalysierten Oxidation von Propen in einem Mikrostrukturreaktor; Diplomarbeit, Engler-Bunte-Institut, Universität Karlsruhe, (1991)
- [9] W. Bier, A. Guber, H.-J. Fernholz, H. Magnus, K. Schubert, R. Wittgruber: Herstellung und Test von mikrostrukturierten Röntgenverstärkerfolien; Z. Med. Phys. 3, (1993), (im Druck)
- [10] K. Weibezahn, G. Knedlitschek, H. Dertinger, Th. Schaller, K. Schubert, W. Bier: Substrat für Zellkulturen und Kultur von Zellen oder Zellaggregaten; DP 41 32 379. 3-41, (1993)
- [11] W. Bier, A. Guber: Qualification of Mechanically Fabricated IR Filters Using FTIR-Spectroscopy; SPIE Vol. 1575, 534, (1992)
- [12] W. Bier, A. Guber, U. Köhler, G. Linder: Alternative Methoden der Siliziumbearbeitung; Kongressbericht Gerätetechnik und Mikrosystemtechnik VDI-Berichte Nr. 960, 735, (1992)
- [13] W. Dienst: Festigkeitsprüfung an keramischen Mikroproben; DVM, Tagungsband Werkstoffprüfung 1992, 281, (1992)

**Chemische Mikrosensoren,
Materialwissenschaften**

Mehrstufige Gassensorsysteme zur Prozeß- und Umweltüberwachung

J. Goschnick, P. Althainz, A. Dahlke, H.J. Ache

Institut für Radiochemie

Zusammenfassung

Es wurden neuartige zweistufige Leitfähigkeitsgassensoren hergestellt, die aus einer mehrere 100 nm starken Zinndioxidschicht mit einem ultradünnen Überzug von SiO_2 bestehen. Zur Deposition des SiO_2 bei möglichst niedrigen Temperaturen wurde eine spezielle CVD-Technik (Chemical Vapour Deposition) entwickelt, mit der aus Tetraethylorthosilicat und Wasser bei Temperaturen von nur $300\text{ }^\circ\text{C}$ SiO_2 direkt auf dem Zinndioxid gebildet wird. Es wurden SnO_2 -Sensorelemente mit durchschnittlich 2 nm dicker poröser SiO_2 -Beschichtung hergestellt, die zu 85% das Metalloxid abdeckte.

Der Leitfähigkeitstest mit methan- und propanhaltiger Luft zeigte im Vergleich zum unbeschichteten Zinndioxid eine Selektivitätserhöhung für den Methannachweis durch eine exzeptionelle Empfindlichkeitssteigerung für Methan, die nur durch eine aktive chemische Mitwirkung des SiO_2 erklärt werden kann. Die Nachweisgrenze für Methan liegt derzeit bei ca. 2 ppm für eine Sensortemperatur von $350\text{ }^\circ\text{C}$. Die Ansprechzeit beträgt für Konzentrationen ab 500 ppm Methan 50 sec. Damit werden Leistungsdaten durch die Beschichtung erreicht, die bislang nur mit den wirksamsten Dotierungen erzielt werden konnten. Geplante Verbesserungen der Langzeitstabilität und Senkung der Meßtemperatur lassen noch eine deutliche Steigerung der Nachweisempfindlichkeit für Methan erwarten.

1. Einleitung

Die Luftüberwachung wie die Kontrolle von Prozeßgasen erfordern häufig an einer Vielzahl örtlich dichter Meßpunkte kontinuierliche Messungen, die gleichermaßen zuverlässig und schnell Gaszusammensetzungen erfassen, um vor Gefahrensituationen zu warnen oder Prozeßabläufe zu steuern. Dabei verlangt die Vielzahl der Meßorte kostengünstige Meßwertaufnehmer, die angesichts von Platzbeschränkungen oder mobilen Meßpositionen möglichst klein, leicht und robust sein sollen. Aber auch im Bereich des privaten Konsums besteht erheblicher Bedarf nach preiswerten Luftmeßsensoren. Beispiele sind die engmaschige Luftqualitätsüberwachung in urbanen Gebieten, die Kontrolle der Zuluft für Fahrzeuginnenbelüftungen oder die Kontrolle des Backvorgangs in kommerziellen oder privaten Backöfen. Millimetergroße Gassensoren sind seit gut einem Jahrzehnt in rasanter Entwicklung und für Leckageprobleme bereits im Einsatz. Allerdings ist für eine charakterisierende Überwachung komplexer Gasgemische wie der Luft der gegenwärtige Entwicklungsstand aufgrund unzureichender Selektivität und mangelnder Stabilität noch weitgehend unbefriedigend. Insbesondere die Erfassung der Vielzahl organischer Luftschadstoffe stößt auf Schwierigkeiten.

Dem soll die Entwicklung neuartiger mehrstufiger Gassensorsysteme abhelfen, die einem hochempfindlichen Gasdetektor ein konfektionierbares Selektionselement (Selektor) vorgeschaltet haben, das den Gaszugang zum Detektor regelt und gleichzeitig eine Schutzfunktion übernimmt. Mehrfachanordnungen solcher dualen Gassensorelemente mit feinabgestufter chemischer Selektivität sollen eine quasispektrale Analyse der Gaszusammensetzung ermöglichen. Als Gasdetektoren werden halbleitende Metalloxidfilme eingesetzt, deren Leitfähigkeit empfindlich und schnell auf Änderungen der Luftzusammensetzung reagiert. Ihr simpler Aufbau und die einfache Meßtechnik machen sie äußerst kostengünstig und robust. Herstellung und Platzbedarf sind mikrosystemkompatibel.

Als Selektoren werden ultradünne glaskeramische Membranen entwickelt, die in nm-Dicke durch Gasphasenabscheidungsverfahren direkt auf den Metalloxidfilmen erzeugt werden und dadurch auf molekularer Ebene in ihren Eigenschaften konfektionierbar sind. Es werden Schichten auf der Basis von SiO_2 - und Al_2O_3 -Netzwerken erprobt, die durch Verwendung von Silanen und Aluminiumverbindungen mit speziellen organischen Liganden chemisch funktionalisiert und in der Porosität eingestellt werden können. Daneben werden mikrogranulare Metalloxid-

schichten aus etwa mikrometergroßen Partikeln als Leitfähigkeitsdetektoren entwickelt, die besonders hohe Gasempfindlichkeit versprechen. Aus Platzgründen wird hier nur über SiO₂-beschichtete Zinnoxidsensoren und die zur Herstellung entwickelte spezielle Gasphasenabscheidungstechnik berichtet.

2. Experimentelles

Die Sensorschichtsysteme wurden hauptsächlich in einer dreiteiligen Ultra-Hochvakuum-Anlage (UHV) aus Transfer-, Analysen- und Präparationskammer hergestellt und charakterisiert. Letztere gestattet das Aufbringen von Schichten durch Aufdampfen, Sputtern (Materialauftrag mittels Ionenbeschleunigung induzierter Zerstäubung) oder Gasphasenabscheidung. Die Schichtsysteme können von dort ohne Atmosphärenkontakt in die Analysenkammer geschleust werden, die mit verschiedenen oberflächenanalytischen Methoden ausgerüstet ist. Manipulatoren in der Analysen- und Präparationskammer erlauben Positionieren und Heizen (max. 1000 °C) der Proben. Der Basisdruck der Anlage beträgt etwa 5·10⁻¹⁰ mbar nach Ausheizen auf 150 °C. Das Einschleusen der Proben aus der Atmosphäre erfolgt durch die separat belüftbare Transferkammer ohne die Vakuumbedingungen in den anderen Kammern zu beeinträchtigen.

Zur chemischen Charakterisierung wurde Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) mit einer MgK_α-Quelle (300 Watt, 1253 eV Anregungsenergie) eingesetzt. Die Elektronenenergieanalyse erfolgte mit einem hemisphärischen Analysator bei einer Durchlaßenergie von 50 eV. Zur quantitativen Auswertung der XPS-Spektren wurde ein Untergrundabzug nach Shirley [1] durchgeführt und die integrierten Signalintensitäten mit Scofield's atomaren Ionisationswahrscheinlichkeiten korrigiert [2]. Elementtiefenverteilungen wurden mit Sekundärneutralmassenspektrometrie (SNMS) erhalten, wobei zum Probenabtrag 5 keV-Argonionen mit einer Stromdichte von 8 μA/cm² eingesetzt wurden. Die kontinuierliche Massenanalyse der emittierten Neutralteilchen erfolgte nach Ionisation durch einen 55 eV-Elektronenstrahl und Diskriminierung thermischer Spezies durch ein Quadrupolmassenfilter mit Sekundärelektronen-Vervielfacher im Zählbetrieb. Die Tiefenskala der gegen die Abtragszeit aufgezeichneten Massensignale wurde bei Untersuchung der SiO₂-Beschichtungen mit einem Tiefenvorschub von 0,05 nm/sec berechnet, der beim Abtrag einer SiO₂-Schicht bekannter Dicke (30 nm SiO₂ auf einem Si-Wafer) unter den benutzten Bedingungen ermittelt wurde.

Für Messungen der elektrischen Leitfähigkeit befand sich der Sensor in einem vom Testgasgemisch durchströmten Glasrohr, das auf 30 cm durch einen Ofen geführt wurde, um eine genaue Temperatur-

Kontrolle von Sensor und Testgas sicherzustellen. Der Durchfluß betrug 50 l/h. Die Sensortemperatur wurde bei 350 °C gehalten. Die Testatmosphären wurden durch Mischung von synthetischer Luft mit organischen Gasen (Propan und Methan) in verdünnter Form unter Kontrolle von Rotametern bei Raumtemperatur hergestellt. Zwei-Punkt-Leitfähigkeitsmessungen erfolgten mit einem Vielfachmeßinstrument (Fa. KEITHLEY, maximale Spannung 5 V), indem Platinspitzen zur elektrischen Kontaktierung mit Edelstahlfedern auf die aufgesputterten Goldstreifen gedrückt wurden.

Präparation und chemische Charakterisierung der Sensorelemente

Die SnO₂-Filme wurden durch Aufputtern von Zinn auf 15x15 mm² große und 1 mm dicke Quarzglasscheiben mit anschließender, 12-stündiger Oxidation der Metallfilme an Atmosphäre bei 650 °C hergestellt. Darauf wurden zur elektrischen Kontaktierung zwei parallele Goldstreifen im Abstand von 10 mm aufgesputtert. Rasterelektronenmikroskopische Bilder zeigen eine granulare Struktur der SnO₂-Filme mit Korngrößen von etwa 500 nm, die durch Aufschmelzen der Sn-Schicht beim Oxidationsprozeß entsteht.

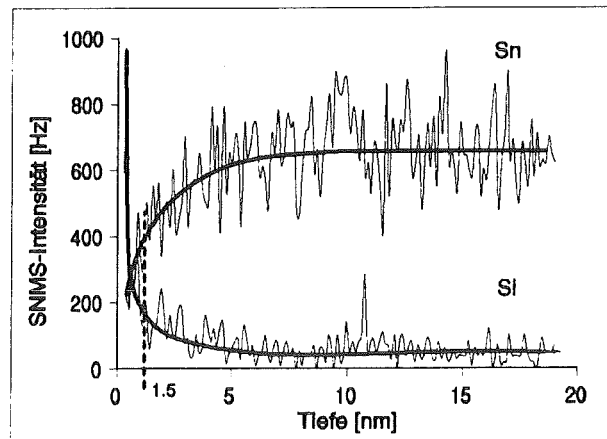


Abb. 1: SNMS-Tiefenprofil des mit SiO₂ beschichteten SnO₂-Sensors

Der SiO₂-Film wurde durch Gasphasenabscheidung (CVD) von Tetraethylorthosilicat (TEOS) direkt auf der SnO₂-Schicht erzeugt. Um eine niedrige Prozeßtemperatur zu erreichen, die auch den Einbau organischer Funktionsgruppen erlaubt, wurde eine spezielle Technik entwickelt, bei der TEOS auf der Oberfläche mit Wasser hydrolysiert wird. Die SiO₂-Filme wurden durch Exposition des Substrats mit 0,2 mbar TEOS und 0,2-10 mbar H₂O bei einer Substrattemperatur von 300°C erzeugt. Um eine Hydrolyse des TEOS in den Zuleitungen zu vermeiden, wurden zwei getrennte Quellen verwendet. Die Öffnung der TEOS-Quelle mit einem Durchmesser von 150 mm befindet sich ca. 2 mm über der

Probe, während das H₂O weit entfernt von der Probe in die Kammer eingelassen wird und so einen etwa isotropen Druck aufbaut. Die SiO₂-Filme entstehen wahrscheinlich durch Hydrolyse des TEOS und anschließende Polykondensation:

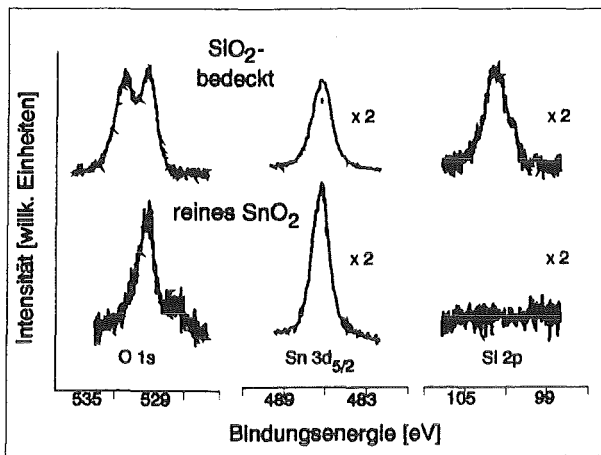
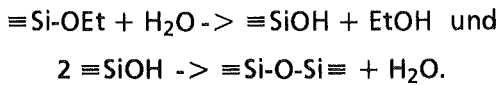


Abb. 2: XPS-Spektren der freien und SiO₂ bedeckten SnO₂ Sensorschicht

Zunächst wurde die Abhängigkeit der erzielten SiO₂-Schichtdicke von der TEOS-Dosis, d.h. von der CVD-Expositionszeit bei gleichbleibendem TEOS- und H₂O-Druck, untersucht. Zur Bestimmung der Schichtdicke der SiO₂-Filme, sowie der prozentualen Bedeckung des SnO₂-Substrats wurden SNMS-Tiefenprofile aufgenommen. In Abbildung 1 ist ein Tiefenprofil eines 1.5 nm dicken SiO₂-Films gezeigt. Es wurde in allen Tiefenprofilen ab Beginn der Zerstäubung eine sofortige Abnahme des Si-Signals verbunden mit einer Zunahme des Sn-Signals gefunden. Dies zeigt vor allem eine ungleichmäßige Dicke des Films. Die SiO₂-Bedeckung der Zinndioxidschicht wurde aus dem Verhältnis des Sn-Signals zu Beginn der Messung I_{Sn}^0 und der Intensität im Innern des Zinndioxids am Ende der Messung I_{Sn}^∞ berechnet: $\Theta_{\text{SiO}_2} = 1 - I_{\text{Sn}}^0 / I_{\text{Sn}}^\infty$. Es ergaben sich in allen Fällen Bedeckungen deutlich unter 1, wie Abbildung 3 zeigt. Die mittlere Dicke der SiO₂-Schicht wurde beim Intensitätshalbwert $(I_{\text{Sn}}^\infty - I_{\text{Sn}}^0) / 2$ bestimmt. In Abbildung 1 ist diese Position durch eine gestrichelte Linie markiert. Die Auswertung der Tiefenprofile ergab eine von der TEOS-Dosis unabhängige Schichtdicke von ca. 2 nm, wie Abbildung 3 darstellt. Somit scheinen schon kleinste TEOS-Expositionen SiO₂-Beschichtungen der Dicke zu erzeugen, wie sie auch bei den längsten Expositionszeiten auftraten. Lediglich der Bedeckungsgrad erhöht sich mit der TEOS-Dosis.

Zur weiteren Charakterisierung der Doppelschichtsysteme wurden XPS-Spektren aufgenommen. In Abbildung 2 sind Spektren der reinen und mit SiO₂ bedeckten SnO₂-Filme dargestellt. Das Spektrum des unbedeckten SnO₂ im unteren Bildteil zeigt ein O1s-Signal bei einer Bindungsenergie (BE) von 530.2 eV und ein Sn3d_{5/2}-Signal bei 486.3 eV BE, wie sie für SnO₂ erwartet werden [3]. Das Verhältnis der integrierten Signalintensitäten (Sn/O) beträgt nach Korrektur mit atomaren Ionisierungswahrscheinlichkeiten 0.43 [2]. Demnach ergibt die Präparation tatsächlich etwa stöchiometrisches Zinndioxid. Nach der Exposition der Metalloxidschicht mit einer TEOS-Dosis von 8.4 mbar·min wurde das XPS-Spektrum der oberen Bildhälfte erhalten, das zusätzlich ein Si2p-Signal bei einer BE von 102.8 eV und ein weiteres O1s-Signal bei 532.3 eV BE enthält. Diese BE zeigen die Deposition einer SiO₂-Schicht [4]. Die mit atomaren Ionisierungswahrscheinlichkeiten nach Scofield [2] korrigierten Intensitätsverhältnisse ergeben 15% Sn, 20% Si und 66% O. Das Auftreten eines Sn-Signals trotz Beschichtung kann auf eine unvollständige oder eine so dünne SiO₂-Schicht zurückzuführen sein, daß der Durchtritt der Photoelektronen vom Zinn möglich ist. Um Näheres über den Schichtzustand zu erfahren, wurden die XPS-Daten im Rahmen eines Modells von Schichtinseln einheitlicher Dicke interpretiert [1]. Die Auswertung der von Bedeckung und Dicke der Inseln abhängigen XPS-Intensitätsverhältnisse Sn/Si ergab bei Einbeziehung der Daten aller TEOS-Expositionen für eine Schichtdicke von 6 nm bestmögliche Übereinstimmung mit den SNMS-Bedeckungswerten (siehe Abbildung 3) [5]. Die angesichts des groben Modells geringe Diskrepanz zur Schichtdicke aus SNMS-Daten ist wahrscheinlich auf die Annahme lateral konstanter Inseldicke zurückzuführen, die nach SNMS nicht gegeben ist. Zusätzlich dürfte die benutzte inelastische mittlere freie Elektronenweglänge für den sehr dünnen SiO₂-Film zu der Abweichung beitragen [5].

Sowohl die XPS-, wie auch die SNMS-Daten ergeben eine mit der TEOS-Dosis ansteigende Bedeckung bis zu einer Sättigungsbedeckung, die nach SNMS 0.85 beträgt. Offenbar wachsen bei niedrigen TEOS-Dosen bereits SiO₂-Inseln etwa der Dickenverhältnisse wie bei höheren TEOS-Expositionen auf. Die Dicke der Inseln ist lateral ungleichmäßig und beträgt im Mittel 2 nm. Eine Erhöhung der Dosis nach Erreichen der Sättigungsbedeckung von 0.85 ergibt kein weiteres Wachstum der Schicht. Damit scheint die Wirkung von SnO₂, die offenbar einige Atomabstände anhält, für das Wachstum der SiO₂-Schicht notwendig zu sein.

Einsatztest der Gassensorelemente

Zur Untersuchung des Einflusses der SiO₂-Beschichtung auf die Sensoreigenschaften der SnO₂-Filme wurden Messungen der elektrischen Leit-

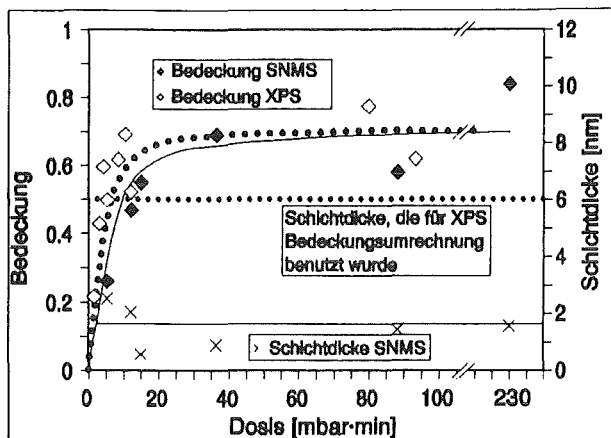


Abb. 3: Bedeckung und Schichtdicke, wie sie aus XPS- und SNMS-Daten gewonnen wurden.

fähigkeit in Testgasatmosphären mit Methan und Propangehalt variierender Konzentration durchgeführt. Dabei wurden unbeschichtete Zinndioxidfilme und solche mit maximaler SiO_2 -Bedeckung zunächst bei einer Temperatur von 350°C getestet. Alle Sensorelemente wurden vorher 12 h bei dieser Temperatur in Reinsluft getempert, wonach stabiles Leitfähigkeitsverhalten erhalten wurde. Abb. 4 zeigt die Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen.

Als Sensorsignal wird die relative Leitfähigkeitsänderung bei Exposition mit belasteter Luft benutzt, bezogen auf die Leitfähigkeit in Reinsluft. Die Abhängigkeit des Sensorsignals von der Konzentration der organischen Gase ist in doppelt logarithmischer Auftragung angegeben. Das durch Geraden näherungsweise beschreibbare Signalverhalten entsprechend einem Potenzgesetz zeigt die Einheitlichkeit der Signalentstehung über den weiten untersuchten Konzentrationsbereich. Der SiO_2 -Überzug erhöht die Methanempfindlichkeit um einen Faktor 8, wogegen die Propan-Empfindlichkeit praktisch unverändert bleibt. Damit bewirkt die SiO_2 -Beschichtung eine erhebliche Selektivitätserhöhung des Sensors bezüglich Methan. In der Tat sind die erhaltenen Empfindlichkeiten für Methan je nach Konzentrationsbereich vergleichbar oder sogar besser als die besten bekannten Literaturwerte wie Tabelle 1 zeigt. Aus der beobachteten Langzeitschwankung der Leitfähigkeit von einigen Prozent in drei Tagen ergibt sich derzeit eine Nachweisgrenze von etwa 2 ppm für Methan, wenn eine relative Leitfähigkeitsänderung von 10% als sicher meßbar zugrundegelegt wird.

Die Ansprechzeiten der Sensorschichten, definiert als die Zeit, bei der 90% Signalintensität erreicht werden, betragen etwa 50 Sekunden. Nur für Methan-Konzentrationen unter 500 ppm und nur für die SiO_2 -bedeckten Sensoren steigen die Antwortzeiten auf bis zu 500 Sekunden. Dies ist ein Hinweis auf einen diffusionskontrollierten Anrei-

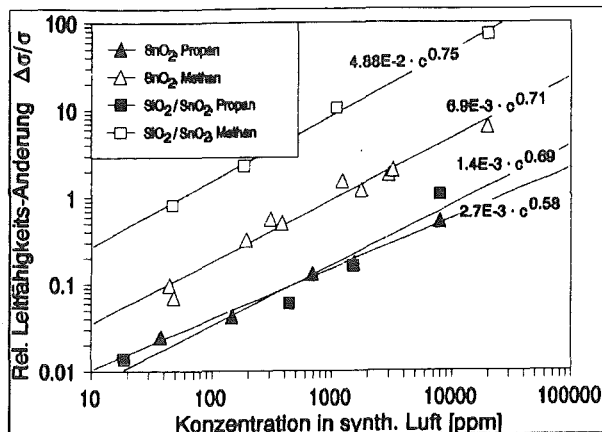


Abb. 4: Empfindlichkeitsverhalten von Sensoren ohne und mit SiO_2 -Überzug maximaler Bedeckung.

cherungsmechanismus als Begründung für die Sensitivitätserhöhung gegenüber Methan durch den SiO_2 -Film. Einen weiteren Beitrag dürften Veränderungen der elektronischen Struktur des SnO_2 im Oberflächenbereich liefern. Ein passiver Molekularsiebeffekt ist allerdings auszuschließen, da unter diesen Umständen vor allem Leitfähigkeitsdefizite bei Exposition mit dem größeren Propanmolekül auftreten sollten. Dies zeigen auch erste Messungen der Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeitsänderungen im Bereich $350\text{--}550^\circ\text{C}$, die für Methan beim beschichteten Detektor einen Anstieg der Sensitivität mit Temperaturerniedrigung ergaben, während die Empfindlichkeit des unbeschichteten SnO_2 -Films mit Erhöhung der Temperatur steigt. Im übrigen läßt das Temperaturverhalten erwarten, daß die Nachweisgrenze durch Senkung der Betriebstemperatur unter 350°C noch deutlich verbessert werden kann.

Sensor	500 ppm	1000 ppm	5000 ppm
aufgesputtert, IRCH	0.53	1.6	2.68
mit 2 nm SiO_2 , IRCH	5.16	8.7	29.0
dotiert mit Co [6]	5.06	8.0	14.2
dotiert mit Pt [6]	1.1	3.2	7.5
dotiert mit Au [6]	8.6	12.4	21.1
rein [7]	-	-	19
dotiert mit Ag [7]	-	-	23
dotiert mit Cu [7]	-	-	19
dotiert mit Pd [8]	-	-	0.96
rein [9]	-	3.0	-

Tab. 1: Die relative Leitfähigkeitsänderung für verschiedene SnO_2 -Sensoren bei drei Methankonzentrationen

Literatur

- [1] "Practical Surface Analysis, Volume 1", 2. ed., eds. D. Briggs and M. P. Seah, Wiley, Chichester, 1990, p. 244.
- [2] J. H. Scofield; "Hartree-slater subshell photoionization cross sections at 1254 and 1487 eV", J. Electr. Spect. Rel. Phenom., 8 (1976), 129-137.
- [3] O in SnO₂ 530.6 eV BE: P. R. Moses, L. M. Weir, J. C. Lennox, H. O. Finklea, F. R. Lenhard and R. W. Murray, Anal. Chem. 50 (1978) 576; Sn in SnO₂ 486.4 eV BE: C. D. Wagner, W. M. Riggs, L. E. Davis, JH. G. Moulder, G. E. Muilenberg, "Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy, Perkin Elmer, Minnesota, 1978.
- [4] O in SiO₂ 532.8 eV BE, Si in SiO₂ 103.4 eV BE: E. D. Wagner, W. M. Riggs, L. E. Davis, J. F. Moulder, G.E. Muilenberg, "Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy", Perkin Elmer, Minnesota, 1978.
- [5] P. Althainz, A. Dahlke, J. Goschnick, H. J. Ache; "Low-temperature deposition of glass membranes for gassensors", zur Veröffentlichung in Thin Solid Films angenommen.
- [6] Kowalkowski, R; "Charakterisierung und Modifizierung von Metalloxid-Gassensoren: Vergleichende elektrische und spektroskopische Untersuchungen", Dissertation, Fakultät für Chemie und Pharmazie der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, 1987.
- [7] N. Yamazoe, K. Kurokawa and T. Seiyama; "Effects of additives on semiconductor gas-sensors", Sensors and Actuators, 4 (1983), 283-289.
- [8] M.H.M. Reddy, A.N. Chandokar, "Response study of electron-beam evaporated thin-film tin oxide gassensors", Sensors and Actuators, B9 (1992), 1-8
- [9] I.Stoev, D.Kohl; "An integrated gas sensor on silicon substrate with sensitive SnO_x-layer", Sensors and Actuators, B2 (1990), 151-161

Optochemische Mikrosensoren für umweltanalytische Aufgaben

J. Reichert¹, R. Czolk², G. Heinzmann¹, S. C. Kraus¹, A. Morales-Bahnik¹, H. J. Ache¹

¹) Institut für Radiochemie, ²) Projektleitung Mikrosystemtechnik

Zusammenfassung

Die Entwicklung chemischer Mikrosensoren, die den in der Praxis geforderten Spezifikationen genügen und sich in mikrosystemtechnische Lösungen integrieren lassen, erfordert deren zielgerichtete Entwicklung unter Einsatz von Mikrotechniken, um die Systeme in großer Stückzahl und damit preisgünstig herstellen zu können. Erforderlich für den breiten Einsatz einer sensorgestützten in-line Instrumentierung in der Umweltanalytik ist die Entwicklung von sensitiven, selektiven und stabilen Sensoren. Bisher haben z.B. Probleme mit der Langzeitstabilität den Einsatz chemischer Sensoren, von einzelnen Ausnahmen abgesehen, über den Laborbereich hinaus verhindert.

Vorgestellt werden optochemische Sensoren für toxische Gase und Schwermetall-Ionen auf der Basis von immobilisierten Porphyrinderivaten. Als Immobilisierungsmatrix werden hauptsächlich poröse Gläser verwendet, die mittels der sog. Sol-Gel-Technik hergestellt werden. Am Beispiel von pH-Sensoren wird gezeigt, daß bei Einhalten bestimmter Prozeßparameter und Zusatz von Additiven eine stabile Fixierung der Indikatoren gelingt und der Meßbereich der Sensoren durch Modifikation der Matrix eingestellt werden kann. In Kombination mit photolithographischen Verfahren erlaubt das Sol-Gel-Verfahren zudem eine lateral strukturierte und variable Synthese verschieden sensitiver Schichten auf einem Substrat. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, komplette optochemische Sensorfelder aufzubauen, die sich entsprechend den gegebenen Anforderungen gestalten lassen.

1. Einleitung

Optochemische Sensoren erfassen die bei Analytkontakt erfolgenden spektralen Änderungen von immobilisierten Farbindikatoren, wobei das optische Signal entweder über Lichtleiterkopplung an entsprechende Spektrometereinheiten geführt wird oder direkt am Sensor abgegriffen und spektral aufgelöst detektiert wird. In diesem Zusammenhang sei betont, daß eine optische Detektion gegenüber anderen, z. B. potentiometrischen Verfahren, immer Vorteile hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Meßdaten bietet, da kein Referenzelement benötigt wird und auftretende Instabilitäten durch Mehrwellenlängenverfahren kompensiert werden können.

Die im folgenden beschriebenen Entwicklungen zielen einerseits darauf ab, durch geeignete Wahl der Indikatorfarbstoffe sensitive Nachweisverfahren zu etablieren, die es gestatten, verschiedene Komponenten einer Substanzklasse über analyt-spezifische und unterscheidbare spektrale Änderungen zu differenzieren. Andererseits wird mit dem Sol-Gel-Verfahren ein sehr variables Immobilisierungskonzept verfolgt, da bei diesem Verfahren die Ausgangssubstanzen (Silane), erforderliche Additive und zugegebene Indikatorfarbstoffe den Anforderungen entsprechend eingesetzt werden können. Somit ist prinzipiell die Möglichkeit gege-

ben, photometrische Nachweisreaktionen für verschiedene Analyte in einer chemisch modifizierbaren und somit optimierbaren Matrix zu immobilisieren. Am Beispiel von pH-Sensoren wird gezeigt, daß sich die mittels des Sol-Gel-Prozesses hergestellten porösen Glasschichten auch lateral strukturiert aufbauen lassen, so daß mit diesem Verfahren optochemische Mikrosensoren insbesondere auch in Form von Arrays oder Sensorfeldern realisiert werden können.

2. Sensorprinzipien und Sensorherstellung

Porphyrinderivate bilden mit zweiwertigen Metallen und Übergangsmetallen spektral deutlich unterscheidbare Komplexe aus. Da Porphyrine sehr große Komplexierungskonstanten aufweisen, können sehr sensitive Nachweisverfahren entwickelt werden. Zudem zeichnet sich diese Farbstoffklasse durch extrem große molare Extinktionskoeffizienten aus, so daß die optische Detektion sehr empfindlich erfolgen kann [1,2].

Metalloporphyrine können zum Nachweis von Gasmolekülen verwendet werden, die an den noch freien Bindungsstellen des Zentralatoms koordiniert werden [3]. Die hierbei auftreten-

den spektralen Änderungen sind in charakteristischer Weise vom Analyten sowie vom jeweiligen Zentralatom abhängig [4].

Die Bestimmung des pH-Wertes einer Lösung kann durch Analyse der bei der Protonierung bzw. Deprotonierung erfolgenden spektralen Änderungen von pH-Indikatoren durchgeführt werden. In der Regel wird ein Meßbereich von zwei bis drei pH-Einheiten von einem Indikator überstrichen.

Zur Sensorherstellung wurden die entsprechenden Farbstoffe in verschiedenen Matrices immobilisiert. Verwendet wurden zum einen Polymere, die als dünne Filme (1 - 3 μm) auf Glas- oder Plexiglassubstraten per spin-coating aufgebracht wurden. Die Farbstoffe wurden entweder dem gelösten Polymer beigegeben oder in einem zweiten Schritt elektrostatisch adsorbiert.

Als weitere Immobilisierungsmatrix wurden poröse Gläser eingesetzt, die mittels des Sol-Gel-Verfahrens hergestellt werden [5]. Hierzu wird die Lösung eines Metallalkoxides, z.B. Tetramethoxysilan (TMOS), kurz Sol genannt, durch den Ablauf von Polykondensationsreaktionen in eine Polymermischung, das Gel, überführt. Durch eine nachfolgende Wärmebehandlung erhält man aus diesem Gel ein poröses und transparentes Glas. Die Vorteile dieser Art der Glasherstellung liegen in der Möglichkeit, durch geeignete Wahl der unterschiedlichen Verfahrensparameter die physikalischen und chemischen Eigenschaften des entstehenden Glases zu kontrollieren bzw. gezielt einstellen zu können. Ein weiterer und für die Sensorentwicklung entscheidender Vorteil ergibt sich aus den vergleichsweise niederen Temperaturen während der Herstellung. Hierdurch ist es möglich, organische Moleküle, die der Ausgangsmischung zugegeben wurden, als sensitive Reagenzien in einer anorganischen Polymermatrix zu immobilisieren.

3. Ergebnisse

Gassensoren

Auf der Basis von immobilisierten Metalloporphyrinen lassen sich optochemische Sensoren für toxische Gase realisieren, wobei die Möglichkeit gegeben ist, durch Variation des Zentralatoms, des Porphyrinderivates sowie der Matrix den Nachweis sehr sensitiv und spezifisch zu gestalten. Zur Detektion von Ammoniak erwies sich der Mangankomplex von Tetra(methylpyridyl)porphyrin (TMPyP), immobilisiert in Nitrocellulose, am geeignetsten: Der Sensor arbeitet reversibel bei Ansprechzeiten von 1 - 3 min. mit einer Nachweisgrenze von ca. 500 ppb. Die Stabilität ist mit mehreren Monaten als sehr gut zu bezeichnen [4]. Zur Zeit weist der Sensor noch eine Querempfindlichkeit gegen Wasser auf, die jedoch durch eine genaue Spektrenauswertung eliminiert werden kann. Auch sollte bei

Verwendung eines wasserhaltigen Polymers zur Immobilisierung dieser Störeinfluß beherrschbar sein. In Abb. 1 ist exemplarisch ein Differenzspektrum gezeigt, wie es bei Beprobung des Sensors mit Ammoniak erhalten wird. Der Quecksilberkomplex von TMPyP spricht reversibel und unterscheidbar auf SO_2 bzw. NO_2 an (vgl. Abb. 1, Mitte bzw. unten), wobei die beobachtete spektrale Änderung hauptsächlich auf eine Protonierung des Porphyrins zurückzuführen ist und die koordinative Anbindung der Gase eine eher untergeordnete Rolle spielen dürfte. In diesem Fall wurde der Sensor hergestellt durch Immobilisierung von (Hg)TMPyP in einer dünnen Schicht (1 μm) porösen Glases. Es wurden Nachweisgrenzen für beide Gase von 1 ppm bei Ansprechzeiten von 1 - 3 min. erhalten.

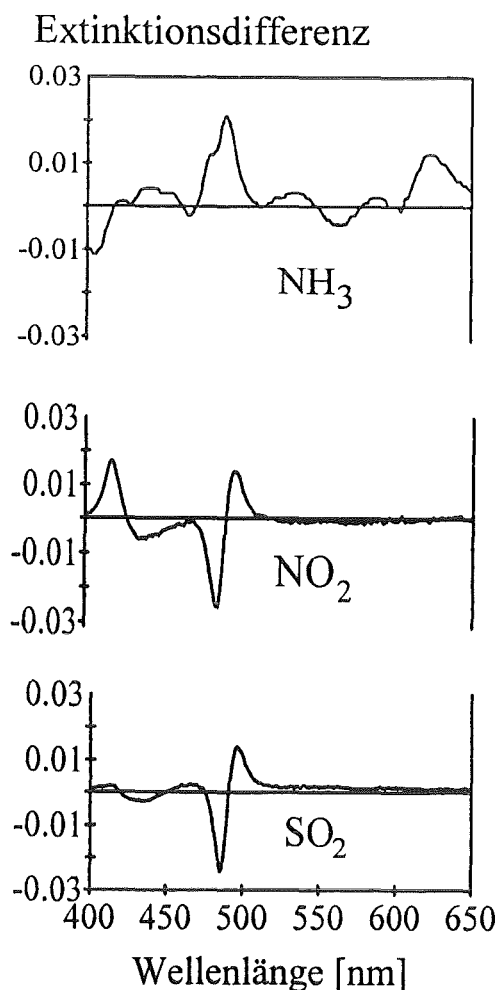


Abb. 1: Differenzspektren von Metalloporphyrinen bei Beprobung mit Ammoniak, SO_2 bzw. NO_2 . Oben: (Mn)TMPyP immobilisiert in Nitrocellulose (Schichtdicke 5 μm). Mitte und unten: (Hg)TMPyP immobilisiert in porösem Glas (Schichtdicke 1 μm). Gaskonzentrationen jeweils 100 ppm.

Schwermetall-Sensoren

Aufgrund ihrer Komplexeigenschaften eignen sich Porphyrinderivate allgemein als sensitive Reagenzien für Metall- bzw. Schwermetall-Ionen [1,2], wobei sich die verschiedenen Metall-Porphyrin-Komplexe anhand ihrer charakteristischen Spektren deutlich unterscheiden. In Abb. 2 ist dies für den Fall einiger Metallkomplexe des TMPyP dargestellt. Ein Sensor für Cadmium und Quecksilber wurde realisiert, indem TMPyP elektrostatisch an Nafion, einem stark sauren Kationenaustauscher, immobilisiert wurde. Bei einer Meßzeit von 10 min. wurden Nachweisgrenzen von 5 µg/l für Cd(II) und 30 µg/l für Hg(II) erreicht, indem die Kinetik der Komplexbildung zur Auswertung herangezogen wurde. Die Stabilität des Sensors wurde über mehrere Wochen getestet und erwies sich als sehr gut [6].

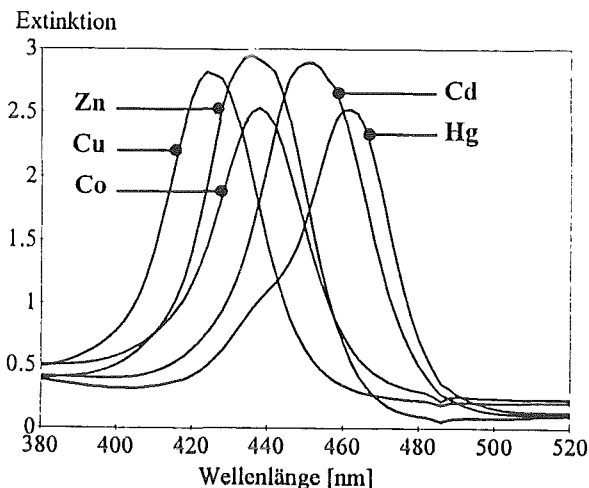


Abb. 2: Spektren verschiedener Metallkomplexe von TMPyP. Bei dem realisierten Sensor wird die Kinetik des Anstiegs der Komplexbanden von Hg(II) bzw. Cd(II) verfolgt.

Dotierte Sol-Gel-Gläser als pH-Sensoren

Ziel dieser Entwicklung ist zum einen, durch Variation der Matrix (z.B. Einführen von funktionellen Gruppen oder Additiven) und optimierte Prozeßführung den Sol-Gel-Prozeß so zu steuern, daß die Mikro-Umgebung des im Glas immobilisierten Reagenzfarbstoffes die für seine Funktion optimalen Bedingungen vorgibt [7]. Denn es ist bei nahezu allen Nachweisreaktionen das Einhalten eines bestimmten pH-Wertes absolut notwendig. Andererseits müssen die Farbstoffe durch geeignete Maßnahmen stabil eingebunden werden, damit sie bei Kontakt mit wäßrigen Meßmedien nicht ausgezogen werden.

Bei Einhalten bestimmter Prozeßparameter (Gelierungsdauer, Wärmebehandlung) gelang es, mit pH-Indikatoren dotierte poröse Gläser in Form von Tabletten (Dicke 1 mm, Durchmesser 10 mm) herzustellen, die sich als mechanisch stabil und bearbeitbar erwiesen. In Form von kleinen, runden Stäben können diese Gläser am Ende eines Lichtleiters fixiert werden und so als pH-Tauchsonde aufgebaut werden. Als Beispiel sind in Abb. 3 die bei verschiedenen pH-Werten erhaltenen Spektren einer 1 mm dicken, porösen Glasscheibe, dotiert mit dem Indikator Bromkresolgrün (BKG), dargestellt.

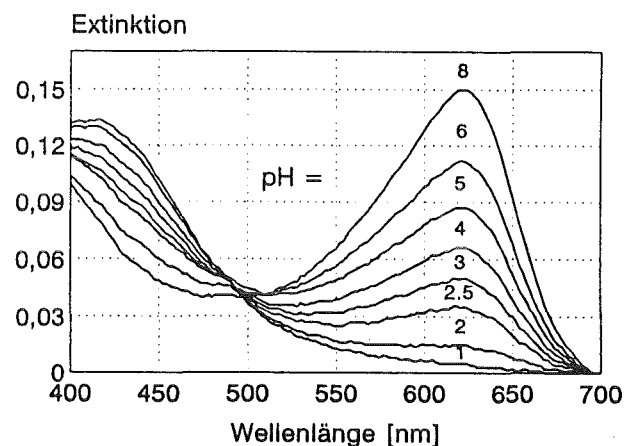


Abb. 3: Dotierte Sol-Gel-Gläser als pH-Sensoren: Dargestellt sind die nach 10 min. erhaltenen Spektren einer porösen, 1 mm dicken, mit dem Indikator Bromkresolgrün dotierten Glasscheibe.

Es zeigte sich im Falle der verwendeten pH-Indikatoren der Sulfo-phthalein-Klasse, daß diese bei Zusatz des kationischen Detergenzes CTAB (Cetyltrimethylammonium Bromid) stabil in der porösen Glasmatrix immobilisiert werden können, d. h. es wurde über einen Zeitraum von mehreren Wochen kein Farbstoffaustrag festgestellt. Das zugesetzte CTAB erfüllt zwei Funktionen: Zum einen verhindert es die Rißbildung bei der Trocknung, zum anderen fixiert es den Indikator über dessen Sulfonsäurerest. Verwendet wurde im gezeigten Beispiel als Indikator BKG und CTAB, in verschiedenen, steigenden Konzentrationsverhältnissen zugesetzt. Die Ansprechzeiten dieser Sensoren liegen, bedingt durch die großen (ca. 1 mm) Diffusionsstrecken, bei ca. 10 min.

Der Zusatz von CTAB bewirkt auch einen Shift des pKs-Wertes des immobilisierten Indikators um etwa eine Einheit (vgl. Abb. 4). Dieser Effekt erfolgt graduell; er kann somit genutzt werden, den Arbeitsbereich des Sensors variabel zu gestalten und ggfs. entsprechend anzupassen.

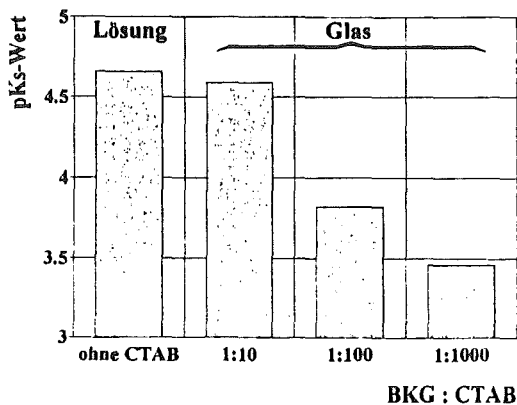


Abb. 4: Shift des pK_s -Wertes des in porösem Glas immobilisierten Indikators BKG bei steigendem Zusatz von CTAB.

Laterale Strukturierung von porösen Glasfilmen

Die Sol-Gel-Technik erlaubt, poröse Glasfilme lateral strukturiert auf Glassubstraten aufzubauen. Ein Ergebnis hierzu ist in Abb. 5 gezeigt, wie es durch einen konventionellen Lift-off-Prozeß erhalten wurde: Strukturierung des Gassubstrates mit Photolack, Aufbringen und Abschleudern einer gelierten Silanlösung und Abheben des Photolacks.

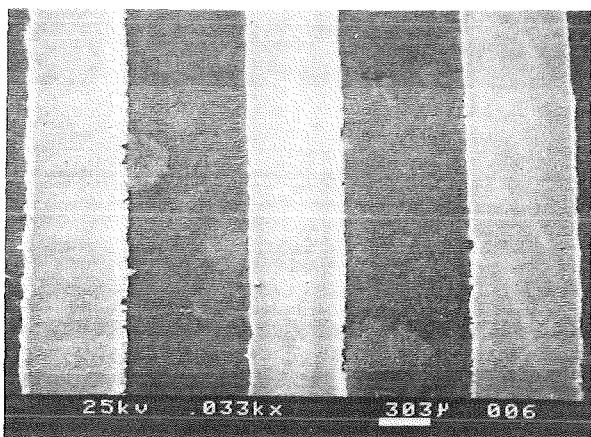


Abb. 5: REM-Aufnahme von lateral strukturierten porösen Sol-Gel-Streifen, erhalten mittels Lift-off-Technik (Dicke der Schichten ca. $1 \mu\text{m}$, Breite der Streifen ca. $550 \mu\text{m}$).

Auf diese Weise ergibt sich die Möglichkeit, durch sequentielles Aufbringen verschieden sensitiver Schichten an vorgegebenen Stellen auch Sensor-Arrays oder Sensorfelder auf einem Substrat zu realisieren. Als naheliegendes Beispiel wurde ein optochemisches pH-Sensor-Array aufgebaut, das der Beschränkung des Meßbereichs auf 2 - 3 pH-Einheiten, wie sie bei einem Einzelsensor vorgegeben ist, nicht mehr unterliegt.

4. Ausblick

Die Verwendung von Porphyrinderivaten als Rezeptormoleküle für optochemische Sensoren erlaubt eine selektive und sehr nachweisstarke Detektion der Analyten, wie sie für den Bereich der Umweltanalytik gefordert sind. Sensoren für toxische Gase können durch Variation des Zentralatoms, des Porphyrinderivates oder der Immobilisierungsmatrix für den jeweiligen Analyten optimiert werden. Zur Entwicklung von Sensoren für Schwermetallionen ist eine stabile Anbindung, bei vollem Erhalt der Reaktivität des Reagensfarbstoffes gefordert. Als aussichtsreiche Immobilisierungsmatrix erwiesen sich poröse Glasfilme, da diese chemisch modifizierbar sind und damit für die jeweilige Problemstellung optimiert werden können. Zudem können diese Filme lateral strukturiert aufgebaut werden, wodurch die Möglichkeit gegeben ist, auf einem Substrat komplette Sensorfelder zu realisieren.

Zudem wird derzeit die Adaption der optochemischen Sensoren für toxische Gase und Schwermetallionen an das vom Institut für Mikrostrukturtechnik entwickelte Mikrospektrometer mit dem Ziel verfolgt, einen optischen Schadstoffanalysator aufzubauen. Dieses Mikrosystem wird in der Lage sein, mit Hilfe von integrierten Aktorkomponenten (Pumpen, Ventile), vor Ort selbstständig Proben zu nehmen, Meßzyklen zu fahren sowie die erhaltenen Daten mit angepassten Algorithmen (Spektrenerlegung und Auswertung über Mustererkennungsverfahren) unmittelbar anzuzeigen und zu bewerten.

5. Literatur

- [1] M. Komata, J.-I. Itoh,
A highly sensitive spectrophotometric determination of cadmium with $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ -tetrakis (4-N-trimethylaminophenyl)-porphine; *Talanta*, 35, 723 (1988)
- [2] R. Czolk, J. Reichert, H.J. Ache: An optical sensor for the detection of heavy metal ions; *Sensors and Actuators B*, 7, 540 (1992)
- [3] H. Arai, K. Eguchi, T. Hashiguchi:
Optical detection of nitrogen monoxide by metal porphyrine dispersed in amorphous silica film; *Chem. Lett.*, 521 (1988)
- [4] A. Morales-Bahnik, R. Czolk, H.J. Ache, An optochemical ammonia sensor based on immobilized metalloporphyrins; wird vorgestellt bei EUROSENSORS VII, Sept., 26-29 (1993) Budapest, Ungarn
- [5] C.J. Brinker, G.W. Scherer: *Sol-Gel-Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel-Processing*; Academic Press, Inc., New York (1990)
- [6] 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 (1993)
- [7] S.C. Kraus, R. Czolk, J. Reichert, H.J. Ache: Optimization of the sol-gel-process for the development of optochemical sensors; EUROSENSORS VI, San Sebastian, Spanien, Paper 1.2.8. (1992)

Magnetostruktive Schichten als Aktoren in der Mikrosystemtechnik

E. Quandt

Institut für Materialforschung I

Zusammenfassung

Im Hinblick auf den Einsatz als Mikroaktoren wurden amorphe hochmagnetostruktive TbFe- und TbDyFe-Schichten entwickelt, ihre Eigenschaften charakterisiert und gezielt verbessert. Entsprechend der beiden möglichen Magnetfeldansteuerungen der Schichten - parallel und senkrecht zur Schicht - mußten hierzu Beschichtungsbedingungen zur Herstellung hochmagnetostruktiver Schichten mit entsprechend senkrechter oder paralleler leichter Magnetisierungsrichtung erarbeitet werden. Mit Erfolg wurden Schichten mit nahezu idealer senkrechter Anisotropie abgeschlossen. Für die andere Orientierung konnten Beschichtungskonzepte erarbeitet werden, deren Richtigkeit durch erste Experimente belegt wurden.

Im Vergleich zu alternativen Herstellungsverfahren sind die magnetischen Eigenschaften der durch Simultan-Magnetronspütern hergestellten Schichten sehr gut. Die an $Tb_{0,42}Fe_{0,58}$ -Proben festgestellte Magnetostruktion $\lambda \approx 450 \cdot 10^{-6}$ ist der größte bekannte Wert für amorphe Proben bei einer Feldstärke von 6 kOe. Auch konnten spezielle Legierungen abgeschlossen werden, die weichmagnetische Eigenschaften in Kombination mit einer großen Magnetostruktion aufweisen. Die für die Seltenen Erdenreichen Legierungen erreichten Koerzitivfeldstärken kleiner 10 Oe stellen ebenfalls die besten bekannten Werte dar.

Die experimentell bestimmten Daten wurden zur Berechnung eines magnetostruktiven Biegewandlers verwendet, der die Grundlage für einen Entwurf eines magnetostruktiven Membranventils bildet.

1. Einleitung

Gezielte magnetostruktive Beschichtungen von LIGA-Mikrostrukturen können dazu beitragen, das Anwendungsspektrum dieser Strukturen für aktorische Funktionen zu erweitern. In Kombination mit den in der LIGA-Technik abformbaren Materialien lassen sich spezielle Verbundwerkstoffe entwickeln, die die relativen Längenänderungen von magnetostruktiven Schichten in Bewegungen von Biegeungen (s. Abb. 1) und Membranen umsetzen. Im Vergleich zu den für diese Aufgaben alternativ einsetzbaren piezoelektrischen Schichten oder Kompaktwerkstoffen weist der Einsatz von magnetostruktiven Materialien verschiedene spezifische Vorteile auf: ihre als Metall einfachere Ab-

scheidung, ihre größere relative Längenänderung sowie ihre kontaktlose Ansteuerung. Je nach mikrotechnischem Design kann eine Magnetfeldansteuerung parallel oder senkrecht zur Schicht vorteilig sein. Für die senkrechte Ansteuerung spricht der in der Regel kleinere Luftspalt zwischen den Feldführungen, nachteilhaft ist die Abschwächung des Magnetfeldes durch den Entmagnetisierungsfaktor. Sinnvoll ist daher die speziell optimierte Entwicklung hochmagnetostruktiver Schichten für beide Ansteuerungsarten.

Hochmagnetostruktive Eigenschaften mit relativen Längenänderungen von etwa 1% wurden bereits 1964 an Tb und Dy [1] bei tiefen Temperaturen festgestellt. Verbindungen der Seltenen Erden mit ferromagnetischen Übergangsmetallen - insbesondere mit Fe - führten 1971 zur Entdeckung der großen ("giant") Magnetostruktion der Laves-Phasen $TbFe_2$ und $DyFe_2$ [2] bei Raumtemperatur. Für technische Anwendungen ist die Entwicklung von Materialien mit guten magnetostruktiven sowie mit weichmagnetischen Eigenschaften von besonderem Interesse. Die weichmagnetischen Eigenschaften - geringe Koerzitivfeldstärken und Sättigungsfeldstärken der Magnetisierung und damit der Magnetostruktion - bedeuten für den Einsatz als Aktoren kleinere Ansteuerfelder und wegen kleiner oder verschwindender Hysterese einfachere Regel-

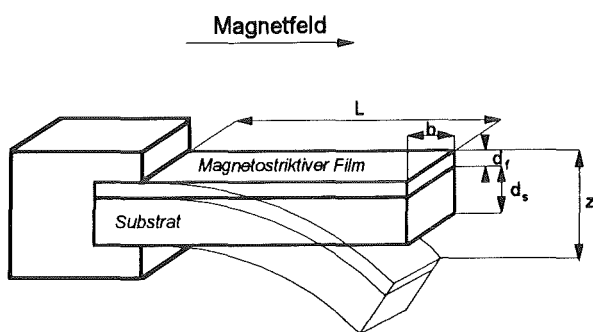


Abb. 1: Prinzip eines magnetostruktiven Biegewandlers.

kreise. Sowohl bei den Seltenen Erden [1] als auch bei den Laves-Phasen [2] lassen sich durch Legierung der Seltenen Erden Tb und Dy eine erhebliche Reduktion der Sättigungsfeldstärken von > 25 kOe auf Werte von 0,6 kOe ($Tb_{0,4}Dy_{0,6}$ bei 77K) und etwa 7 kOe ($Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_2$) durch eine temperaturabhängige Kompensation der Anisotropieenergie erreichen. Ein alternativer, für PVD-Beschichtungen besonders attraktiver Ansatz ist die Herstellung von amorphen oder nanokristallinen TbFe- oder TbDyFe-Legierungen, bei denen durch die Kristallstruktur eine Gesamtanisotropie-Reduktion auftritt, die intrinsische starke Anisotropie der Seltenen Erden - die für die große Magnetostriktion verantwortlich ist - aber erhalten bleibt. Der Einfluß der zusätzlichen intrinsischen Anisotropiekompensation durch das Dy soll an diesen amorphen PVD-Schichten untersucht werden.

2. Experimentelles

Die TbFe- und TbDyFe-Schichten wurden auf Si, SiO_2 und verschiedenen Metallen (Ni, Ti, Al, Cu) abgeschieden. Die Herstellung erfolgte durch DC-Simultan-Magnetronspütern der Elementtargets (2" Durchmesser, 3N) in einer Leybold Z550-Anlage bei einem Ausgangsvakuum von $4 \cdot 10^{-5}$ Pa und einem Argonpartialdruck von 0,4 bis 4 Pa (s. Abb. 2).

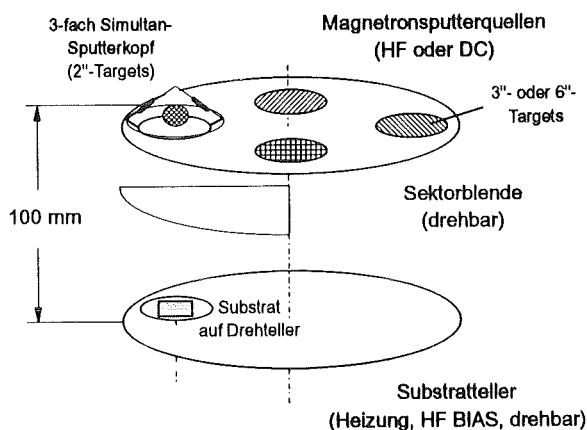


Abb. 2: Schematischer Aufbau der Beschichtungsanlage.

Die Stöchiometrie der Schichten konnte durch Variation der Sputterleistungen an den entsprechenden Targets eingestellt werden. Mit dieser Beschichtungsmethode kann z.B. im System Tb_xFe_{1-x} der Anteil des Tb von 10 bis 90 at% variiert werden. Analysiert wurden die Verhältnisse der Metalle in den Schichten durch Emissionsspektrometrie mit Plasmaanregung (ICP-OES), die Sauerstoffgehalte und die Tiefenprofile durch Augerelektro-nenelektroskopie (AES). Die durch die Anordnung der drei Sputterquellen erzeugte laterale Stöchiometrievariation in den Schichten konnte durch eine Drehung der Substrate um die Achse des Dreifach-sputterkopfes kompensiert werden. Das Konzept der Anlagen - die Substrate können unter vier Targetpositionen gefahren werden - ermöglicht

zudem die Beschichtung der magnetostriktiven Filme mit Passivierungs- und Verschleißschuttschichten [3] ohne Bruch des Vakuums. Der kristalline Aufbau der Schichten wurde mit Röntgenbeugung sowie mit Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) an speziell hergestellten Proben untersucht. Die magnetische Polarisation wurde mit einem Vibrationsmagnetometer (VSM) an ausgewählten Proben, die Magnetostriktion mit einem dafür entwickelten Meßstand (s. Abb. 3) bestimmt [4]. Dabei wird die Magnetostriktion der dünnen Schichten über den direkten magnetostriktiven Effekt bestimmt, in dem die Auslenkung

$$z = \frac{3 L^2 d_f E_f (1 - \nu_s)}{d_s^2 E_s (1 + \nu_f)} \lambda \quad (1)$$

bzw. die Krümmung

$$\phi = \frac{6 L d_f E_f (1 - \nu_s)}{d_s^2 E_s (1 + \nu_f)} \lambda \quad (2)$$

eines Biegebalkens (d_f, d_s : Dicke, E_f, E_s : Elastizitätsmodul und ν_f, ν_s : Poissonzahlen des Films bzw. des Substrats sowie L : Balkenlänge) [5] optisch detektiert wird. Dieses Meßprinzip entspricht der wichtigen aktorischen Anwendung der Magnetostriktion in der Mikrosystemtechnik, der Krümmung von Biegebalken oder Membranen. Es ist deswegen besonders geeignet, die für die Auslegung mikrotechnischer Komponenten relevanten Daten der Auslenkung bzw. der Krümmung als direkte Meßwerte zu liefern.

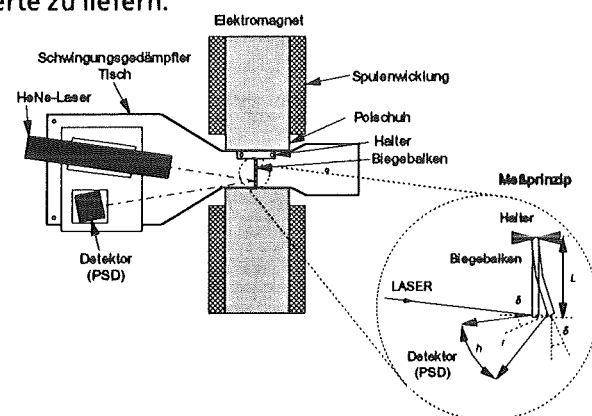


Abb. 3: Prinzip und Aufbau der Magnetostruktionsmessung.

3. Ergebnisse und Diskussion

TbFe-Schichten

Die Tb_xFe_{1-x} -Schichten wurden durch Simultan-sputtern in verschiedenen Zusammensetzungen $0,3 \leq x \leq 0,6$ röntgenamorph auf unbeheizte Substrate abgeschieden und untersucht. Magnetostriktive Eigenschaften konnten im Zusammenset-

zungsbereich $0,34 \leq x \leq 0,46$ nachgewiesen werden. Verglichen mit den bekannten kristallinen magnetostruktiven TbFe-Phasen Tb_2Fe_{17} , Tb_6Fe_{23} , $TbFe_3$ und $TbFe_2$ bedeutet dieses Ergebnis eine Verschiebung der Magnetostriktion bei amorphen Proben zu höheren Tb-Gehalten (s. Abb. 4). Die Er-

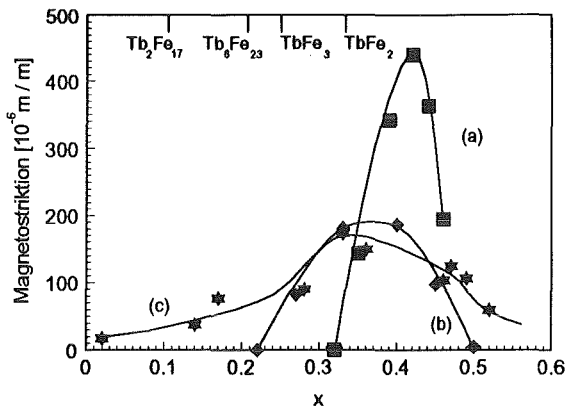


Abb. 4: Magnetostriktion von amorphen TbFe-Schichten (a) im Vergleich zu [6] (b) und [7] (c) in einem Magnetfeld von 6 kOe (a,b) und 16 kOe (c).

gebnisse anderer Herstellungsverfahren - Elektronenstrahlverdampfen [6] und HF-Magnetronspütern von Mosaiktargets [7] - verdeutlichen die starke Abhängigkeit der Ergebnisse von der Herstellungsmethode und damit wohl von der Mikrostruktur der Schichten. Der Vergleich verdeutlicht aber auch die Leistungsfähigkeit der durch DC-Simultansputtern hergestellten Schichten bezüglich der erreichbaren Magnetostruktionswerte. Die Koerzitivfeldstärken zeigen ebenfalls eine starke Stöchiometrieabhängigkeit. Für $x = 0,37$ wurde für eine Magnetisierung senkrecht zur Schicht ein H_c von 250 Oe und parallel zur Schicht von 50 Oe festgestellt. Bei $x = 0,44$ waren beide Werte unterhalb der Meßempfindlichkeit von 10 Oe. Die Abnahme der Koerzitivfeldstärke mit steigendem Tb-Gehalt deutet sich bereits durch die bekannten Werte im Zusammensetzungsbereich $0,14 \leq x \leq 0,32$ [8] an (s. Abb. 5).

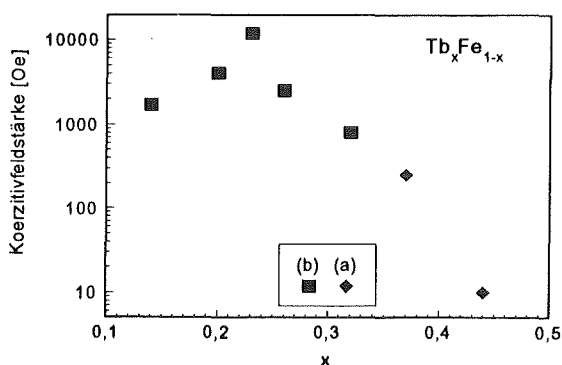


Abb. 5: Koerzitivfeldstärke von amorphen TbFe-Schichten (a) im Vergleich zu [8] (b).

Diese Ergebnisse verdeutlichen, daß für aktuatorische Anwendungen Zusammensetzungen zu wählen sind, die bei hoher Magnetostriktion einen möglichst hohen Tb-Anteil aufweisen. Die Magnetostruktionskurven für verschiedene Zusammensetzungen (s. Abb. 6) zeigen den unterschiedlichen

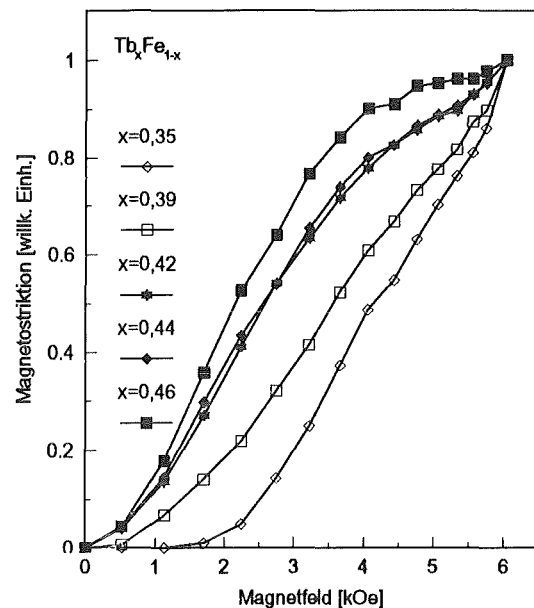


Abb. 6: Relative Magnetostruktionsverläufe amorpher TbFe-Schichten (Magnetfeld parallel zur Schicht).

Verlauf der Magnetisierung und damit der Magnetostriktion bei Veränderung des Tb-Gehalts um wenige at%. Durch Vergleich der Magnetisierungskurven für eine $Tb_{0,37}Fe_{0,73}$ - und eine $Tb_{0,44}Fe_{0,56}$ -Schicht (s. Abb. 7) erkennt man die unterschiedlich stark ausgeprägte, zu höheren Tb-Anteilen abnehmende Anisotropie der TbFe-Schichten. Die Diskussion dieser Ergebnisse erfolgt im Zusammenhang mit den TbDyFe-Schichten.

TbDyFe-Schichten

Die $(Tb_yDy_{1-y})_xFe_{1-x}$ -Schichten wurden durch Simultansputtern der Element- bzw. eines Legierungstargets $Tb_{0,3}Dy_{0,7}$ in verschiedenen Tb zu Dy-Verhältnissen ($0,3 \leq y \leq 0,7$) und Seltenen Erden zu Fe-Verhältnissen ($0,3 \leq x \leq 0,5$) analog zu den TbFe-Schichten abgeschieden und untersucht. Folgende Aussagen lassen sich durch die Experimente belegen:

- 1.) Die Magnetostriktion nimmt mit steigendem Dy-Gehalt in den Schichten ab. Dabei verschiebt sich das Maximum der Magnetostriktion zu kleineren Seltenen Erden-Anteilen x (s. Abb. 8).
- 2.) Alle Legierungen weisen unabhängig von ihrem Dy-Gehalt eine senkrechte Anisotropie auf (als Beispiel s. Abb. 9).

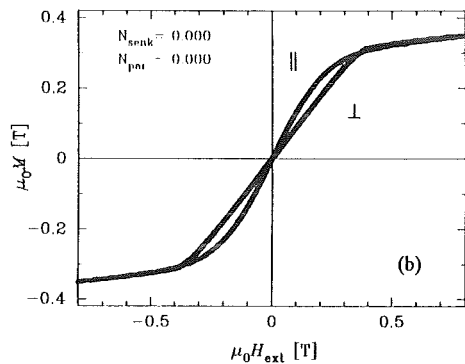
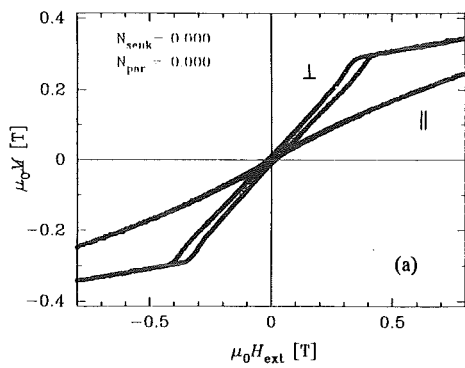


Abb. 7: Magnetische Polarisation einer $Tb_{0,37}Fe_{0,63}$ - (a) und einer $Tb_{0,44}Fe_{0,56}$ -Schicht (b) in Abhängigkeit eines äußeren Magnetfeldes \parallel und \perp zur Schicht.

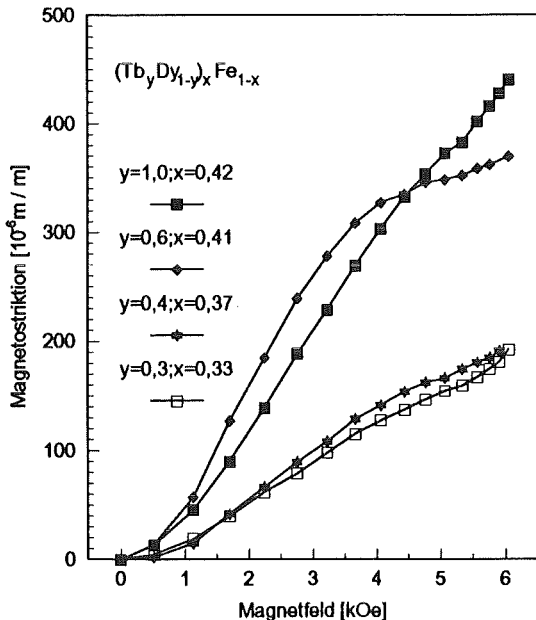


Abb. 8: Magnetostraktionsverläufe amorpher $TbDyFe$ -Schichten. Dargestellt ist die in Abhängigkeit des Dy-Gehalts beste Legierung.

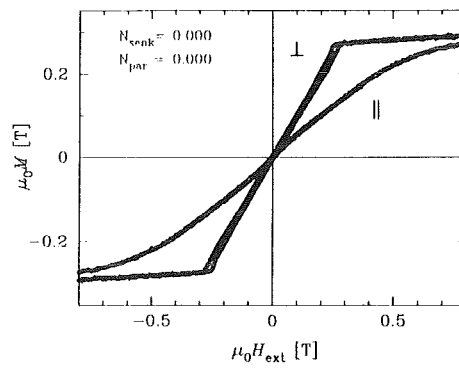


Abb. 9: Magnetische Polarisation einer $(Tb_{0,4}Dy_{0,6})_{0,37}Fe_{0,63}$ -Schicht in Abhängigkeit eines äußeren Magnetfeldes \parallel und \perp zur Schicht.

3.) Die abnehmende senkrechte Anisotropie bei steigendem Seltenen Erden-Gehalt, die bei $TbFe$ -Legierung festgestellt wurde, wird auch bei den $TbDyFe$ -Schichten beobachtet.

Zur Klärung dieser Ergebnisse und der sich daraus ergebenden Folgerungen kann ein Modell herangezogen werden, nach dem drei Mechanismen zur senkrechten Anisotropie in diesen amorphen Schichten beitragen: die intrinsische Anisotropie der Atomanordnungen, die mikrostrukturelle Anisotropie und magnetoelastische Wechselwirkungen zwischen Schicht und Substrat [9]. Die bislang diskutierten $TbDyFe$ -Schichten lassen aufgrund der bis auf die Zusammensetzung konstant gehaltenen Abscheidungsbedingungen nur Unterschiede im Beitrag der intrinsischen Anisotropie erwarten. Ein höherer Seltenen Erden-Gehalt und die Zulegierung von Dy wirken anisotropiereduzierend, können aber wegen der notwendigen Senkung des Seltenen Erden-Gesamtgehalts bei steigendem Dy-Gehalt nicht gleichzeitig zur Wirkung kommen. Dominierend bleiben bei den magnetrongesputterten Schichten wohl die beiden anderen Beiträge. Einen Hinweis liefern $TbDyFe$ -Schichten, die durch DC-Diodensputtern von Mosaiktargets hergestellt wurden [10], eine planare leichte magnetische Richtung aufweisen und sich im wesentlichen durch den Eigenspannungszustand (Zug- statt Druckspannungen) von den magnetrongesputterten Schichten unterscheiden. Diese Eigenspannungszustände, die die magnetoelastischen Wechselwirkungen zwischen Schicht und Substrat beeinflussen, lassen sich beim Magnetronsputtern z.B. durch den Ar-Partialdruck oder die BIAS-Spannung einstellen. Eigenspannungsfreie $TbDyFe$ -Schichten konnten bei etwa 1 Pa Ar-Partialdruck abgeschieden werden, eine mit dem Ar-Partialdruck ansteigende Sauerstoffverunreinigung (vgl. auch [7]) verhinderte aber bislang die Herstellung hochmagnetostriktiver magnetrongesputterter $TbDyFe$ -

Schichten mit Zugspannungen. Auch eine Veränderung der Anisotropie durch die Mikrostruktur wurde zu erreichen versucht. Zu einem solchen Experiment wurde eine quasi-Viellagenschicht mit Terfenol-D-ähnlicher Zusammensetzung abgetrennt und einer konventionellen Schicht der gleichen Zusammensetzung (s. Abb. 10) gegenübergestellt. Der Vergleich verdeutlicht die Richtigkeit des gewählten Ansatzes, der weiter verfolgt werden soll.

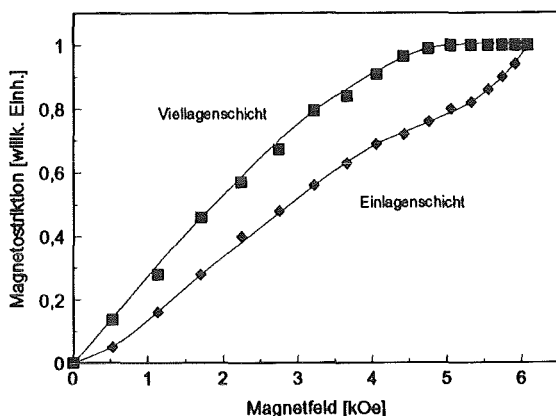


Abb. 10: Relativer Magnetostraktionsverlauf einer Mono- und einer quasi-Viellagenschicht mit Terfenol-D-ähnlicher Zusammensetzung.

Stabilität der Schichten

Für den Einsatz als Aktoren in der Mikrosystemtechnik ist die Stabilität der Schichten von großer Wichtigkeit, insbesondere das Oxidationsverhalten und die thermische Stabilität.

Die Oxidation der magnetostriktiven Schichten wurde exemplarisch an einer TbDyFe-Schicht untersucht, die vorher einen Monat Normalatmosphäre bei Raumtemperatur ausgesetzt war. Das AES-Tiefenprofil (s. Abb. 11) zeigt, daß die oberen 40 nm der Schicht oxidiert sind. Die Tiefenverteilung der Elemente lassen sich in Anlehnung an Un-

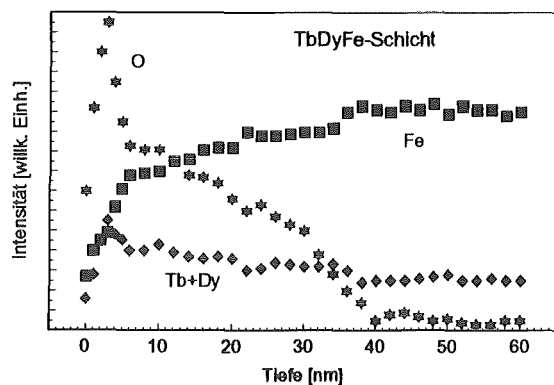


Abb. 11: AES-Tiefenprofil einer TbDyFe-Schicht.

tersuchungen an TbFe-Schichten aus der Abfolge der Oxidschichten - Deckschicht aus Fe_2O_3 gefolgt von einem Seltenen Erden-Oxid - und einer nachfolgenden Mischschicht aus einem Seltenen Erden-Oxid und einer Fe-reichen intermetallischen Phase [11] deuten. Diese Ergebnisse verdeutlichen eindrucksvoll, daß eine Passivierung der Schichten in einem Aktorkonzept unverzichtbar ist, insbesondere wenn höhere Temperaturen nicht ausgeschlossen werden können.

Die thermische Stabilität der amorphen hochmagnetostriktiven Schichten wurde an einer Terfenol-D-ähnlichen TbDyFe- und einer $\text{Tb}_{0,42}\text{Fe}_{0,58}$ -Probe untersucht. Die Proben wurden zur Vermeidung von Oxidation als Schichtpaket hergestellt, bei der sich die etwa 50 nm dicke magnetostriktive Schicht zwischen zwei etwa 10 nm dicken amorphen C-Schichten befindet. Die Temperung der Schichtpakete erfolgt mit in-situ elektronenmikroskopischer Beobachtung in 50°C Schritten mit jeweils 10 min Haltezeit. Die Untersuchungen an der TbDyFe-Schicht zeigt das berichtete Verhalten [12], eine bei etwa 350°C beginnende Kristallisation. Große Abweichungen an diesem Kristallisationsverhalten zeigte dagegen die TbFe-Probe. Bis 600°C konnte keine Kristallisation nachgewiesen werden. Eine systematische Untersuchung dieses unterschiedlichen Verhaltens ist in Arbeit.

4. Ausblick

Die Ergebnisse der Schichtentwicklung zeigen, daß für die senkrechte Magnetfeldsteuerung TbFe-Schichten mit nahezu idealer leichter Magnetisierung senkrecht zur Schichtebene hergestellt werden können. Die Verwendung von TbFe- anstelle von TbDyFe-Schichten für diese Aufgabe ist wegen der größeren Magnetostraktion und der höheren Curietemperatur [2] vorteilhaft. Bedingt durch die prinzipielle Entmagnetisierung dünner Schichten ist für diese Anregungsart dennoch ein äußeres Feld von etwa 2,5 kOe zur Sättigung der Schichten notwendig. Für die parallele Magnetfeldsteuerung konnten Konzepte für die Schichtentwicklung aufgezeigt werden. Erste Ergebnisse lassen erwarten, daß durch die Umsetzung dieser Konzepte die erforderlichen Sättigungsfeldstärken weiter reduziert werden können.

Die bisher erzielten Ergebnisse der parallelen Ansteuerung wurden für einen Ti-Modellbiegebalken ausgewertet (s. Abb. 12). Die Berechnung erfolgte ausgehend von Glg. (1) mit einer für den Fall ähnlicher Schicht- und Substratdicken erweiterten Beziehung [10]. Ideale Gestaltmagnetostraktion vorausgesetzt würde man bei einer senkrechten Feldsteuerung bei der Sättigungsfeldstärke als Maximalwert die halbe Auslenkung mit umgekehrten Vorzeichen erhalten. Diese Berechnungen sind als Vorüberlegungen für einen Ventil-Demonstrator

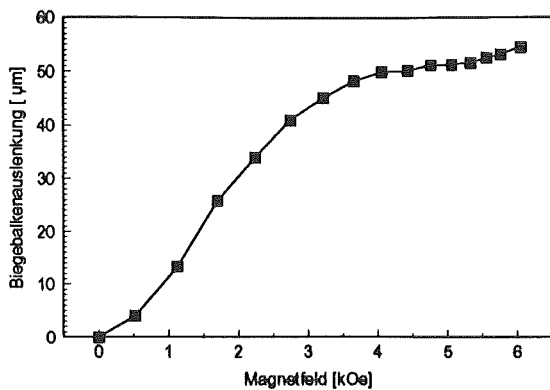


Abb. 12: Berechnete Auslenkung eines Ti-Biegebalkens ($L = 1 \text{ mm}$, $d_s = 2 \text{ µm}$, $d_f = 1 \text{ µm}$, vgl. Abb. 1) mit TbDyFe-Schicht.

zu sehen. Ein solches Membranventil - Abb. 13 zeigt als Modell ein Ventildesign, das im Normalzustand geschlossen ist und über einen Druckausgleich verfügt [13] - soll über magnetostruktive Schichten betätigt werden. Die typischen Anforderungen an die Durchflußmenge einerseits und die erzielbaren Membranhübe andererseits bewirken

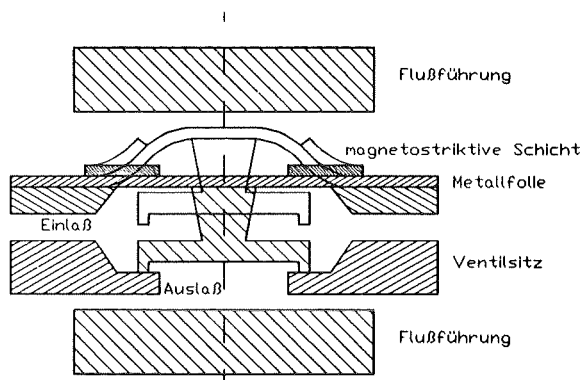


Abb. 13: Schematischer Aufbau eines magnetostruktiven Membranventils.

eine Ventilgeometrie, bei der der Durchmesser wesentlich größer als die Bauhöhe ist. Das Konzept setzt daher auf die senkrechte Feldansteuerung unter Nutzung der entwickelten hochmagnetostruktiven Schichten mit senkrechter Anisotropie.

Danksagung

F. Schatz (MPI für Metallforschung, Institut für Physik, Stuttgart) für die Magnetisierungsmessungen.

Literatur

- [1] A.E. Clark: High Power Magnetostrictive Transducer Materials; Actuator 92; H. Borgmann, K. Lenz, eds., VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH, Berlin, 127, (1992)
- [2] A.E. Clark: Magnetostrictive Rare Earth-Fe₂ Compounds; Ferromagnetic Materials, Vol. 1, E.P. Wohlfarth, eds., North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 531, (1980)
- [3] H. Holleck: Advanced Concepts in PVD Hard Coatings; Vacuum, 41, 2220, (1990)
- [4] E. Quandt, J. Schlegelmilch: Verfahren zur Messung der relativen Längenänderung magnetostruktiver und piezoelektrischer dünner Schichten; KfK-Primärbericht, (1993)
- [5] E. Klokholm: The Measurement of Magnetostriction in Ferromagnetic Thin Films; IEEE Trans. Magn., MAG-12, 819, (1976)
- [6] D.W. Forester, C. Vittoria, J. Schelleng, P. Lubith: Magnetostriction of Amorphous Tb_xFe_{1-x} Thin Films; J. Appl. Phys., 49, 1966, (1978)
- [7] Y. Hayashi, T. Honda, K.I. Arai, K. Ishiyama, M. Yamaguchi: Dependence of Magnetostriction of sputtered Tb-Fe Films on Preparation Conditions; Proc. Intermag 1993, Stockholm, AS-06, (1993)
- [8] R. Krishnan, M. Porte, M. Tessier, J.P. Vitton, Y. Le Cars: Magnetic Anisotropy and other Studies in Amorphous Tb-Fe Films; IEEE Trans. Magn., 24, 1773, (1988)
- [9] V.G. Harris, K.D. Alyesworth, B.N. Das, W.T. Elam, N.C. Koon: Determination of the Structural Anisotropy in Amorphous Tb-Fe Films; IEEE Trans. Magn., 28, 2958, (1992)
- [10] F. Schatz, M. Hirscher, G. Flik, H. Kornmüller: Magnetic Properties of Giant Magnetostrictive TbDyFe Films; Phys. Stat. Sol. (a), 137, 197, (1993)
- [11] R.B. van Dover, E.M. Gyorgy, R.P. Frankenthal, M. Hong, D.J. Siconolfi: Effect of Oxidation on the Magnetic Properties of Unprotected TbFe Thin Films; J. Appl. Phys., 59, 1291, (1986)
- [12] E.T.M. Lacey, D.G. Lord, P.J. Grundy: Sputtered Films of TbDyFe; IEEE Trans. Magn., 24, 1713, (1988)
- [13] M.A. Huff, M.S. Mettner, T.A. Lober, M.A. Schmidt: A Pressure-Balanced Electrostatically-Actuated Microvalve; Technical Digest, IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, 123, (1990)

Keramische Mikrostrukturen

Verfahren zur Materialsynthese und zur Formgebung

H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, E. Günther, R. Knitter, H. Wedemeyer, R. Zimmermann-Chopin

Institut für Materialforschung III

Zusammenfassung

Mit dem Ziel, keramische Materialien für Mikroaktoren zu entwickeln, wurden Arbeiten zur Synthese von multinären Piezokeramiken begonnen, wobei als typische Vertreter für perovskitische, piezoelektrische Keramik das $\text{PbZr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48}\text{O}_3$ (PZT) und das $\text{Pb}(\text{Mg}_{0,33}\text{Nb}_{0,67})_{0,9}\text{Ti}_{0,1}\text{O}_3$ (PMNT) gewählt wurden. Für beide Keramiken wurde eine Reihe verschiedener Sol-Gel Precursoren entwickelt, die sich hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrer physikalischen Eigenschaften unterscheiden. Diese lassen sich nun mit Hilfe unterschiedlicher Methoden zu PZT- oder PMNT-Keramikpulver umsetzen. Die Korngröße wie auch die Größe der Primärpartikel liegen hierbei im Submikronbereich. Dies sind Voraussetzungen zur Herstellung von Mikrostrukturen.

Als eine Möglichkeit zur Herstellung mikrostrukturierter keramischer Schichten mit drei-dimensionalen Strukturen im Mikrometerbereich und einem hohen Aspektverhältnis wurde das Gießen keramischer Folien mit anschließendem Prägen gewählt. Es wurden metallische Formen und Formen aus Kunststoff als Matrizen zum Prägen bei Drücken zwischen 4 und 32 N/mm² benutzt. Mit zwei verschiedenen ZrO₂-Pulvern wurden durch Variation des Verhältnisses von keramischem Pulver zu organischen Additiven und durch die Variation des Prägedrucks sehr gute Abformergebnisse mit hoher Formtreue erreicht. Die erreichten Dichten der Keramikstrukturen aus ZrO₂ nach dem Sintern liegen bei 99 % th.D. Die Güte der Abformung legt nahe, daß eine Reduzierung der Mikrostrukturen um etwa eine Größenordnung möglich sein sollte.

1. Einleitung

Die Anwendung keramischer Hochleistungswerkstoffe hat in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Dies ist vor allem auf die herausragenden Eigenschaften der Keramiken zurückzuführen. Sie sind generell verschleißfest, inert gegen aggressive Medien und temperaturbeständig. Allerdings läßt die klassische Methode der Herstellung keramischer Formteile gewisse Schwierigkeiten bei der Herstellung von Mikrostrukturen erwarten. Die keramische Verfahrenstechnik basiert auf der Technologie und der Handhabung von Pulvern, die wiederum durch Partikel- und Korngröße charakterisiert sind. Bei einer Mikrostruktur mit äußeren Abmessungen, die im Bereich von 1 mm und inneren Abmessungen (Stegbreiten), die in der Größenordnung von 5-10 µm liegen, ergeben sich deutlich höhere Anforderungen an die Prozeßtechnik als bei größeren Formen.

Zieht man weiterhin in Betracht, daß die gewünschte Keramik ein Mehrkomponentensystem sein kann - was bei Funktionskeramiken in der Regel der Fall ist - muß die Materialhomogenität auch in der kleinsten inneren Struktur des Bauteils gewährleistet sein. Weiterhin sollten, um ein quasi-isotropes Formteilverhalten zu gewährleisten, die Korngröße des Materials etwa eine Größenordnung kleiner sein als die minimale Stegbreite der Struktur.

Diese Randbedingungen resultieren in speziellen Anforderungen an Synthese und Verfahrenstechnik. Bezüglich der Synthese sind dies hauptsächlich die Forderungen nach einem homogenen Ausgangsmaterial mit minimalen Korngrößen und den Strukturabmessungen angepaßten Teilchengrößen.

Die Anforderungen an die Verfahrenstechnik sind:

- Handhabbarkeit des hergestellten Materials
- Optimierung der Qualität der Formmasse hinsichtlich des Formgebungsverhaltens (Formfüllvermögen, Stabilität)
- Sinterverhalten (hohe Enddichte, Formtreue, homogenes Mikrogefüge).

Arbeiten zur Herstellung von keramischen Mikroformteilen müssen somit sowohl die Entwicklung geeigneter Synthese wie auch Formgebungsverfahren umfassen.

Nachfolgend sollen Arbeiten zur Synthese am Beispiel multinärer piezokeramischer Materialien dargestellt werden. Ergebnisse von Untersuchungen zur Prozeßtechnik und zur optimierten Herstellung keramischer Mikrostrukturen werden anhand von Beispielen aus dem Gebiet der Strukturmaterialien auf ZrO₂-Basis sowie von Biokeramiken gegeben.

2. Synthese multinärer piezokeramischer Mikropulver nach einem Sol-Gel Verfahren

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung eines Sol-Gel Prozesses zur Herstellung piezokeramischer Verbindungen wie Bleizirkonattitanat (PZT) der Zusammensetzung $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48})\text{O}_3$ sowie von Bleimagnesiumniobatitanat (PMNT) der Komposition $\text{Pb}(\text{Mg}_{0,33}\text{Nb}_{0,67})_{0,9}\text{Ti}_{0,1}\text{O}_3$. Die Substanzen sollten als Mikropulver anfallen, die als Ausgangsmaterialien zur Entwicklung geeigneter Formgebungsverfahren mit Mikrostrukturen aus Polymethylmetacrylat (PMMA) dienen konnten.

2.1 Pulversynthese

Auf der Basis der Zr-, Ti-, Nb- und Mg-Alkoholate, sowie des Pb(II)-Acetates wurde für das PZT und das PMNT ein Sol-Gel Precursor und für das PZT ein metallorganisch modifiziertes Polymer entwickelt.

Zur Synthese der Sol-Gel Precursoren wurden die entsprechenden Alkoholate in organischer Lösung miteinander umgesetzt und durch Reaktion mit dem Komplexbildner Acetylaceton gegen vorzeitige Hydrolyse stabilisiert. Diese Stabilisierung ermöglichte Blei oder verschiedene Dotierungsstoffe nicht mehr als Alkoholate, sondern als kristallwasserhaltige Acetate einzusetzen. Im nächsten Schritt wurde die Alkoholatlösung beim PZT mit kristallwasserhaltigem Pb(II)-Acetat und beim PMNT mit basischem Pb(II)-Acetat zur Reaktion gebracht. Zur Direktsynthese keramischer Mikropulver wurden die Sole mit Dimethylformamid versetzt, das die Bildung eines homogenen und rißarmen Gels begünstigte, und mit einem Überschuß an Wasser hydrolysiert. Durch Einengen der Lösung und Trocknung bei Temperaturen bis 180 °C konnte ein dichtes Gelpulver erhalten werden.

2.2 Kalzinieren der Pulver

Die IR-spektroskopischen Untersuchungen der Gelpulver zeigen beim PZT-Pulver das Vorhandensein von Wasser und chemisch gebundenen Hydroxylgruppen ($3600 - 3400 \text{ cm}^{-1}$), Banden des Zr-Acetylacetonkomplexes ($1660 - 1300 \text{ cm}^{-1}$), sowie die Gerüstschwingungen noch vorhandener n-Propanolgruppen ($1020 - 930 \text{ cm}^{-1}$) (Abb. 1). Ein analoges Bild zeigt das IR-Spektrum des PMNT-Gelpulvers. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Gelpulver vor der pulvermetallurgischen Formgebung zu kalzinieren, um ein zu starkes Schrumpfen und Rißbildung während der Verdichtung zu vermeiden.

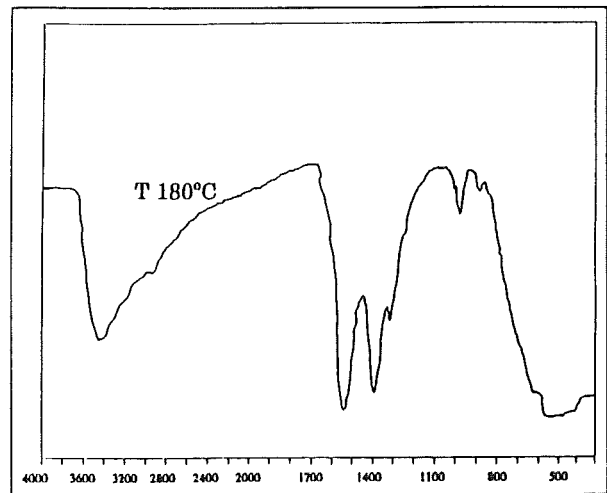


Abb. 1: IR-Spektrum eines bei 180 °C getrockneten PZT-Gels

Die Kalzinationstemperaturen wurden durch thermogravimetrische Analysen ermittelt. Hiernach ist die Zersetzung der organischen Anteile und die Bildung der anorganischen Strukturen beim PZT-Pulver bei 550 °C und beim PMNT-Pulver bei etwa 350 °C erreicht. Diese Ergebnisse wurden röntgenographisch bestätigt.

Es ist von besonderem Interesse, daß während des Kalzinierens neben der spezifischen Oberfläche auch die Partikelgröße der Gelpulver stark abnimmt. Partikelgrößen von etwa 1 µm werden bei Kalzinationstemperaturen von etwa 750 °C erreicht (Abb. 2).

2.3 Charakterisierung der Pulver

Nach dem Kalzinieren betragen die Partikelgrößen (d_{50} -Werte) etwa 1 µm. Die Verteilungsbreite der Partikelgrößen ist bei den beiden Pulversorten unterschiedlich und hängt von der Verteilungsbreite bei den Gelpulvern ab, wobei das PMNT-Pulver stärker zur Agglomeration neigt als das PZT-Pulver. Die gemessenen Oberflächen beider Pulversorten betragen etwa 5 m²/g.

Die Pulver sind röntgenographisch einphasig. Nach dem Kalzinieren bei 600 - 700 °C beträgt die Dichte der Pulverpartikel deutlich mehr als 90 % der theoretischen Dichte. Das Sintern der Pulver beginnt oberhalb 1000 °C, wobei mit zunehmender Sinter-temperatur und Sinterdauer deutliche Bleiverluste auftreten.

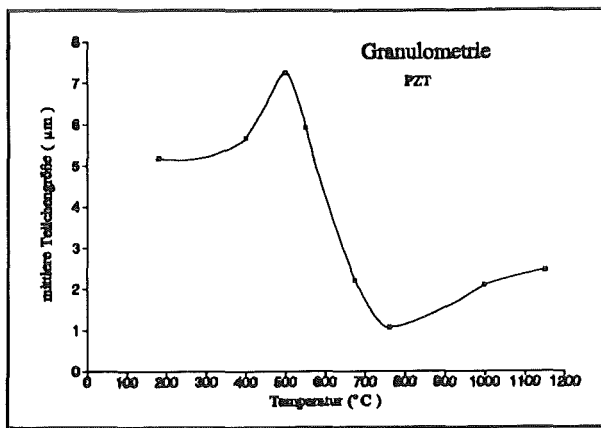


Abb. 2: Mittlere Teilchengröße von PZT-Pulver als Funktion der Temperatur

2.4 Ergebnisse und Diskussion

Es wurden nach einem Sol-Gel Verfahren piezokeramische PZT- und PMNT-Pulver hergestellt, die zur Abformung mikrostrukturierter Formen geeignet sind. Zur pulvermetallurgischen Formgebung ist eine optimierte Kalzination der Gelpulver notwendig, um zu starkes Schrumpfen und Rißbildung während des Sinterns zu vermeiden. Zur Abformung werden stabile Schlickersuspensionen benötigt. Die hergestellten, feinteiligen Piezopulver sind hierfür gut geeignet. Zur Verdichtung der Formkörper ist ein Sinterprogramm zu entwickeln, das insbesondere die Neigung zu Bleiverlusten bei höheren Temperaturen berücksichtigt.

3. Herstellung keramischer Mikrostrukturen durch Prägen plastifizierter Keramikmassen

Als Verfahrenstechnik zur Abformung keramischer Mikrostrukturen wurden die Prozesse Foliengießen und Prägen untersucht. Während Mikrostrukturen aus Metall oder Kunststoff mit Hilfe der LIGA-Technik [1] herstellbar sind, ist dies bei keramischen Mikrostrukturen nicht möglich. Es wurde deshalb ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, durch Prägen einer plastifizierten Keramikmasse mit einer Negativform eine Abformung mit hoher Formtreue zu erreichen. Solche Negativformen können mit Hilfe eines mechanischen Mikrofertigungsverfahrens aus Metall oder durch das LIGA-Verfahren (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung, Kunststoff Abformung) z.B. aus PMMA (Polymethylmethacrylat) hergestellt werden.

Eine schematische Übersicht über den Verfahrensablauf zeigt Abbildung 3.

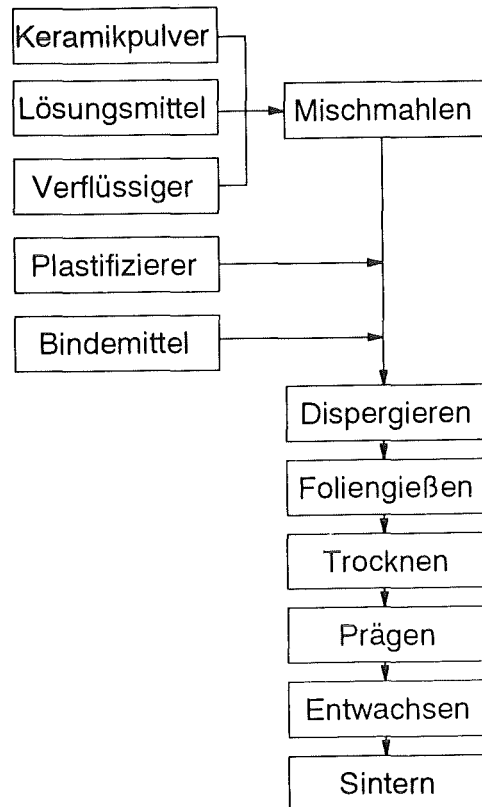


Abb. 3: Fließbild des Herstellungsprozesses

3.1 Experimentelles

Als Ausgangsmaterialien wurden Keramikpulver auf $ZrO_2-Al_2O_3$ Basis sowie Hydroxylapatit-Pulver verwendet. Die Zirkoniumoxidpulver der Typen TZ-3Y - mit 3 mol% Y_2O_3 stabilisiertes ZrO_2 - und TZ-3Y20A, ebenfalls mit 3 mol% Y_2O_3 stabilisiertes ZrO_2 mit 20 Gew.% Al_2O_3 -Zusatz (Tosoh, Japan) wurden zuerst 24 h lang in einer Kugelmühle unter Ethanol gemahlen, um vorhandene Agglomerate zu zerstören. Hierdurch ließ sich der mittlere Teilchendurchmesser von etwa $50 \mu m$ auf $1 \mu m$ reduzieren. Die spezifische Oberfläche betrug $15 m^2/g$ für das TZ-3Y-Pulver und $16 m^2/g$ für das TZ-3Y20A-Pulver.

Das Hydroxylapatit-Pulver, $Ca_5(PO_4)_3OH$ (Merck) wurde 1 h lang bei $700 \text{ }^\circ C$ kalziniert, wodurch die spezifische Oberfläche von ursprünglich $72 m^2/g$ auf $20 m^2/g$ reduziert wurde. Die mittlere Teilchengröße lag hier bei Werten unterhalb $0,5 \mu m$.

3.2 Herstellung der Foliengießmasse

Die Folienherstellung nach dem Doctor-Blade Prozeß [2] basiert auf der Dispersion feinkörniger Keramikpulver in organischen oder wässrigen Lösungen, bestehend aus Lösungsmittel, Binde- und Plastifizierungsmitteln und dem Gießen dieser Schlicker auf eine Trägeroberfläche.

Für die hier verwendeten Materialien wurde Ethanol als Lösungsmittel verwendet, daneben Polyvinylbutyral (PVB) als Binder und Dibutylphthalat (DBP) als Plastifizierer. Die hiermit hergestellten Suspensionen wurden auf eine Glasplatte gegossen, auf 500 µm Dicke kalibriert und bei Raumtemperatur mindestens 12 h lang getrocknet.

Das Ablösen der getrockneten Folien erfolgte mechanisch mit einem Klingenschaber. Nach dem Ablösen wurden die so erhaltenen Folien in kleinere Teile geschnitten. Der Keramikanteil in der Folie lag nach Verdampfen des Lösungsmittels zwischen 77 und 86 Gew.% bei den Zirkoniumoxidfolien und zwischen 50 und 58 Gew.% bei den Hydroxylapatitfolien.

3.3 Strukturierung durch Prägen

Als Prägewerkzeuge wurden sowohl metallische Mikroformen verwendet, die durch mechanische Mikrofertigung hergestellt worden waren [3], als auch Mikrostrukturen aus Polymethylmetacrylat (PMMA), hergestellt nach dem LIGA-Verfahren. Vor dem Prägen wurden die Stempel entweder mit Wasser oder mit Stearinsäure benetzt, um sie nach dem Prägevorgang wieder ablösen zu können. Geprägt wurden dreidimensionale Mikrostrukturen mit 30 bis 130 µm Kantenlänge und Strukturhöhen bis zu 300 µm. Der Prägedruck lag zwischen 4 und 32 N/mm², wobei einige Folien vor dem Prägen noch mit einem Druck von 160 N/mm² vorverdichtet wurden.

3.4 Entwachsen und Sintern

Vor dem Sintern wurden in einem vorgeschalteten Entwachsungsschritt die organischen Bestandteile aus der Folie ausgebrannt. Die Entwachsungsbedingungen ließen sich mit Hilfe thermogravimetrischer Untersuchungen (TG) optimieren. Abbildung 4 zeigt vergleichende TG-Kurven sowohl der Hauptadditive - Binder, Verflüssiger, Plastifizierer - im einzelnen als auch einer Keramikfolie mit diesen Bestandteilen. Es ist zu erkennen, daß die organischen Zusatzstoffe im Temperaturbereich zwischen 150 °C und 550 °C ausgetrieben werden können. Die optimale Sintertemperatur wurde mit Hilfe von Dilatometerversuchen an gepreßten zylindrischen Pulverproben festgelegt. Im Falle des Hydroxylapatits wurde durch Röntgenbeugungsaufnahmen

nachgewiesen, daß bei dieser Temperatur keine Zersetzung stattfindet.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die mikrostrukturierten Folien mit 0,1 °C/min erst bis auf 550 °C aufgeheizt. Nach einer Haltezeit von 15 min

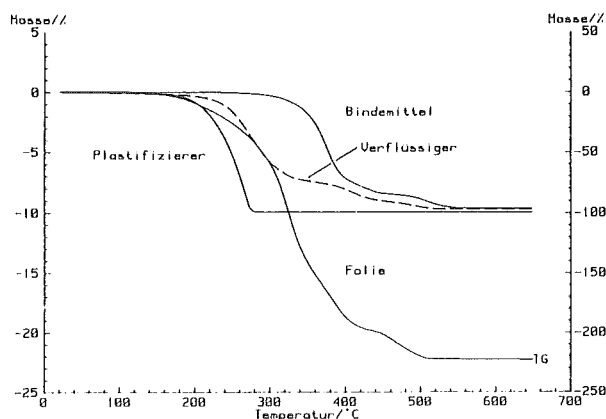


Abb. 4: Thermogravimetrie einer ZrO₂-Folie mit einem Feststoffgehalt von 78 Gew.% (linke Skala) und der organischen Additive (rechte Skala)

wurde die Temperatur mit 1 °C/min weiter bis zur Sintertemperatur erhöht. Diese betrug im Fall der ZrO₂-Keramik 1450 °C und für Hydroxylapatit 1275 °C. Nach einer Sinterdauer von 1 h wurden die Mikrostrukturen mit 10 °C/min auf Raumtemperatur abgekühlt.

3.5 Ergebnisse und Diskussion

Nach dem Sintern wurden die Dichte und die offene Porosität der Keramikstrukturen bestimmt. Im Falle der Zirkoniumoxidproben wurden 97 % th.D. für die TZ-3Y20A-Proben und 99 % th.D. für die TZ-3Y-Proben bestimmt. Es zeigt sich, daß die Erreichung dieser hohen Dichten weder vom gewählten Prägedruck (4 - 20 N/mm²) noch vom im Rahmen der Untersuchungen gewählten Feststoffanteil (77 - 86 Gew.%) abhängt. Die Dichten der Hydroxylapatit-Strukturen lagen mit 91 % th.D. etwas niedriger, bedingt durch die relativ geringe Sintertemperatur, die gewählt wurde, um eine thermische Zersetzung zu vermeiden.

Hatten Feststoffanteil in der Folie und Prägedruck auch keinen Einfluß auf die Sinterdichte der Strukturen, so doch auf das Prägeverhalten und die Abformqualität. Beide Parameter wurden im Zuge der Untersuchungen optimiert. So zeigt Abb. 5 die hohe Genauigkeit, die bei der Abformung erreicht werden kann, wenn man das metallische Prägewerkzeug - im oberen Teil der Abbildung - mit der geprägten und gesinterten Keramikstruktur - unten - vergleicht.

Bei dem Keramikmaterial handelt es sich hierbei um Zirkoniumoxid-Aluminiumoxid vom Typ TZ-3Y2O_A, der Feststoffanteil in der Prägemasse betrug 84 Gew.% und der Preßdruck 20 N/mm². Es zeigt sich, daß trotz des linearen Schrumpfes von ca. 20 % alle Details der Prägematrize, von den scharfen Kanten bis hin zu den Fräsriefen, exakt wiedergegeben sind.

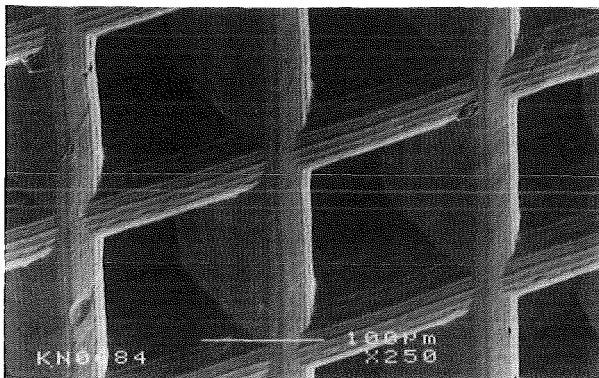
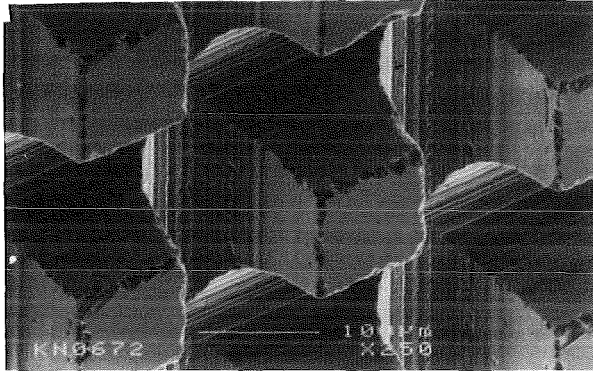


Abb. 5: *Metallisches Prägewerkzeug (oben); keramische Mikrostruktur (TZ-3Y₂O_A) nach dem Sintern bei 1450 °C (unten)*

Die PMMA-Prägematrizen hatten die Form sechseckiger Säulen mit 50 µm Durchmesser und 200 µm Höhe bei einem Säulenabstand von 50 µm. Bedingt durch die geringe mechanische Festigkeit dieser Prägematrizen konnte nur ein geringer Preßdruck von 6 N/mm² aufgebracht werden. Trotzdem wurden, wie Abb. 6 zeigt, Keramikstrukturen hoher Formtreue erreicht, die immerhin Strukturhöhen von 120 µm aufwiesen.

Der geringe Feststoffanteil der Hydroxylapatitmassen führte zu höheren linearen Schrumpfwerten von ca. 30 % und damit - verglichen mit den ZrO₂-Strukturen - zu einer Oberfläche von geringerer Qualität. Diese ließ sich jedoch durch Erhöhung des Feststoffanteils von 50 auf 58 Gew.% und ebenfalls eine Erhöhung des Prägedrucks verbessern. Wie anhand von Abb. 7 zu erkennen ist, lassen sich die viereckigen Säulenstrukturen mit guter Genauig-

keit abformen. Doch im Gegensatz zu den ZrO₂-Strukturen, ist eine Wiedergabe der Fräsriefen hier nicht zu sehen. Auch metallische Prägematrizen mit einer größeren Strukturhöhe lassen sich gut abformen. Abb. 8 zeigt eine gesinterte Hydroxylapatitfolie, die mit einer metallischen, 250 µm hohen Pyramidenstruktur geprägt wurde. Auf Versuche, mit PMMA-Matrizen abzuformen, wurde aufgrund des benötigten hohen Prägedrucks verzichtet.

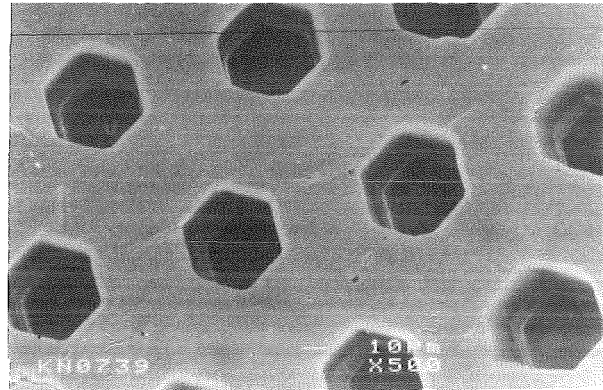


Abb. 6 *Keramische Mikrostruktur (TZ-3Y₂O_A) nach dem Sintern, geprägt mit einer PMMA-Form*

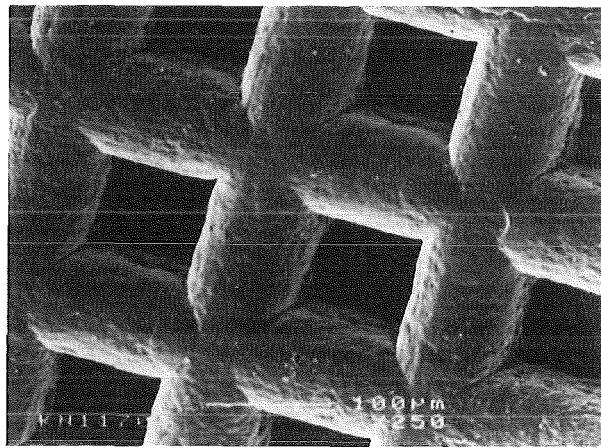


Abb. 7: *Hydroxylapatitstruktur nach dem Sintern bei 1275 °C*

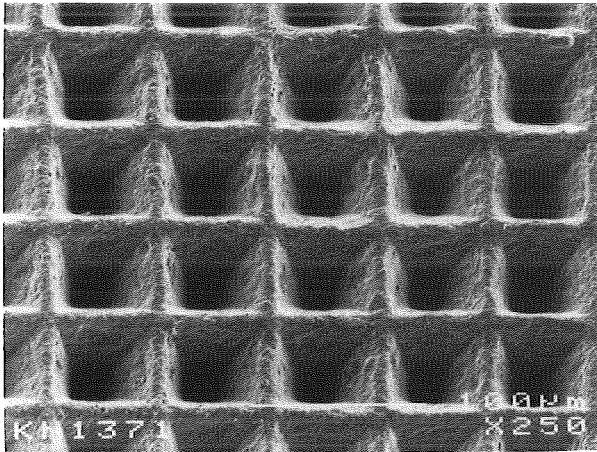


Abb. 8: Hydroxylapatitstruktur nach dem Sintern, geprägt mit einer 250 μm hohen Pyramidenstruktur

3.6 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnte folgendes gezeigt werden:

- Das hier angewandte Sol-Gel Verfahren ist geeignet, um piezokeramische Mikropulver herzustellen, die sich durch gute Homogenität und Größen der Primärpartikel im Submikronbereich auszeichnen.
- Direktabformungsverfahren piezokeramischer Mikrostrukturen aus Gelen oder Gel-haltigen Schlickern oder Pasten resultierten noch nicht in hochdichten Keramikstrukturen, jedoch ist hier, insbesondere in den druckunterstützten Abformverfahren noch Entwicklungspotential vorhanden, so daß eine Weiterentwicklung und -verfolgung dieser Verfahren zu höheren Strukturdichten führen wird.

- Die pulvergstützte Prozeßtechnik, die aus Pulverkonditionierung, Herstellung plastifizierter keramischer Gießmassen, anschließendes Prägen von Mikroformen und Sintern besteht, resultiert in hochdichten, keramischen Mikrostrukturen äußerster Formtreue. Weiterführende Arbeiten werden sich hier mit der möglichen Herstellung von Mikroformen mit größerer Strukturhöhe ($\geq 350 \mu\text{m}$) befassen. Ein weiterer wichtiger Schwerpunkt der zukünftigen Arbeiten auf diesem Gebiet ist die Übertragbarkeit der hier entwickelten Verfahrenstechnik auf andere Ausgangspulver und hier insbesondere auf die selbst synthetisierten Piezokeramikpulver.

Damit liegt dann eine breite Basis zur Synthese und Verfahrenstechnik keramischer Mikrostrukturen vor.

4. Hinweise:

- [1] Bley P., Menz W.:
Stand und Entwicklungsziele des LIGA-Verfahrens zur Herstellung von Mikrostrukturen, KfK-Nachrichten 23 (1991) 69-75.
- [2] Williams J.C.:
Doctor-Blade Process, in Wang F.F.Y. (ed): Treatise on Materials Science and Technology, Vol. 9 (1976), 73-198 Academic Press.
- [3] Bier W., Linder G., Seidel D., Schubert K.:
Mechanische Mikrotechnik,
KfK-Nachrichten 23 (1991) 165-173.

Systemtechniken

Arbeitsergebnisse aus der Aufbau- und Verbindungstechnik für die Integration mikrosystemtechnischer Komponenten

D. Seidel, W. Keller, D. Maas

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zusammenfassung

Die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) ist eine Schlüsseltechnologie für eine erfolgreiche Mikrosystemtechnik. Nur mit einer leistungsfähigen und hochentwickelten AVT ist es möglich, Komponenten der Mikrostrukturtechnik sowohl untereinander zu verknüpfen als auch mit mikroelektronischen Bauteilen zu Mikrosystemen zu verschalten. Seit drei Jahren wird am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) des Kernforschungszentrums Karlsruhe daran gearbeitet, aus der Mikroelektronik bekannte Verfahren der AVT für die Mikrosystemtechnik zu modifizieren und weiterzuentwickeln. Anhand von drei mikrotechnischen Funktionsmustern, einem Beschleunigungssensor, einer Mikropumpe und einer Meßzelle für ein Mikroanalysensystem, werden die sehr unterschiedlichen Anforderungen an die AVT erläutert, die wichtigsten Verfahrenstechniken beschrieben und einige ausgewählte Problemlösungen vorgestellt.

1. Einleitung

Das am IMT noch junge Arbeitsgebiet der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) für die Mikrosystemtechnik hat sich in den zurückliegenden drei Jahren zu einem unverzichtbaren Instrument für die Integration mikrosystemtechnischer Komponenten entwickelt. Bedingt durch die schnell wachsende Zahl der im IMT mit Hilfe der LIGA-Technik (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung, Kunststoffabformung) entwickelten Sensoren, Aktoren und anderen Bauelementen, ist die AVT zu einem außerordentlich breit gefächerten, sehr rasch expandierenden Arbeitsgebiet geworden.

Über die Aufgaben und Arbeitsinhalte der AVT für die Mikrosystemtechnik wurde bereits berichtet [1]. Im IMT wurden zu deren Umsetzung neue Laborräume mit Geräten zum Fügen und Kontaktieren von Bauteilen, einer Dickschichtprozeßlinie und Einrichtungen zur Qualitätssicherung eingerichtet. Ausführliche Beschreibungen dieser Prozeßtechniken finden sich z.B. in [2]. Damit wurden die notwendigen Voraussetzungen geschaffen, nahezu alle heute und in absehbarer Zukunft im IMT anfallenden Aufgaben auf dem Gebiet der AVT bearbeiten oder in angemessener Zeit entwickeln zu können.

Charakteristisch bei der Bearbeitung der Aufgabenstellungen ist die für nahezu jeden Einzelfall notwendige Anpassung und Modifizierung der Montage- und Kontaktierungstechniken, die ihren Ursprung häufig in der Mikroelektronikfertigung haben. Neu für den Entwurf von LIGA-Strukturen ist die Erfahrung, daß bereits in der Planungsphase neuer Bauelemente die Möglichkeiten und Grenzen der für die Integration zur Verfügung stehen-

den Aufbau- und Verbindungstechniken berücksichtigt werden müssen, was mitunter sehr einschneidende Auswirkungen auf das Design und die Werkstoffauswahl hat.

Einen Überblick über die im AVT-Labor des IMT verfügbaren Prozesse und Arbeitstechniken und deren Einsatz anhand typischer Anwendungsbeispiele von Funktionsmustern zeigt die Tabelle 1. Am Beispiel von drei mikrotechnischen Funktionsmustern mit ihren unterschiedlichen Anforderungen an die AVT soll der Einsatz der grundlegenden und häufig angewandten Aufbau- und Verbindungstechniken erläutert werden.

2. Beschleunigungssensor mit Auswerteschaltung

Anhand der Verknüpfung des LIGA-Beschleunigungssensors mit einer Auswerteelektronik wird im folgenden ein repräsentativer Querschnitt der verfügbaren Aufbau- und Verbindungstechniken vorgestellt. Einzelne Beschleunigungssensoren oder ganze Sensorarrays werden zusammen mit einem oder mehreren integrierten Schaltkreisen für die Auswertung des Meßsignals und passiven elektronischen Bauelementen auf einem Schaltungsträger aufgebaut und kontaktiert. Dieser wird zum Schutz vor Umgebungseinwirkungen in ein Metallgehäuse hermetisch eingebaut. Aufbau und Funktion des Beschleunigungssensors werden in [3] beschrieben.

Die Beschleunigungssensoren werden im Mehrfachnutzen auf einer Keramikunterlage durch galvanische Metallabscheidung in Kunststoffhohlformen gefertigt. Vor der weiteren Verarbeitung müssen die Sensoren zusammen mit ihrer kerami-

Aufgabe	Prozeß	Anwendung
Vereinzeln von Keramiksubstraten	Laser-Ritzen und Brechen, Sägen	z.B. Beschleunigungssensoren, Mikromotoren, Schaltungsträger
Montage von Bauteilen auf Substrat	Kleben	Bestücken von Schaltungsträgern mit Beschleunigungssensoren, Chips, Kondensatoren
Fügen von Bauteilen	Kleben, positioniert und keilfehlerfrei	Mikropumpen, Fluidik-Elemente, Mikroventilsysteme
Gehäusen	Kleben, hermetisch	Beschleunigungssensoren
Elektrische Kontaktierung	Drahtbonden, Leitkleben	Beschleunigungssensoren Chips, Mikromotoren
Anschlüsse für Fluide (Mikro/Makro-Schnittstellen)	Laser-Bohren, Kleben	Mikropumpen, Mikroventilsysteme, Meßzellen für Mikroanalysensystem
Herstellung von Schichtschaltungen	Siebdruck, Einbrennen, Laser-Trimmen von Dickschicht-Widerständen	Beschleunigungssensoren

Tabelle 1: Überblick über die im AVT-Labor des IMT verfügbaren Prozesse und deren Anwendung bei der Herstellung von Funktionsmustern.

schen Unterlage vereinzelnd werden. Dazu werden auf der Rückseite des Keramiksubstrats mit einem Nd-YAG-Laser ca. 100 µm breite Nuten als Sollbruchstellen eingearbeitet. Deren Tiefe beträgt etwa 2/3 bis 3/4 der Keramikdicke. Dieses Ritzen erfolgt vor dem Entfernen der Kunststoffform, welche die feinen metallischen Strukturen vor Verschmutzung schützt. Nach dem Herauslösen des Kunststoffs wird die Keramikunterlage entlang dieser Nuten gebrochen. Mit dieser Technik lassen sich Einzelteile mit einer Größe von wenigen Millimetern herstellen.

Als Schaltungsträger dienen Substrate aus Al₂O₃-Keramik mit Abmessungen von 10 mm x 10 mm, auf die Leiterbahnen und Widerstände in Dickschichttechnik aufgebracht werden. Die Schaltungsträger werden ebenfalls im Mehrfachnutzen, zu jeweils 16 Stück auf einem 2"x2"-Substrat gefertigt (Abb. 1) und anschließend wie oben beschrieben vereinzelnd. Das Layout wird durch CAD erstellt, die Siebdruckschablonen im AVT-Labor angefertigt. Die gedruckten Widerstände werden mit dem bereits erwähnten Laser getrimmt, wobei eine Widerstandstoleranz von 1% problemlos erreicht wird. Der Schaltungsträger wird auf dem Boden eines Metall-Gehäuses (TO4), der mit seiner Keramikunterlage vereinzelte Beschleunigungssensoren auf dem Schaltungsträger mit einem warm-aushärtenden Klebstoff befestigt. Die ungehäuseten aktiven Bauelemente und die Kondensatoren werden ebenfalls eingeklebt. Die elektrischen Verbindungen zwischen den Bauelementen und dem Schaltungsträger, sowie zu den

Gehäusedurchführungen werden mit einem Golddraht-Wedge/Wedge-Bonder hergestellt.

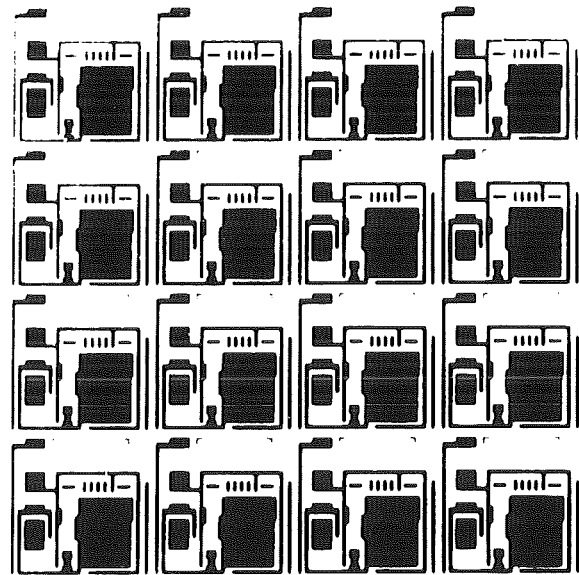


Abb. 1: Im Mehrfachnutzen auf einem Keramiksubstrat in Dickschichttechnik hergestellte Schaltungsträger für Beschleunigungssensoren.

Die zuverlässige Drahtkontaktierung der in Dickschichttechnik hergestellten Leiterbahnen ist wesentlich kritischer und schwieriger als bei rein metallischen Oberflächen. Die erreichte hohe Haftfestigkeit der Kontaktstellen verlangt eine genaue

Parametereinstellung der Prozeßlinie, die durch umfangreiche Versuche gefunden wurde. Abbildung 2 zeigt die komplette Hybridschaltung zur Messung von Beschleunigungen. Nach einem elektrischen und mechanischen Funktionstest wird das Gehäuse in trockener, inerte Atmosphäre hermetisch verschlossen.

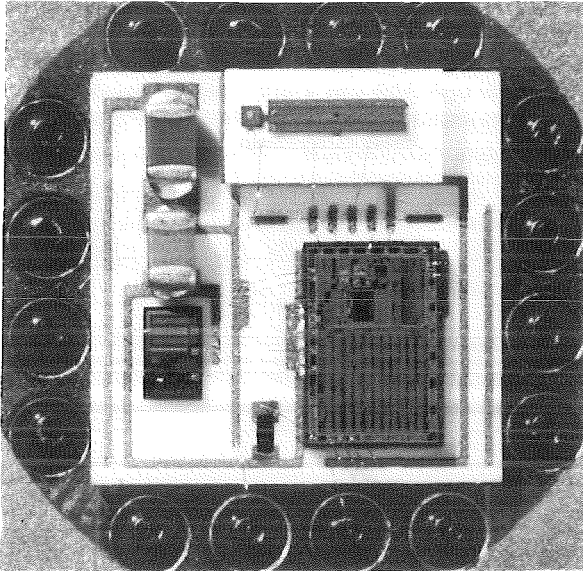


Abb. 2: In Hybridtechnik hergestelltes Funktionsmuster eines LIGA-Beschleunigungssensors mit Auswerteschaltkreis. Die Abmessungen des Schaltungsträgers betragen 10 mm x 10 mm.

3. Mikropumpe

Zum Fügen planarer, mikrostrukturierter Bauteile werden im AVT-Labor verschiedene Klebetechniken eingesetzt. Die Anforderungen an die verwendeten Klebstoffe und an die Ausbildung der Klebefugen unterscheiden sich wesentlich von denen der konventionellen Klebetechnik. Außer einer guten Adhäsion an den verschiedensten Werkstoffen (Glas, Keramik, Metalle und Kunststoffe) müssen die Klebstoffe auch Forderungen nach chemischer Beständigkeit, Aushärtbarkeit mit sehr geringem Schrumpf und Langzeitstabilität erfüllen. Die Klebefugen müssen sich den sehr komplexen Geometrien der Mikrostrukturen anpassen. Meist müssen sie nicht nur den Zusammenhalt von Bauteilen garantieren, sondern überdies auch Dichtfunktionen übernehmen. Da die Fügeflächen meistens sehr klein (kritische Dimensionen ca. 100 µm) sind, werden besonders präzise Klebstoffauftragungstechniken verwendet [4].

Am Beispiel der im IMT entwickelten LIGA-Mikropumpe sollen einige Klebetechniken näher erläutert werden. Auf die Herstellung und Funktion dieser Pumpe wird nicht näher eingegangen sondern auf [5] verwiesen.

Den schematischen Aufbau der Mikropumpe zeigt Abbildung 3 in Explosionsansicht. Das LIGA-Bauteil besteht aus einer 3 µm dicken Titanmembran mit einer aufgalvanisierten, 100 µm hohen Goldstruktur, die den Pumpenraum und die Ein- und Austrittskanäle umschließt. Auf der Titanmembran ist im Bereich der Einlaßöffnung ein passives Ventil strukturiert. Ein separat hergestelltes Mikroauslaßventil wird beim Zusammenbau der Pumpe montiert. Zum Verschließen der Hohlräume wird auf die Goldstruktur ein Deckglas geklebt. Dabei muß sich die Klebefuge den Mikrostrukturkanten anpassen und so den entstehenden Hohlraum nach außen abdichten. Es darf kein Klebstoff in den Pumpenraum gelangen und bewegliche Teile (Einlaßventil, Membran) verunreinigen. Bis zum Aushärten des Klebstoffs darf sich die Klebefuge nicht mehr undefiniert verändern. Um eine geeignete Klebefuge zu realisieren, wird bei diesem und den nachfolgenden Arbeitsschritten der Klebstoff bei Raumtemperatur mit einem manuellen Mikrodispenser in einer empirisch ermittelten Geometrie und Menge aufgetragen und während eines speziellen Temperatur-Zeit-Profiles ausgehärtet [4].

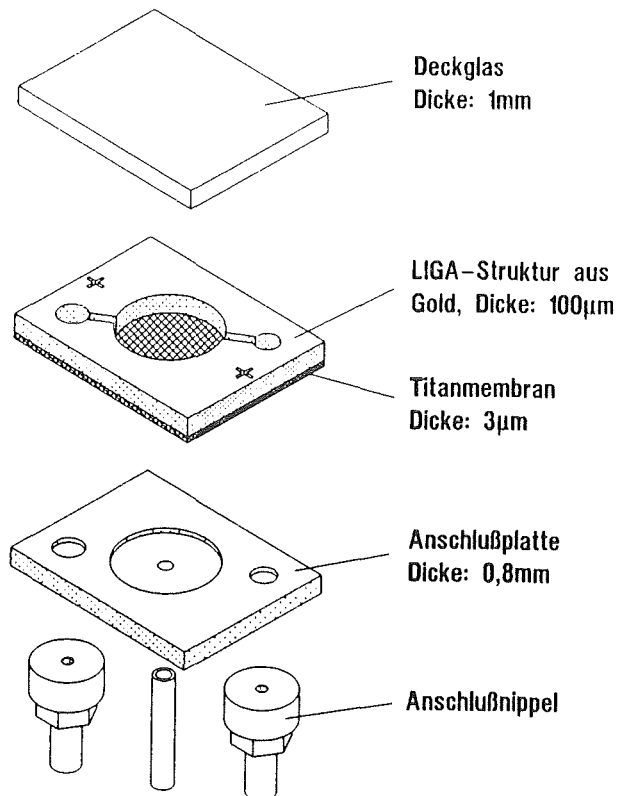


Abb. 3: Einzelteile der LIGA-Mikropumpe. Die lateralen Abmessungen des LIGA-Bauteils betragen 8.5 mm x 11 mm.

Auf die Titanmembran wird eine feinwerktechnisch hergestellte Adapterplatte mit Anschlußnippeln zur Medienankopplung und zum Druckanschluß für die Membrananregung geklebt. Diese

Verklebung muß lateral positioniert und keilfehlerfrei erfolgen, um eine möglichst gleichmäßige Benetzung der Klebefläche zu gewährleisten und ein Fließen des Klebstoffs auf die Membran und das Einlaßventil zu vermeiden. Für diese Aufgabe wurde eine Vorrichtung entwickelt und gebaut, mit der die Komponenten für die Mikropumpe - aber auch andere Mikrobauteile - gefügt werden können (s. Abb. 4). Eine fertig montierte Mikropumpe zeigt Abbildung 5

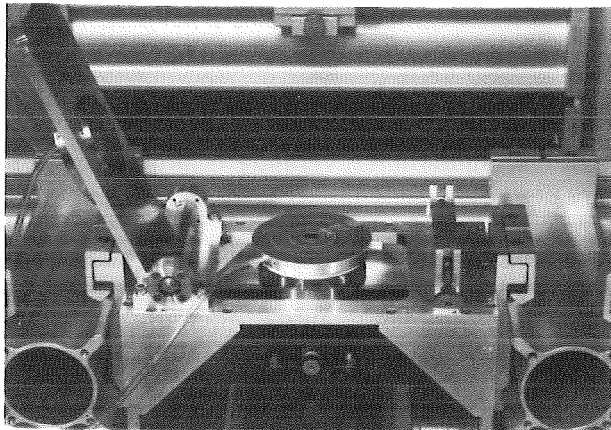


Abb. 4: Vorrichtung zum positionierten und keilfehlerfreien Verkleben von Mikrostrukturen. Die Fügepartner werden mittels Vakuum auf einem in allen Raumrichtungen verstellbaren Tisch bzw. auf einer darüber gelagerten Aufnahmeplatte (im Bild hochgeklappt) aufgespannt. Durch Verfahren des Tisches bei heruntergeklappter Aufnahmeplatte werden die Fügepartner zueinander ausgerichtet.

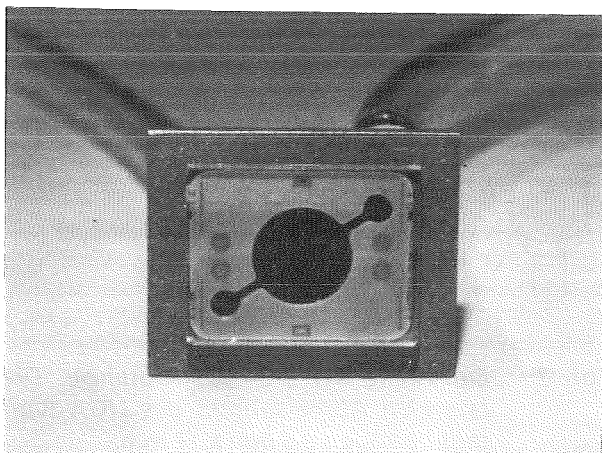


Abb. 5: Draufsicht auf die durch das Deckglas sichtbare Struktur der LIGA-Mikropumpe. Die lateralen Abmessungen des LIGA-Bauteils betragen 8.5 mm x 11 mm.

4. Meßzelle für ein Mikroanalyssystem

An dem dritten Beispiel, einer Meßzelle für ein Mikroanalyssystem zur Messung des pH- und pNa-Wertes in wässrigen Lösungen soll die Gestaltung und die Herstellung einer Mikro/Makro-Schnittstelle für die Zu- und Abführung der Meßlösung an ein Sensorelement erläutert werden. Aufbau und Funktion des Analysensystems werden in [6] behandelt.

Die ionensensitiven ChemFET-Sensoren mit Abmessungen von 400 µm x 400 µm werden zusammen mit den elektrischen Leiterbahnen auf einem Silizium Wafer prozessiert und paarweise zu Chips der Größe 5 mm x 8 mm vereinzelt. Für erste Messungen mit diesen Sensoren wurde eine kurzfristig realisierbare Lösung für die Zu- und Abführung des Fluids gefunden.

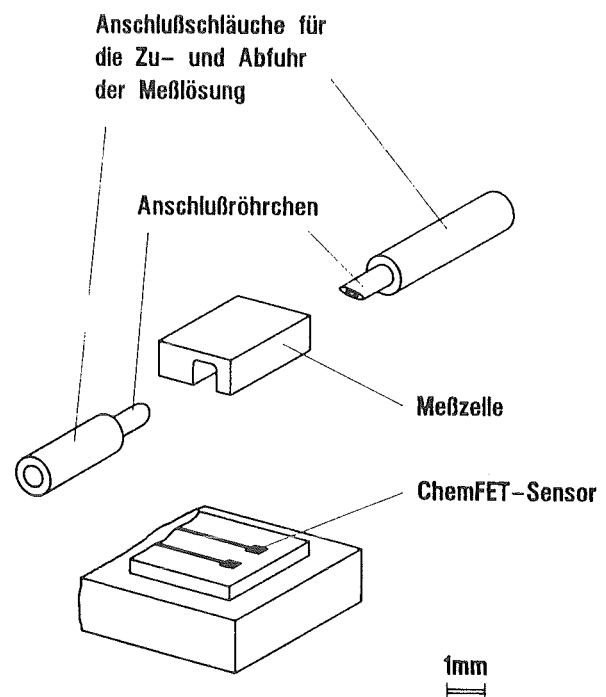


Abb. 6: Einzelteile der Meßzelle für ein Mikroanalyssystem.

Die Abbildung 6 skizziert den Aufbau dieser Schnittstelle in Explosionsansicht. In einen Glasquader von etwa der Größe des verwendeten Chips wird zuerst mit einem diamantbestückten Sägeblatt eine durchgehende Nut eingearbeitet. Dieses Bauteil wird dann auf den Chip geklebt, so daß die aktiven Sensorflächen innerhalb der Nut liegen. Von beiden Seiten werden angeschrägte Anschlußröhrchen eingeklebt, über deren freien Enden Anschlußschläuche geschoben werden. Auf diese Weise wird über den Sensorflächen ein Strömungskanal realisiert, durch den die Meßlösung an den ChemFETs vorbeigeführt wird. Auf die nur sehr kleinen zur Verfügung stehenden Klebeflä-

chen von wenigen Quadratmillimetern muß der Klebstoff sehr präzise aufgetragen werden, damit kein Klebstoff auf die Sensorflächen gelangt, aber dennoch eine hohe Festigkeit und vor allem Dichtigkeit erzielt wird. Die Abbildung 7 zeigt eine Photographie einer fertigen Meßzelle mit dem Sensorchip und den Schlauchanschlüssen. Mit dem so hergestellten Funktionsmuster wurden erste Messungen durchgeführt [6]. Auf diese Weise wurde eine Mikro/Makro-Schnittstelle zwischen Meßflüssigkeit und Sensoroberflächen realisiert.

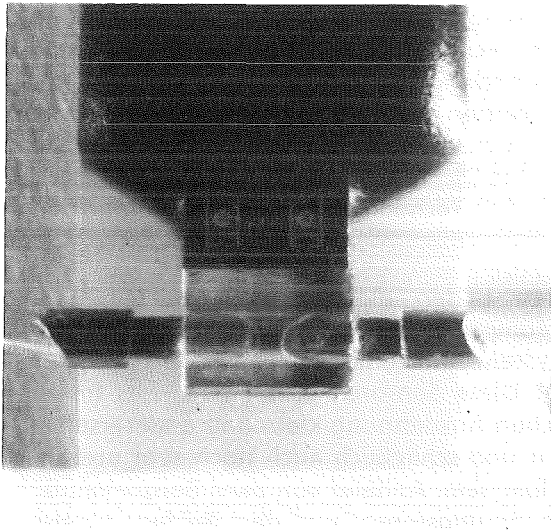


Abb. 7: Fertig montierte Meßzelle mit Sensorchip und Schlauchanschlüssen. Die Anschlußröhrchen haben einen Außendurchmesser von 0,7 mm.

5. Ausblick

Die Anforderungen an die AVT werden in Zukunft wachsen, weil immer komplexere Bauteile entwickelt werden. Für die anwendungsorientierte Entwicklung von Funktionsmustern (Demonstratoren) müssen wirtschaftlich einsetzbare Aufbau- und Verbindungstechniken gefunden werden. In diesem Zusammenhang erscheint zum Beispiel das anodische Bonden für die Verbindung von metallischen und halbleitenden Werkstoffen mit Gläsern [1] als eine außerordentlich interessante Technik, die bereits seit Jahren für Silizium/Glas industriell angewendet und im IMT auf ihre Einsatzmöglichkeit bei anderen Werkstoffen hin untersucht wird [7]. Die Klebetechnik wird wegen

ihrer praktisch materialunabhängigen, universellen Einsetzbarkeit ihren Stellenwert behalten. Hier sind weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig, um zu präziseren und rationelleren Techniken für den Klebstoffauftrag zu kommen und die Dimensionen der klebbaren Fügepartnern von Mikrobauteilen zu verkleinern. Die Drahtkontaktierung muß in Zukunft noch kontrollierter an die verwendeten Werkstoffe und für den Einsatz bei Feinstleiterbahnen angepaßt, das heißt optimiert werden. Auf diese Weise können auch auf unterschiedlichen metallischen Fügepartnern, sowie inhomogenen Oberflächen der Dickschichttechnik zuverlässige und für lange Zeit stabile Verbindungen erreicht werden.

Literatur

- [1] W. Keller, D. Maas, D. Plesch, D. Seidel: Aufbau- und Verbindungstechnik; KfK-Nachrichten, 2-3/91, 143, (1991)
- [2] H. Reichl, ed.: Hybridintegration; Hüthig Verlag Heidelberg, 2. Aufl. (1988)
- [3] M. Strohrmann, O. Fromhein, W. Keller, K. Lindemann, J. Mohr: LIGA-Sensoren und intelligente Sensorsysteme zur Messung von Beschleunigungen; KfK-Bericht Nr. 5238, 1993
- [4] W. Keller, D. Maas, D. Seidel: Positioniertes Verkleben von LIGA-Mikrostrukturen am Beispiel einer Mikropumpe; Tagungsband 3. Symposium Mikrosystemtechnik Regensburg, 327, (1993)
- [5] W.K. Schomburg, B. Büstgens, R. Rapp, J. Reichert, O. Fromhein: Mikromembranpumpen als Elemente eines optochemischen Mikroanalyse-systems; KfK-Bericht Nr. 5238, 1993
- [6] W. Hoffmann, H. Eggert, W.K. Schomburg, D. Seidel: Elektrochemisches Mikroanalyse-system (ELMAS) für die Ionometrie von Flüssigkeiten; KfK-Bericht Nr. 5238, 1993
- [7] J. Goschnick, D. Maas, J. Schuricht and H.J. Ache: Depth-profiles within glass samples from anodic bonding experiments with copper using SNMS; Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, Vol. 346, No 1-3, 323-326, (1993)

Schaltungsentwurf für Mikrosysteme

H. Gemmeke, M. Balzer, O. Fromhein, O. Krömer, T. Kühner
Hauptabteilung für Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik

Zusammenfassung

Am Beispiel der Mikrosysteme für den SAW (Surface Acoustic Wave) - und den Beschleunigungssensor werden unterschiedliche elektronische Systemkonzepte und die daraus resultierenden Fertigungstechniken diskutiert. Dabei wird der Weg von der Systemsimulation (analoge Simulation des Sensors und der Frontendelektronik mit SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) und digitale Simulation - wenn notwendig - mit VHDL (Very high speed integrated circuit Hardware Description Language) bis zum fertigen Produkt illustriert. Die Forderungen nach extrem kleiner Bauweise und niedrigem Preis, verbunden mit intelligenter Auswerte-Elektronik und möglichst geringer elektrischer Verlustleistung, sind einerseits widersprüchlich und zum anderen mit Standard-Technologien nicht ohne weiteres realisierbar; leistungsfähige und schnelle Arithmetik kann bei Verwendung konventioneller Prozessoren nur mit inhärenten hohen elektrischen Verlustleistungen erreicht werden. Das führt bei der geforderten miniaturisierten Bauweise zu wärmetechnischen Problemen. Die Wege, die aus diesem Dilemma herausführen können, werden anhand der im HPE verfolgten Techniken, wie Dickfilm- und ASIC (Application Specific Integrated Circuit)-Technologien sowie MCM (Multi-Chip-Modul)-Technik, vorgestellt und verglichen.

1. Einleitung

Im Projekt Mikrosystemtechnik (PMT) sollen Mikrobauteile des LIGA-Verfahrens (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung, Kunststoff Abformung), d.h. Sensoren und Aktoren mit Hilfe von elektronischen Systemen zu intelligenten Mikrosystemen ergänzt werden, siehe Abb. 1. Unter diesen Mikrosystemen kann man sich z.B. Beschleunigungssensoren, Mikro-Roboter oder optische Mikro-Spektrographen vorstellen. Andererseits gibt es auch Projekte zu gemischten Systemen, bestehend aus Halbleiter- bzw. Festkörper-Sensoren und LIGA-Aktoren, wie z.B. durch Oberflächenbeschichtung chemisch sensitive Feldeffekt-Transistoren (Chem-

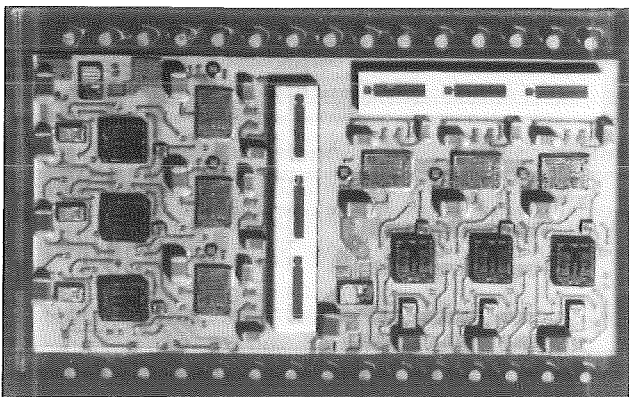


Abb.1: Elektronisches Mikrosystem für den Beschleunigungssensor. 2 x 3 Sensoren sind zusammen mit den analogen Datenerfassungs-Chips in einer Dickfilmhybrid-Technik verbunden.

FETs) oder SAW-Sensoren. In den beiden letzteren

Projekten bilden die Sensoren zusammen mit Mikro-Pumpen und -Ventilen der LIGA-Technik ein Mikrosystem zur chemischen Gas- oder Flüssigkeitsanalyse. Diese Sensoren sollen einerseits in ihrer räumlichen Ausdehnung klein und andererseits intelligent und schließlich auch noch sehr preiswert herstellbar sein. Anhand von zwei Beispielen, dem Beschleunigungssensor und dem Surface-Acoustic-Wave-Sensor, sollen die Kopplung der Sensoren an die Elektronik und die mögliche Architektur des intelligenten Gesamtsystems diskutiert werden. Dabei muß man zwei Stufen des Systemdesigns unterscheiden. In der ersten Stufe wird der Sensor evaluiert und optimiert, d.h. der elektronische Anteil soll sehr universell, flexibel und hoch intelligent ausgerüstet sein. Auf eine räumlich möglichst geringe Ausdehnung des experimentellen Gesamtsystems kann man in diesem Stadium verzichten, sie muß lediglich absehbar sein. Für diesen Fall werden hier Resultate für den Beschleunigungssensor beschrieben. In der zweiten Stufe geht es dann um eine möglichst konkrete Anwendung und die damit verbundenen Randbedingungen, wie z.B. räumliche Ausdehnung, Leistungsverbrauch, Kommunikationsfähigkeit und Intelligenz. Dazu werden im letzten Teil dieser Arbeit erste Teilresultate für den Aufbau der Mikroelektronik des SAW-Sensors präsentiert.

2. Intelligente Mikrosensorsysteme

Betrachtet man intelligente Mikrosysteme, so muß man zumeist - auch in monolithischen Systemen - feststellen, daß die Intelligenz mehr Raum einnimmt und Kosten verursacht als die Sensoren. In komplizierten, verteilten und vernetzten Systemen mit vielen Sensoren sollte das Mikrosystem eine

Reihe von Aufgaben erfüllen können, wie z.B. autonome Kontrollaufgaben, Regelung von Teilsystemen, Selbstkalibration, Fehlertests, Kompression und Zwischenspeicherung von Daten, Erkennung von kritischen Ereignissen und schließlich Triggern der Kommunikation zu einem Hostprozessor und Antwort auf die Kommunikationsanforderung vom Host (Client- und Serverprozess). Die Datenbusbelastung kann sich insbesondere in vernetzten Systemen mit vielen Sensoren zu unzulässigen Werten aufaddieren. In allen diesen Beispielen wird durch ein intelligentes Sensorsystem die Kommunikation zum Host bzw. der Host selbst entlastet, sowie die Fehleranfälligkeit des Gesamtsystems erniedrigt. Das sind entscheidende Gründe für ein intelligentes Sensorsystem. Im nächsten Abschnitt soll die mögliche Systemarchitektur betrachtet werden.

3. Systemarchitektur

Die Architektur eines intelligenten Mikrosensorsystems wird von der analogen Seite der Frontend-Elektronik her durch die Anpassung an das digitale System des Controllers und der Kommunikation bestimmt, siehe schraffierte Bereiche in Abb. 2. Beim

zwischen digitalem System und Sensor bzw. Aktor direkt vor die Digitalisierung zu setzen:

- a) Die Sensoren bzw. Aktoren sind zum Teil noch sehr in der Lebensdauer begrenzt, und das intelligente System relativ teuer, so daß das Auswechseln der sensorspezifischen Komponente möglich sein sollte.
- b) Das gemischt analog-digitale Design on ASICs ist sehr aufwendig und teuer, so daß das Zurückgreifen auf bekannte, gut ausgetestete Analogschaltkreise die Entwicklungszeit verkürzen und das Gesamtdesign verbilligen kann.

Darüber hinaus spricht das zweite Argument für die Verwendung der Hybrid- bzw. Multi-Chip-Modul-Technik bei der Herstellung des aktiven analogen Sensor- bzw. Aktor-Elements.

Die Aufgaben des digitalen Systems bestehen in der Ablaufkontrolle, Datenerfassung und -Speicherung, sowie der Kommunikation. Der Controller kann ein μ -Prozessor, digitaler Signalprozessor (DSP) oder ein ASIC sein. Die Kommunikation kann visuell über ein interaktives Display oder mehr oder weniger kontinuierlich über einen Feldbus, wie z.B. DIN- [1] oder CAN-Bus [2], geschehen. Falls es die Anforderungen zulassen, kann man die Einzelbausteine durch einen Mikrocontroller, wie z.B. den 80C592 [3] (mit CAN-Bus) oder einen auf das spezielle Problem zugeschnittenen ASIC [4] ersetzen. Davon unabhängig kann die physikalische Ankopplung an den Host sehr unterschiedlich sein, wie z.B. über eine elektrische Verbindung, Infrarot, Ultraschall oder Funk. In einem vernetzten System ist dabei die Datenkompression des intelligenten Mikrosystems besonders wichtig, das Mikrosystem kann zu einem Datenspeicher entarten. Die komprimierten Informationen werden ev. einmal jährlich, wie der Wärmemengenmesser einer Heizung, abgefragt. Was sind nun die besonderen Anforderungen der Mikrosystemtechnik an die Elektronik, die im Systemdesign berücksichtigt werden müssen?

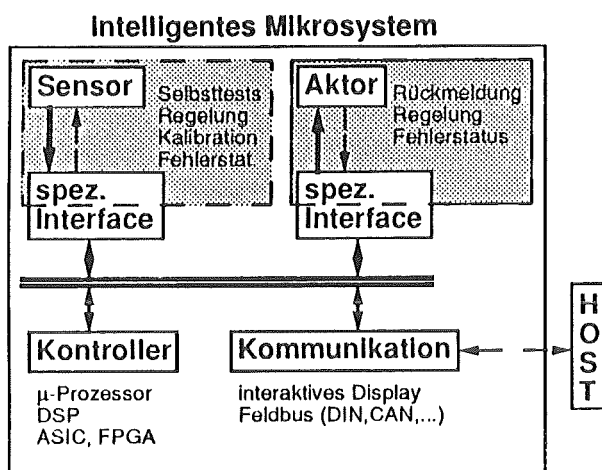


Abb. 2: Mögliche Struktur und Funktionalität eines intelligenten Mikrosystems.

Sensor ist der Hauptdatenfluß zum spezifischen Interface hin gerichtet, das die vom Sensor gelieferten analogen Meßdaten in eine elektronisch auswertbare Information transformiert. Andererseits gibt es auch einen schwächeren Datenfluß vom Interface zum Sensor bzw. zum Eingang der Frontend-Elektronik für Selbsttests, Fehlererkennung und Kalibration. Entgegengesetzt dazu ist beim Aktor der Hauptdatenfluß vom digitalen Bus über eine Signalaufbereitung zum Aktor hin gerichtet. Auch in diesem Falle gibt es einen schwachen Datenfluß in die Gegenrichtung für die Fehlererkennung, den Status und einfache Regelaufgaben. Es gibt im wesentlichen zwei Gründe, die Schnittstelle

4. Spezifische Anforderungen der Mikrosystemtechnik an die Elektronik

Zu diesem Thema gibt es im wesentlichen vier Argumentgruppen:

- a) Die Baugröße der Elektronik sollte klein sein, wenn man Mikrosysteme bauen will. Damit sind Hybrid- und Multi-Chip-Modul-Techniken, sowie hochintegrierte Mikrocontroller und ASICs für die Herstellung der Elektronik gefragt. Natürlich wird diese Anforderung stark von der Applikation beeinflusst.
- b) Für Sensoren bzw. Aktoren der LIGA-Technik müssen ebenso wie für MCM-Technik spezielle

einfache und zuverlässige Verbindungstechniken entwickelt werden.

- c) Die Lebensdauer der Sensoren und Aktoren muß im Systemdesign berücksichtigt werden. Submodule müssen ev. als Austausch Elemente in das System integriert werden können.
- d) Aus der räumlichen Nähe von Sensoren, Aktoren und Elektronik erwachsen Schwierigkeiten durch den unerwünschten Austausch von Wärme und Probleme mit der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) zwischen den beteiligten Bauelementen. Die chemischen Sensoren sind z.B. sehr wärmeempfindlich. Auf diesen Punkt wird im folgenden noch näher eingegangen.

Zusätzlich zu diesen Randbedingungen kommt noch der für das Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) spezifische Zeitdruck für die Realisation der ersten Mikrosysteme hinzu.

5. Mikrosystemdesign aus der Sicht eines Elektrikers/Physikers

Die Hauptaufgaben der Hauptabteilung für Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (HPE) für ein derartiges intelligentes Mikrosensorsystem bestehen in der Definition, dem Design, der Simulation, Verifikation, Auswahl der Fertigungstechnologie, Fertigung, in den Tests und der hardwarenahen Programmierung. Design und Simulation bilden dabei einen iterativen Prozeß, den man nicht auftrennen sollte, wenn man ein zeitaufwendiges Hardware-Redesign vermeiden will. Für Simulation und Realisation sind die technischen Möglichkeiten im KfK, siehe Tab. 1, zusammengefaßt. Sensor und Aktor lassen sich gemeinsam mit der analogen Elektronik mit PSPICE [5] simulieren. PSPICE erfaßt in einfacher Weise auch die nichtlineare Beschreibung des mechanischen Systems.

	Simulation	Realisierung	
Sensor/ Aktor	PSPICE	LIGA	} Hybrid
Analog- Elektronik	PSPICE	Hybrid, ASIC	
Digital- Elektronik	Software- Debugger VHDL	DSP, µ-Prozessor, ASIC	

Tab. 1: Simulation und Realisierung beim Entwurf eines Mikrosystems.

Zur Illustration ist in Abb. 3a das Blockschaltbild von Sensor und Frontend-Elektronik (Lageregelungs-Schaltkreis) für den Beschleunigungssensor dargestellt. In Abb. 3b ist gezeigt, wie sich die-

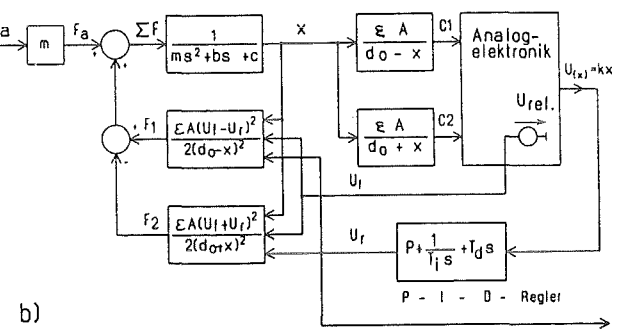
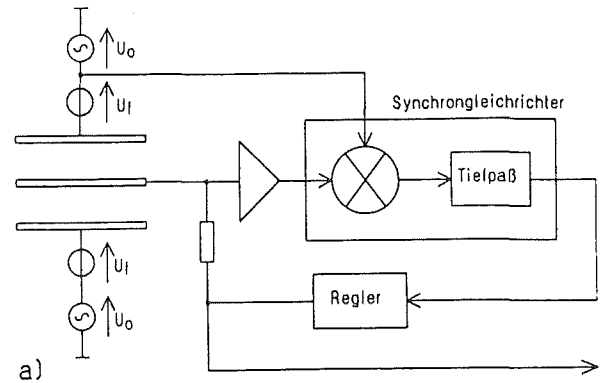


Abb. 3: Beschleunigungssensor mit Lagedetektion und Lageregelung. Die Kraft auf die mittlere Zunge des Sensors wird als Kapazitätsänderung detektiert und über eine Spannungsänderung ausgeregelt (a). Nach Laplace-Transformation (b) läßt sich das mechanische und elektrische System gemeinsam mit PSPICE simulieren.

ses Blockdiagramm durch eine Laplace-Transformation in eine Form bringen läßt, so daß man Sensor und Elektronik gemeinsam simulieren kann. In der Version SPICE [6] liegt der Code im HPE auch in Originalform vor, so daß sich spezielle Input-Routinen entwickeln lassen, die die Sensor/Aktor-Beschreibung vereinfachen. Für geringe Produktionsziffern ($\leq 10^4 - 10^5$) lohnt es sich dagegen nicht, gemischt analog-digitale Systeme auf einem Chip zu entwickeln, da damit der Aufwand erheblich wächst. Auch die gemischt analog-digitale Simulation des Gesamtsystems ist, bedingt durch die sehr unterschiedlichen Zykluszeiten des analogen und digitalen Bereichs, nicht sinnvoll. Man beschränkt sich auf die Simulation der kritischen Schnittstellen, um auftretende Schwierigkeiten frühzeitig zu erkennen und zu bewältigen. Benutzt man einen digitalen Controller oder Signalprozessor, der alle anfallenden Aufgaben umfassend erledigen kann, so kann man zwar auf die digitale Simulation verzichten, aber man benötigt für die Optimierung des Codes und die Suche der Fehler Tools, wie einen Software-Debugger. Für

den Einsatz von ASICs als Controller ist eine Hochsprachen-Beschreibung (VHDL) der Elektronik hilfreich. Sie ermöglicht, neben einer Simulation der ASICs auf verschiedenen Abstraktionsebenen, einen Wechsel zwischen verschiedenen ASIC-Anbietern ohne großen Redesign-Aufwand. Für die ASIC-Entwicklung hat HPE einen Kooperationsvertrag mit dem Institut für Mikroelektronik Stuttgart (Prof. Höfflinger) abgeschlossen.

Die Realisierung des Mikrosystems führt zu den schon diskutierten LIGA-, Hybrid- und ASIC-Bauteilen, die dann in der Hybrid- oder MCM-Technologie zusammengefügt werden.

6. Stand der Entwicklung für den Beschleunigungssensor

Für den Beschleunigungssensor wurde in HPE ein Mikrosystem aufgebaut (siehe Abb. 4), bestehend

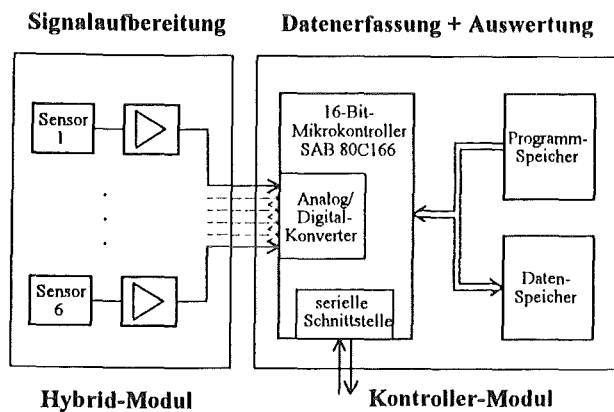


Abb. 4: Blockdiagramm des Beschleunigungssensorsystems.

aus einem Hybridmodul für die Signalaufbereitung und einer mit Surface-Mount-Devices (SMD) bestückten "Trägerplatte", die ein Kontrollermodul für die Datenerfassung und Datenauswertung enthält. Auf dem Hybridmodul werden 2 mal 3 Sensoren nach dem Prinzip des Differentialkondensators mit beweglicher Zwischenelektrode mit dem analogen ASIC CC310 [7] ausgewertet. In der verwendeten Hybridtechnologie sind auf einem Al_2O_3 -Keramikträger mehrere Lagen von Leiterbahnen und Isolationsschichten aufgedruckt, die Chip-Kondensatoren und Halbleiter-Chips aufgeklebt und letztere mit Gold- oder Aluminiumdraht gebondet. Die Widerstände sind aus Zeit- und Preisgründen als Dünnschicht-Chips aufgebracht und nicht gedruckt. Dieses System ist, bedingt durch den komplexen 16 Bit Mikrokontroller SAB 80C166 [8], ein hochintelligentes und sehr leistungsfähiges Datenerfassungs- und Auswertungssystem. Es eignet sich sehr gut für die breite Evaluierung und De-

monstration eines neuen Sensors, solange eine spezifische Anwendung nicht einen schlankeren und billigeren Aufbau erfordert.

In der zweiten Entwicklungsphase ist zudem eine elektronische Lageregelung für die analoge Auswertung des Beschleunigungssensors vorgesehen. Bis dahin soll auch eine konkrete Anwendung für den Beschleunigungssensor definiert werden, die es erlaubt, eine kompaktere und preiswertere Auswerteelektronik zu entwerfen.

Ein großer Vorteil der Hybridtechnik gegenüber der SMD-Technik ist die geringere Baugröße und die exzellente Wärmeableitungseigenschaften, siehe Abb. 5. Die Wärmeableitung wird durch die

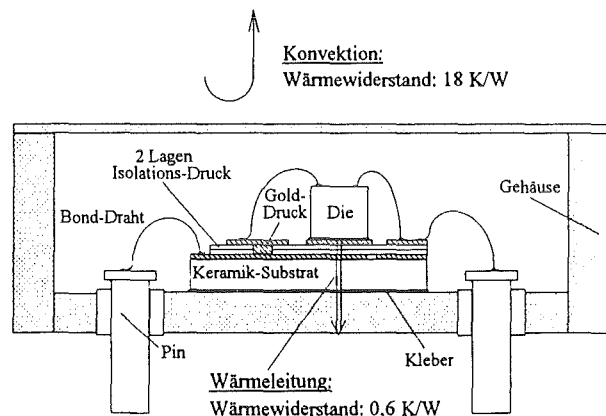


Abb. 5: Wärmeableitung bei der in HPE gewählten Hybrid-Technik.

großflächige Aufklebung der Halbleiter-Chips auf das Al_2O_3 -Substrat gegeben. Die derzeitige Verlustleistung für die analoge Signalverarbeitung beträgt ca. 0,3 W. Dank der guten Wärmeableitung werden die Sensoren lediglich um $\Delta T = 5^\circ\text{K}$ gegenüber der Umgebung erwärmt. Die Datenerfassungseinheit hat in dieser Architektur und Bauform eine Verlustleistung von 2,5 W. Diese hohe Wärmeverlustleistung ist aber ein Problem für temperatur-sensitive Sensoren, wie den SAW-Sensor. In diesem Fall ist ein anwendungsspezifischer Controller, z.B. ein ASIC um eine Größenordnung günstiger im Leistungsverbrauch als der sehr universelle Aufbau beim Beschleunigungssensor.

7. Status der Entwicklungen für den Surface-Acoustic-Wave-Sensor

Da der SAW-Sensor zudem eine klar definierte Anwendung (Gas- oder Flüssigkeitsanalyse) hat, wurde hier der zweite Weg gewählt, d.h. für den Controller ist ein spezifischer ASIC entwickelt worden. Der SAW-Sensor ist ein HF-Oszillator, dessen frequenzbestimmendes Element, ein Piezosystem, durch Anlagerung von Molekülen verstimmt wird. Mit einer speziellen Beschichtung verleiht man die-

sem Sensor auch eine auf bestimmte Moleküle spezifische Sensitivität. Die Grundfrequenz für das vom Institut für Radiochemie (IRCh) vorgegebene System beträgt ca. 450 MHz [9] und die maximale Frequenzverstimmung 2 MHz. Für ein komplettes Sensorsystem werden 8 Sensoren in einem Gehäuse untergebracht, siehe Abb. 6. Das führt zu erhebli-

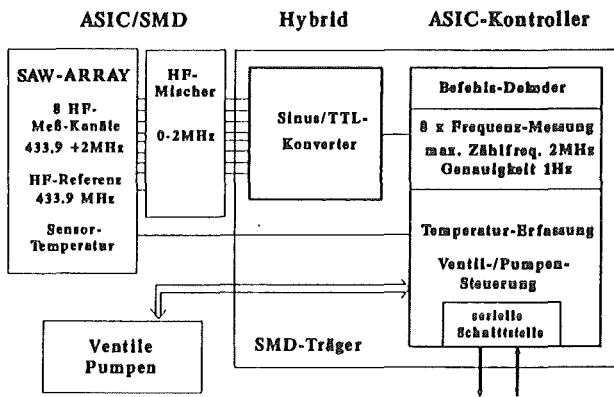


Abb. 6: Blockdiagramm des Surface-Acoustic-Wave-Sensorsystems.

chenProblemen. Einerseits ist wegen der hohen Frequenzen ein kompakter Aufbau mit sehr kurzen Leitungen erforderlich und zudem müssen die Oszillatoren aus Stabilitätsgründen durchgehend laufen, aber andererseits birgt die räumliche Nähe erhebliche HF- und Wärme-Überkopplungsprobleme in sich, die noch nicht alle gelöst sind. Für die digitale Verarbeitung wird das Mischsignal von bis zu 2 MHz in einer Hybridschaltung an TTL-Pegel angepaßt. Der ASIC-Kontroller ist in dieser ersten Version in einem FPGA ACTEL1280 mit ca. 8000 Gates [10] realisiert. Wie ein μ -Kontroller verfügt er u.a. über einen Befehlsdekoder, eine einfache RS232 Kommunikations-Schnittstelle und 8 parallel arbeitende 21 Bit Zähler. Der Unterschied zum μ -Kontroller besteht nur darin, daß diese Funktionen fest verdrahtet sind.

8. Resümee und Ausblick

In all diesen Fällen wurde die Analogseite, z.T. einschließlich Sensor, mit PSPICE simuliert. Die digitalen ASICs wurden mit Werkzeugen von VIEW-Logic entwickelt. Eine Simulation über das Gesamtsystem war aufgrund einer klaren und einfachen Schnittstellendefinition nicht notwendig! Gemischt analog-digitale ASICs werden erst bei sehr großen Stückzahlen lukrativ. Dagegen können Hybrid- und Multi-Chip-Module wesentlich schneller und preisgünstiger entwickelt werden. Der Sprung vom Hybrid- zum MCM-Aufbau ist nur dann erforderlich, wenn es die dazu konkrete Anwendung gibt

und die industrielle Verwertung die dadurch erreichbare kleinere Bauweise benötigt. Andererseits gibt es einige Entwicklungsschritte in der Zukunft, die mit relativ geringem Aufwand einen Fortschritt bringen können:

- Höhere Packungsdichte durch geringere Leiterbahnbreiten in der Hybridtechnik, d.h. 2 statt 4 mil. Damit lassen sich auch komplexere Bausteine wie FPGAs und ASICs als Dice einsetzen.
- Noch geringere Abmessungen lassen sich erzielen, wenn man sich an ASIC-Digital-Baukästen [4] beteiligt, die dann optimal in Verlustleistung und Chipfläche ein "full custom design" ermöglichen.
- Die Verlustleistung läßt sich schließlich durch den Übergang von der 5 auf die 3.3 Volt Technologie weiter erniedrigen.

Literatur

- DIN 66348, Teil 2: Schnittstellen und Steuerungsverfahren für die serielle Meßdatenübertragung.
- Philips, Firmenschrift, Hamburg: CAN-Specification 2.0, Sept. 1991, Controller-Area Network
- Philips, Firmenschrift, Hamburg: Target Device Specification 2.3, Jan. 1992
- B. Höfflinger: Mikrocontroller Baukasten, Institut für Mikroelektronik, Stuttgart, Projektbeschreibung, März 1993
- MicroSim Corporation, Firmenschrift: PSPICE Circuit Analysis User's Guide, 1992
- T. Querles et al., SPICE, University of California, Department of Electrical Engineering & Comp. Scienc., Berkeley, Ca, 94720
- Bosch, Prototyp
- Siemens, Firmenschrift, München: SAB 80C166 User's Manual 1990
- Siemens, Firmenschrift, OFW-Resonatoren auf Quarz von 200 MHz bis 1GHz
- Actel, Firmenschrift, München, ACT Data-book, April 1992

Automatische Vermessung von 2D- und 3D-LIGA-Strukturen zur Qualitätskontrolle

H. Guth, C. Döpmeier, M. Goik, A. Hellmann, U. Stucky

Institut für Angewandte Informatik

Zusammenfassung

Das System COSMOS-2D (Computer System for Measurement of Optically Acquired Structure Surfaces in 2-Dimensional Space) ist ein vollautomatisches Strukturvermessungssystem. Es besteht aus einem computergesteuerten Lichtmikroskop und einem Multiprozessor-Rechner und arbeitet auf der Basis von digitaler Bildverarbeitung (BV) und Mustererkennung. Das System ist in der Lage, die geometrischen Parameter ebener Strukturflächen bei unterschiedlichen Strukturmaterialien zu bestimmen. Durch den Einsatz der Mustererkennung ist eine präzise Vermessung, im Gegensatz zu einfachen „Matching“-Verfahren, auch bei ungenauer Positionierung des Prüflings möglich. Als Ergebnis der Vermessung wird eine detaillierte Beschreibung der Ist-Geometrie geliefert, die durch Vergleich mit den Parametern der Soll-Geometrie eine Beurteilung der Produktqualität ermöglicht. Da die Funktionalität mechanischer Mikrostrukturen durch ihre dreidimensionale Geometrie gegeben ist, reicht eine zweidimensionale Vermessung zur Beurteilung der Qualität in der Regel nicht aus. Für ein 3D-Vermessungssystem wurde als bildgebendes Verfahren die Rasterelektronenmikroskopie (REM) gewählt, wobei vor allem die hohe Schärfentiefe ausschlaggebend war. Es werden Stereobildpaare aufgenommen, die nach Bildvorverarbeitung und Mustererkennung photogrammetrisch ausgewertet werden. Die wichtigste Komponente des Systems ist eine Vorbereitung, bei der optimale Blickwinkel, Aufsetzpunkte und Vergrößerungen sowie weitere Mikroskopparameter bestimmt werden und die Operationsfolge für die Vermessung festgelegt wird. Für diese Vorbereitung ist eine Beschreibung der gesamten 3D-Geometrie notwendig, um Verdeckungen von für die Vermessung relevanten Geometrielementen auszuschließen und Aufsetzpunkt, Blickwinkel und Vergrößerung hinsichtlich maximaler Meßgenauigkeit zu optimieren. Zukünftige Entwicklungsarbeiten konzentrieren sich auf die optimale REM-Steuerung und auf Probleme der Mustererkennung in rasterelektronischen Aufnahmen.

1. Einleitung

Die Fertigung dreidimensionaler mikromechanischer Strukturen ist eine wesentliche Grundlage für die Herstellung von Sensor- und Aktorsystemen in der Mikrosystemtechnik, einem der Arbeitsschwerpunkte des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KfK). Eines der wichtigsten Ziele ist die Massenfertigung von Mikrostrukturen, um im industriellen Maßstab kostengünstige Systeme produzieren zu können. Unter diesem Aspekt muß eine rasche und zuverlässige Qualitätskontrolle als wichtiger Bestandteil eines Fertigungsprozesses für mikromechanische Strukturen angesehen werden. Vorbild ist hier die Halbleiterindustrie, wobei deren Konzepte zur Qualitätssicherung jedoch nicht auf die Mikromechanik übertragen werden können, da sie größtenteils auf elektrischen Funktionstests beruhen, während die Funktionalität der Mikrostrukturen in der Hauptsache durch deren geometrische Eigenschaften bestimmt wird. Daher müssen Strukturvermessungssysteme entwickelt werden, die in der Lage sind, die Parameter unterschiedlichster geometrischer Formen zu bestimmen und diese Aufgabe im Hinblick auf einen industriellen Einsatz vollautomatisch erfüllen.

Es wird nun zuerst das System COSMOS-2D (siehe Zusammenfassung) vorgestellt, das in der Lage ist, die (zweidimensionale) Oberflächengeometrie von Mikrostrukturen zu vermessen, und bereits als vollautomatisch arbeitender Prototyp realisiert wurde [1][2]. Es wurde zuerst nach Vorgaben des im KfK entwickelten LIGA-Verfahrens (Röntgentiefenlithographie, Galvanik, Abformung) [3,4] konzipiert.

Die Strukturvermessung in drei Dimensionen stellt neue Anforderungen an ein Vermessungssystem, die aus den Auswirkungen der gegenüber dem 2D-Fall sehr viel komplexeren dreidimensionalen Geometrie resultieren. Im zweiten Teil des Berichts wird ein Konzept für ein 3D-Vermessungssystem beschrieben, das nicht von einem festgelegten Umfang an Meßaufträgen und Geometrieformen ausgeht sondern als Grundsystem von einer sehr allgemeinen Definition dieser Begriffe und entsprechend den Anforderungen seitens der Anwender erweitert und damit sehr flexibel eingesetzt werden kann.

2. Zweidimensionale Vermessung

Zur vollautomatischen Vermessung der Oberflächengeometrie von Mikrostrukturen wurde das Strukturvermessungssystem COSMOS-2D entwickelt. Es arbeitet auf der Grundlage der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung.

2.1 Systemanforderungen

Ausgangspunkt der an das System gestellten Anforderungen ist das LIGA-Verfahren, mit dem Strukturen mit hohem Aspektverhältnis und beliebiger lateraler Geometrie hergestellt werden können. Damit ergibt sich gleich die erste Forderung an das System, unabhängig von der Oberflächengeometrie vermessen zu können. Die zweite Anforderung besteht in der zerstörungsfreien Vermessung, da die Produkte nach der Qualitätskontrolle in der Regel weiterverarbeitet bzw. ihrer Bestimmung zugeführt werden. Die Strukturen befinden sich auf einem Substrat, das zur Vermessung in ein Mikroskop gebracht werden muß. Um dabei einen kostengünstigen Kreuztisch benutzen zu können, muß das System in der Lage sein, auch mit einer ungenauen Positionierung fertig zu werden. Das unterschiedliche Reflexionsverhalten der durch die Vielfalt der Prozessschritte bedingten Materialien muß ebenso berücksichtigt werden wie die Tatsache, daß aufeinanderfolgende Prozessschritte Komplementärstrukturen erzeugen können. Eine weitere Forderung ist eine detaillierte Fehlerbeschreibung, um angeben zu können, welche Geometrieteile in welchem Maße nicht der Vorgabe entsprechen. Dazu gehört auch die Möglichkeit, einen automatischen Objektivwechsel durchzuführen, um die Strukturdetails mit der jeweils nötigen Auflösung zu vermessen. Eine weitere wichtige Systemanforderung ist die Möglichkeit, sich bei der Vermessung auf kritische Bereiche der Strukturen zu beschränken, die der Entwurfsingenieur bereits beim Design definieren kann. Um das System in einer Produktionsstraße einsetzen zu können, muß der Meßvorgang vollautomatisch ablaufen und darf eine bestimmte Taktzeit, die vom Produktionsprozeß vorgegeben wird, nicht überschreiten.

2.2 Systemkonzept

Der Herstellungsprozeß einer Struktur beginnt mit dem Entwurf in einem CAD-System. Der Entwurfsingenieur, der in der Regel die kritischen Bereiche einer Struktur am besten kennt, hat die Möglichkeit, Vermessungsanforderungen an das System zu formulieren und Toleranzwerte vorzugeben. Er benutzt dazu die Möglichkeit zur Bemaßung eines Entwurfs, die ein mechanisches CAD-System bietet, und die zusammen mit den Geometriedaten die Informationsgrundlage zur Steuerung des Kontrollsystems bildet (Abb. 1).

Ein Prozeß [5] erzeugt aus diesen Informationen Steuerbefehle, die das Vermessungssystem sequentiell abarbeitet. Ein Eingreifen des Operators ist nicht notwendig. Diese Befehle betreffen sowohl die Steuerung des Mikroskops (Positionierung und Vergrößerung), als auch die Anweisung an die Mustererkennung zur Verifikation der entsprechenden geometrischen Details im Bild der Struktur (Soll-Daten). Nach Bearbeitung eines Auftrags stehen die Meßergebnisse (Ist-Daten) in einer ähnlichen Beschreibung wie die entsprechenden Soll-Daten zur Verfügung.

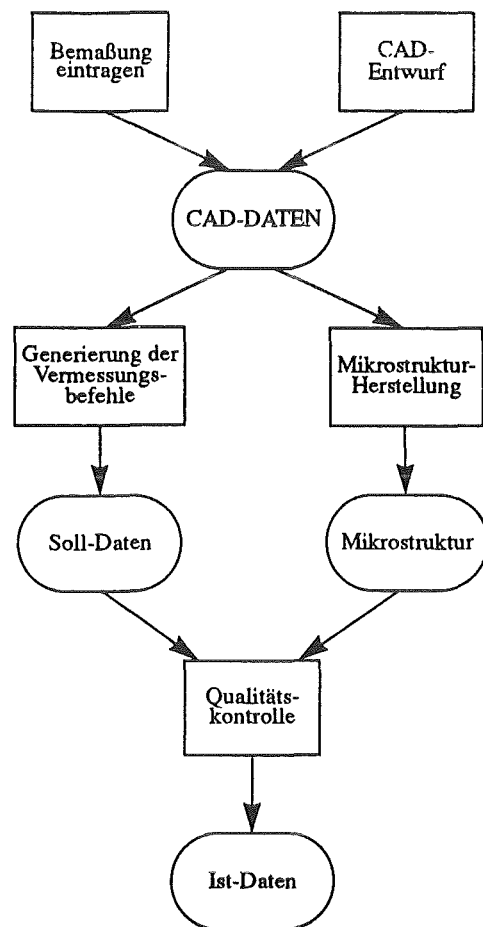


Abb. 1: Systemkonzept

Beim Entwurf der Strukturen im CAD-System werden die Aufträge an das Vermessungssystem in Form von Bemaßungen eingetragen und zusammen mit den Geometriedaten weitergegeben. Die Geometriedaten bilden die Grundlage zur Herstellung der Mikrostrukturen, zusammen mit den Bemaßungsangaben werden sie zur Generierung der Anweisungen benutzt, die das Vermessungssystem vollautomatisch abarbeitet.

Das System liefert außerdem eine allgemeine Fehlerbetrachtung wie z.B. "Gemessene Distanz liegt außerhalb der Fehlertoleranz" oder "Standard- bzw. Maximal-Abweichung einer verifizierten Kante ist größer als die Toleranz". Eine spezifische Fehleranalyse kann durch Vergleich der Ist- mit den Soll-Daten durchgeführt werden.

Die Anforderung, beliebige Oberflächengeometrien vermessen zu können, wird durch die nachfolgend beschriebenen Überlegungen erfüllt: Jede Struktur wird durch ihre Randlinien begrenzt. Die Strukturgeometrie kann durch einen i.allg. geschlossenen Kantenzug beschrieben werden. Ähnlich wie im CAD-System kann dieser Kantenzug in geometrische Primitive zerlegt werden. Mit den Grundelementen Strecke und Kreisbogen kann auf diese Weise jede beliebige Oberflächengeometrie verifiziert werden. Trotzdem wurden aus Gründen einfacherer Handhabbarkeit und zur Reduzierung der Datenmenge noch die Grundelemente Kreis und Spirale eingeführt.

Durch die Definition von Ecken als weiterer Primitiven-Typ läßt sich eine hierarchische Beschreibung der Strukturgeometrie herleiten [1]. Zwei Ecken begrenzen jeweils einen der oben beschriebenen Kantentypen (außer Kreis), wobei notwendigerweise verschiedene Ausprägungen unterschieden werden müssen: Ecken als Kombination zweier Geraden, als Kombination einer Geraden und eines Kreisbogens und zusammengesetzt aus zwei Kreisbögen mit verschiedenen Mittelpunkten und/oder Radien. Die Ecken bilden die unterste Ebene der Beschreibungshierarchie.

Die Verifikation der Strukturgeometrie wird folgendermaßen durchgeführt: Das Mikroskop fährt das in den Soll-Daten beschriebene Strukturdetail unter das angeforderte Objektiv. Ein Videobild wird akquiriert und im Rechner mit Hilfe eines speziellen Verfahrens [6] die Randlinie der Struktur extrahiert. Diese Randlinie, die den Kantenzug beinhaltet, wird anschließend mit Methoden der Mustererkennung weiterverarbeitet. Durch die Verwendung der Mustererkennung ist es nicht erforderlich, daß das Strukturdetail exakt an der beschriebenen Position liegt. Es wird ein gewisses Fenster zugelassen, innerhalb dessen das Muster gesucht werden kann. Dadurch ist es möglich, einen kostengünstigen Mikroskop-Kreuztisch zu benutzen.

Bei der Mustererkennung müssen zuerst die Ecken detektiert werden, bevor das dadurch begrenzte Kantenelement verifiziert werden kann. Die Verifikation eines Kantenelementes geschieht dadurch, daß die zwischen den zwei Ecken vorhandenen Kantenpixel mit ihren Positionsdaten die Grundlage für einen Least-Squares-Fit bilden, bei dem die geometrischen Parameter des entsprechenden Kantentyps ermittelt werden. Diese Parameter sind mit ihrer jeweiligen Standard- bzw.

Maximal-Abweichung die entsprechenden Meßergebnisse. Geforderte Distanzen werden aus den euklidischen Abständen der ermittelten Positionen berechnet.

2.3 Systemaufbau

Für den Aufbau des Vermessungssystems wurde eine Mehr-Processor-Architektur gewählt, bei der sich die Systemleistung durch Zufügen weiterer Prozessoren problemlos steigern läßt. Aus Kostengründen werden nur auf dem Markt erhältliche Standardkomponenten eingesetzt (Abb. 2).

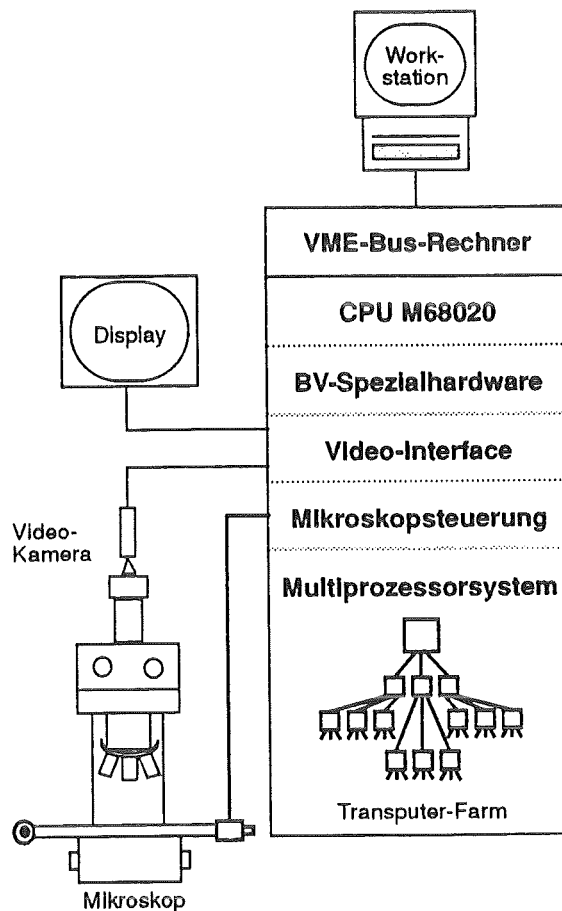


Abb. 2: Hardware-Aufbau

Das System besteht aus Standard-Komponenten mit einem VME-Bus-Rechner als Basis. Die CPU M68020 übernimmt als Master die Steuerung des Mikroskops, der Videobildakquisition, der BV-Spezialhardware zur Bildvorverarbeitung und die Verbindung zur Transputer-Farm, auf der die Vermessungen ausgeführt werden. Als Benutzeroberfläche fungiert eine Workstation.

Rückgrat des Systems ist ein VME-Bus-Rechner, der als Master die Soll-Daten interpretiert, das Mikroskop und den Kreuztisch in den geforderten Zustand versetzt und das entsprechende Videobild akquiriert. Er veranlaßt die BV-Spezial-Hardware

[6], die Bildvorverarbeitung durchzuführen und übergibt dieses Ergebnis zusammen mit den formulierten Vermessungsaufträgen zur Mustererkennung und weiteren Berechnungen an eine untergeordnete Transputer-Farm. Diese Farm ist in Form eines trinären Baumes realisiert. Jeder Transputer erhält die identische Bildverarbeitungssoftware und bearbeitet einen Vermessungsauftrag vollständig. Nach Auftragsabschluß gibt er die Ergebnisse an den Master zur Verwaltung zurück und meldet seine Bereitschaft zur Ausführung des nächsten Auftrages. Auf diese Weise wird eine parallele Abwicklung der Strukturvermessungen und damit ein hoher Durchsatz ermöglicht. Die Anzahl an Aufträgen pro Zeiteinheit wird derzeit einzig durch die Positioniergeschwindigkeit des Mikroskop-Kreuztisches beschränkt (ca. 0.6 sec pro Positionierung). Die Kommunikation mit dem Benutzer zur Einstellung von Meßparametern und zur Visualisierung der Meßergebnisse übernimmt eine Workstation, die via Local Area Network (LAN) mit dem System verbunden ist. Sie stellt auch die Verbindung zum CAD-System dar.

3. Dreidimensionale Vermessung

Das zweidimensionale Vermessungssystem COSMOS-2D wurde speziell für LIGA-Strukturen entworfen, bei denen vielfältige Einsatzmöglichkeiten für dieses System gegeben sind. Letztendlich sind aber LIGA-Strukturen und auch mit anderen Verfahren hergestellte Strukturen dreidimensionale Körper, deren Funktion von einer hinreichend genauen Maßhaltigkeit in allen drei Dimensionen abhängt. Daraus ergibt sich die Forderung nach einer 3D-Vermessung und einem System, das diese Aufgaben möglichst rasch und zuverlässig erfüllt. Die Architektur für ein solches 3D-System (dargestellt in Abb. 3) ist auf oberster Ebene derjenigen von COSMOS-2D noch sehr ähnlich. Auf den darunterliegenden Ebenen nimmt die Komplexität durch die Hinzunahme einer weiteren Dimension jedoch rasch zu.

Zunächst wird auch beim 3D-System der Einsatz von digitaler Bildverarbeitung und Mustererkennung ins Auge gefaßt. Demzufolge wird ein Bildaufnahmeverfahren benötigt, das Bilder liefert, aus denen Informationen über die dreidimensionale Geometrie der zu vermessenden Strukturen gewonnen werden können. Das Lichtmikroskop ist dafür schon allein wegen der geringen Schärfentiefe nicht geeignet. Nach einer Reihe von Untersuchungen unterschiedlichster mikroskopischer Verfahren wurde die Rasterelektronenmikroskopie (REM) ausgewählt [7]. Die Mikrostrukturen lassen sich im REM wegen der sehr großen Schärfentiefe meist in ihrer gesamten Ausdehnung abbilden, wobei sich die Konturen in

den meisten Fällen durch Kontrastunterschiede gut abzeichnen. Ein wesentlicher Punkt ist auch die Möglichkeit, Proben beliebig zu rotieren und stark zu verkippen, so daß eine Betrachtung aus unterschiedlichsten Blickrichtungen möglich ist. Die variable Auflösung gestattet es, sowohl Strukturdetails im Sub- μm -Bereich als auch Strukturen mit Ausdehnungen von mehreren 100 μm abzubilden. Ferner sind verschiedene Strukturmaterialien abbildbar. Im Hinblick auf eine Automatisierung des Vermessungssystems ist es vorteilhaft, daß ein modernes REM in nahezu allen seinen Funktionen von einem externen Rechner aus gesteuert werden kann. 3D-Informationen erhält man aus den Stereoaufnahmen und Projektionsrechnungen. Dabei wird die Probe nach der ersten Aufnahme verkippt und damit aus einer anderen Perspektive betrachtet [8,9,10].

Die Erzeugung eines Meßauftrags kann auch im 3D-Fall durch die Bemaßung in einem dreidimensionalen CAD-System erfolgen. Meßaufträge für das 3D-System werden in verschiedene Klassen eingeteilt, die durch die Art der Meßgröße definiert sind. Sie beziehen sich auf ein oder mehrere geometrische Elemente, das sind Ecken, Kanten und Oberflächen der Mikrostrukturen, oder auch komplette dreidimensionale Körper. Außerdem besteht die Möglichkeit, eine Sollgenauigkeit für die Bestimmung der Meßgrößen vorzugeben.

Die wichtigste Systemkomponente ist die Vorbereitung. Sie liefert Parameter für die Steuerung von Mikroskop und Probentisch, legt die Operationsfolge für die Durchführung von Meßaufträgen fest, beginnend mit der Verifikation geometrischer Elemente, über photogrammetrische Berechnungen bis hin zur Bestimmung der Meßgröße und berechnet Parameter zur Beschreibung der zu erkennenden Geometrielemente, die von den Algorithmen zur Mustererkennung benötigt werden.

Für die Implementierung einer ersten Version der Vorbereitung wurden folgende Festlegungen getroffen:

- Für jeden Meßauftrag wird ein Stereobildpaar aufgenommen.
- Der Kippwinkelunterschied zwischen den beiden Bildern (Stereokippwinkel) wird vom Benutzer vorgegeben und gilt für jeden Meßauftrag einer Meßreihe.
- Wenn möglich werden REM-Parameter auftragsunabhängig festgelegt. Dies geschieht zu Beginn der Vorbereitung entweder durch Benutzereingabe oder

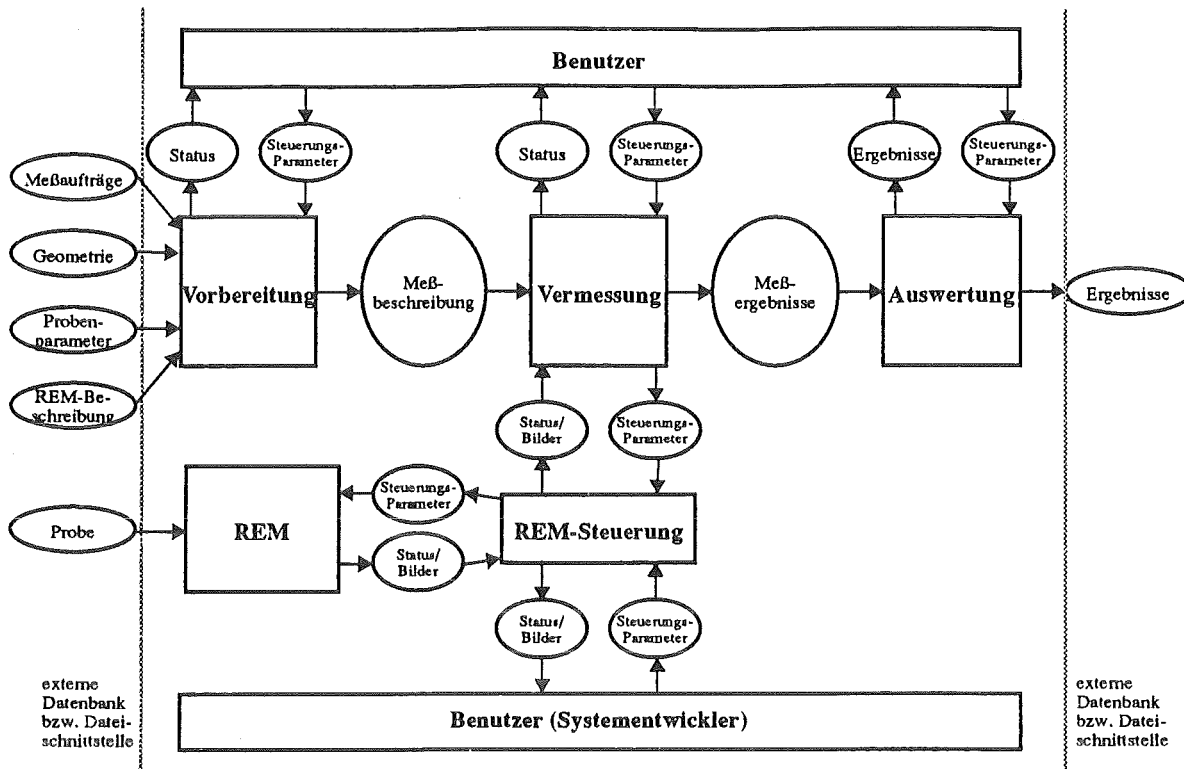


Abb. 3: Architektur des 3D-Vermessungssystems

Die Hauptkomponenten des Systems sind die Vorbereitung, die Vermessung und die Auswertung. Eine weitere Softwarekomponente dient zur Steuerung des Rasterelektronenmikroskops (REM). Jede Komponente erhält eine Benutzerschnittstelle, wobei die Schnittstelle zur REM-Steuerung nur für die Systementwickler vorgesehen ist. Wichtigste Eingabedaten sind Geometriedaten und Meßaufträge.

durch Bestimmung nach einfachen Kriterien unter Berücksichtigung allgemeiner Probenparameter.

- Der Typ eines Meßauftrags hängt zunächst außer von der Art der Meßgröße auch noch vom Typ der geometrischen Elemente, auf die er sich bezieht, ab. Damit legt der Typ des Auftrags auch die Operationsfolge bei der späteren Vermessung fest. In einem bereits erstellten zweiten Konzept werden Meßaufträge unabhängig von diesen geometrischen Typen klassifiziert.
- Es wird von quadratischen REM-Bildern ausgegangen.

Für die Bearbeitung der einzelnen Meßaufträge bei der Vorbereitung wird eine vollständige Beschreibung der Strukturgeometrie einer Probe benötigt. Dafür wurde ein erweiterungsfähiges Datenmodell erstellt, das von den geometrischen Elementen Ecke, Kante, Oberfläche und Körper ausgeht. Bisher wurde der Kantentyp Gerade sowie

der Oberflächentyp Ebene implementiert, so daß eine Beschreibung von Polyedern möglich ist.

Im Auftragsbearbeitungsteil der Vorbereitung werden zuerst diejenigen geometrischen Elemente festgelegt, die in den Bildern verifiziert werden müssen. Danach erfolgt eine Verdeckungsprüfung dieser Elemente. Dabei wird eine Reihe von Blickrichtungspaaren überprüft, ob die zu erkennenden Elemente durch Oberflächen benachbarter Strukturen verdeckt werden. Diese Blickrichtungen sind im maximal einsehbaren Raumwinkel element näherungsweise gleichverteilt. Wenn ein Blickrichtungspaar mit freier Sicht gefunden wurde, wird der Aufsatzpunkt bestimmt. Das ist der Punkt auf der Substratoberfläche, der unter dem unabgelenkten Elektronenstrahl liegt. Dabei müssen zwei Kriterien erfüllt sein: Die zu verifizierenden Objekte müssen für beide Bilder innerhalb des Bildausschnitts liegen und die Vergrößerung soll maximal sein. Schließlich erfolgt eine Abschätzung der erreichbaren Genauigkeit. Ist die Sollgenauigkeit erfüllt, wird das Blickrichtungspaar akzeptiert. Falls das nicht der Fall ist, wird das nächste Blickrichtungspaar auf

Verdeckung geprüft. Nach Überprüfung aller Blickrichtungspaare ohne Erreichen der Sollgenauigkeit wird dasjenige Paar übernommen, das maximale Meßgenauigkeit zuläßt. Ein Meßauftrag wird zurückgewiesen, wenn keine Blickrichtung mit freier Sicht gefunden wurde. Abschließend erfolgt die Berechnung der Parameter für die Mustererkennung unter Berücksichtigung der perspektivischen Abbildungen der zu erkennenden Elemente unter einer Zentralprojektion.

Die zweite Systemkomponente ist die Vermessung. Die von der Vorbereitung berechneten Parameter werden in einer Meßbeschreibung zur Verfügung gestellt. Die Bearbeitung von Meßaufträgen gliedert sich in zwei Teilschritte. Beim ersten Schritt, der Bildakquisition, werden über eine Softwarekomponente zur REM-Steuerung die auftragsabhängigen Tisch- und Mikroskopparameter eingestellt, REM-Bilder aufgenommen und die Bilddaten zu einem externen Rechner übertragen. Im zweiten Schritt erfolgen dann die einzelnen Operationen, die zur Bestimmung der Meßgröße nötig sind. Die Operationsfolge beginnt immer mit der Verifikation geometrischer Elemente unter Einsatz von digitaler Bildverarbeitung und Mustererkennung. Von grundlegender Bedeutung ist hier die Extraktion von Objektkonturen. Anschließend kann anhand dieser Konturen eine Erkennung von Strukturecken und -kanten und darauf aufbauend auch die Verifikation von Oberflächen und dreidimensionalen Körpern erfolgen. Eine saubere und vollständige Kantenextraktion ist wegen der Grauwertverhältnisse im Bereich von Kanten bei REM-Aufnahmen eine komplexe Aufgabe, für die umfangreiche Entwicklungsarbeiten notwendig sind, die zur Zeit sowohl in Richtung klassischer Algorithmen als auch in Richtung Neuronaler Netze in Angriff genommen werden. Nachfolgende Operationen berechnen dreidimensionale Geometrie-Parameter aus zweidimensionalen Parametern der Abbildungen. Es können auch weitere Bildverarbeitungsmethoden angewandt werden, um Geometrielemente einer qualitativen Prüfung zu unterziehen.

Die Systemkomponente Auswertung dient der benutzergerechten Darstellung, Weiterverarbeitung und Interpretation der Meßergebnisse. Ihre Konzeption erfolgt erst dann, wenn alle anderen Systemteile realisiert und Erfahrungen beim Einsatz des Systems gesammelt worden sind.

Die Systementwicklung und -realisierung erfolgt objektorientiert. Durch die Festlegung von Meßauftragsklassen und einer Klassenhierarchie für geometrische Elemente kann das einmal fertiggestellte System bei neuen Vermessungswünschen und bei Einführung neuer Geometrieformen

durch Erzeugen neuer Klassen und durch neue Methoden für bereits existierende Klassen auf relativ einfache Weise erweitert werden. Das Grundsystem bleibt unverändert, da die einheitlichen Schnittstellen der Meßauftrags- und Geometrie-Klassen zum Grundsystem nicht verändert werden.

4. Ausblick

Die Arbeiten für das System COSMOS-2D konzentrieren sich nun auf die Implementierung von weiteren geometrischen Grundelementen zur Beschreibung von Strukturkanten sowie auf Modifikationen, die im Hinblick auf den bevorstehenden praktischen Einsatz vorgenommen werden.

Im Vordergrund zukünftiger Arbeiten beim 3D-Vermessungssystem steht die Anpassung der Vorbereitung an ein reales REM und die Implementierung der Systemkomponente Vermessung, wobei der Schwerpunkt hier bei der Kantenextraktion liegt. Ferner ist die REM-Steuerung zu realisieren, die zunächst bei schwierigen Aufgaben den Benutzer miteinbeziehen wird und dann schrittweise automatisiert werden soll.

Literatur

- [1] B. Bürg: "Parametrisches optisches Messen bei der Herstellung von Mikrostrukturen mit beliebiger ebener Oberflächengeometrie", KfK-Bericht 4849, 1991
- [2] B. Bürg, H. Guth, A. Hellmann: "COSMOS-2D: Ein System zur Verifikation und Vermessung von zweidimensionalen geometrischen Formen", KfK-Nachrichten, 23, 2-3/91, S. 100-109, 1991
- [3] W. Ehrfeld, E.W. Becker: "Das LIGA-Verfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis und großer Strukturhöhe", KfK-Nachrichten, 19, 4/87, S. 167-179, 1987
- [4] P. Bley, J. Göttert, M. Harmening, M. Himmelhaus, W. Menz, J. Mohr, C. Müller, U. Wallrabe: "The LIGA Process for the Fabrication of Micromechanical and Microoptical Components", H. Reichl (ed.), Micro Systems Technologies '91, VDE-Verlag Berlin, 1991
- [5] I. Brauch, H. Eggert, K.-P. Scherer, P. Stiller: "Einsatz wissensbasierter Methoden für Konstruktion, Fertigung und Test von LIGA-Mikrostrukturen", Informatik aktuell: Information als Produktionsfaktor, 22. GI-Jahrestagung, Karlsruhe, 1992, Springer-Verlag, 1992

- [6] R. Massen: "Real-Time grey-level and colour image pre-processing for a vision guided biotechnology robot", Proc. Int. Conf. Robot Vision and Sensory Controls, 115-122, IFS (Conferences) Ltd and authors, 1988
- [7] U. Stucky, H. Guth, B. Bürg, A. Hellmann: "Bildaufnahme zur 3D-Erfassung von Mikrostrukturen", unveröffentlicher Bericht, KfK, 1992
- [8] A. Boyde: "A Stereo Plotting Device for SEM Micrographs; and a Real Time 3-D System for the SEM", IITRI/SEM, 1974, S. 93-100
- [9] A. Boyde: "Quantitative Photogrammetric Analysis and Qualitative Stereoscopic Analysis of SEM Images", J. of microscopy, Vol. 98, 3, 1973, S. 452-471
- [10] P.G.T. Howell: "Taking, Presenting and Treating Stereo Data from the SEM", IITRI/SEM, 1975, S.697-706

Informationstechnische Integration von LIGA-Entwurfs- und Fertigungsumgebung

K. P. Scherer, I. Brauch, H. Eggert, P. Stiller

Institut für Angewandte Informatik

Zusammenfassung

Zur Herstellung mikromechanischer Strukturen mit hohem Aspektverhältnis wurde im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) der LIGA-Prozeß (Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung und Kunststoff-Abformung) als wichtige Basistechnologie entwickelt. Die Komplexität dieses Verfahrens erfordert die Erforschung der unterschiedlichsten Wissensbereiche vieler an diesem Prozeß beteiligten Experten. Dies beginnt beim Entwurf in einem CAD-System, zieht sich über die unterschiedlichen Herstellungsschritte bis hin zur Qualitätskontrolle, wo mit Hilfe zerstörungsfreier Prüfverfahren wie zum Beispiel Bildverarbeitungsmethoden Masken und Strukturen vermessen werden können.

Diese drei groben Phasen können jedoch nicht streng sequentiell ablaufen, da eine starke Korrelation zwischen ihnen besteht. Informationstechnisch muß eine Grundstruktur entwickelt werden, wie diese Beeinflussung der einzelnen Fertigungsphasen untereinander formal und semantisch korrekt gehandhabt werden kann. Die Integration der verschiedenen Wissensdomänen bzgl. der Strukturgeometrie, des Prozeßwissens und der Vermessungsmöglichkeiten bietet eine leistungsfähige Grundlage für die Unterstützung des Konstrukteurs, möglichst korrekte und gute Strukturen zu entwerfen. Unter dem Aspekt der rechnergestützten Qualitätskontrolle können nach einem solchen Entwurfsschritt prozeßbegleitend schon in einem frühen Stadium eventuelle Defekte detektiert werden. Basis dafür ist eine objektorientierte Struktur, in der das komplexe menschliche Wissen aus Entwurf, Fertigung und Test in seinen logischen Einheiten möglichst natürlchsprachig abgebildet wird.

1. Einleitung

Der reale Herstellungsprozeß von Mikrostrukturen und insbesondere von Mikrosystemen kann nur dann in seiner Komplexität vollständig erfaßt und verstanden werden, wenn es eine Möglichkeit gibt, rechnergestützt Informationshilfen anzubieten, um das Prozeßgeschehen in all seinen Ausprägungen nachzuvollziehen [1]. Der Wert eines solchen Computersystems liegt zum einen in der Funktion als Informationssystem, zum anderen aber auch in der Fähigkeit, als Diagnosesystem zur Interpretation der momentanen Fertigungssituation beizutragen.

2. LIGA-Prozeß und Informationstechnik

Prinzipiell kann die gesamte LIGA-Herstellungskette von Mikrostrukturen unterteilt werden in drei semantisch unterschiedliche Phasen bzw. Wissensbereiche.

In einem ersten Schritt, der Konstruktion, entwirft der Konstrukteur mithilfe eines CAD-Systems für mechanische Konstruktion die spezielle Maske bzw. Mikrostruktur bzw. ein Feld solcher Strukturelemente. 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 Geo-

metrieformen 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.

Um eine effiziente Konstruktion und auch eine adäquate Herstellung zu garantieren, werden leistungsfähige Test- und Überwachungsmethoden benötigt.

Die real hergestellten Masken oder Zwischenprodukte können zum Beispiel kontrolliert werden mit zerstörungsfreien Prüfverfahren auf der Basis digitaler Bildverarbeitung [2]. Es ist spezielles Wissen notwendig, welche Methoden der Bildverarbeitung 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.

Dieses Ziel kann nur erreicht werden, wenn alle Aspekte wie Entwurf, Herstellungsprozeß und Inspektion als Qualitätskontrolle aus einer gemeinsamen globalen Sicht berücksichtigt werden [3], [4]. Obwohl diese drei Aspekte zunächst als separate Wissensgebiete betrachtet werden, müssen sie semantisch korreliert werden, da die Diagnoseaussagen bzgl. eines defekt gefertigten Teils ge-

rade die kausalen Parameterbeziehungen nutzen.

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).

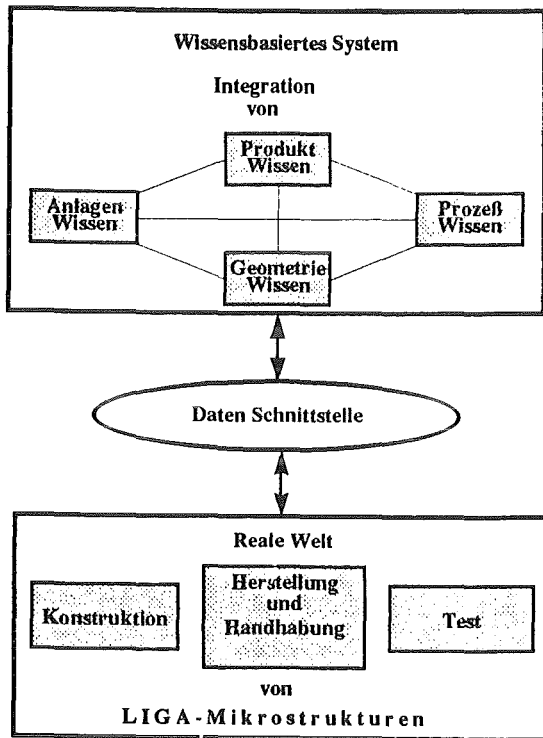


Abb. 1: Integration verschiedener Wissensdomänen

Diese objektorientierten Strukturen betreffen das Produktwissen über die Zwischen- und Endprodukte, das Prozeßwissen, um diese Strukturen herzustellen, das Geometriewissen und das Wissen um den momentanen Prozeßanlagenzustand. Der Zugang (Datenschnittstelle) zu diesen unterschiedlichen Domänen wird über eine Schnittstelle realisiert, die unter anderem für das korrekte Abbild der Semantik in das entsprechende Datenformat verantwortlich ist.

3. Objektorientierte Prozeßbeschreibung

Der LIGA-Herstellungsprozeß besteht aus einer Kette verschiedenster einzelner Prozeßschritte. Hierbei ist ein Prozeßschritt definiert als eine Überführung eines Halbzeugs von einem Zustand in den nächsten. Aus einer feineren Sicht kann ein solcher Prozeßschritt aus mehreren Unterprozessen bestehen. Beispielsweise besteht die Zwischenmaskenherstellung aus der Konstruktion, der Resiststrukturierung und der Metallisierung (Abb. 2). Diese Beziehung ist realisiert über eine Objekt-

Unterobjekt-Relation besteht aus bzw. der inversen Relation gehört zu. Der Vorteil einer solchen Verfeinerungsstrategie liegt in der Möglichkeit, jederzeit Information bzgl. eines Prozeßschrittes auf einem selbstgewählten Abstraktionsniveau zu erhalten.

Ein weiterer wichtiger Aspekt zur Prozeßinformation ist die richtige zeitliche Aufeinanderfolge der einzelnen Bearbeitungsschritte. Das System muß für jeden einzelnen Fertigungsschritt auf jeder Ebene der Verfeinerungshierarchie Wissen über Vorgänger- und Nachfolger-Prozesse haben. Dies wird berücksichtigt in Zeitrelationen, die im Kalkül einer Zeitlogik verankert sind.

Die dritte Erweiterung ist die Substitution eines Fertigungsschrittes durch einen alternativen Schritt bzw. eine alternative Prozeßkette, falls die Randbedingungen oder Vorgaben dies erforderlich machen. Insgesamt erhält man so ein dreidimensionales Modell für das Fertigungsprozeßgeschehen, in welchem die Entwurfsphase und die einzelnen Testphasen nahtlos integriert sind.

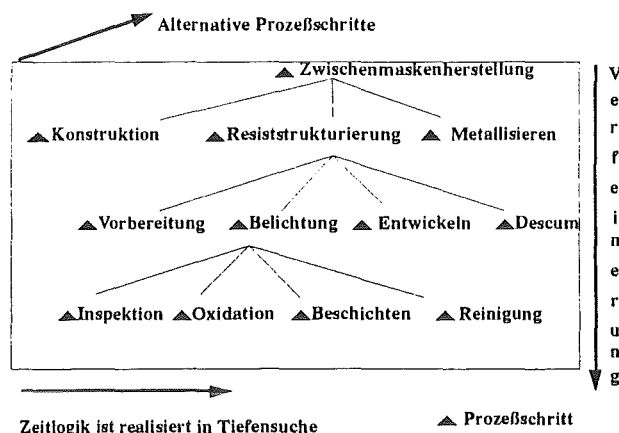


Abb. 2: Dreidimensionales Prozeßschrittmmodell

Als wichtige Informationseinheit bei der Prozeßbeschreibung dient der Prozeßschritt mit all seinen Ausprägungen. Die Menge aller Fertigungsschritte wird zusammengefaßt in einer Klasse. Für jedes Element (genannt Objekt) dieser Klasse sind zum Beispiel eine Kurzbeschreibung oder ein Hinweis auf ein Handbuch interessant, aber auch, ob dieser Schritt und unter welchen Bedingungen er notwendig ist oder nicht. Diese Information wird in den sogenannten Klassenattributen realisiert, die für jedes Objekt vorhanden und nur in ihrer Ausprägung verschieden sind.

Ein großer Vorteil dieser objektorientierten Struktur einschließlich des Vererbungsmechanismus ist die komfortable Möglichkeit, Klassen und Objekte als Informationsträger auf natürlichsprachige Weise zu generieren, ändern und löschen. Umgekehrt

ist diese Wissensrepräsentation geradezu notwendig, um ein solch komplexes Verfahren wie den LIGA-Prozeß informationstechnisch handhabbar zu machen.

Um eine umfassende Prozeßbeschreibung zu ermöglichen, werden neben der Klasse der Prozeßschritte in diesem Modell noch eine Klasse der Prozeßparameter, der Ausrüstungsgegenstände und die Klasse der Arbeitsmaterialien generiert. Jedes Objekt dieser Klassen besitzt klassenspezifische Attribute, unterliegt dem Vererbungsprinzip und gehört semantisch über eine Objekt-Unterojekt-Relation zu einem Prozeßschritt (Abb. 3). Die Mächtigkeit des Prozeßmodells basiert auf der Vernetzung der Objektstrukturen unterschiedlichster Klassen und der Verfeinerungsstrategie des dreidimensionalen Modells.

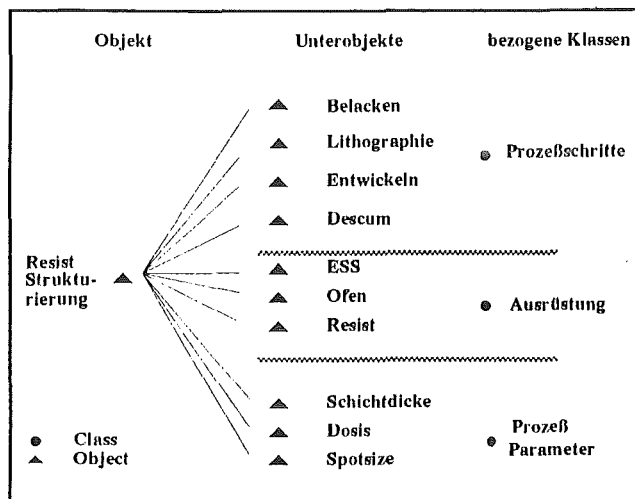


Abb. 3: Verknüpfung der prozeßbezogenen Objekte

4. Simulation und Optimierung

Eine leistungsfähige Unterstützung des Konstrukteurs beim Entwurf von Mikrostrukturen und Masken ist die Simulation und Optimierung von Prozeßparametern, da die Kenntnis über die Parameterabhängigkeiten schon im voraus genutzt werden kann. Durch die Simulation können somit Defekte im realen Prozeßgeschehen vermieden und damit immense Herstellungskosten eingespart werden.

Die Simulation basiert auf der Vernetzung der Prozeßparameter, die zu den einzelnen Prozeßschritten gehören. Man erhält ein kausales Parameternetz von Input- und Output-Parametern (Abb. 4), deren gegenseitige Beeinflussung sowohl in einer numerischen Funktionalität (Funktionscharen) als auch über linguistische Terme repräsentiert ist. Die Aussagen über diese Einflußgrößen können logisch scharf oder in Form von Fuzzy-Größen vorliegen. Genau für diese Vernetzung der unter-

schiedlichsten Paramertertypen ist auf objektorientierter Basis ein Simulationsmodell entwickelt. Die Simulation im Prozeßgeschehen besteht in der Vorwärtspropagation der Parameterwerte im kausalen Netz in Abhängigkeit vorgegebener Inputgrößen unter Berücksichtigung scharfer und unscharfer Zusammenhänge [5], [6].

In einer weiteren Ausbaustufe soll ein Optimierungsmodell als inverses Modell zur Simulation entwickelt werden. Optimierung wird in diesem Kontext definiert als inverse Suchoperation im kausalen Parameternetz. In Abhängigkeit gewählter Zielvorgaben (unterschiedlichsten Typs) müssen die Inputparameter im Netz gefunden bzw. erschlossen werden, die in der Simulation zu den vorgegebenen Zielgrößen propagieren. Die Realisierung wird in einer Rückwärtsverkettung als Inverse zur Vorwärtsverkettung liegen.

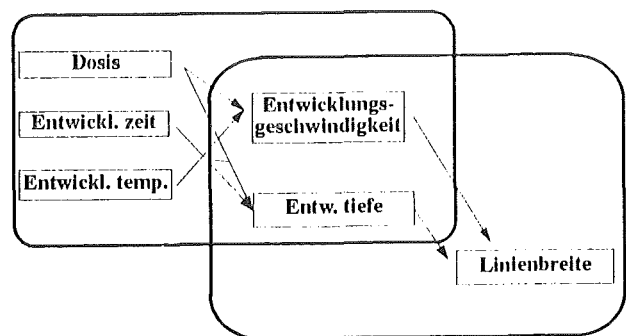


Abb. 4: Parameterabhängigkeitsnetz

5. Objektorientierte Geometriemodelle

Im Rahmen der Qualitätskontrolle wird bereits in der Entwurfsphase spezifiziert, welche generierten Geometrien mit welcher Toleranz eingehalten werden müssen und wie die Vermessung der nach diesem CAD-Entwurf hergestellten Strukturen durchzuführen ist. Auf diese Weise können mögliche durch den Herstellungsprozeß bedingte Defekte und Fehler schon in einem relativ frühen Stadium durch unmittelbaren Vergleich zwischen der Referenzstruktur und der vermessenen diagnostiziert werden.

Für eine solche Vermessung von 2D-Strukturen wurde das System COSMOS 2D/3D (Computer System for Measurement of Optically Acquired Structure Surfaces in 2/3-Dimensional Space) im IAI entwickelt, welches auf der Basis digitaler Bildverarbeitung die mit einem Mikroskop aufgenommenen Masken und Strukturen in ihren Basisgeometrieelementen vermessen kann. Die Vermessung basiert auf der Verifizierung von Ecken und Kanten unterschiedlicher Art. Jede Figur wird zusammengesetzt aus einer wohlgeordneten Aneinanderreihung von Kantenelementen unterschied-

lichsten Typs (Geradenstücke, Kreisbögen, Spiralen). Die im CAD-System generierten Geometrien liegen zunächst in einem speziellen Datenformat (IGES) vor [7]. 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 mit 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 Zellhierarchieebene besteht eine solche Zelle schließlich aus den Basisgeometrieelementen wie Linien, Kreisbögen und Spiralen mit ihren entsprechenden Parametern (Abb. 5).

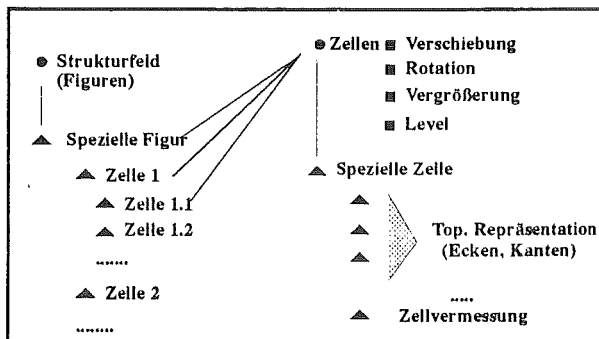


Abb. 5: Zellhierarchie

6. 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 solcher Vermessungsauftrag setzt sich zusammen aus einer wohldefinierten Abfolge von Einzelaufträgen, die sich auf die Verifizierung und Erkennung von Basisgeometrien (wie Linien, Kreisbögen, Spiralen) beziehen. Wird zum Beispiel die Distanz zwischen einem Punkt auf einem Kreisbogen und einer Ecke

(Schnitt zwischen einem Kreisbogen und einem Geradenstück) vermessen, 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 in das Bildverarbeitungssystem übertragen, wo dann die Abarbeitung der Aufträge stattfindet (Abb. 6).

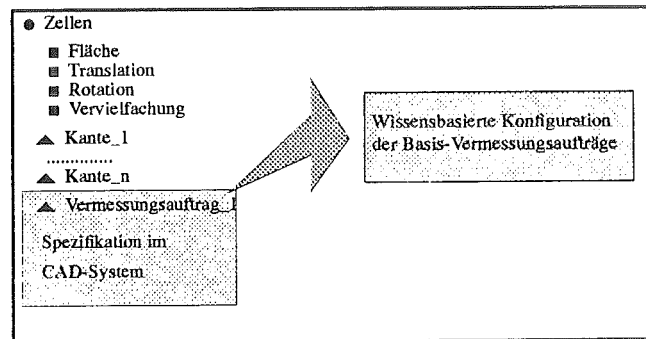


Abb. 6: Generierung des Vermessungsauftrages

7. Integration der verschiedenen Wissensdomänen

Im Hinblick auf eine leichte und komfortable Handhabung der verschiedenen Informationseinheiten bietet sich eine objektorientierte Struktur als formale Wissensrepräsentation an, in der das Wissen aus den unterschiedlichen Domänen (Entwurf, Fertigung, Vermessung) gleichartig niedergelegt ist. In diesem Sinne sind im Modell die Prozeßbeschreibung mit der gesamten Information über Prozeßschritte, Prozeßparameter, Ausrüstungsgegenstände und auch das Wissen um die Geometriestrukturen und Vermessungsmöglichkeiten beim Entwurf analog strukturiert, damit benutzerabhängige Applikationen auf diese Basisinformation leicht zugreifen können.

Dies erfordert eine Integration des Geometriemodells beim Entwurf, dem wissensbasierten Konfigurationssystem für die Vermessungsaufträge und dem Prozeßmodell.

In einer späteren Ausbaustufe des Systems soll die gesamte Information mit einem objektorientierten Datenbanksystem verwaltet werden, in die auch Analyseergebnisse der vermessenen Struktu-

ren abgelegt werden, so daß nach einer Fehlererkennung und einer Ursachenforschung dem Konstrukteur bei einem weiteren Entwurf eine Unterstützung in Form von Entwurfshilfen gegeben werden kann. Diese applikationsabhängigen Entwurfsregeln benötigen Wissen aus den unterschiedlichen Domänen (Abb. 7, Abb. 8).

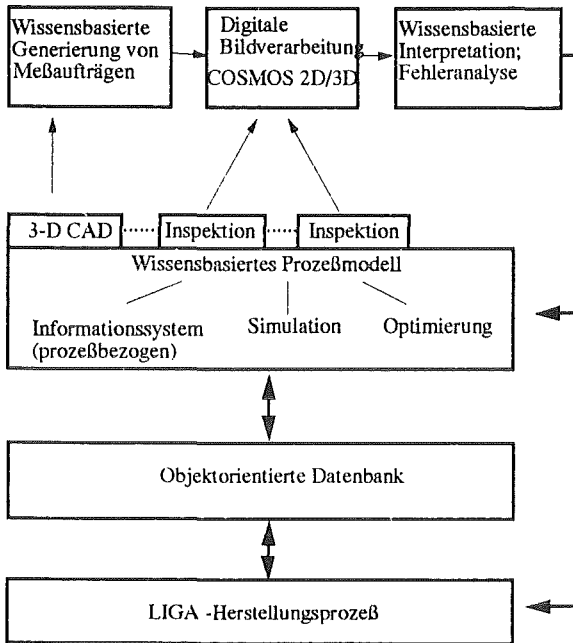


Abb. 7: Verbindung der Systemkomponenten

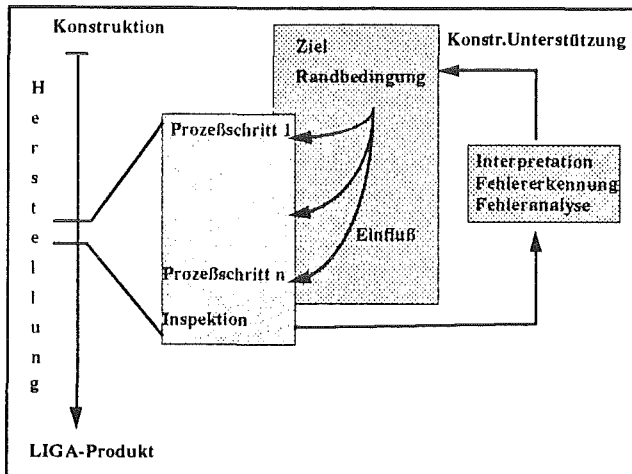


Abb. 8: Entwurfs- und Fertigungsbeeinflussung nach Fehlererkennung

8. Implementierung

Die Software für die wissensbasierte Informationsverarbeitung ist realisiert in C++ unter UNIX auf einer SUN Sparc Station. Zum Entwurf der Masken und Mikrostrukturen steht das CAD-System

ME10/ME30 für Mechanikonstruktion auf einer HP 720 PVRX zur Verfügung. Die im CAD-System generierte Geometrieinformation und Bemaßungsinformation liegt im IGES-Format vor und wird über einen speziell entwickelten IGES-Parser in die objektorientierte Struktur abgelegt.

Die Durchführung der Vermessungsaufträge im Bildverarbeitungssystem COSMOS erfolgt nach Konvertierung der im objektorientierten System abgelegten Information in ein spezielles COSMOS-Format.

Die Architektur des gesamten Computernetzes ist eine Server-Client-Lösung, wobei die verschiedenen Systeme über LAN mit TCP/IP verbunden sind.

Literatur

- [1] P. Bley, J. Göttert, M. 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] 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
- [3] I. Brauch, H. Eggert, K.P. Scherer, P. Stiller, „Unterstützung des LIGA-Herstellungsprozesses mit wissensbasierten Methoden“, ZWF CIM, Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung, Carl Hanser Verlag, München, 1993
- [4] I. Brauch, H. Eggert, K.P. Scherer, P. Stiller, „Einsatz wissensbasierter Methoden für Konstruktion, Fertigung und Test von LIGA-Mikrostrukturen“, Informatik aktuell: Information als Produktionsfaktor, 22. GI-Jahrestagung, Karlsruhe, 1992, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1992
- [5] H. J. Zimmermann, „Fuzzy Technologien: Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale“, VDI Verlag, Düsseldorf, 1993
- [6] G.J. Klir, T.A. Folger, „Fuzzy Sets, Uncertainty and Information“, Prentice Hall Intern. Editions, State University of New York, Binghamton, 1988
- [7] Reed (ed), Initial Graphic Exchange Specification (IGES)“, Version 5.1, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD 1991

Liste der am Projekt Mikrosystemtechnik beteiligten Institute

Institut für Mikrostrukturtechnik, IMT
Institut für Materialforschung, IMF
Institut für Radiochemie, IRCh
Institut für Angewandte Informatik, IAI
Hauptabteilung für Ingenieurtechnik, HIT
Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik, HPE
Hauptabteilung Versuchstechnik, HVT

Autoren

Ache, H. J., 31, 143, 148
Althainz, P., 143
Bacher, W., 116, 122
Balzer, M., 85, 172
Bier, W., 134
Bley, P., 9
Both, A., 122
Brauch, J., 184
Büstgens, B., 78
Coerdts, W., 85
Czolk, R., 148
Dahlke, A., 143
Dautzenberg, P., 57
Dinglreiter, H., 122
Düpmeyer, C., 177
Eggert, H., 89, 184
El-Kholi, A., 116
Fromhein, O., 67, 78, 85, 172
Gemmeke, H., 172
Götttert, J., 73
Goik, M., 177
Goschnik, J., 143
Guber, A., 134
Günther, E., 159
Guth, H., 177
Hein, H., 105, 111
Heinzmann, G., 148
Hellmann, A., 177
Hoffmann, W., 89
Holler, E., 94
Kalb, H., 122
Keller, W., 67, 167
Klose, W., 3
Kneifel, B., 57
Knitter, R., 159
Kohl, M., 73
Kraus, S.C., 148
Krömer, O., 172
Kühner, T., 85, 172
Lindemann, K., 67
Linder, G., 134
Maas, D., 167
Menz, B., 116
Menz, W., 21, 111
Mohr, J., 67, 73, 105, 116, 129
Morales-Bahník, A., 148
Müller, A., 73
Müller, C., 105
Neisius, B., 57
Quandt, E., 153
Rapp, M., 85
Rapp, R., 78
Reichert, J., 78, 85, 148
Rembser, J., 1
Rininsland, H., 57
Ritzhaupt-Kleissl, H. J., 159
Ruprecht, R., 122
Schaller, T., 134
Scherer, K.-P., 184
Schomburg, W. K., 78, 89
Schubert, K., 134
Schülken, H., 57
Schulz, J., 129
Seidel, D., 89, 167
Selig, M., 57
Stiller, P., 184
Stransky, R., 116
Strohrmann, M., 67
Stucky, U., 177
Trapp, R., 57, 94
Trauboth, H., 38
Voigt, A., 85
Vollmer, J., 111
Walter, F., 111
Wedemeyer, H., 159
Wiche, W., 6
Zimmermann-Chopin, R., 159
Zum Gahr, K.-H., 50