

**Forschungszentrum Karlsruhe**  
**Technik und Umwelt**

**Wissenschaftliche Berichte**  
**FZKA 6423**

**4. Statuskolloquium  
des Programms  
Mikrosystemtechnik  
30./31. März 2000  
im Forschungszentrum Karlsruhe**

**Programm Mikrosystemtechnik**

**März 2000**



**Forschungszentrum Karlsruhe**

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6423

**4. Statuskolloquium des  
Programms Mikrosystemtechnik**

**30./31. März 2000  
im Forschungszentrum Karlsruhe**

zusammengestellt von der Programmleitung

**Programm Mikrosystemtechnik**

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe  
2000

**2. erweiterte Auflage**

Als Manuskript gedruckt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

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

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft**  
**Deutscher Forschungszentren (HGF)**

**ISSN 0947-8620**

**ISSN 1615-133X**

# Inhaltsverzeichnis, Abstracts

<b>Begrüßung durch den Vorstand des Forschungszentrums Karlsruhe</b>	<b>1</b>
P. Fritz	
<b>Grußworte des Bundesministeriums für Bildung und Forschung</b>	<b>3</b>
K. Bauer	
<b>Grußworte der Landesregierung Baden-Württemberg</b>	<b>7</b>
A. Tschermark von Seysenegg	
<b>Ansprache des Vorsitzenden des PMT-Projektbeirats</b>	<b>11</b>
<b>Mikrosystemtechnik: Von der Vorlaufforschung zur industriellen Anwendung</b>	
S. Paasche	
<b>Stand und Perspektiven des Programms Mikrosystemtechnik</b>	<b>13</b>
<b>Status and Prospects of the Program Microsystem Technologies</b>	
P. Bley	

Within the Microsystem Technologies Program (PMT) of Forschungszentrum Karlsruhe about 210 people from seven institutes join in doing interdisciplinary work to develop complex microsystems. The work of PMT is structured in "Technology Fields" for the long term work and in "application fields" for the industrial oriented work. PMT has been concentrating on the use of polymers, metals and ceramics and has worked out a substantial portfolio on fabrication technologies which can be put at industry's disposal. The fabrication technologies are being described in details in many contributions to these proceedings, whereas this paper gives an overview and shows the connection between the individual technologies. In order to be able to quickly transfer the results to industry, PMT cooperates in various ways with industry. During the past two years, forms of such cooperation where about 20 joint research programs, 50 bilateral cooperations with industry and license agreements as well as the handling of about 300 orders within the framework of research by contract and microfabrication. Furthermore, in the beginning of 1999, PMT has established the "Forschungszentrum Karlsruhe Industrial Forum Microfabrication Technologies" – FIF – to improve the information exchange and intense dialogue with industry. Being competitive also in the long-term, fundamental research work is of great importance to PMT. Such research for the continued development of microsystems is conducted in the areas which show the potential for future industrial applications and where PMT is holding a top position, respectively will achieve such in an assessable timeframe.

## Fertigungstechniken

23

### Fertigungstechniken für die primäre Strukturierung von Kunststoffen

25

#### Fabrication Technologies for Patterning of Polymers

V. Saile, S.J. Chung, H. Hein, J. Mohr, F.J. Pantenburg

Fabrication technologies based on lithography are core techniques in the program Microsystem Technology (PMT) at Forschungszentrum Karlsruhe. Lithographic methods are employed for direct fabrication of polymer components. Furthermore, metallic components or mold inserts as tools for hot embossing or injection molding are manufactured as well, using the polymer structures as lost molds. In this contribution the state-of-the-art in lithography R&D at PMT is described. Special emphasis is given to new opportunities in manufacturing with deep X-ray lithography at the synchrotron source ANKA under construction at Forschungszentrum. This new facility will commence with routine operation in the second half of this year.

### Fertigung von mikrostrukturierten Komponenten und Formeinsätzen aus Metall

31

#### Manufacture of metallic microcomponents and molding tools

W. Bacher, K. Bade, A. Guber, M. Guttmann, W. Pfleging, T. Schaller, P. Schloßmacher

Micro electroplating as a part of the LIGA process is used for the manufacture of molding tools (usually mold inserts) for production of polymer or ceramic microstructures by different replication techniques. Furthermore electroforming is a possible process for the direct fabrication of metallic microcomponents by combination of lithography and electroplating. These metallic components as well as the mold inserts can be produced also by laser patterning, by cavity sinking with EDM, and by the different methods of mechanical micromachining. In this paper the current work in the Research Center Karlsruhe is reviewed for the development of the described manufacturing technologies.

### Abformverfahren für mikrostrukturierte Bauteile aus Kunststoff und Metall

39

#### Molding Technologies for Microstructured Components Made of Plastics and Metals

R. Ruprecht, T. Gietzelt, M. Guttmann, T. Hanemann, M. Hecke, K. Müller, V. Piotter

Consistent utilization of the economic and technical advantages of microsystems technologies is expected to result in improved and novel products. For this, methods for the production of often large series of microcomponents from specific materials selected at low costs per piece must be available. To manufacture microstructured components and microparts from plastics and metals, molding processes are being developed. Recent innovations of the Forschungszentrum Karlsruhe (Karlsruhe Research Center) with regard to the molding processes of micro injection molding, vacuum hot embossing, photomolding of plastic components or electroforming, micro powder injection molding, and micro casting of metals are described briefly. The states of the art of the processes are compared.

## **Fertigung keramischer Mikrokomponenten**

**45**

### **Fabrication of Ceramic Microcomponents**

H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, W. Bauer, R. Knitter, V. Piotter, R. Ruprecht, J. Haußelt

Several processing routes have been developed for the manufacturing of ceramic microcomponents in order to meet various requirements with respect to material or design of a special micropart or actual production parameters. Consequently there are different fabrication requirements for the state of product development, for pilot production and for mass production of a ceramic microcomponent. Experience shows that one of the most versatile techniques for the fabrication of ceramic microcomponents is ceramic injection moulding (CIM). This technique with its two variations – high pressure and low pressure injection moulding – can effectively be applied during the state of development and prototyping as well as for series production.

## **Strategische Teilprojekte**

**51**

### **Material- und Verfahrensentwicklung für mikrotechnische Hochleistungsbauteile**

**53**

#### **Development of Materials and Processes for High-Performance Microtechnology Components**

K.-H. Zum Gahr, R. Knitter, R. Ruprecht, K. Seemann

A research project is carried out in the scope of the strategy funds of the Hermann von Helmholtz Association of German Research Centers (HGF) for microcomponents with a wide range of applications such as in communication technology, transport technology, in households, medical technology or chemical process engineering.

The aim of the project is the development of new materials and process technologies for microtechnological demonstration objects. This includes also the modeling and characterization of material properties in the micro range as well as integrating the components into the microsystems and testing of the systems performances.

The project is broken down into the three main areas of development of *Part A*: microinductors for use as matching networks in the range of 1 to 4 GHz for mobile communications, or as microtransformers. *Part B*: technologies for processing materials required to make three-dimensional wear microcomponents of metals with and without coatings, especially components for annular gear pumps and microstructured injection molding inserts. *Part C*: compact modular chemical reactor designs with internal structural details in the submillimeter range to be made of chemically resistant ceramic materials.

**Materialflow systems for microsystems production**

U. Gengenbach, F. Engelhardt, A. Hofmann, R. Scharnowell

An important aspect in the production of microsystems is the material flow. Si based microtechnology takes advantage of the material flow systems of the semiconductor industry. Material flow systems in manufacturing equipment for the hybrid microsystems are mainly tailor made solutions. The German standardization committee DIN NAFuO AA F3 "Manufacturing equipment for microsystems" has standardized a tray for use in the manufacturing of microsystems. The goal was to make this standard compatible with the standards in semiconductor industry in order to make part of the semiconductor manufacturing equipment (cleanroom storage boxes, handlers) available for microsystems technology. In the joint research project Microfeed2 this tray serves as a the basis for material flow systems in the microsystem production of two industrial partners. Apart from being used for inhouse material flow, trays stored in clean room transport boxes are also applicable for material flow between geographically distributed plants. This system can be a building block for the distributed production of microsystems in a network of SMEs, a socalled "virtual enterprise for the manufacturing of microsystems (MicroWebFab)".

**Elektronische Mikronasen für Überwachungs- und Regelaufgaben - ELMINA****Electronic Micronoses for monitoring and regulation tasks**

J. Goschnick

ELMINA is a strategy project of the Helmholtz Gesellschaft dedicated to the development of Electronic Micronoses (ENs) in form of densely integrated microsystems. Four institutes of the Karlsruhe research center collaborate to make microfabricated Electronic Noses available which combine low price, little spatial requirements and low energy consumption with excellent analytical performance at high reliability. The objective is to provide inexpensive gasanalytical modules for the integration into processes or products to enable intelligent reactions. Mass products for consumers are targets of the application as well as fabrication facilities.

The present EN systems developed at the Institute of Instrumental Analysis based on metal oxide and SAW-sensor arrays are taken as the starting point. A new generation of EN microsystems for widespread use in diverse applications is intended with enhancing the compactness of the microsystems as well as the analytical performance in various ways: hybrid integration of the sensor micro array with the corresponding electronics, densification and modification of the present microstructures, improvement of their chemical equipment and packaging technology.

The project comprises three representative applications which are pursued together with industrial partners to provide orientation for the development and practical scenarios for device testing: an air quality monitor as a mass product for the equipment of buildings including fire detection ability as well as gasanalytical devices for two production facilities, one of which will be a natural gas drilling site and the other a complex production facility of the chemical industry. In view of the complexity of the monitored objects an intelligent EN network is being developed for multi-site surveillance. This EN net system will not only allow archiving and visualization of the multitude of messages from the Ens. It will moreover enable collective evaluation of the data to yield the spatial distribution and the dynamics of spreading gases or odors in the monitored complex.

## **Entwicklung und Fertigung mikrofluidischer Komponenten für analytische Anwendungen in den Life Sciences**

73

### **Development and manufacture of microfluidic components for analytical application in the life sciences**

M. Kautt, W.K. Schomburg, M. Hecke, W. Hoffmann, J. Reichert, D. Moss, T. Schaller, W. Pfleging, T. Hanemann, E. Gottwald

The importance of microsystems technology for the biosciences is steadily increasing. This paper presents some examples of microfluidic components for biological and analytical purposes, developed within the Microsystem Technology Program (PMT) of Forschungszentrum Karlsruhe. In addition to the development of miniaturised analytical techniques and new methodological approaches, a feature of the work of PMT is the development of manufacturing technologies suitable for low-cost, high-quantity production. The microfluidics components for bioanalysis developed in PMT are made of plastics. Examples of microfluidic components include a measurement cell developed in cooperation with BASF for use in drug screening, a cell container system for three-dimensional culturing of various kinds of cells which is used for activity tests for pharmaceuticals and cosmetics in collaboration with an industrial partner, and a miniaturized capillary electrophoresis chip which has been used to demonstrate the capabilities of a process for rapid manufacture of prototypes. Finally, a process is described for the economic manufacture of microfluidic analysis systems made of polymers.

## **Brückenschlag vom Labor zum Markt – Das Forschungszentrum Karlsruhe Industrieforum Mikrofertigungstechnik (FIF)**

79

### **The link between laboratory and market - The Forschungszentrum Karlsruhe Industrial Forum Microfabrication Technologies (FIF)**

J. Fahrenberg, R. Czolk

The Forschungszentrum Industrial Forum „Microfabrication Technologies“ (FIF) is an initiative to improve the technology transfer in the microsystems technology field. Based on the know-how of the scientific experts within the “Microsystem Technologies Program” (PMT) of Forschungszentrum Karlsruhe the industrial members receive an excellent overview of the abilities and chances offered by microfabrication technologies. The over 200 coworkers of PMT will support the implementation of these innovative technologies by a special offer, which consists of information, consulting, scientific-technical service and training. The intense dialogues and being part of a network of end-users and scientists enable the FIF-members to build an optimum basis for long-term and confidential cooperation between industry and research.

## **Fertigung von Mikrokomponenten nach DIN EN ISO 9001 an einem Forschungsinstitut**

83

### **Fabrication of Microcomponents According to DIN EN ISO 9001 in a Research Institute**

D. Maas, R. Ehnes, P. Jakobs, B. Karl, U. Köhler, C. Lienert, V. Saile, J. Schulz

Due to the establishment of a quality management system according to DIN ISO EN 9001 standard the Institute of Microstructure Technology (IMT) was restructured. In the course of this process a division “Microfabrication” was formed on January 01, 99. The division “Microfabrication” works as a high-tech workshop whose task is to manufacture IMT products (at present basically intermediate and working masks for deep X-ray lithography, LIGA mold inserts, molded LIGA parts and fluidic microcomponents) with reliable and documented production methods (LIGA- and AMANDA-process and their various process variants). We want to show how it is possible to run a reliable production according to industrial standards on the one hand, to leave space for research and development and establish and maintain quality management system according to a globally accepted standard on the other hand in an institute originally established for research reasons.

<b>Wachstumsmarkt Mikrosystemtechnik am Beispiel des LIGA-Mikrospektrometers</b>	<b>91</b>
--	-----------

### **Growth market micro system technologies demonstrated by the LIGA microspectrometer as an example**

R. Wechsung

The total world market for microsystems is expected to grow from \$ 26 billion in the year 2000 with an annual rate of 20 %. New emerging products will contribute to an even larger growth until year 2010. The largest growth will be in the field of biomedicine and information technology. MST as an enabling technology is described with the characteristic example of the LIGA microspectrometer with applications in the field of non invasive biomedical diagnostics.

<b>Mikrofluidische Komponenten für die chemische Analysenmesstechnik</b>	<b>95</b>
--	-----------

### **Microfluidic components for analytical measurements**

A. Maute, W.K. Schomburg

In analytical measurement techniques the market asks for more sensitive, miniaturized instruments, which are able to analyze smallest samples of only a few nanoliters in very short times. Consequently, microscopically small components are needed such as those which can be fabricated by the AMANDA process.

This paper describes a microdegasser for high performance liquid chromatography (HPLC) which was developed for Agilent Technologies by Forschungszentrum Karlsruhe and is produced by STEAG microParts. The microdegasser is one of the components which help to achieve the very good market position of Agilent Technologies for HPLC instrumentation.

<b>SAW-Sensorsystem: Gemeinsame Entwicklung, Know-How-Transfer, Marketingstrategie und neue Anwendungen</b>	<b>99</b>
---	-----------

### **SAW sensor system: Joint Development, Know-How-Transfer, Marketing Strategy and New Applications**

H. Töpfer, M. Rapp

This report describes the progress of a successful cooperation of the project Mikrosystemtechnik with an industrial partner, the company Burkert GmbH & Co. KG. Subject was the joint development of sensor systems for the detection of organic gases and gas mixtures basing on polymer-coated „surface acoustic wave“ (SAW) sensors. The related sensor system „SAGAS“ was presented here earlier.

Starting from a core technology developed in the Forschungszentrum consisting of an array of eight differently coated SAW sensors, their electronic support and data evaluation, Burkert has developed a market ready and flexible analytical sensor system called "GASYS" which can be easily adapted versus different applications. With a joint marketing strategy these sensor systems could be tailored towards the needs of special customers resulting in several systems for different monitoring tasks as well as quantitative analytical tasks of single components in gas mixtures for automatic process control in explosion-protected production zones. In this presentation the basic functionality and actual performance of these systems is depicted using several practical examples.

**Hot Embossing - as a Technology for Production and Research & Development**

U. Heim, M. Heckele

Hot embossing, together with micro injection molding, is one of the techniques to produce polymer micro components. Especially the feature to replicate high precision surfaces has a high potential for numerous application in microfluidics and micro optics. Important fact for industrial success is the development of hot embossing machines and equipment as well as cost-effective proceedings to produce under industrial conditions

**Hochfrequente Ultraschallsysteme für die Mikrosystemtechnik - Unternehmungsgründung durch Technologietransfer -****High Frequency Ultrasonic Systems for Microsystems Technology - Company Start up by Means of Technology Transfer -**

J. Straka, A. El-Kholi

In various manufacturing areas, ultrasonic energy of high frequency, so called megasonic energy, supports effectively cleaning, etching and photoresist removal.

Since 1996 the Institute for Microstructure Technology (IMT) of the Karlsruhe Research Center (FZK) and SONOSYS® have been involved in the joint development of high-frequency megasonic power systems. Various designs have been completed for LIGA technology applications, specifically for the development of microstructures with high aspect ratios.

The effect of megasonic energy in cleaning and etching processes, is based on the generation of controlled acoustic cavitation in the cleaning fluid. During processing, the transducer generates high frequency (750 kHz - 3 MHz) sonic waves which are transmitted to the surface of substrates in a liquid medium. Both, chemical reaction and megasonic actuation are utilized to break down the attracting forces holding particles to the surface.

SONOSYS® is specialized in the design and production of high frequency ultrasonic ( Megasonic ) systems in the frequency range of 400 kHz to 3 MHz. These megasonic systems represent a cleaning technology for highly efficient removal of sub-micron sized particles down to 0,1 µm.

Nowadays, SONOSYS® Megasonic systems are used world-wide in laboratories to support the developing process of microstructures and MEMS and are used by leading manufacturers of wet process equipment for the semiconductor industry.

### Software-Tool für Analyse und Training von Sensordaten

119

#### Software-Tool for Analysis and Training of Sensor Data

V. Hartmann, W. Eppler, H. Gemmeke

Sensor systems often comprise multiple sensors if they have to detect not only the presence of a single gas mixture (e.g. with a fire detector) but if they have to distinguish among different gases or they have to determine their concentration. Such sensor arrangements are called sensor arrays. The sensor data are analyzed with modern methods of pattern recognition. KANGAROO (KArlsruhe Neural Gas Analyzing Robust Operating Observer) is a modular software package for measuring sensor data with different sensor systems. A classifier and other data mining algorithms are created for their use in sensor data analysis. Apart from the high flexibility of the whole system the fast adaptation of individual modules for special measuring functions was a design goal of the system. No special expert knowledge is necessary. In context of a co-operation between the Research Center Karlsruhe and the industry KANGAROO has been in use for some time. Two typical applications in pharmaceutical industry, the efficiency and the high flexibility of the software is demonstrated in the paper.

### Automatisierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für die Mikrosystemtechnik am Beispiel metalloxidischer Gassensor-Chips

125

#### Packaging of micro machined metal oxide gas sensor chips

T. Blank

The Karlsruhe research center (FZK) develops micro machined gas sensor arrays based on semiconducting metal oxides. 40 sensor elements are placed on a silicon chip of an overall size of approx. 1 cm<sup>2</sup>. The sensor is operated at a temperature of about 300°C and evaluated by a microelectronic. The chip is mounted in a ceramic PGA housing that connects to the electronics.

In this paper the current package technology is analyzed with respect to automatic manufacturability. Due to the high operating temperature of the sensor and its direct environmental contact the thermal, mechanical and environmental behavior of the chip and package are investigated. The package of the chip is too expensive and cannot be assembled automatically with reasonable effort. Furthermore the thermal and mechanical behaviour needs to be improved. To overcome these difficulties a new miniaturized package with superior thermal and mechanical properties is under development in the context of HGF project „ELMINA“.

**INFOFLOW - a process-oriented system to support Business Flows in low volume productions**

M. Dickerhof, P. Jakobs, A. Schmidt, J. Schulz, F. Bulling

Workflow systems are widely used in the organizational areas of business as well as in the production department to support standardized processes. Most systems currently available on the market are only suitable for managing high volume, low product variation applications.

The INFOFLOW system was developed especially to meet the special requirements of the single and small batch manufacturer, which implies smaller production numbers with higher product variation.

There are very good reasons for the use of an appropriate flow control system for modeling, model execution and the exception handling in flexible production structures. Employee decisions are supported at all production levels by providing activity and order related information.

INFOFLOW supports more flexible production structures to deal with the complexity of the work. Such an "ad hoc"-workflow approach should support both the entry of measuring data, the notes of the co-workers, as well as production information.

Only by integrating these aspects can optimization of the flows in the technical and organizational sense be achieved in low volume production.

**Laser-assisted fabrication of micro patterned components and mold inserts**

W. Pfleging, T. Hanemann, W. Hoffmann

At the Forschungszentrum Karlsruhe GmbH the material aspects and possible industrial applications of laser processing are investigated. The relevant materials are ceramics, semiconductors, metals and polymers. A main topic of the work is the laser patterning and welding for applications in medical and microsystem technologies. In this paper the rapid manufacturing of mold inserts as well as the three dimensional patterning of polymers will be discussed. Laser material processing is used for precise patterning and surface modification of steel, cemented carbides or ceramics for mold inserts in micro injection molding (e.g. UV-assisted reaction injection molding) or hot embossing. These mold inserts enable the demolding of micro components composed of polymers, ceramics and metals. Lateral resolutions of 40 µm with aspect ratios up to 10 are obtained. With excimer laser radiation aspect ratios up to 40 are realized in polymer surfaces, e.g. for manufacturing of small biocontainers or trenches for applications in medical and biological technology. The lateral resolution of the structures is in the micrometer range.

**Development of Ferromagnetic Single- and Multilayer Films for High Frequency –  
Microinductors**

K. Seemann, I. Fergen

Many soft magnetic materials with a high saturation magnetisation and anisotropy exhibit high frequency properties up to the GHz region. These materials will be integrated in microinductors which show higher performance in contrary to ordinary microcoils concerning the quality factor and high frequency ability. Especially ferromagnetic single layer films with a high resistivity or multilayer films with insulating inter-layers made of  $\text{SiO}_2$  are able to meet these requirements. By high resistivities or thin enough magnetic films in a multilayer arrangement eddy currents can be decreased which lead to relative low cut-off frequencies. Beside these electronic properties the magnetic properties in the first place affect the high frequency ability of the films. Such as the mentioned anisotropy and the saturation magnetisation of the films are two deciding parameters which mainly determine the maximum cut-off frequencies.

**Einsatz numerischer Verfahren zur Modellbildung und Simulation von kapillarisch  
getriebenen Fluiden in Mikrostrukturen**

**Use of Numerical Methods for Modeling and Simulating Capillary Driven Fluids in  
Microstructures**

S. Halstenberg, A. Quinte, H. Eggert, C. Schön, R.-P. Peters

Today, medical test strips allow to determine a number of major biomedical parameters, e.g. blood sugar, very rapidly and at low costs. In conventional test strips, an absorbent fleece of nitrocellulose or glass fiber is mostly applied as the transport medium. The fluid to be investigated is transported into the reaction zone by a capillary effect. The above materials are produced at low costs, but do not allow any precise and reproducible control of the flow behavior of the test fluid in the test strip.

Meanwhile, technical progress in microstructure technology has resulted in the precise fabrication of fluidic microstructures having a variety of geometries. By an adequate design of the structures in the microchannels, the flow properties desired may be adjusted in a specific and, above all, reproducible manner. With the support of computer-aided tools, the expenditure required for the design of medical test strips may be reduced significantly.

In the present contribution, use of the tools of FLOW-3D (FlowScience company) and CFX4 (AEATechnology company) shall be discussed for capillary driven flows using simple models. The concept developed for the generation of an overall model for the medical test strips shall be presented.

## Anwendungen

157

### Funktionsschichten für mikroverfahrenstechnische Bauteile

159

#### Functional Coatings for Devices in Micro Process Engineering

M. Fichtner, W. Benzinger, K. Haas-Santo, P. Pfeifer, R. Wunsch

Functional coatings have been developed for microchannel devices to open up new application areas in thermal and chemical process engineering. Passivating layers to prevent fouling as well as catalytically active layers for heterogeneously catalyzed reactions will be presented. Special attention will be directed to preparation methods which allow a postcoating of already assembled microchannel devices. Among these are coatings made by the sol/gel method, the anodic oxidation of aluminum and the immobilization of nanoparticles.

### Fertigung marktgerechter mikrofluidischer Systeme mit dem AMANDA-Verfahren

167

#### Production of microfluidic systems by the AMANDA process in accordance with market conditions

W.K. Schomburg, S. Kaiser

The AMANDA process combines surface micromachining, molding, and diaphragm transfer and especially allows an economical production of microcomponents from polymers. The advantages and limitations of the process steps are discussed. The Institut für Mikrostrukturtechnik offers substantial support for the market introduction of the AMANDA process.

### Dreistufige Mikrostrukturen am Beispiel eines Zyklogetriebes

173

#### Three-stepped Microstructures for a cycloid-gear system

H. Hein, S.J. Chung, J. Mohr, T. Akashi, T. Hirata

In this paper, a prototype of 2 mm-diameter micro-cycloid gear system fabricated by a multi-exposure LIGA technique is presented. The entire gear system consists of a casing and three vertically stacked disks and gears. Each part is composed of three different levels. The first level, 40  $\mu\text{m}$  high, was fabricated by UV-lithography (UVL) using the resist system EPON SU-8, and the second as well as the third level, 195  $\mu\text{m}$  and 250  $\mu\text{m}$  high respectively, were processed by aligned deep X-ray lithography (DXL) using PMMA. The alignment error between two DXL-processed layers was measured and the results have turned out to be within  $\pm 5 \mu\text{m}$  range. As a result of the height control process by the mechanical surface machining, the deviation of structural height has been maintained within  $\pm 2 \mu\text{m}$  range for the UVL-processed structures, and  $\pm 10 \mu\text{m}$  for the DXL-processed structures. Further the tests of gear assembly were implemented with 125  $\mu\text{m}$ -diameter glass fibre, by using a die-bonding machine with vacuum gripper under stereo-microscope. Finally the dynamic tests of the gear system were successfully conducted with the mechanical torque input by an electrical motor. A proper rotational speed reduction was observed in the operational input range of 50 to 500 rpm with the designed gear ratio of 17.

The results in this paper were achieved within a co-operation agreement between Forschungszentrum Karlsruhe and Sumitomo Heavy Industries, Ltd., Japan.

## Die Anwendung der Mikrooptik in der Tele- und Datakommunikation

179

### The Application of Micro-Optical Devices in Tele- and Data-Communication

J. Mohr, P. Krippner, U. Wallrabe

Within the strategic R&D field „Microoptics“ two concepts are used to fabricate microoptical components. Based on these concepts a lot of prototypes have been fabricated by IMT. The characteristics of these components show the applicability of the concepts to fabricate microoptical modules and systems also for use in tele- and data-communication. Up to now the work of Forschungszentrum is almost laid by the available technology. To increase the acceptance by industry and in the market it is necessary to deepen the competence for the application area. Thus, it is discussed to set up a network of research institutes who will contribute with their expertise to the work in the tele and data-communication field. In addition an industrial advisory board is needed to drive the work towards industrial use.

## RibCon - Steckverbinder für 16 Multimode-Fasern

187

### RibCon – Connector for 16 Multimode Fibers

H. Dittrich, U. Wallrabe, J. Mohr, P. Ruther, T. Hanemann, O. Jacobi, K. Müller, V. Piotter, R. Ruprecht, T. Schaller, W. Zißler

The Forschungszentrum Karlsruhe, in cooperation with the Spinner company, is developing a connector for 16 multimode fibers whose precision element is microinjection molded out of a polymer. The injection molding tool used for this purpose contains microstructured mold inserts manufactured in a process combining mechanical microfabrication, deep X-ray lithography, electroforming, and wire-EDM. The contribution presents an outline of the main features of the precision element from the perspective of manufacturing technology, and describes the manufacturing process from tool production to molding to quality control of the molded connectors ready for use.

## Exponate des PMT

193

### Herstellung von Formeinsätzen aus Nickel bis 120 mm Durchmesser mit Hilfe konventioneller Optischer Lithographie

195

### Nickel Mold Insert Fabrication by Using Conventional Optical Lithography and Electroforming up to 120 mm Diameter

S.J. Chung, H. Hein

Nickel mould inserts can be fabricated by using conventional optical lithography. They are employed for microstructuring by hot embossing and injection molding. The negative resist EPON SU-8 is applied by the process. The advantage of this process for the users is the short processing time and the large functional area based on 6 inch technology. The maximum diameter for the mould insert is 120 mm for circular shapes and 85 mmx85 mm side length for rectangular shapes. Application examples are capillary fluidic devices, Lab-On-Chip or optical waveguides.

**Fertigung von Mikrostrukturen durch Röntgentiefenlithographie an der Karlsruher Synchrotronstrahlungsquelle ANKA**

197

**Fabrication of microstructures by deep X-ray lithography at the Karlsruhe synchrotron light source ANKA**

F.J. Pantenburg, J. Mohr, H.O. Moser, K.-H. Häfele

At the Karlsruhe synchrotron light source ANKA, three beamlines will be installed for deep X-ray lithography within a clean-room environment. X-ray mirrors are installed in each beamline to adapt the synchrotron radiation distribution of ANKA to the requirements of deep X-ray lithography, especially spectral distribution and power flux. The irradiation equipment consists of state-of-the-art X-ray scanners, which were developed together with JenOptik/Mikrotechnik and have been used at the light sources ELSA in Bonn and BESSY I in Berlin. The characterization and installation of deep X-ray lithography equipment at ANKA is scheduled for march 2001.

**Galvanische und aussenstromlose Methoden zur Herstellung metallischer Mikrostrukturen**

199

**Galvanic and electroless processes for fabrication of metallic microstructures**

K. Bade, A. Fath, M. Guttmann, E. Walch

This contribution deals with the methods of electroplating (of metals in lost forms) for fabrication of metallic microstructures developed in the Microsystems Technology Program of the Karlsruhe Research Center. Current developments are described and possible applications of these plating technologies are illustrated.

**Mikrostrukturierung von Stahl mit Hartmetallfräsern**

201

**Micromachining of Steel by Using Tungsten Carbide Micro End-mills**

T. Schaller

Micro end-mills with 100 µm diameter and less are ground from tungsten carbide and used for the micromachining of hardenable steel. The cut microstructures are deburred and the surface quality is enhanced by electrochemical polishing. Steel micromachining is used for the manufacture of prototypes as well as the fabrication of mechanically resistant mold inserts for the molding of microsystem components.

**Prägen von Mikrobauteilen ohne Restschicht**

203

**Plastic Microcomponents without Residual Layer by Hot Embossing**

M. Hecke, H. Dittrich

In this paper, a new technique shall be presented for the direct production of diced plastic microcomponents by hot embossing. The technique is characterized by hot embossing of a multi-layer consisting of different Polymers. A microstructured molding tool made of various materials structures only one polymer completely and penetrates into the second plastic material by some microns. After this process step the entire multi-layer can be put into a magazine to remove the partially structured polymer layer (base layer) from the microstructure. Now, the diced microstructures can be handled by pick- and place techniques. The complete manufacturing process has been run successfully for stepped gear made of polyoxymethylene (POM).

## **Werkstoffe und Abformverfahren für polymere, metallische und keramische Mikrobauteile**

**205**

### **Materials and Shaping Processes of Polymer, Metallic and Ceramic Microcomponents**

W. Bauer, D. Göhring, R. Knitter, V. Piotter

Among the numerous shaping processes that are used for the fabrication of microcomponents the injection molding has an outstanding significance, not only because of its well known suitability for large scale production, but also for the large number of process-modifications that enables its application to a great variety of materials. This aspect is demonstrated by an overview of polymer, metallic and ceramic materials which are processed by micro injection molding.

## **KomPas: Thermophysikalisches Prüfsystem für Mikrokomponenten**

**207**

### **KomPas: Thermophysical measuring system for thin films and microcomponents**

M. Rohde

KomPas (Compact Photothermal / Photoacoustic Apparatus) is a measuring system based on the generation and subsequent detection of thermal waves which can be used to determine thermophysical properties like the thermal conductivity and the thermal contact resistance in thin films and microcomponents. It can be also applied for nondestructive testing as well as for the measurement of adhesion within thin film systems. Due to its compact configuration it can be used for photothermal measurements outside the laboratory as a quality testing tool within a process line.

## **Fortschritte in der Mikrozugprüfung**

**209**

### **Progress in Micro Tensile Testing**

H. Schneider, M. Klotz, J. Aktaa

The micro tensile testing machine developed has been optimized by improving specimen clamping, force measurement, and strain measurement. The new type of specimen clamping allows testing of specimens with round tension shackles, i.e. wires or fibers. Sensitivity of force measurement has been increased for the strength of specimens with a small cross section (about  $100 \mu\text{m}^2$ ) being determined with sufficient accuracy. Based on the improved strain measurement, it was possible for the first time to carry out strain-controlled tensile tests of microspecimens and to determine major properties, e.g. Young's modulus with less scattering.

## **Komponenten zum Aufbau modularer Mikrofertigungssysteme**

**211**

### **Components for modular manufacturing equipment for microsystems**

U. Gengenbach, A. Hofmann, B. Köhler, E. Just, M. Kohl, F. Eberle, F. Engelhardt, R. Scharnowell

The Research Center Karlsruhe develops equipment for automatic assembly of hybrid microsystems. These activities are geared toward industrial applications and towards the assembly of in-house prototype products. Based on previous experience in the development and setup of a flexible assembly system the main strategy is now to develop modular manufacturing equipment. The emphasis is on feeding and material flow systems, grippers and gripper exchange systems as well as digital image processing for manufacturing equipment for microsystems.

The demand for exact positioning of mobile systems rises an extensive need for sensor modules suitable for position finding and navigation. They pick up the course of movement and indicate the location either relatively or, being backed by global or local reference systems, absolutely.

Today a reliable and exact determination of position and orientation is performed by precise inertial navigation units composed of expensive precise mechanics or optical components costing from 1000DM up to several 100000DM and/or a satellite navigation system (i.e. GPS). This kind of technology can be employed profitably only in large expensive high-tech devices.

Microsystems Technology today is able to produce inexpensive, very compact motion sensors with good properties by micromachining. This makes it feasible to produce novel, inexpensive and compact inertial navigation systems. Within the scope of the BMBF project 'KOMET' (Compact measuring modules for inertial technology) this objective is pursued. The Department of Data Processing and Electronics (HPE) will as a project partner administer its know-how in the field of precise read-out electronics for micromechanical sensor elements.

*Application Specific Integrated Circuits (ASICs)* are the appropriate way to build electronics for microsystems. At the *Department of Data Processing and Electronics (HPE)* *analog/digital ASICs* can now be designed »on site«. In this article we want to present why such an option is reasonable and important for microsystems technology and which are the distinguishing features of this kind of electronics design. Finally, we will give an example of an *analog/digital ASIC* developed at HPE.

For optimization of the overall performance of microsystems, the interactions between different physical properties (mechanical, fluidic, thermal, etc.) have to be taken into account. For this purpose, a program tool has been developed at the Research Center Karlsruhe, which allows application-dependent calls to different simulation programs (e.g. finite element programs) in arbitrary sequence and which manages their data transfer. As an example, the electrically generated temperature distribution in shape memory microvalves and the electrochemical growth of metallic microstructures are presented.

## **Entwurfssimulation mikrooptischer Systeme in Anwendung auf einen Heterodynemempfänger**

**219**

### **Designsimulation of Microoptical Systems in Application of a Heterodyne-Receiver**

I. Sieber, H. Eggert, H. Guth, W. Jakob, K.-P. Scherer, P. Ziegler

Manufacturing test structures of microsystems is a very expensive process, both in terms of time and money. For this reason, computer-supported design technologies ensuring continuous support in all design phases and, consequently, also consistency, are becoming more and more important in microsystems technology. The concept underlying this paper is the computer-aided design of a modular microoptical system rugged enough to be employed in mass fabrication. In mass fabrication, it is not the ideal arrangement of individual components which results in the most effective system. Instead, tolerances in positioning individual optical elements need to be taken into account already in modeling.

## **Aufbau und Montage von mikrooptischen Bänken am Beispiel eines Heterodynemempfängers**

**221**

### **Optical heterodyne receiver as an example for structuring and assembly of microoptical components**

S. Albatal, L. Berger, F. Königer, O. Krömer, J. Mohr, U. Wallrabe, P. Ziegler

As an alternative to transmitting information using intensity modulation, some lightwave transmitters perform this task by modulating the frequency or the phase of an optical carrier. Compatible lightwave receiver decode the information using homodyne or heterodyne detection techniques. The advantages of such systems are high receiver sensitivity and efficient use of fiber bandwidth. When compared with homodyne detectors, Heterodyne detectors simplify receiver design, in that neither optical phase-locking nor frequency matching of the local oscillation is needed. Such products can be made price-competitive by using the LIGA Process, through which highly precise adjustment aids can be formed. This enables a relatively simple passive assembly of optical components. For this reason, LIGA-process is considered to be an important way to reduce prices of optical receiver production. A heterodyne receiver prototype based on the above mentioned technology was realized by Institut für Mikrostrukturtechnik.

## **Optische 2x2-Schaltmatrix mit elektromechanischen Stellelementen**

**223**

### **Optical 2x2 switch matrix with electromechanical microactuators**

A. Ruzzu, J. Mohr, U. Wallrabe

In the rapidly developing optical telecommunication domain optical switch arrays lend themselves to the complex switching tasks. Therefore a prototype of an optical switch matrix with 2 in- and output channels has been developed. With the presented concept also switch arrays with more channels can be designed. The optical signals are detoured inside a microoptical bench by means of moveable micromirrors. The mirrors are placed by micromotors, which are structured together with the optical bench. Thus optical losses due to further assembly can be avoided. First prototypes have been fabricated and are currently investigated with regard to switching times and optical switching behavior.

**Commercial Products Based on the LIGA Microspectrometer**

P. Krippner, T. Kühner, A. Last, J. Mohr, S. Schönfelder

The microspectrometers developed by the Karlsruhe Research Center on the basis of the LIGA technology for use in the visible wavelength range are presently produced in series by the STEAG microParts company. In the meantime these modules which are mainly applied for color measurement form the key part of portable measurement systems for various applications. These measurement devices are developed, produced, and commercialized by companies having acquired long years of experience in the respective field of use.

Three examples of color measurement systems will be presented using the product information supplied by the respective companies: An instrument for determining the characteristics of colored surfaces (Spectro-pen, Dr. Lange GmbH), an instrument for non-invasive measurement of the bilirubin concentration of new-born children (Bili Check System, SpectRx Inc.), and a device for determining the color of diamonds (Diamond Colorimeter, Gran Computer Industries Ltd.).

**Weiterentwicklung von Spektrometersystemen für den NIR-Bereich****Further Development of Spectrometer Systems for the NIR Range**

P. Krippner, T. Kühner, S. Oppermann, A. Last, J. Mohr, P. Wicht

Successful commercialization of microspectrometers for the visible wavelength range (VIS) in color measurement technology gave rise to the development of a similar system for the near infrared range (NIR) from  $0.9 \mu\text{m}$  to  $1.75 \mu\text{m}$ . Besides other measurement tasks, the evaluation of the spectral information allows a chemical analysis of hydrocarbons, e.g. plastics and fuels, and a humidity measurement in food. As in the VIS range, this holds out the prospect of a market with a high number of applications.

The system is set up in a modular manner. It consists of the spectrometer module, in which opto-electric conversion and digitization of the spectral signal are accomplished, and the microcontroller module for further processing of the digital signals and communication with a host PC. The structure and functions of these components, the applied assembly and bonding technology as well as the properties of the entire system will be described.

**Elektromagnetisch angetriebener Mikrochopper****Electromagnetically driven microchopper**

P. Krippner, A. Fath, J. Mohr

There are numerous analysis tasks like gas detection in the infrared range that suggest the development of microspectrometers as they exist in the visible or near infrared in that range, too. Nevertheless, the development of spectrometer systems in that range showed that increasing detector noise in combination with decreasing intensity of the light sources cause signal to noise problems. To overcome those problems the use of detection methods that suppress noise (e.g. lock-in detection) have to be implemented into the system. To do so, an additional system element has to be integrated into the system to perform the intensity modulation of the light necessary in that case.

For this purpose an electromagnetic driven microchopper has been developed. It is integrated near the entrance slit of the microspectrometer without increasing the system volume. The integration concept, the functioning and the performance of the chopper are presented in the paper.

## **Dreistufige Mikrostrukturen am Beispiel eines Zyklogetriebes**

**231**

### **Three-stepped Microstructures for a cycloid-gear system**

H. Hein, S.J. Chung, J. Mohr, T. Akashi, T. Hirata

For a prototype of a micro-cycloid gear system with a diameter of 2mm and a total height of 1,15mm the components are fabricated by a multi-exposure LIGA technique. The three-stepped parts of the gear system are made out of electroplated Nickel with an individual height up to 485 $\mu$ m.

The fabrication process is presented within the session "applications". The poster is focused on the different parts of the micro gear. Some SEM photos are shown to demonstrate details of the gear-system, the proper quality of the parts and the functionality of the gear.

## **Mikroventile für ein fluidisches Baukastensystem**

**233**

### **Microvalves for a fluidic modular construction system**

M. Kohl, T. Rogge, W.K. Schomburg

At the Research Center Karlsruhe, the development of a modular construction system for fluidic applications is pursued as a long-term goal. This report presents two valve concepts as part of this construction system. The first concept makes use of a microfabricated shape memory thin film as a driving element. In the second concept, the bending motion of a piezo disc is transferred to the displacement of a valve membrane by a kind of hydraulic mechanism. The possibility of arbitrary combination of the valves with other fluidic components opens up a broad field of applications.

## **Einfluss der Luftfeuchtigkeit und anderer Umgebungsparameter auf AMANDA-Komponenten für die Mikrofluidik**

**235**

### **The Effect of Humidity and Other Parameters on AMANDA Components for Microfluidics**

R. Ahrens, Z. Rummler, W.K. Schomburg, C. Stingl, K. Wulff

Microfluidic components which are fabricated by the AMANDA process are made of polymers. Their material properties determine the effect of the change of environmental parameters on the microcomponents. This paper describes among others investigations the effect of humidity on the flow rate of micropumps and the effect of temperature on pressure sensors. The proper choice of the polymers and a design adapted to material properties reduces the effect of environmental parameters sufficiently and allows to make full use of the advantages of polymers.

## **Mikrokapillarstrukturen aus Kunststoff für die Biotechnologie**

**239**

### **Plastic Microcapillary Structures for Use in Biotechnology**

A. Guber, W. Bacher, E. Gottwald, M. Heckele, D. Herrmann, A. Muslija

Microcapillary structures for lab chips and micro/nanotiter plates to be used in biotechnology and life sciences contain various types of microchannels and microdepressions. For these structures being successful on the market as low-cost mass products, they will have to be fabricated from plastics to an increasing extent.

**SAW-Sensoren für die industrielle Prozeßanalytik**

241

**SAW sensor systems for industrial process analysis**

M. Rapp, A. Voigt, T. Wessa, J. Reibel

The new sensor system SAGAS (= surface acoustic wave aroma and gas analyzing system) is shown in the exhibition with its new more compact shape. Now, the system bases on a further miniaturized multiplex-controlled array consisting of eight polymer-coated surface acoustic wave (SAW) sensors. Discriminations within seconds of different organic gases, i.e. solvent vapors, are presented. Actual industrial applications at Schering AG are shown and explained on the poster. For such applications a special sensor system was developed for explosion protected industrial areas together with the license partner, Bürkert. Now, it is successfully used for a preparative process HPLC for the on-line control of a gradient mixer. Appropriate data analysis enables qualitative as well as quantitative determinations of eluent compositions. Quantitative analysis reveals pleasant low determination errors of better than 1% ! Meanwhile, the system is part of the routine operation and the used analytical methods were validated according to the German ICH guidelines. Moreover, the sensor system showed also exceptional properties for monitoring tasks of raw materials. Liquid and gaseous raw materials can now be identity checked just before usage in the factory. On-site, this enables a simple and fast possibility to avoid any confusion.

**Massenproduktion oxidischer Mehrschichtsysteme für Gassensormikroarrays**

243

**Mass Production of Oxidic Multi-Layer Systems for Gas Sensor Micro Arrays**

J. Fuchs, J. Benz, M. Bruns, J. Goschnick

In the framework of the PROXI project carried out under the sponsoring program "Production 2000" of the BMBF the Institute of Instrumental analysis (IFIa) together with industrial partners is developing a production process for a low cost mass production of gas sensor arrays for the "Karlsruher Mikronase" KAMINA. The IFIa is working on the further development of the shadow mask technique applied for structuring of the arrays. Furthermore, it is developing physical and chemical test procedures for establishing a quality management system for the production as well as tests for the gas sensitivity allowing for an examination of larger quantities of sensor arrays.

**Elektrisch beheizte Wärmeübertrager und Verdampfer mit Mikrokanalstrukturen**

245

**Electrically driven microstructure heat exchangers and evaporators**

J. Brandner, M. Fichtner, K. Schubert

Easily controllable heating of fluids in process technology is normally done either by electrical heating or heat transfer fluids. This paper shall give an overview on the design and the properties of electrically driven microstructure heat exchangers.

The prototypes developed have been made of stainless steel. An electrical power of about 15000 W could be realized. The electrically driven microstructure heat exchangers can be used for heating gases or liquids up to a maximum temperature of around 850°C. Because the microstructure heat exchangers are acting as flame arresters the devices can also be used for heating inflammable or explosive fluids. Beside this it is also possible to use electrically driven microstructure heat exchangers for evaporation of liquids or electrically heating of chemical reactions in microstructure systems.

<b>Künstliche Hand auf der Basis flexibler Fluidaktoren</b>	<b>247</b>
---	------------

<b>Artificial Hand based on flexible fluidic actuators</b>
--

S. Schulz, C. Pylatiuk
------------------------

The most wide-spread hand prosthesis has only a very limited pattern of motion and the movements appear to be robot-like. A new class of flexible fluidic actuators made possible the construction of an artificial hand which not only has natural movements, but also a wide range of motion-patterns.

<b>Liste aller ausgestellten Poster und Exponate</b>	<b>249</b>
--	------------

<b>Liste der am Programm Mikrosystemtechnik beteiligten Organisationseinheiten</b>	<b>250</b>
--	------------

<b>Liste der Autoren</b>	<b>250</b>
--------------------------	------------

## Begrüßung durch den Vorstand des Forschungszentrums Karlsruhe

P. Fritz

Vorstandsbereich 3

Sehr geehrte Damen und Herren,

im Namen des Vorstandes des Forschungszentrums Karlsruhe möchte ich Sie recht herzlich bei diesem 4. Statuskolloquium des Programms Mikrosystemtechnik begrüßen (PMT).

Doch zunächst einige Worte zum Forschungszentrum Karlsruhe. Es ist eine von 15 Großforschungseinrichtungen, die in der Hermann-von-Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) zusammengeschlossen sind. Innerhalb dieser Forschungsgemeinschaft ist das Forschungszentrum die drittgrößte Einrichtung mit ca. 3600 Mitarbeitern und einem Finanzvolumen von ca. 570 Mio. DM.

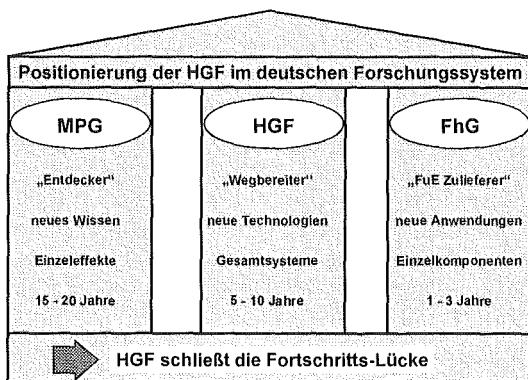


Abb. 1: Rolle der Hermann-von-Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) in der Forschungslandschaft

Als Wissenschaftsorganisation fördert die HGF den Erfahrungs- und Informationsaustausch ihrer Mitglieder, sorgt für die Koordinierung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, nimmt Aufgaben im gemeinsamen Interesse wahr und vertreibt die Belange der Helmholtz-Gemeinschaft nach außen. Ihre Grundfinanzierung in Höhe von ca. 3 Milliarden DM erhalten die Helmholtz-Zentren zu 90 Prozent vom Bund und zu 10 Prozent von den jeweiligen Sitzländern. Es sind rund 22500 Personen in den Zentren beschäftigt. In Übereinstimmung hiermit verfolgt das Forschungszentrum langfristige Forschungsziele des Staates in wissenschaftlicher Autonomie, die sich durch ein hohes Maß an Gemeinpflcht auszeichnen.

Die künftige programmatische Entwicklung der HGF-Zentren wird zunehmend von der Pro-

grammstruktur auf HGF-Ebene geprägt werden. Als Konsequenz dieser Programmorientierung ist beabsichtigt die Finanzierung der HGF-Zentren vollständig von der institutionellen Förderung auf eine wettbewerbsorientierte Mittelzuweisung über die HGF-Programme umzustellen. Damit rücken sowohl auf Ebene der HGF als auch auf der Ebene des Forschungszentrums als eines dieser Zentren die Forschungsprogramme als Leit- und Steuerungselemente gegenüber der klassischen Institutsstruktur in den Vordergrund.

Die künftige Entwicklung der wissenschaftlich-technischen Struktur des Forschungszentrums Karlsruhe soll mittelfristig in eine ausgewogene Programmstruktur mit drei gleichgewichtigen Programmen Umwelt, Energie und Schlüsseltechnologien (u.a. Mikrosystemtechnik) mit einem Anteil von je 25 % sowie den Programmen Gesundheitsforschung mit 15 % und Struktur der Materie (Grundlagenforschung) mit 10 % münden, d.h. 65 % Vorsorgeforschung, 25 % angewandte, industrieorientierte Forschung und 10 % erkenntnisorientierte Grundlagenforschung.

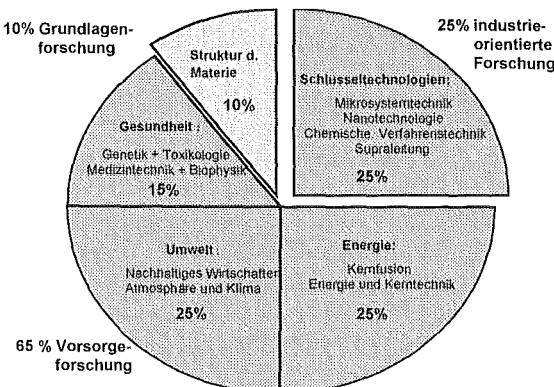


Abb. 2: Künftige Programmstruktur des Forschungszentrums

Seit 1998 bewerben sich die HGF-Zentren im Wettbewerb um Mittel aus dem HGF-Strategiefonds (jedes HGF-Zentrum hat 5 % seines Etats in diesen Fonds „eingezahlt“). Das PMT hat sich bei allen drei bisher erfolgten Ausschreibungen als federführendes HGF-Zentrum beteiligt und war 1998 und 1999 mit den Projekten „Material- und Verfahrensentwicklung für mikrotechnische Hochleistungsbauten“ (MALVE) und „Elektronische Mikronasen für Überwachungs- und Re-

gelaufgaben in Gebäuden und Produktionsanlagen" (ELMINA) erfolgreich.

Auch im Jahre 2000 bewirbt sich das PMT mit dem Projekt „Entwicklung und Fertigung mikrofluidischer Analysesysteme aus Polymeren mit integrierter Probebehandlung und Detektion“ (EFAPRO). Diese drei HGF-Projekte werden in späteren Vorträgen bei diesem Statuskolloquium ausführlich dargestellt.

### Einbindung FZK/PMT in der BRD

Im Rahmen seiner Forschungstätigkeiten arbeitet das PMT mit mehr als 50 Forschungseinrichtungen und Hochschulen zusammen, eine besonders enge Verbindung besteht dabei mit den Universitäten in Karlsruhe und Freiburg. Das PMT ist hierbei nicht nur über die Professuren der Institutsleiter, die im PMT mitarbeiten, an Universitäten angebunden, sondern auch durch eine Vielzahl von Diplom- und Doktorarbeiten.

In 20 Verbundprojekten werden die Arbeiten über das Forschungszentrum hinaus durchgeführt.

Im Rahmen von bilateralen Kooperationen und Lizzenzen werden jährlich ca. 50 Aufträge aus der Industrie bearbeitet, in der Vielzahl sind diese Aufträge von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU). Es werden dabei jährlich ca. 10 % an Drittmittel eingeworben. Diese Industriekooperationen beinhalten Arbeiten, die sowohl dem vorwettbewerblichen als auch dem wettbewerblichen Bereich zuzuordnen sind.

Um die Zusammenarbeit mit der Industrie auf eine neue und langfristig tragfähige Basis zu stellen, wurde auf Anregung des industriell geführten Projektbeirats Anfang 1999 das Forschungszentrum Karlsruhe Industrieforum Mikrofertigungstechnik (FIF) gegründet. Der Gründung ging eine intensive Diskussion mit der Industrie voraus, die sich besonders auf die von der Industrie gewünschten Leistungen bezog. Über diese Initiative zur Verbesserung des Technologietransfers im Bereich der Mikrosystemtechnik wird auch in einem späteren Vortrag näher berichtet werden.

### Arbeitsfelder des PMT im Forschungszentrum

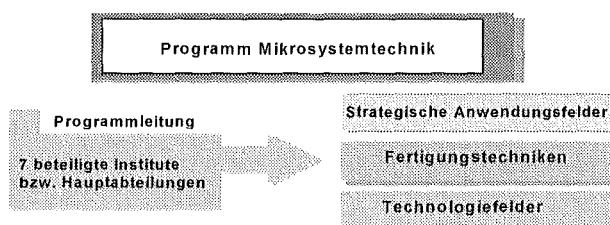


Abb. 3: Struktur des PMT und die Arbeitsthemen

Die Arbeitsfelder / Standbeine des PMT gliedern sich in Strategische Anwendungsfelder wie z.B. Mikroverfahrenstechnik, in Technologiefelder wie z.B. Mikrostrukturierungstechniken und in das Stichwort „Fertigungstechniken. In diesem Zusammenhang ist sicher besonders interessant dass das Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) seit dem 2. Dezember 1999 nach ISO 9001 zertifiziert ist und damit ein wichtiger Schritt in Richtung Qualitätssicherung im Forschungszentrum erreicht wurde.

Ganz allgemein gilt, das nicht nur einzelne Institute bezüglich ihrer Ausrichtung und Ihrem Erfolg jährlich überprüft werden, sondern auch das PMT selbst wird alle 5 Jahre, derzeit parallel zu dem Statuskolloquium von dem wissenschaftlich-technischen Ausschuss des Aufsichtsrats unter Nutzung externer Gutachter evaluiert.

### Ein wichtiger Punkt sind langfristige „Produktvisionen“

Neben kurz- und mittelfristig angelegten Arbeiten wird das PMT im Rahmen seiner bisherigen Strategischen Anwendungsfelder (Mikroverfahrenstechnik, Mikrooptik, Mikrofluidik und Gassensorik) langfristige „Produktvisionen“ mit einem Zeithorizont in der Größenordnung von 10 Jahren etabliert. Diese Fernziele werden dabei in mittelfristige Teilprojekte bzw. Meilensteine, sog. „Demonstratoren“ untergliedert. Die genaue Festlegung auf diese Produktvisionen und Demonstratoren bedarf einer ausführlichen Diskussion innerhalb des PMT, die gerade begonnen hat. Das Forschungszentrum wird in diese Diskussion auch externe Experten einbeziehen. Die Definition langfristiger Ziele ist keine einfache Aufgabe, da die Industrie – nach eigenen Angaben – heute noch nicht sicher sagen kann, wo solche „Produktvisionen“ angesiedelt sein sollten.

Mögliche Produktvisionen könnten sein:

- Implantierbare künstliche Organe / künstliche Gliedmaßen.
- Baukastensystem für Mikroverfahrenstechnik.
- Bioanalytische Mikrosysteme.

Ein wichtiges Stichwort ist hierbei die Interdisziplinarität unter Ausnutzung der spezifischen Möglichkeiten des Forschungszentrums als Großforschungseinrichtung.

Bei allen Arbeiten des PMT ist eine kontinuierliche Überprüfung der Märkte und Konkurrenzsituation (technologisch, institutionell) erforderlich.

Zum Schluß möchte ich Ihnen heute und morgen eine interessante und informative Vortragsveranstaltung wünschen.

## **Grußworte des Bundesministeriums für Bildung und Forschung**

Dr. Knut Bauer

Leiter der Abteilung „Neue Technologien, Informationstechnologie“  
im Bundesministerium für Bildung und Forschung

Sehr geehrter Herr Dr. Fritz,  
meine sehr geehrten Damen und Herren,  
ich freue mich, am 4. Statuskolloquium des Programms Mikrosystemtechnik im Forschungszentrum Karlsruhe teilnehmen zu können.

Frau Bundesministerin Bulmahn hat mich gebeten, dem Forschungszentrum Karlsruhe, den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Programms Mikrosystemtechnik, ihren wissenschaftlichen und industriellen Kooperationspartnern und den fachkundigen Gästen dieser Veranstaltung ihre herzlichen Grüße zu überbringen.

Gestatten Sie mir einige generelle Eingangsbermerkungen, ehe ich auf den Anlass des heutigen Statusseminars, die Darstellung des Standes der Forschung zur Mikrosystemtechnik und der Bewertung der Chancen und deren Bedeutung dieser Technologie aus der Sicht der Bundesregierung kurz eingehe.

In der aktuellen Bildungs- und Forschungspolitik so scheint es – wenn man auf die Berichterstattung der Medien schaut – wird derzeit wenig über Forschung und Entwicklung gesprochen – viel dagegen über

- Bildungs- und Ausbildungsnotstand,
- Mangel an qualifizierten Arbeitskräften,
- Wege in die Wissensgesellschaft, verbunden mit der Aufforderung zum lebenslangen Lernen,
- und über den Zwang zu ständiger Innovation und Wettbewerb.

Dies sind in der Tat drängende Probleme. Wir alle sind betroffen. Es sind wichtige Faktoren für unsere wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung. Maßnahmen zur Lösung der damit verbundenen Probleme erfordern daher zu recht hohe politische Aufmerksamkeit.

Die Antworten der Bundesregierung, der Länder, der Wirtschaft und zahlreicher Organisationen auf diese Herausforderungen sind in jüngster Zeit bemerkenswert und erfreulich.

In wohlverstandener public-private-partnership werden fast täglich neue Aktivitäten bekannt und überwiegend zustimmend diskutiert. Einige Stichworte hierzu:

- die D21 Initiative der IT-Wirtschaft gemeinsam mit der Bundesregierung, einer Bildungsinitiative auf allen Ebenen: Schule, berufliche Ausbildung, Studium, Fort- und Weiterbildung in den Betrieben,
- Aktionen großer Unternehmen zum Thema „Schulen ans Netz“ mit kostenlosem bzw. kostengünstigem Internetzugang, technischer Ausrüstung der Schulen, Lehrerfortbildung;
- unserer Initiative zur Entwicklung von Bildungssoftware.

Dies alles vermittelt das Gefühl von Dynamik und Aufbruch, einer Entwicklung, die nachhaltig zu sein verspricht.

Wenn sich dies bestätigt, besteht berechtigte Hoffnung, dass eine wichtige Qualität in unserem Lande, gut ausgebildete, hochqualifizierte Menschen zu haben, erhalten bleibt. Sie sind eine notwendige Voraussetzung für die Entwicklung einer modernen Gesellschaft und einer global wettbewerbsfähigen Wirtschaft. Ich denke, es ist für uns, stark an Forschung und Entwicklung neuer Technologien interessierter, verständlich, dass der dringende Handlungsbedarf in diesem kritischen Bereich besondere politische Aufmerksamkeit erfordert.

Dies umso mehr, als wir bei den anderen wichtigen Standortfaktoren einer international starken industriellen Basis in der Produktion hochwertiger Güter, in der Innovationsfähigkeit der Unternehmen, in der Leistungsfähigkeit einer breiten Forschungsbasis eine solide Ausgangsposition besitzen. Dies hat nicht zuletzt der jüngste Bericht zur technischen Leistungsfähigkeit Deutschlands bestätigt.

Im Bereich der technologischen Innovationen, in der Produktion neuer Güter geht es weniger darum, Schwächen auszugleichen als vielmehr darum, Kontinuität in der Innovation zu erhalten, neue technologische Optionen, neue Produkte und deren Märkte rechtzeitig zu erkennen und systematisch zu entwickeln.

Eine dieser technologischen Optionen ist die Mikrosystemtechnik. Sie zählt zu den vielversprechendsten Technologien des beginnenden Jahrhunderts.

Neue Technologien, wie zum Beispiel die Nanotechniken und die Biotechnologie können in Mikrosysteme integriert und damit anwendbar gemacht werden. Auch der zunehmenden Bedeutung optischer Technologien für innovative Produkte kann durch die kostengünstige Herstellung mikrooptischer Systeme in großen Stückzahlen Rechnung getragen werden.

Mit Mikrosystemtechnik können wir nicht nur bestehende Produkte erheblich verbessern oder kostengünstiger gestalten. Mikrosystemtechnik schafft vor allem die Möglichkeit zu völlig neuen Produkten. Bereits heute werden viele technische Entwicklungen in diesem Bereich in innovative Produkte umgesetzt und vermarktet. Ein Beispiel aus dem FZK, das Mikrospektrometer, das hier entwickelt wurde und jetzt vom Industriepartner – der Firma Steag microParts – für vielfältige Anwendungen kommerzialisiert wird.

In Deutschland hat die Mikrosystemtechnik einen hohen Entwicklungstand. Sie ist vor allem in Branchen, in denen Deutschland eine starke Wettbewerbsposition hat, dem Automobilbau, dem Maschinen- und Anlagenbau, der Produktions- oder der Umwelttechnik von strategischer Bedeutung.

Schon heute sind zahlreiche Produkte „Made in Germany“ ohne Mikrosystemtechnik nicht mehr denkbar. Im Automobil beispielsweise werden die Mikrosysteme von den Nutzern meist gar nicht bewusst wahrgenommen. In ihren Funktionen werden sie aber als selbstverständlich vorausgesetzt. Ohne den Airbagsensor, ohne Antiblockiersysteme, ohne Fahrdynamikregelungen und effizientes Motormanagement lassen sich Autos heutzutage kaum noch verkaufen.

Die Mikrosystemtechnik entwickelt sich mit entsprechend großer Dynamik. Am Markt für Mikrosystemtechnik beobachten wir seit einigen Jahren enorme Wachstumsraten. Eine im Auftrag der EU erstellte Marktstudie prognostiziert für den Zeitraum von 1996 bis 2002 eine Verdreifachung des Umsatzes für Mikrosysteme. Für das Jahr 2002 wird weltweit ein Marktvolumen von 40 Mrd. US \$ prognostiziert.

Deutschland verfügt derzeit im internationalen Wettbewerb über eine ausgezeichnete Position:

- Bund und Länder haben die Entwicklung der Mikrosystemtechnik während der vergangenen Jahre intensiv gefördert.
- Wir haben in Forschungseinrichtungen und Hochschulen eine hervorragende Wissenschaftsbasis, die ständig verbreitert wird. Die

Zahl qualifizierter Ingenieure nimmt wieder überproportional in den relevanten Fachgebieten zu.

- Und wir haben eine breit gefächerte und internationale wettbewerbsfähige Industrie.

Aber die internationale Konkurrenz schlägt nicht. Auch andere führende Industrienationen, allen voran die USA und Japan, haben die Potenziale der Mikrosystemtechnik erkannt und nutzen sie.

Es wäre daher Illusion zu glauben, dass sich die vorhandenen Potenziale der Mikrosystemtechnik ohne besondere Anstrengung realisieren. Wenn wir diese Chancen in Deutschland in Unternehmen, die hier im Lande fortentwickeln und produzieren, nutzen wollen, dann

- müssen wir unser Know-how in Forschung und Industrie bündeln und zielgerichtet erfolgsträchtige Anwendungsfelder erschließen,
- müssen wir weiterhin dafür sorgen, dass auch mittelständische und kleine Unternehmen ohne ausreichende Entwicklungskapazität die Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik erfolgreich nutzen können.

Mit dem Förderkonzept Mikrosystemtechnik 2000+ wird die Bundesregierung diesen Prozess gezielt auf Touren bringen. Wir haben dafür ein ganzes Bündel von Maßnahmen gestartet:

- Wir fördern industrielle Verbundprojekte.
- Wir verbessern mit unterstützenden Maßnahmen die Rahmenbedingungen für Innovationen.

Dafür sind in den nächsten vier Jahren Fördermittel von rd. 100 Mio. DM pro Jahr vorgesehen.

Wir ermöglichen darüber hinaus auch in Absprache mit den anderen öffentlichen Förder- und Wissenschaftsorganisationen eine angemessene Grundlagenforschung.

Meine Damen und Herren,

wir wollen gemeinsam, dass das breite Potenzial der Mikrosystemtechnik möglichst schnell für neue Produktentwicklungen erschlossen wird. Wir wollen, dass die deutsche Industrie in dieser Schlüsseltechnologie auch weiterhin eine internationale Spitzenposition einnimmt.

Das PMT und seine Kooperationspartner aus Universitäten und Unternehmen leisten hier einen wichtigen Beitrag. Ich will dies an einem weiteren Beispiel deutlich machen: der sogenannten „Elektronischen Nase“. Dieses Messgerät wurde hier im Forschungszentrum entwickelt. Heute wird es von einem Unternehmen in Lizenz hergestellt und vertrieben. Zu den wichtigsten Anwendern gehört die chemische Industrie.

Die Produkte und ihr Nutzen sind natürlich die am besten kommunizierbaren Ergebnisse einer Technologie. Von gleicher, für die Wirtschaftlichkeit sogar von höherer Bedeutung, sind aber die entsprechenden Fertigungstechnologien für die Mikrosysteme. Dieser Teil der Arbeiten des Forschungszentrums soll ja daher heute auch im Mittelpunkt des Statusseminars stehen.

Vielversprechende Produktkonzepte dürfen nicht daran scheitern, dass keine geeigneten Fertigungstechnologien zur Verfügung stehen. Unternehmen, vor allem auch KMU's mit innovativen Produktideen sind nur dann in der Lage, diese auch umzusetzen, wenn die Produktionstechnik verfügbar und beherrschbar ist bzw. in bestehende Produktionslinien integriert werden kann.

Kooperation zwischen Forschung und Unternehmen auf so anspruchsvollem Niveau erfordert Lern- und Anpassungsprozesse auf beiden Seiten. Im Dialog mit der Industrie hat das Programm Mikrosystemtechnik sein Angebot weiterentwickelt und auf die Anforderungen der Wirtschaft ausgerichtet.

Exemplarisch dafür steht die Zertifizierung des Instituts für Mikrostrukturtechnik nach ISO 9001, die industriellen Qualitätsstandard der Produkte und Verfahren garantiert.

Unter Mitwirkung der Industrie wurde außerdem vor einem Jahr das Karlsruher Industrieforum für Mikrofertigungstechnik gegründet. Ich bin sicher, dass dieses Forum den Technologietransfer im Bereich der Mikrofertigung noch weiter voranbringen wird, aber gleichzeitig auch dazu beiträgt, neue Forschungs- und Anwendungschancen zu erschließen.

Das Potenzial der Mikrosystemtechnik ist bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Wir stehen erst am Anfang einer breiten industriellen Nutzung. Langfristig reicht es daher nicht aus, die bestehenden Techniken kontinuierlich weiterzuentwickeln. Wir brauchen auch Optionen für die Zukunft.

Ein wichtiger Schwerpunkt im PMT ist darum die vorwettbewerbliche Grundlagenforschung. Hier werden die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen für künftige Entwicklungen gelegt, und hier werden neue industriell attraktive Anwendungsbereiche erschlossen.

Meine Damen und Herren,

lassen Sie mich zum Schluss noch eines bemerken: das PMT deckt die gesamte Spannweite von einer visionären Idee bis hin zur Umsetzung in industrierelevante Demonstratoren ab. Dies kann nur in einem großen Forschungszentrum wie dem FZK mit entsprechenden Ressourcen erfolgen, bedarf aber der ständigen Kommunikation und Kooperation mit potenziellen Anwendern und Nutzern der Technologie.

Für die zunehmende Interaktion mit den industriellen Partnern gibt es wichtige Indikatoren:

Während der vergangenen beiden Jahre konnte das PMT 10% seines Aufwandes über Mittel aus der Industrie finanzieren. Weitere 40% der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden in gleichgewichtigen Kooperationen mit Industrieunternehmen durchgeführt. Über diese Ergebnisse freue ich mich sehr. Damit haben Sie die Auflagen des Aufsichtsrates nicht nur erreicht, sondern zum Teil sogar weit übertroffen.

Die Mikrosystemtechnik wird künftig einer der Schwerpunkte im neustrukturierten HGF-Forschungsprogramm sein und ist als eine der Schlüsseltechnologien explizit ausgewiesen. Damit bekommt die Mikrosystemtechnik auch innerhalb der HGF eine zunehmend breitere Basis. Allerdings wird bei begrenzten Ressourcen auch der Wettbewerb der guten Konzepte innerhalb des Technologiefeldes aber auch zwischen den Technologien härter. Das FZK hat mit dem PMT hier eine gute Ausgangsposition.

Die Einführung und Etablierung von neuen und innovativen Technologien erfordert Durchhaltevermögen und bedarf eines langen Atems. Die Resonanz, die dieses Statusseminar bei den Partnern des FZK aus Industrie und Forschung erfährt, dokumentiert die Leistungen des PMT in den letzten Jahren. Ich hoffe, dass diese erfolgreiche Partnerschaft gefestigt und ausgeweitet wird.

In diesem Sinne wünsche ich allen Teilnehmern an diesem Statuskolloquium weiterhin viel Erfolg bei der Entwicklung und industriellen Umsetzung der Mikrosystemtechnik



## Grußworte der Landesregierung Baden-Württemberg

A. Tschermak von Seysenegg  
Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg

Meine sehr geehrten Damen und Herren,  
ich begrüße Sie im Namen der Landesregierung  
Baden-Württemberg beim 4. Statuskolloquium  
Mikrosystemtechnik.  
Insbesondere darf ich Ihnen die Grüße von Wirtschaftsminister Dr. Döring überbringen, der heute leider nicht selbst anwesend sein kann.

### Schlüsseltechnologie Mikrosystemtechnik

Die Mikrosystemtechnik wird sich zu einer Schlüsseltechnologie für die Wettbewerbsfähigkeit einer Nation entwickeln. Dies ist eine der Kernaussagen eines Gutachtens zum Thema „Wirtschaftliche Potenziale der Miniaturisierung aus industrieller Sicht“, das das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg in Auftrag gegeben hat. Das Gutachten wurde erstellt vom Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe, dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe und dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Stuttgart.

Ziele der Untersuchung, die jetzt gerade etwa vor einem Jahr vorgestellt wurde (Februar 1999), waren empirische Erhebungen in den USA, Japan und Deutschland zur Entwicklungsdynamik der industriellen Miniaturisierungspotenziale, zu Strategien und Wettbewerbspositionen wichtiger Akteure, zu Innovations- und Diffusionshemmnissen sowie zu konkurrierenden Technologiepotenzialen.

Allen drei Ländern ist nach der Studie gemeinsam, dass keine euphorische Haltung von großen Unternehmen gegenüber der MST zu spüren ist. Miniaturisierungspotenziale werden zwar auf breiter Front erkannt, technische Lösungen dafür jedoch nicht unter dem Gesichtspunkt der innovativen Technologie gesucht, sondern unter dem Aspekt der technisch-wirtschaftlich günstigsten Lösung geprüft. Unternehmen wollen sich nicht mit Technik profilieren, wenn deren Miniaturisierungsmöglichkeit weit über den benötigten Miniaturisierungsbedarf hinausgeht und technisch und kostenmäßig noch erhebliche Risiken enthält.

Diese zurückhaltende Haltung schlägt sich in Marktprognosen zur Mikrosystemtechnik nieder, die für das Jahr 2002 eine Spannweite von etwa

7-8 Mrd. US-Dollar bis zu rd. 40 Mrd. US-Dollar voraussagen.

In diesen ersten Aussagen der Studie zeigt sich das Dilemma der Mikrosystemtechnik: Einerseits ist sie technologisch an vorderster Front mit exzellenten Ergebnissen und Anwendungsmöglichkeiten. Auf der anderen Seite haben wir eine hinsichtlich der Anwendungen und der Einsatzfelder recht zögerliche Industrie. Wir haben einerseits die Hauptschrittmacher der Miniaturisierung im Bereich der Automobilindustrie, der Informations- und Kommunikations-Industrie für Massendatenspeicher und Telekommunikation, biotechnologische und medizintechnische Unternehmen und einige andere mehr; auf der anderen Seite haben wir aber heute die vielen Industriebereiche, besser eigentlich Produktbereiche, bei denen miniaturisierte Systeme durchaus eingesetzt werden könnten, aber eben noch nicht eingesetzt werden.

Deutschland fügt sich – bei vielen wesentlichen Unterschieden hinsichtlich Technologien und Strategien zu den beiden anderen verglichenen Nationen USA und Japan – in dieses Gesamtbild durchaus ein: Deutschland verfügt über einen weltweit als führend angesehenen und in seiner Breite singulären Entwicklungsstand in nahezu allen relevanten Mikrostrukturierungstechnologien, und zwar was die halbleiterbasierten wie auch die nichthalbleiterbasierten Systeme angeht. Technologisch führende Miniaturisierungsentwicklungen werden jedoch zu einem großen Teil im wissenschaftlichen Institutssektor durchgeführt, der dann die Aufgabe hat, den zurückhaltenden Unternehmenssektor von der Mikrosystemtechnik zu überzeugen.

Die industrielle Akteurslandschaft wird dagegen von wenigen Großunternehmen und einer größeren Anzahl mittlerer Unternehmen geprägt, deren Kernkompetenz durch kundenorientiertes Applikationsengineering geprägt ist. Schrittmachermarkt ist hierbei die Automobilindustrie, die ich hier als großen Verbund von Kraftfahrzeugherstellern und Kraftfahrzeugzulieferern verstehe, aber auch die IT-Industrie. Sehr vereinfachend gesagt und sicherlich unter Weglassen von zahlreichen gebotenen Differenzierungen: Wir haben auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik eine exzellente Forschungsinfrastruktur, die sehr industrierelevant zu arbeiten in der Lage ist und dieses auch tut; es gibt aber nur relativ wenige industriell gefertigte

Großserienprodukte, bei denen sich die hohen Kosten für Know-how-Erwerb und Fertigung durch die großen Stückzahlen letztlich wirtschaftlich rechnen.

### **Die Frage liegt nahe: Was ist zu tun?**

„Kommunikation und Kooperation zwischen allen Akteuren des Innovationssystems müssen deutlich verbessert werden“. So werden die Herren Weule und Grupp, die beide an der Studie beteiligt gewesen sind, anlässlich der Vorstellung der Studie zitiert. Die Unternehmen müssten die Forschungsarbeiten der Institute viel aktiver beobachten und ihrerseits die Institute besser über die eigenen Anforderungen informieren, da damit der Grundstein für den späteren Markterfolg gelegt wird. Auch soll die Industrie wesentlich stärker in die Verantwortung für anwendungsnahe Technologieförderung genommen werden.

Genau dies tun wir, genauer gesagt Sie meine Damen und Herren, hier beim 4. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik. Hier findet Information, aber auch Kommunikation zwischen Wissenschaft und Industrie über wissenschaftliche Ergebnisse, Anwendungsmöglichkeiten, aber auch über Anforderungen aus Sicht der Anwendersseite statt. Für mich ist das Statuskolloquium ein ganz zentraler Punkt des Gesamtprojektes Mikrosystemtechnik: Denn nur über aktives Bekannt machen der Ergebnisse, der Entwicklungstrends, der laufenden Arbeiten, aber auch über Rückkopplung mit der potenziellen Anwendersseite kann ein so großes Projekt wie dieses seine wirtschaftsrelevante Zielsetzung auch wirklich erreichen. Deshalb ist das Statuskolloquium ein essenzieller Teil des Gesamtprojektes und deshalb freue ich mich, dass das Statuskolloquium eine so große Resonanz gefunden hat. Dafür herzlichen Dank an die Veranstalter und an alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer. Das Statuskolloquium hat die nachhaltige Unterstützung des Landes, weil nur durch den kommunikativen Dialog zwischen Wissenschaft und Wirtschaft – und zwar nicht nur in einer Einbahnstraße – ein echter gegenseitiger Transfer erreicht werden kann.

### **Weitere Maßnahmen**

Auf Seiten des Landes konzentrieren wir uns nicht nur auf das Projekt Mikrosystemtechnik und das Statuskolloquium. Wir versuchen vielmehr, den Dialog zwischen Wissenschaft und Wirtschaft durch weitere Maßnahmen zu initiieren oder zumindest dazu beizutragen. Der Dialog kann nicht breit genug angelegt werden. Dabei möchte ich gleich mit zwei Maßnahmen hier in Karlsruhe beginnen:

### **1. ANKA**

Die Synchrotronstrahlenquelle hier im Forschungszentrum, gleich nebenan, geht ihrer Fertigstellung entgegen. Im Oktober wird die Anlage eingeweiht. Nach bisherigen Informationen von Prof. Saile, dem wissenschaftlichen Leiter des Projektes, dem ich an dieser Stelle meinen Dank und meine Anerkennung für seine hervorragende Arbeit aussprechen möchte, erfüllt die Anlage bisher alle in sie gesetzten Erwartungen. Ich will jetzt hier nicht von den technischen Details oder von Geld reden. Viel wichtiger ist in diesem Zusammenhang – weil dialogbezogen – die Organisationsform für den Betrieb dieses technischen Großgerätes. ANKA wird nämlich nicht als Anlage des Forschungszentrums betrieben, sondern ist einvernehmlich zwischen Bund, Forschungszentrum und Land in eine eigenständige nicht gemeinnützige, d.h. marktorientierte Gesellschaft ausgegliedert worden. ANKA muss sich deshalb am Markt durchsetzen, d.h. seine Dienstleistungen aktiv an seine potenziellen Abnehmer, seien sie aus Wissenschaft oder Industrie, verkaufen. Hier ist also echtes Marketing gefragt und ganz konkretes Aufzeigen, was die Anlage kann und was man vor allem mit ihr machen kann, kurz: gefordert ist ein durch und durch kunden- und damit dialogorientiertes Handeln. Für Wissenschaftler, die ein Großgerät entwickeln, errichten und betreiben, ist dies ohne Frage eine Herausforderung völlig neuer Art: Denn auch wenn Bund, FZK und Land als Investoren ANKA letztlich nicht im Stich lassen werden, so werden doch ganz andere Anforderungen an das ANKA-Team gestellt, als dies bei einer auf wissenschaftliche Ergebnisse und Erkenntnisfindung ausgerichtete Großgerätebetriebsmannschaft der Fall ist.

### **2. Industrieforum Mikrofertigungstechnik**

Das zweite Stichwort berührt ebenfalls das Forschungszentrum Karlsruhe und wird Ihnen während dieses Statuskolloquiums noch ausführlich vorgestellt werden, weshalb ich es hier nur kurz erwähnen möchte, nämlich das Industrieforum Mikrofertigungstechnik mit der passenden Abkürzung FIF. „Brückenschlag vom Labor zum Markt“ ist der Vortrag heute Nachmittag übertitelt – und genau das soll es sein. Kompaktes und kompetentes Leistungs- und Beratungsangebot auf hohem Niveau, ausgerichtet auf die industriellen Anwender als Kunden – das kennzeichnet das FIF, das ich als ein wichtiges Stellglied in dem notwendigen Kommunikations- und Kooperationsprozess sehe.

### 3. Foundry-Konzept bei der Hahn-Schickard-Gesellschaft

Foundry-Konzepte sind fraglos inzwischen nicht mehr ganz neu; das Projekt Mikrosystemtechnik mit seinem Technikum hier in Karlsruhe ist im Grunde auch zumindest in Teilen ein solches Konzept. Auf dem Gebiet der halbleiterbasierten Mikrosysteme erprobt derzeit das Institut für Mikro- und Informationstechnik der Hahn-Schickard-Gesellschaft in Villingen-Schwenningen im Rahmen eines Verbundforschungsvorhabens ein weiteres Konzept dieser Art, an dessen Ausbau uns als Land nachdrücklich gelegen ist. Schon wegen der unterschiedlichen Technologien im Verhältnis zu Karlsruhe ist uns an diesem Konzept gelegen, weil wir damit in Baden-Württemberg ein ebenso breites wie hoch qualifiziertes Angebot für Mikrosysteme an die Industrie machen können. Ganz konkret übernimmt das IMIT in Villingen-Schwenningen das Design, den Prototypbau und die Fertigung von ersten Kleinserien. Die Serienfertigung mittlerer Stückzahl soll später auf bestehenden Fertigungseinrichtungen großer Firmen erfolgen. Hierzu wird das Design und die Fertigung beim IMIT von Anfang an auf die Anforderungen dieser Serienfertigungslinien abgestimmt, so dass der Übergang problemlos ist. Mit diesem Konzept wollen wir auch kleineren Firmen den schrittweisen Einstieg in die Produktion von Mikrosystemen erleichtern.

Auf einem wichtigen Feld wurde dieses Konzept inzwischen ergänzt. Das Institut für Feinwerk- und Zeitmesstechnik an der Universität Stuttgart, dessen Träger ebenfalls die Hahn-Schickard-Gesellschaft ist, wurde inhaltlich und strukturell völlig neu auf die Aufbau- und Verbindungstechnik und vor allem auf die Häusungstechnik ausgerichtet. Die Ziele dieser neuen Arbeitsrichtung liegen in technologischen Entwicklungslinien und Fertigungstechnik für neue Gehäuse einschließlich der Kontaktierungsprobleme. Die Hahn-Schickard-Gesellschaft verfügt mit dem Foundry-Konzept in Villingen-Schwenningen und dem neuen Arbeitsschwerpunkt in Stuttgart damit praktisch über eine vollständige Wertschöpfungskette ebenso wie über eine komplette Produktlinie: Sie bietet Mikrosysteme (auf Halbleiterbasis) einschl. Verpackung – sozusagen den kompletten Bausatz für alle Verwendungsmöglichkeiten.

### 4. Verbundprojekte

Vor allem für kleine und mittlere Unternehmen ist der Schritt zur Mikrosystemtechnik vielfach noch sehr schwierig und keine triviale Unternehmensentscheidung. Dies hat sicherlich mehrere Gründe; die wichtigsten zwei sind:

- Mangelndes Know-how und fehlende Forschungskapazitäten. Vielfach fehlt Firmen, die von der Feinwerktechnik kommen, die Erfahrung im Bereich Elektrotechnik und Informationstechnik.
- Mikrosystemtechnik erfordert ganz neue Fertigungstechniken, die keinen fließenden Übergang von der Feinwerktechnik erlauben. Die Fertigungsanlagen selbst erfordern hohe Investitionen und rechnen sich nur für relativ große Stückzahlen.

Unsere Hilfe für diese Unternehmen konzentriert sich deshalb auf diese beiden Problem-bereiche. Zur Beseitigung von Wissens- und Erfahrungsdefiziten haben sich in ganz besonderem Maße Verbundprojekte bewährt, bei denen mehrere mittelständische Unternehmen mit einem oder mehreren Forschungsinstituten zusammen ein gemeinsames Thema, in der Regel im vorwettbewerblichen Bereich, bearbeiten. Durch die auf Gegenseitigkeit angelegte Kooperation, auch zwischen den Unternehmen, entsteht ein breites Erfahrungswissen, in das die Unternehmen sich zu vergleichsweise günstigen Konditionen hineinarbeiten können, denn die Kosten eines solchen Projektes werden je zur Hälfte von den Unternehmen und der öffentlichen Hand getragen. Der Erfolg mit solchen Projekten, den wir aus der Resonanz der Unternehmen, sowohl was die Beteiligung wie auch was die Ergebnisverwertung angeht, abzulesen glauben, gibt uns bislang Recht. Dies ermutigt uns, auch in naher Zukunft wieder Verbundprojekte und zwar auch auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik aufzulegen. Ich bin recht zuversichtlich, dass wir aus weiteren Privatisierungserlösen wieder Mittel zur Verfügung stellen können, um technologie- wie marktorientierte Projekte auch im Bereich der Mikrosystemtechnik anzustoßen. Ich würde mich freuen, wenn gerade hier aus dem Teilnehmerkreis des Statuskolloquiums sich eine Reihe von Firmen zu einer Projektbeteiligung entschließen könnten. Denn mit den Verbundprojekten sollen ja gerade die Probleme der Unternehmen gelöst werden. Ich möchte Sie deshalb ganz herzlich dazu einladen und auffordern, Themen für solche Projekte zu definieren und von sich aus in dieser Richtung aktiv zu werden. Sie, meine Damen und Herren, tun sich damit selbst den besten Dienst.

Ich wünsche Ihnen zwei interessante Tage hier beim Statuskolloquium und einen regen und konstruktiven Gedankenaustausch.



## Ansprache des Vorsitzenden des PMT-Projektbeirats

### Mikrosystemtechnik: Von der Vorlaufforschung zur industriellen Anwendung

S. Paasche

Daimler-Chrysler AG, Geschäftsbereich Mercedes-Benz Lkw, Entwicklung Technische Systeme

Meine sehr geehrten Damen und Herren,  
ich habe meinen heutigen Beitrag unter das Thema gestellt: „Mikrosystemtechnik: Von der Vorlaufforschung zur industriellen Anwendung“.

Viele Vertreter aus Forschung und Industrie, mit denen ich diskutiert habe, sprechen der Mikrosystemtechnik ein umfangreiches Innovationspotential zu. Dies entspringt oft einer Einschätzung aus dem Bauch heraus, die sich bei der Konkretisierung in reale Produkte meistens nur schwer erfüllt. Es entsteht der Eindruck, die Mikrosystemtechnik könnte viel leisten, man müsste dieses Potential nur richtig umsetzen können. Und genau hier ergeben sich die meisten Schwierigkeiten.

In einem solchen Umsetzungsprozess sind die Beteiligten aus der Industrie und der Forschung bei einem sehr hohen zeitlichen Anspannungsgrad gefordert, möglichst effizient zusammenzuarbeiten. Dazu ist es notwendig eine geeignete Basis für die Zusammenarbeit zu finden. Wie diese aussehen kann, darauf möchte ich später noch genauer eingehen.

Meine Damen und Herren, unsere täglichen Erfahrungen zeigen uns, Innovationen entstehen nicht zufällig und auch nicht in einem Augenblick. Erfolgreiche Innovationen sind in den allermeisten Fällen das Endprodukt eines mehr oder weniger langen und intensiven Innovationsprozesses.

Am Anfang des Innovationsprozesses steht die Idee einer Innovation. Diese Idee kann auf Basis von eigenen Erfahrungswerten entstehen, oder durch eine gezielte Ideenfindung. Interessanter und meist auch effizienter ist hierbei der zweite Ansatz. Ein geeigneter Ideenfindungsprozess erzeugt eine größere Ideenvielfalt, aus der dann die besten Ideen ausgewählt werden können.

Das bedeutet aus Sicht der Industrie, dass es notwendig ist eine Plattform zu finden, die möglichst viel Information zur Ideengenerierung zur Verfügung stellt. Dies können Unternehmen durchaus selber leisten, indem sie z.B. weltweit in

den relevanten Konferenzen und Gremien vertreten sind (erlauben Sie mir eine Anmerkung: nur wenige Unternehmen können und wollen sich das leisten), oder indem sie sich ein geeignetes Fenster zur weltweiten wissenschaftlichen Entwicklung suchen, das diese Funktion günstiger und mit entsprechender Kompetenz umfassend wahrnehmen kann.

Meine Damen und Herren, für eine solche Aufgabe ist eine Großforschungseinrichtung mit ihren vielfältigen Kompetenzen und weltweiten Verbindungen nahezu in idealer Weise geeignet.

Sie werden vielleicht fragen, warum diese Aufgabe nicht bereits durch die bestehenden Möglichkeiten umfassend gelöst wird. Es gibt viele öffentliche wissenschaftliche Veranstaltungen, die als Fenster zur wissenschaftlichen Welt dienen können.

Dies schätze ich durchaus auch so ein, aber meine Damen und Herren, Innovationsideen werden nicht, und bitte verzeihen Sie mir diesen Ausdruck, auf dem „wissenschaftlichen Marktplatz“ gehandelt. Dazu sind solche Überlegungen viel zu brisant für den geschäftlichen Erfolg.

Nicht Öffentlichkeit, sondern Vertraulichkeit ist hierbei unbedingte Voraussetzung.

Dies wird heute zumeist durch bilaterale und vertraglich gesicherte Zusammenarbeit erreicht. Wobei hier ein wesentlicher Aspekt fehlt: Die Diskussion und der Austausch der Potentiale mit mehreren Industrievertretern sowie der Unternehmen untereinander in einem gemeinsamen und vertraulichen Rahmen. Selten ist ein Unternehmen alleine in der Lage eine neue Technologie erfolgreich am Markt umzusetzen. Hilfreich ist es, mit anderen Unternehmen gemeinsame Win-Win-Situationen zu entdecken, und diese konsequent zu nutzen. Dies kann zu einer sehr fruchtbaren Zusammenarbeit mehrerer Unternehmen führen und den Innovationsprozess erheblich beschleunigen.

Die Großforschungseinrichtung mit ihren umfangreichen Möglichkeiten hat dabei folgende Aufgaben:

1. eine geeignete Wissens- und Lernplattform für die Unternehmen zur Verfügung zu stellen
2. als Multiplikator für die industriellen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu wirken
3. die wissenschaftlichen und technologischen Trends weltweit aufzuzeigen oder zu setzen,
4. und als Katalysator im Innovationsprozess zu wirken; konkret heißt das, entsprechende Unternehmen im Innovationsprozess zusammen zu bringen.

Eine solche Zusammenarbeit erstreckt sich dabei nicht nur auf die anwendungsorientierte oder entwicklungsnahe Forschung, sondern auch auf die Vorlaufforschung. Im Rahmen der Diskussion der Ergebnisse der Vorlaufforschung mit der Industrie lassen sich besser latente zukünftige Bedarfe erkennen. Meist können Vertreter aus der Industrie auf die Frage: „Was benötigen Sie in den nächsten 5 bis 10 Jahren an Leistungen aus der Vorlaufforschung?“ keine konkrete Antwort geben. Zum einen weil die Tagesaktualität der Probleme in der Geschäftswelt ihre volle Aufmerksamkeit erfordert, und zum anderen weil sich die Rahmenbedingungen des Geschäfts in einem Zeitraum von 5 bis 10 Jahren dramatisch verändern.

Für eine erfolgreiche Zukunftsfähigkeit ist kontinuierliches Lernen und eine permanente Diskussion der zukünftigen wissenschaftlichen und technologischen Möglichkeiten notwendig. Eine solche Diskussion befriert Wissenschaft und Industrie gleichermaßen bis hin zu industriellen Spin Offs aus der Vorlaufforschung. Eine Großforschungseinrichtung kann mit ihrem Netzwerk zu den weltweit führenden Forschungszentren hierbei einen entscheidenden Beitrag leisten.

Die Innovationsgeschwindigkeit gerade in den technologischen Feldern wie der Mikrosystemtechnik nimmt kontinuierlich zu. Damit wir in Deutschland bei diesem Wettlauf vorne mit dabei sind, ist eine konsequente Vernetzung von Forschung und Industrie auf allen Ebenen der Forschungsarbeit notwendig. Die Vernetzung sollte schon im Rahmen der Vorlaufforschung beginnen und mit steigender Anwendungsnähe zunehmen.

Ich habe vorher aufgezeigt, dass für eine Umsetzung der Forschungsleistungen in erfolgreiche Innovationen in der Industrie Vertraulichkeit eine

unbedingte Voraussetzung ist. Dabei ist nicht eine Vertraulichkeit der Ergebnisse der Vorlaufforschung gefordert, sondern ein vertraulicher Rahmen für die Diskussion. Dafür ist eine geeignete Vorgehensweise zu finden.

Das Forschungszentrum Karlsruhe hat mit dem Industrieforum Mikrofertigungstechnik (kurz FIF genannt) ein hervorragendes Instrumentarium geschaffen, um den Weg von der Vorlaufforschung zur industriellen Anwendung in allen Phasen intensiv zu unterstützen. Im Rahmen des Forums können Unternehmen ihr Beobachtungs- und Kooperationsnetzwerk schnell und effizient vervielfachen, und somit Chancen für Innovationen früher erkennen und diese wirkungsvoller umsetzen.

Das Industrieforum bietet unter anderem folgende Leistungen:

1. Einen fundierten Überblick über die Möglichkeiten und Chancen des Einsatzes von Mikrofertigungsverfahren.
2. Die Einbindung in ein Netzwerk aus Anwendern und Wissenschaftlern
3. Von Experten kommentierte Informationen zu Konferenzen, Messen und Veröffentlichungen im Bereich der Mikrofertigung
4. Die Erschließung neuer Produktionsmethoden mit der Unterstützung von Experten
5. Eine schnelle Problemlösung mittels Beratung durch Fachleute und Nutzung der technischen Einrichtungen.
6. Ein Training für Mitarbeiter aus der Industrie.

Die Inhalte und Angebote des Industrieforum werden im Rahmen dieses Kolloquiums detailliert vorgestellt. Herr Dr. Fahrenberg, Leiter des Industrieforum, wird Ihnen die Möglichkeiten von FIF in seinem Vortrag erläutern.

Nutzen Sie diese Gelegenheit, und lassen Sie sich informieren. Nutzen Sie das Industrieforum zur Steigerung ihrer Innovationskompetenz, um für den Wettbewerb von Morgen besser gerüstet zu sein. Vielleicht werden Sie Mitglied des Industrieforum, und um es mit Boris Becker zu sagen:

„Dann sind Sie drin“

In der innovativen Welt der Mikrosystemtechnik von Morgen.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

# Stand und Perspektiven des Programms Mikrosystemtechnik

Peter Bley

Programm Mikrosystemtechnik

## Zusammenfassung

Im Programm Mikrosystemtechnik (PMT) des Forschungszentrums Karlsruhe arbeiten etwa 210 Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen aus sieben Instituten interdisziplinär zusammen, um komplexe Mikrosysteme zu entwickeln. Die Arbeiten des PMT sind in „Technologiefelder“ für die längerfristig angelegten Arbeiten sowie in „Strategische Anwendungsfelder“ und „Fertigungstechniken“ für die industrieorientierten Arbeiten gegliedert. Das PMT hat sich auf die Verwendung von Kunststoffen, Metallen und Keramiken konzentriert und hierfür ein umfangreiches Portfolio verschiedener Fertigungstechniken erarbeitet, die der Industrie zur Verfügung gestellt werden können. Diese werden in dem vorliegenden Tagungsband in mehreren Beiträgen ausführlich beschrieben, in diesem Bericht wird ein Überblick gegeben und der Zusammenhang zwischen einzelnen Techniken aufgezeigt. Um seine Ergebnisse rasch in die Industrie zu überführen, kooperiert das PMT in verschiedenen Formen mit der Industrie. Formen dieser Zusammenarbeit waren in den letzten beiden Jahren ca. 20 Verbundprojekte, 50 bilaterale Industriekooperationen und Lizenzverträge sowie die Abwicklung von ca. 350 Aufträgen im Rahmen von Auftragsforschung und Mikrofertigung. Weiterhin hat das PMT Anfang 1999 ein „Forschungszentrum Karlsruhe Industrieforum Mikrofertigungstechnik“ (FIF) etabliert, um den Informationsaustausch mit der Industrie zu verbessern. Da für die Konkurrenzfähigkeit des PMT längerfristig angelegte Forschungsarbeiten von großer Bedeutung sind, werden im PMT Arbeiten zur Weiterentwicklung der Mikrosystemtechnik auf den Gebieten durchgeführt, auf denen das PMT eine Spitzenstellung hat bzw. in überschaubarer Zeit erreichen kann und die das Potential für zukünftige industrielle Anwendungen aufweisen.

## 1. Einleitung

Ende des Jahres 1992 wurden die im Forschungszentrum laufenden Arbeiten zur Mikrotechnik zusammengefasst und das Projekt Mikrosystemtechnik etabliert. Seither wird in etwa zweijährigen Abständen die breite Öffentlichkeit über die erzielten Ergebnisse der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Form von Statuskolloquien informiert. Auf dem ersten Statuskolloquium 1993 [1] wurde das neue Projekt vorgestellt, der Schwerpunkt des zweiten Statuskolloquiums waren die sogenannten Demonstratoren [2], komplexe Mikrosysteme, die in institutsübergreifenden Arbeiten bis zum Stand funktionstüchtiger Labormuster entwickelt wurden, und von denen inzwischen einige Systeme bzw. wesentliche Komponenten den Weg in den Markt gefunden haben [3] [4]. Nach der erfolgreichen Evaluierung des Projekts im Jahre 1995 durch eine vom Aufsichtsrat eingesetzte Gutachterkommission wurde auf dem dritten Statuskolloquium in 1998 die neue Struktur des Projekts mit den „Technologiefeldern“ und „Strategischen Anwendungsfeldern“ vorgestellt [5]. Entsprechend der verstärkten Einbindung aller Arbeiten des Forschungszentrums Karlsruhe in die Programme der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) wurde das „Projekt Mikrosystemtechnik“ am Beginn des Jahres 2000 in „Pro-

gramm Mikrosystemtechnik“ umgenannt [6]. Diese Namensänderung trägt auch der Struktur der Arbeiten des PMT Rechnung, die langfristig angelegt sind und auf vielfältige Anwendungsbereiche abzielen. Schwerpunkt dieses vierten Statuskolloquiums sind die im PMT verfügbaren und in Entwicklung befindlichen Fertigungstechnologien und ihre Anwendungen für mikrosystemtechnische Produkte. Das Programm Mikrosystemtechnik des Forschungszentrum Karlsruhe ist als Ergänzung des Förderprogramms „Mikrosystemtechnik 2000+“ des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, BMBF, zu sehen [7].

## 2. Ziele des Programms Mikrosystemtechnik (PMT)

Die Ziele des PMT haben sich seit seiner Gründung nicht geändert und sollen daher nur kurz zusammengefasst werden: Die Arbeiten des PMT zielen darauf ab, einen wesentlichen Beitrag zu leisten, die Industrie bei der Einführung der Mikrosystemtechnik sowohl kurz- als auch langfristig zu unterstützen. Für die langfristige Unterstützung führt das PMT grundlagenorientierte und teilweise risikoreiche Vorlaufforschung durch, deren Ergebnisse Optionen für zukünftige industrielle Anwendungen der Mikrosystemtechnik eröffnen. Im Rahmen der kurzfristig angelegten Arbeiten ko-

operiert das PMT in unterschiedlichen Formen mit vielen Industriefirmen (vgl. Kapitel 5 u. 6).

### 3. Aufbau und Organisation des PMT

Die Grobstruktur des PMT ist in Abb. 1. dargestellt. Auf der linken Seite sind die sieben Organisationseinheiten (Institute und Hauptabteilungen) aufgeführt, die am PMT beteiligt sind. Dabei reicht der prozentuale Anteil, mit dem diese Organisationseinheiten am PMT beteiligt sind, von etwa 10% bis 95%. Insgesamt sind im Jahr 2000 etwa 210 Mitarbeiter im PMT integriert, davon 140 grundfi-

hat sich bei den Fertigungstechniken auf die Bearbeitungen von Kunststoffen, Metallen und Keramiken konzentriert. Folgerichtig sind auch die im PMT entwickelten Mikrosysteme und Komponenten aus diesen Materialien aufgebaut. Selbstverständlich sind die mikroelektronischen Komponenten, die in vielen Mikrosystemen unverzichtbare Bestandteile sind, aus Silizium hergestellt. Während die eigentlichen Silizium-Chips von Kooperationspartnern hergestellt werden, erfolgt deren Entwurf und Systemintegration innerhalb des PMT.

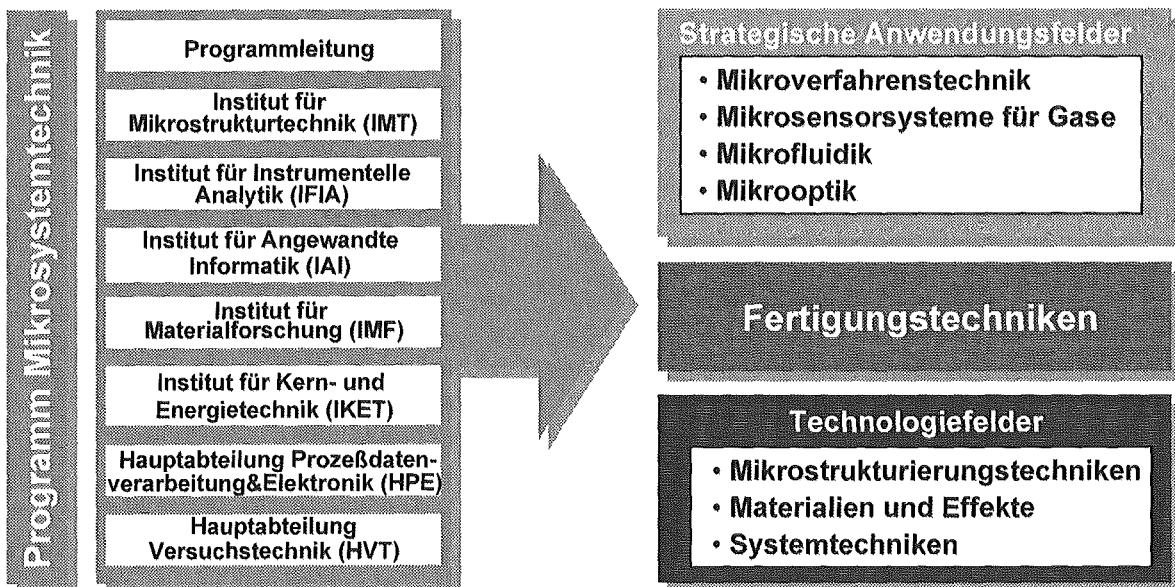


Abb. 1: Struktur des PMT mit den beteiligten Organisationseinheiten und den Arbeitsthemen

nanzierte Mitarbeiter, der Rest wird aus anderen Mitteln finanziert, die z. T. aus der Industrie eingeworben werden.

Auf der rechten Seite von Abb. 1 sind die Arbeitsthemen des PMT aufgeführt, die sich in die „Technologiefelder“, die „Strategischen Anwendungsfelder“ und die „Fertigungstechniken“ gliedern. Die Arbeiten in den Technologiefeldern sind längerfristig angelegt und beinhalten die „Strukturierungstechniken“, die „Materialien und Effekte“ sowie die „Systemtechniken“. In den Strategischen Anwendungsfeldern werden die kurzfristig angelegten Arbeiten meist in Zusammenarbeit mit der Industrie durchgeführt. Das PMT hat sich dabei auf die „Mikroverfahrenstechnik“, „Mikrosysteme für die Analytik von Gasen“, die „Mikrofluidik“ und die „Mikrooptik“ konzentriert. Das größte Arbeitsthema stellt mit 24% die „Fertigungstechnik für Mikrosysteme“ dar. Damit trägt das PMT der Tatsache Rechnung, dass es bei der Überführung von funktionstüchtigen Prototypen in die Industrie oft an einer reproduzierbaren und kostengünstigen Fertigungstechnik mangelt [8,9,10]. Das PMT

### 4. Grundlagen und Vorlaufforschung

Im Rahmen der langfristigen Entwicklungsarbeiten wird an der kontinuierlichen Weiterentwicklung der verschiedenen Techniken gearbeitet, die zur Realisierung von Mikrosystemen erforderlich sind. Diese Arbeiten werden größtenteils in den sogenannten „Technologiefeldern“ durchgeführt. Aber auch zum gezielten Einsatz von Mikrosystemen in industriellen Produkten sind oft längerfristige Vorlaufforschungen erforderlich, um während der Realisierung der Mikrosysteme oder –komponenten aufgetretene Fragestellungen fundiert beantworten zu können. Diese Arbeiten sind dementsprechend in den „Strategischen Anwendungsfeldern“ angesiedelt.

Im Rahmen dieser Untersuchungen arbeitet das PMT mit mehr als 60 Forschungseinrichtungen und Hochschulen zusammen, eine besonders enge Verbindung besteht dabei mit den Universitäten in Karlsruhe und Freiburg. Diese Arbeiten im Bereich der Vorlaufforschung dienen auch der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses.

So wurden in den letzten beiden Jahren 29 Dissertationen und 73 Studien- und Diplomarbeiten fertiggestellt. Die Zahl der jährlichen Veröffentlichungen und Tagungsbeiträge liegt zwischen 250 und 300, wobei 130 eingeladene Vorträge auf nationalen und internationalen Tagungen den hohen Stand der Mikrosystemtechnik im Forschungszentrum Karlsruhe belegen [11]. Im Rahmen der langfristigen Forschungsarbeiten wurde an der Universität Karlsruhe ein Sonderforschungsbereich „Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung ungeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen“ (SFB 499), eingerichtet, an dem das PMT mit dem Institut für Materialforschung III maßgeblich beteiligt ist. Im Rahmen dieses Sonderforschungsbereichs werden im PMT der Pulverspritzguss für metallische und keramische Mikrokomponenten und der Mikroguss entwickelt. Über die wichtigsten wissenschaftlichen Ergebnisse wird in diesem Tagungsband ausführlich berichtet.

## 5. Verbund- und HGF-Projekte

Das PMT bringt seine Kenntnisse in viele Verbundprojekte ein, die vom BMBF, der EU oder dem Land Baden-Württemberg finanziert werden. Damit stellt das PMT sein Know-how den Verbundpartnern, meist aus der Industrie, zur Verfügung und richtet sein F&E-Programm am vorhandenen Bedarf aus. In Tabelle 1 sind die Verbundprojekte aufgeführt, an denen das PMT seit dem letzten Statuskolloquium (1998) beteiligt war bzw. noch ist.

Wie zuvor schon verdeutlicht wurde [6], bewerben sich seit 1998 die HGF-Zentren im Wettbewerb um Mittel aus dem HGF-Strategiefonds. Das PMT hat sich bei allen drei bisher erfolgten Ausschreibungen als federführendes HGF-Zentrum beteiligt (Tabelle 2), und war 1998 und 1999 mit den Projekten „Material- und Verfahrensentwicklung für mikrotechnische Hochleistungsbauteile“ (MALVE) und „Elektronische Mikronasen für Überwa-

Abkürzung	Name / Arbeiten	Förderer/Programm	Laufzeit bis
Zellmonitoring-System	Intelligente Mikrosysteme zum Nachweis funktionsspezifischer Signale aus Biokomponenten	BMBF-MST	31.03.99
DEMIS	Designoptimierung für Mikrosysteme	BMBF-MST	30.06.99
microFeed2	Produktionsstandards und Fertigungsmittel für das Vereinzen, Ordnen und Magazinieren von Mikrokörpern und Mikrosystemen	BMBF-MST	31.12.99
Mikroreaktoren	Mikroreaktoren – Industrierelevante Reaktionen in der Gasphase	BMBF-MST	31.12.99
KOMET	Kompakte Messmodule für die Inertialsensorik	BMBF-MST	28.02.02
OMID	Optimierung von Mikrosystemen für Diagnose- und Überwachungsanwendungen	BMBF-MST	31.03.03
PROBE	Produktionstechnik für bewegliche Mikrostrukturen am Beispiel des Beschleunigungssensors	BMBF-Produktion2000	31.10.98
PROXI	Wirtschaftliche Produktionstechnik für oxidische Mehrschichtsysteme mit lateraler Mikrostruktur am Beispiel eines Mikrogassensorsystems	BMBF-Produktion2000	31.12.99
Wasserstoff-erzeugung	Wasserstofferzeugung in Mikrosystemen	BMBF-Chemische Technologien	30.04.02
Überkritische Fluide	Überkritische Fluide zur Behandlung und Herstellung von komplexen Werkstoffen und Oberflächen	Baden-Württemberg (WiMi; Zukunftsoffensive „Junge Generation“)	30.09.00
Urgeformte Mikroteile	Prozesskettenentwicklung ungeformter Mikroteile	Baden-Württemberg (WiMi; Forschungsschwerpunktprogramm)	30.06.01
SFB 499	Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung ungeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen	DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft)	31.12.02
SPP 1012	Dreidimensionaler Laserstrahlformabtrag von Stählen und Hartmetallen für den Einsatz in der Mikrospritzgießtechnik zur Herstellung von Mikrokomponenten aus Kunststoff, Metall und Keramik	DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft)	31.10.00
MicroSync	Microfabrication with synchrotron radiation	EU (TMR-Projekt)	31.12.99
INTAS-Silicon	Development of Silicon based nitride ceramics	EU (INTAS)	31.12.99
INCO-COP NovelTech	Novel techniques for the manufacturing of nanostructured high performance ceramics	EU Copernicus	30.06.00
MiLS	Miniaturisierte Laser Scanner	EU (INNOVATION)	31.03.01

Tabelle 1: Verbundprojekte mit Beteiligung des PMT (1998 bis 2000)

chungs- und Regelaufgaben in Gebäuden und Produktionsanlagen“ (ELMINA) erfolgreich. Im Jahre 2000 bewirbt sich das PMT mit dem Projekt „Entwicklung und Fertigung mikrofluidischer Analysesysteme aus Polymeren mit integrierter Probebehandlung und Detektion“ (EFAPRO). Der Inhalt dieser drei HGF-Projekte wird in diesem Tagungsband beschrieben [12,13,14].

## 6. Zusammenarbeit mit der Industrie

Die Gründung des PMT im Jahre 1992 war, wie auf dem letzten Statuskolloquium nochmals vom Vorsitzenden des Aufsichtsrats verdeutlicht wurde [15], mit der Auflage verbunden, 10% seines Aufwands aus Drittmitteln aus der Industrie einzuwerben und 30% seiner Arbeiten in Kooperation mit der Industrie durchzuführen. Diese Auflagen wurden in den vergangenen beiden Jahren erfüllt, bzw. was die Industriekooperationen betrifft, deutlich überschritten.

zentrum Karlsruhe Industrieforum Mikrofertigungstechnik (FIF) gegründet. Der Gründung ging eine intensive Diskussion mit der Industrie voraus, die sich besonders auf die von der Industrie gewünschten Leistungen bezog. Weitere Informationen über diese Initiative zur Verbesserung des Technologietransfers im Bereich der Mikrosystemtechnik können diesem Tagungsband entnommen werden [17]. Inzwischen sind FIF 14 Mitglieder beigetreten.

## 7. Fertigungstechniken

Das PMT hat sich, wie schon in Kapitel 3 ausgeführt, auf die Herstellung von Mikrosystemen und -komponenten aus Kunststoffen, Metallen und Keramiken konzentriert. Hierzu stehen mehrere Fertigungstechniken zur Verfügung, deren Stand ausführlich dokumentiert ist. Es wurden in verschiedenen Organisationseinheiten des PMT „Teiltechnika“ eingerichtet, um diese Fertigungs-

Abkürzung	Name/Arbeiten	Beteiligte HGF-Zentren	Laufzeit
MALVE	Material- und Verfahrensentwicklung für mikrotechnische Hochleistungsbauteile	FZK, FZJ, HMI, GKSS, DLR	1998-2001
ELMINA	Elektronische Mikronasen für Überwachungs- und Regelaufgaben in Gebäuden und Produktionsanlagen	FZK	1999-2002
EFAPRO	Entwicklung und Fertigung mikrofluidischer Analysesysteme aus Polymeren mit integrierter Probebehandlung und Detektion	FZK, FZJ, GBF, DKFZ,	beantragt

Tabelle 2: Projekte des HGF-Strategiefonds mit Beteiligung und Federführung des PMT

Zur Einwerbung der 10% Drittmittel aus der Industrie hat das PMT neben den Einnahmen aus 18 Lizenzverträgen pro Jahr etwa 150 Aufträge bearbeitet. Dabei kamen etwa 2/3 der Aufträge von KMUs, der Rest von der Großindustrie.

Neben den Industriekooperationen im Rahmen der im Abschnitt 5 aufgezählten Verbundprojekten hat das PMT mit 46 Unternehmen bilaterale Verträge abgeschlossen. Diese beinhalten einerseits die Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte und Komponenten im vorwettbewerblichen und im wettbewerblichen Bereich. Andererseits zielen sie – meist im Form von Lizenzverträgen – auf die Vermarktung der Entwicklungen des PMT ab. Da viele Firmen eine vertrauliche Behandlung der Themen der Kooperation wünschen, kann hier keine vollständige Liste veröffentlicht werden. Jedoch sind auch Mitarbeiter von Firmen als Koautoren an den Veröffentlichungen der gemeinsamen Arbeiten in diesem Tagungsband beteiligt.

Um die Zusammenarbeit mit der Industrie auf eine neue und langfristig tragfähige Basis zu stellen, wurde auf Anregung des industriell geführten Projektbeirats [16] Anfang 1999 das Forschungs-

techniken einerseits der Industrie zur Verfügung stellen zu können, andererseits für die interdisziplinäre Entwicklung komplexer Mikrosysteme innerhalb des PMT einsetzen zu können. Neben der Fertigung von Funktionsmustern wurden in diesen Technika auch nachgefragte Kleinserien hergestellt [18,4]. Es ist selbstverständlich, dass diese Techniken kontinuierlich entsprechend den Anforderungen weiterentwickelt werden. Der augenblickliche Stand und die Themen der Weiterentwicklung sind in Datenblättern dokumentiert, die im Internet [19] abgefragt werden können. Die Datenblätter der dargestellten Fertigungstechniken sind auf der www-Seite (Abb. 2) hinter diesen Icons hinterlegt.

Um den Zusammenhang der verschiedenen Fertigungstechniken, die in diesem Tagungsband in mehreren Beiträgen beschrieben werden, aufzuzeigen, wird hier – ohne auf Details einzugehen – ein Überblick gegeben (Abb. 3).

Mikrostrukturen können einerseits Mikrobauteile mit Gesamtabmessungen im Mikrometerbereich darstellen (Beispiel Mikrozahnräder) oder auf größeren Bauteilen aufgebracht sein (d. h. die Bauteile



Abb. 2: WWW-Seite mit den Fertigungstechniken, die das PMT seinen Kunden zur Verfügung stellen kann. Die ausführlichen Datenblätter für diese Fertigungstechniken sind hinter diesen Icons hinterlegt (<http://www.fzk.de/pmt/default.htm>)

haben eine deutlich größere Gesamtabmessung, weisen aber Details im Mikrometer- bis in den Submikrometerbereich auf, Beispiel Mikrospektrometerbaustein [4]). Da die Herstellung der sehr kleinen Strukturen in beiden Fällen die technische Herausforderung darstellt, wird hier – verallgemeinernd für beide Formen von Bauteilen - von der „Herstellung von Mikrostrukturen“ gesprochen.

Mikrostrukturen aus Kunststoff können mit verschiedenen Verfahren der Lithographie hergestellt werden. Im PMT stehen hierzu die Elektronenstrahlolithographie, die UV-Lithographie und vor allem die Röntgentiefenlithographie, der erste Schritt des LIGA-Verfahrens, zur Verfügung [20]. Ab dem 4. Quartal 2000 wird für die Röntgentiefenlithographie die Synchrotronstrahlenquelle der ANKA GmbH zur Verfügung stehen [21]. Die klassischen spanabhebenden Verfahren (Fräsen, Bohren, Drehen, hier als Mechanische Mikrofertigung bezeichnet) wurden im PMT so zu einem Mikrostrukturierungsverfahren weiterentwickelt, dass metallische und polymere Mikrostrukturen mit einer sehr hohen Präzision gefertigt werden können [22]. Zur Strukturierung von Kunststoffen, Metallen und Keramiken werden im PMT auch mehrere Laser-Anlagen mit verschiedenen Wel-

lenlängen und Leistungsdaten (CO<sub>2</sub>-Laser mit 10,6 µm, Nd:YAG-Laser mit 1064 und 532 nm sowie Excimer-Laser mit 248 und 193 nm) eingesetzt [23]. Aus diesem Bereich ging eine Ausgründung aus dem PMT hervor, die sich vor allem auf die Strukturierung von TiNi-Legierungen spezialisiert hat [24]. Da mit diesen drei Verfahren (Lithographie, Laser, Mechanische Mikrofertigung) die Mikrostrukturen direkt hergestellt werden, werden sie i. a. als „Primäre Strukturierungsverfahren“ bezeichnet.

Wie allgemein bekannt ist, werden die Mikrostrukturen aus Kunststoff nicht nur als „Endprodukte“ verwendet, sondern auch als verlorene Formen eingesetzt und galvanisch mit Metall aufgefüllt (zweiter Schritt des LIGA-Verfahrens) [25].

Die mit diesen Primären Strukturierungsverfahren hergestellten Mikrostrukturen dienen auch als Formeinsätze für eine nachfolgende Replikationstechnik. Im allgemeinen werden metallische Mikrostrukturen als Formeinsätze bevorzugt. Zur Herstellung dieser Formeinsätze sind die Prozesse so zu führen, dass die metallischen Mikrostrukturen mit einer festen Grundplatte verbunden sind. Dies ist bei der Laser-Strukturierung und der

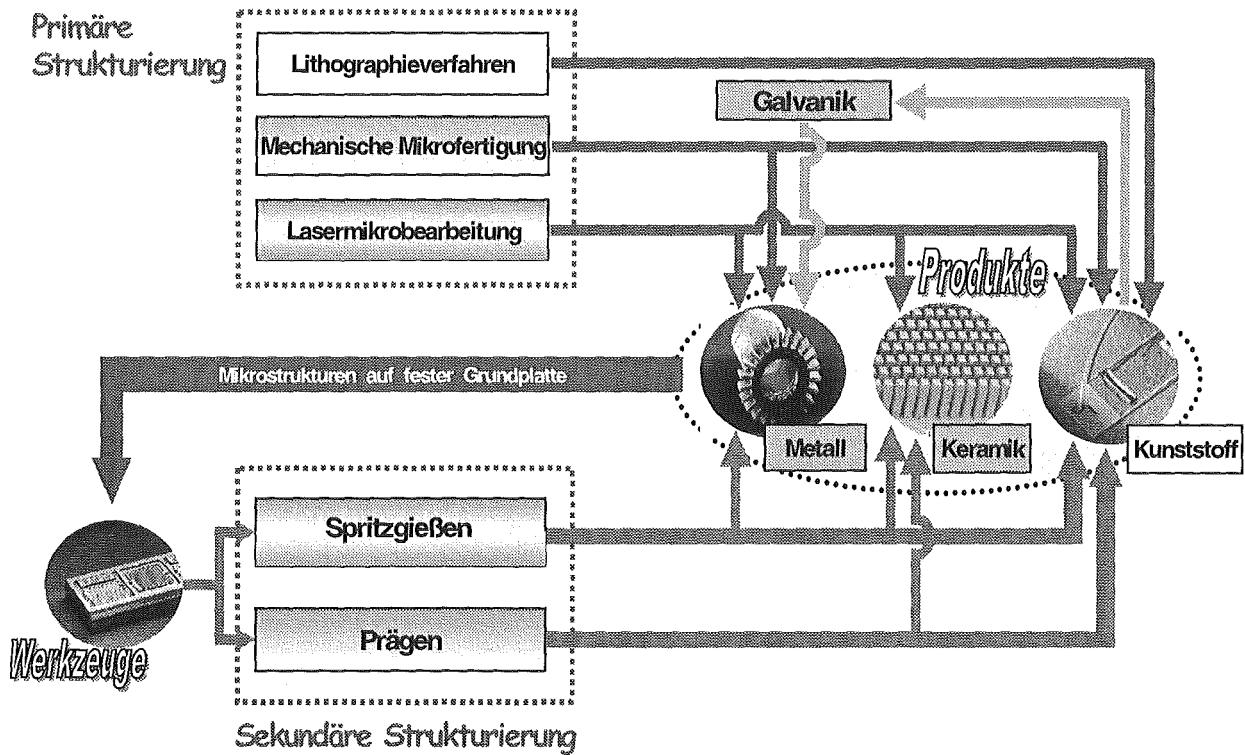


Abb. 3: Überblick über die Fertigungstechniken zur Herstellung von Mikrostrukturen aus Kunststoff, Metall und Keramik

Mechanischen Mikrofertigung ohne besonderen Aufwand möglich, da diese Verfahren die einzelnen Strukturen aus einem Vollmaterial herausarbeiten. Bei der Herstellung über Lithographie und Galvanik wird die erforderliche metallische Grundplatte dadurch erzeugt, dass man die Metallabscheidung nicht beendet, wenn sie die Oberkante der Kunststoffstrukturen erreicht hat, sondern über die Kunststoffstrukturen solange überwachsen lässt, bis eine zusammenhängende Grundplatte entsteht. Diese Grundplatte ist dann fest mit den metallischen Mikrostrukturen verbunden.

Für den Einsatz dieser Formeinsätze zur kostengünstigen Massenfertigung von Mikrostrukturen aus Kunststoff liegen im PMT umfangreiche und langjährige Erfahrungen vor, diese Abförmung entspricht dem dritten Schritt des LIGA-Verfahrens [26]. Heute wird besonders das Mikro-Spritzgießen (*Thermoplastic Injection Molding*, TIM) eingesetzt [27]. Dieses Verfahren hat schon vielfältige industrielle Anwendungen gefunden. Daneben können für Kunststoffstrukturen auch (in der Abb. 3 nicht dargestellt) Reaktionsspritzgießen [28] oder UV-Licht induziertes Reaktionsgießen (*Photomolding*) [23] eingesetzt werden.

Mit einer Variante des Spritzgießens, dem sogenannten Metallspritzgießen (*Metal Injection Molding*, MIM) können auch metallische Mikrostrukturen hergestellt werden. Bei diesem Massenfertigungsverfahren, das sich im PMT in der Entwick-

lung befindet, wird ein Gemisch aus Metallpulver und Kunststoff in einer herkömmlichen Spritzgießmaschine geformt und anschließend so weiterverarbeitet, dass der Kunststoff entfernt (Entbinden) und das Metallpulver zu einer dichten Mikrostruktur gebrannt wird (Sintern). Verwendet man statt des Metallpulvers Keramikpulver, so bezeichnet man das Verfahren als Keramisches Spritzgießen (*Ceramic Injection Molding*, CIM) und man erhält nach den entsprechenden Verfahrensschritten (Formgebung, Entbinden, Sintern) keramische Mikrostrukturen. Beide Verfahren werden gemeinsam als Mikro-Pulverspritzgießen (*Micro Powder Injection Molding*, PIM) bezeichnet [29].

Neben dem Spritzgießen gewinnt für die Herstellung von Mikrostrukturen aus Kunststoff das Prägen (*Heißprägen* bzw. *Vakuumwarmumformung*) zunehmend an Bedeutung, besonders wenn sehr kleine und hochpräzise Mikrostrukturen erforderlich sind. Auch dieses Verfahren hat schon vielfältige industrielle Anwendung gefunden [4,30].

Analog zum Heißprägen von Mikrostrukturen aus Kunststoff lassen sich keramische Mikrokomponenten ebenfalls durch Prägen herstellen. Dabei wird die im ungesinterten Zustand flexible Folie (bestehend aus keramischem Pulver, gebunden in organische Bindemittel und Plastifizierer) strukturiert. Anschließend werden die organischen Hilfsstoffe ausgetrieben und die Keramik dichtgesin-

tert. Dieses Formgebungsverfahren eignet sich vor allem für mehr planare Strukturen [31].

Diese Replikationsverfahren zur Massenfertigung polymerer, metallischer oder keramischer Mikrostrukturen bezeichnet man i. a. als „Sekundäre Strukturierung“.

Die über Sekundäre Strukturierungsverfahren (Replikationstechniken) hergestellten Mikrostrukturen aus Kunststoff können – wie die Kunststoff-Erzeugnisse der Primären Strukturierung – auch als verlorene Formen eingesetzt werden, um mit Hilfe der Galvanik metallische Mikrostrukturen herzustellen.

Alle hier aufgeführten Verfahren haben ihre Vor- und Nachteile, und es wäre sicherlich falsch, ein einziges Verfahren als den „Königsweg“ oder eines der anderen hier dargestellten Verfahren als für die Mikrosystemtechnik ungeeignet zu bezeichnen. Welches Verfahren zur Lösung einer bestimmten Aufgabe das geeignete ist, hängt

angewandt. So wurden z. B. Formeinsätze aus Metall durch eine Kombination der ersten beiden Schritte des LIGA-Verfahrens (Röntgentiefenlithographie und Galvanik für die hochpräzisen Bereiche) und der Mechanischen Mikrofertigung (für die großflächigen Bereiche und für mehrere Strukturierungsebenen) hergestellt [32].

## 8. Strategie und zukünftige Schwerpunkte

Die im PMT vorhandenen Fertigungstechniken zur Herstellung von Mikrostrukturen (vgl. Kap. 7) werden oft als „Nicht-IC-Kompatible Fertigungstechniken“ klassifiziert [33], im Gegensatz zu den IC-Kompatiblen Prozessen, die auf der Silizium-Technologie aufbauen (IC = Integrierte Schaltkreise). Dabei kann, wie aus Tabelle 3 zu entnehmen ist, eine weitere Einteilung in verschiedene Bereiche erfolgen, die von *konventionell* über *evolutionär* bis zu *revolutionär* reichen. Es ist dabei verständlich, dass bei den evolutionären und besonders bei den revolutionären Prozessen besondere

Nr.	Beschreibung	Beispiel	Bereiche
1	Nutzung (und Verbesserung) <b>konventioneller</b> Herstellungsprozesse Nutzung <b>konventioneller</b> Geräte	Spanabhebende Verfahren: Mikrofräsen, Mikrobohren, Mikrodrehen	Konventionell
2	<b>Evolutionäre Verbesserung</b> aktueller Herstellungsprozesse <b>Evolutionäre Verbesserung</b> der Geräte	Mikrogalvanoformung	Evolutionär
3	Nutzung <b>neuer</b> Herstellungsprozesse die <b>vorhandene Materialien</b> benutzen Entwicklung <b>neuer</b> Geräte	Laser-Mikrostrukturierung	
4	Nutzung <b>neuer</b> Herstellungsprozesse Entwicklung <b>neuer</b> Materialien Entwicklung <b>neuer</b> Anlagen	Mikro-Abformung, Röntgentiefenlithographie	Revolutionär

Tabelle 3: Einteilung der „Nicht-IC-Kompatiblen Fertigungstechniken“

sowohl von den technischen Anforderungen an die Mikrostrukturen ab, als auch von der gewünschten Stückzahl. Gerade die gewünschte Stückzahl hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten der verschiedenen Verfahren. So wird man generell bei kleinen Stückzahlen die Primären Strukturierungstechniken bevorzugen und bei sehr großen Stückzahlen eine Anwendung der Sekundären Strukturierung, d.h. der Replikationstechniken, anstreben.

Wie aus diesem Überblick und durch die folgenden Beiträge in diesem Tagungsband ersichtlich ist, stehen im PMT eine Vielzahl von Techniken für Mikrostrukturen aus Kunststoffen, Metallen und Keramiken zur Verfügung. Daher kann das PMT dem Kunden das für seine Problemlösung optimale Verfahren anbieten. Falls es wirtschaftlich oder technologisch günstig ist, werden auch Kombinationen der verschiedenen Techniken

Anstrengungen im Bereich der Forschung und Entwicklung notwendig sind, um funktionstüchtige und industriell anwendbare Prozesse zur Verfügung stellen zu können, da Entwicklungsarbeiten auf mehreren Gebieten (Prozesse, Anlagen, Materialien) gleichzeitig erforderlich sind. Auch sind in evolutionären und revolutionären Bereichen die Entwicklungsarbeiten mit einem höheren Risiko verbunden und die industrielle Eintrittsbarriere liegt höher als bei konventionellen Verfahren. Dies ist u.a. auch dadurch bedingt, dass diese Verfahren nicht im dem hohen Maß auf die mit großem Aufwand entwickelten Fertigungstechniken der ICs zurückgreifen können wie die „IC-Kompatiblen Fertigungstechniken“. Dafür erschließen die „Nicht-IC-Kompatiblen Fertigungstechniken“ völlig neue Einsatzgebiete, wie in verschiedenen Beiträgen in diesem Tagungsband deutlich aufgezeigt wird.

Das PMT wird in Zukunft folgende Schwerpunkte seiner F&E-Arbeiten setzen:

Bei den hier beschriebenen „Nicht-IC-Kompatiblen Fertigungstechniken“ für Mikrostrukturen aus Kunststoffen, Metallen und Keramik, hat sich das PMT eine Spitzenstellung erarbeitet und diese Fertigungstechniken, werden weiterentwickelt hinsichtlich besserer Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit, höherer Ausbeute, niedrigerer Kosten und verbesserter Leistungsdaten. Wie bisher werden diese Fertigungstechniken auch weiterhin eingesetzt, um zusammen mit Partnern aus der Industrie mikrosystemtechnische Produkte zu entwickeln. Dabei werden zunächst Labormuster hergestellt, die den Nachweis der Funktionsstüchtigkeit erbringen. Falls erforderlich, können im PMT auch erste Kleinserien durchgeführt werden, um zuverlässige Aussagen über eine wirtschaftliche Fertigung machen zu können. Die industrielle Fertigung ist jedoch dann von der Industrie selbst durchzuführen.

Neben diesen kurz- und mittelfristig angelegten Arbeiten wird das PMT im Rahmen seiner bisherigen Strategischen Anwendungsfelder (Mikroverfahrenstechnik, Mikrooptik, Mikrofluidik und Gas-sensorik, vgl. Abschnitt 3) langfristige „Produktvisionen“ mit einem Zeithorizont in der Größenordnung von 5-10 Jahren etablieren [5]. Diese Fern-

ziele werden in mittelfristige Teilprojekte bzw. Meilensteine, sog. „Demonstratoren“ untergliedert werden. Die genaue Festlegung auf diese Produktvisionen und Demonstratoren bedarf einer ausführlichen Diskussion innerhalb des PMT, die gerade begonnen hat. Das PMT wird in diese Diskussion auch externe Experten einbeziehen. Die Definition langfristiger Ziele ist jedoch keine einfache Aufgabe, da die Industrie – nach eigenen Angaben – heute noch nicht sicher sagen kann, wo solche langfristigen „Produktvisionen“ angesiedelt sein sollten.

Forschungsarbeiten sind für die langfristige Konkurrenzfähigkeit des PMT von großer Bedeutung. Bei diesen Arbeiten zur Weiterentwicklung der Mikrosystemtechnik wird sich das PMT in seinen langfristig angelegten „Technologiefeldern“ (Mikrostrukturierungstechnik, Materialien und Effekte, Systemtechniken, vgl. Abschnitt 3) auf die Bereiche konzentrieren, die zur Erreichung der „Produktvisionen“ erforderlich sind und die Kompatibilität mit diesen Zielen berücksichtigen. Es ist dabei selbstverständlich, dass das PMT die bei der Entwicklung der Visionen und Demonstratoren erarbeiteten Kenntnisse auf andere, nachgefragte Gebiete anwenden wird.

## Literatur

- [1] 1. Statuskolloquium des Projekts Mikrosystemtechnik, KfK Bericht Nr. 5238, September 1993
- [2] 2. Statuskolloquium des Projekts Mikrosystemtechnik, Wissenschaftlicher Bericht, FZK Nr. 5670, November 1995
- [3] Töpfer, H.: „SAW-Sensorsysteme: Gemeinsame Entwicklung, Know-how-Transfer, Marketingstrategie und neue Anwendungen“, Bürkert Steuer- u. Regelungstechnik, Außenstelle Dresden, dieser Tagungsband
- [4] Wechsung, R.: „Wachstumsmarkt Mikrosystemtechnik am Beispiel des LIGA-Mikrospektrometers“, STEAG/microParts GmbH, dieser Tagungsband
- [5] 3. Statuskolloquium des Projekts Mikrosystemtechnik, Wissenschaftliche Berichte, Forschungszentrum Karlsruhe 6080, April 1998
- [6] Fritz, P.: „Ansprache zum 4. Statuskolloquium PMT 30./31.03.2000“, Wissenschaftlicher Bericht, dieser Tagungsband
- [7] Bothof, A., Claußen, W., Schütze, A., Sturm, H., VDI/VDE-IT: „Innovation durch Mikrointegration“, ISBN 3-89750-090-6, 1998
- [8] Innovationsbeirat der Landesregierung Baden-Württemberg: „Mehr Zukunft wagen“, März 1996
- [9] Studie im Auftrag des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg: „Wirtschaftliche Potentiale der Miniaturisierung aus industrieller Sicht“, Mai 1999, 4-4332.62 – ISI/2
- [10] Berichte aus der Angewandten Innovationsforschung No. 168, Staudt, E. (Hrsg.): „Innovationsbarrieren und Transfermaßnahmen in der Mikrosystemtechnik“, Bochum, 1997
- [11] Veröffentlichungsliste:  
[http://hbk-bibdia.fzk.de:81/de/qsim\\_frm.html](http://hbk-bibdia.fzk.de:81/de/qsim_frm.html)  
(PMT = Vorhabensnummer 41)
- [12] Zum Gahr, K.-H., Knitter, R., Ruprecht, R., Seemann, K.: „Material- und Verfahrensentwicklung für mikrotechnische Hochleistungsbauteile“, dieser Tagungsband
- [13] Goschnick, J.: „Elektronische Mikronasen für Überwachungs- und Regelaufgaben (HGF-Projekt „ELMINA“)“, dieser Tagungsband

- [14] Kautt, M., Schomburg, W.K., Hecke, M., Hoffmann, W., Reichert, J., Moss, D., Schaller, Th., Pfleging, W., Hanemann, Th., Gottwald, E.: „Entwicklung und Fertigung mikrofluidischer Komponenten für analytische Anwendungen in den Life Sciences“, dieser Tagungsband
- [15] Baumgarten, L.: „Ansprache zum 3. Statuskolloquium“, Tagungsband 3. Statuskolloquium, Wissenschaftlicher Bericht, Forschungszentrum Karlsruhe 6080, April 1998
- [16] Paasche, S.: „Mikrosystemtechnik: Von der Vorlaufforschung zur industriellen Anwendung“, DaimlerChrysler AG, dieser Tagungsband
- [17] Fahrenberg, J., Czolk, R.: „Brückenschlag vom Labor zum Markt - Das Forschungszentrum Karlsruhe Industrieforum Mikrofertigungstechnik (FIF) -“, dieser Tagungsband
- [18] Hagen, O.F.: Physikalische Mikroaktorik und-sensorik für Anwendungen in der allgemeinen Mess- und Regeltechnik, Verkehrs- und Verfahrenstechnik“, Tagungsband 3. Statuskolloquium, Wissenschaftlicher Bericht, Forschungszentrum Karlsruhe 6080, April 1998
- [19] <http://www.fzk.de/pmt/default.htm>
- [20] Saile, V.: „Fertigungstechniken für die primäre Strukturierung von Kunststoffen“, dieser Tagungsband
- [21] Pantenburg, F.J., Mohr, J., Moser, H.O., Häfele, K.-H.: „Fertigung von Mikrostrukturen durch Röntgentiefenlithographie“, dieser Tagungsband
- [22] Schaller, T.: „Mikrostrukturierung von Stahl mit Hartmetallfräsern“, dieser Tagungsband
- [23] Pfleging, W., Hanemann, T., Hoffmann, W.: „Lasergestützte Entwicklung von mikrostrukturierten Komponenten und Abformwerkzeugen“, dieser Tagungsband
- [24] [www.nitinol.de](http://www.nitinol.de)
- [25] Bacher, W., Bade, K., Guber, A., Gutmann, M., Pfleging, W., Schaller, Th., Schloßmacher, P.: „Fertigung von mikrostrukturierten Komponenten und Formeinsätzen aus Metall“, dieser Tagungsband
- [26] Becker, E.W., Ehrfeld, W., Hagmann, P., Maner, A., Münchmeyer, D.: „Fabrication of Microstructures with High Aspect Ratios and Great Structural Heights by Synchrotron Radiation, Lithography, Galvanoforming, and Plastic Moulding (LIGA-Process), Microelectronic Engineering 4 (1986) p. 35-36.
- [27] Ruprecht, R., Gietzelt, T., Gutmann, M., Hanemann, T., Hecke, M. Müller, K., Piotter, V.: „Abformverfahren für mikrostrukturierte Bauteile aus Kunststoff und Metall“, dieser Tagungsband
- [28] Harmening, M., Ehrfeld, W.: „Untersuchung zur Abformung von galvanisierbaren Mikrostrukturen mit großer Strukturhöhe aus elektrisch isolierenden und leitfähigen Kunststoffen“, KFK Bericht 4711, Mai 1990, Dissertation
- [29] Bauer, W., Göhring, D., Knitter, R., Piotter, V.: „Werkstoffe und Abformverfahren für Polymere, metallische und keramische Mikrobauteile“, dieser Tagungsband
- [30] Heim, U.: „Prägeanlagen“, Jenoptik Mikrotechnik GmbH, dieser Tagungsband
- [31] Ritzhaupt-Kleissl, H.-J., Bauer, W., Knitter, R., Piotter, V., Ruprecht, R., Haußelt, J.: „Fertigung keramischer Mikrokomponenten“, dieser Tagungsband
- [32] Fahrenberg, J., Schaller, Th., Bacher, W., El-Kholi, A., Schomburg, W.K.: „High aspect ratio multi-level mold inserts fabricated by mechanical micro machining and deep etch X-ray lithography“, Microsystems Technologies, Volume 2, Number 4, October 1996, Springer Research Journal
- [33] Roadmap von „Semiconductor Equipment and Materials International“ (SEMI), USA: <http://www.roadmap.nl>



# **Fertigungstechniken**



# Fertigungstechniken für die primäre Strukturierung von Kunststoffen

Volker Saile, Song-Jo Chung, Herbert Hein, Jürgen Mohr und Franz-Josef Pantenburg

Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Lithographische Fertigungsverfahren gehören zu den Basistechnologien des Programms Mikrosystemtechnik. Sie werden zur direkten Fertigung von Komponenten aus Kunststoffen eingesetzt, aber auch für Ausgangsformen für metallische Komponenten oder lithographisch hergestellte Formeinsätze für Abformverfahren. Der vorliegende Beitrag beschreibt den Stand der Entwicklung und weist insbesondere auf die erheblich erweiterten Möglichkeiten für die Röntgentiefenlithographie hin, wenn in der zweiten Jahreshälfte 2000 der Speicherring ANKA im Forschungszentrum in Betrieb gehen wird.

## 1. Einleitung

Strukturierungsverfahren von Polymeren und Metallen sind von zentraler Bedeutung für die Herstellung von Mikrokomponenten im Programm Mikrosystemtechnik am Forschungszentrum Karlsruhe. Dabei haben sich die am Programm beteiligten Institute auf verschiedene Technologien spezialisiert. So werden bei HVT Metalle spanabhebend mit hoher Genauigkeit bearbeitet. Das IMF-I verfügt über eine ausgezeichnete Expertise zur Strukturierung mit Laserstrahlung und betreibt ein Technikum mit modernster Ausrüstung. Am IMT ist die Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung besonders weit entwickelt. Deren Bedeutung wird noch erheblich zunehmen, wenn in der zweiten Jahreshälfte 2000 die neue Synchrotronstrahlungsquelle ANKA auf dem Gelände des Forschungszentrums den Betrieb aufnimmt. Darüberhinaus werden am IMT hochauflösende Elektronenstrahlolithographie und Optische Lithographie als Mikrostrukturierungsverfahren betrieben.

Damit steht im PMT ein Baukasten von Strukturierungstechniken zur Verfügung, der viele Anwendungsfälle mit sehr unterschiedlichen Anforderungen von der direkten Strukturierung von Spektrometerbausteinen mit Röntgentiefenlithographie bis zur Herstellung von mechanisch gefrästen Formeinsätzen optimal abdeckt.

Lithographische Verfahren sind für die Halbleiterfertigung zu höchster Perfektion entwickelt worden. Sie werden auch sehr erfolgreich in der Mikrostrukturtechnik eingesetzt. So werden Masken mit Elektronenstrahlolithographie hergestellt, Optische Lithographie eignet sich zur Strukturierung von Photoresist, auch von neuen Resists, die Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen zulassen und schliesslich eignet sich die Röntgentie-

fenlithographie für höchste Strukturauflösung und Aspektverhältnisse.

Die lithographisch strukturierten Polymere können entweder direkt als Kunststoffkomponenten eingesetzt werden oder die Reliefstrukturen werden galvanisch aufgefüllt; damit erhält man metallische Mikrokomponenten. Schliesslich können die Polymerreliefs auch weit über die Strukturhöhe galvanisiert werden. Damit entsteht ein metallisches Werkzeug, ein Formeinsatz, für Replikationsverfahren wie das Spritzgießen oder Heißprägen.

## 2. Elektronenstrahlolithografie

Das IMT verfügt über einen hochauflösenden Elektronenstrahlschreiber vom Typ Vector-Scan (EBPG 5-HR), der bei einer maximalen Beschleunigungsspannung von 100 kV eine Adressiergenauigkeit über ein Laserinterferometer ( $\lambda/120$ ) von nominell 5,3 nm besitzt. Aufgrund der hohen Beschleunigungsspannung entsteht bei der Belichtung nur ein kleiner Intra-Proximity-Effekt, sodass man selbst in Resistsschichten von einigen Mikrometern Höhe Strukturdetails im Sub-Mikrometer-Bereich erzeugen kann. In Verbindung mit einer Belichtungsfrequenz von bis zu 10 MHz und einer maximalen Substratgröße von 6 Zoll ist diese hochauflösende Maschine hervorragend geeignet sowohl für großflächige Belichtungen als auch für die Strukturierung mit kleinsten geometrischen Details.

So werden für die Herstellung von Mikrospektrometern nach dem LIGA-Verfahren die erforderlichen Röntgenmasken mit Stufenhöhen der Gitter von unter 200 nm mit dem Elektronenstrahlschreiber strukturiert. Für spezielle Anwendungen aus dem Bereich der Nano-Strukturierung werden in Zusammenarbeit mit anderen Instituten Resiststrukturen für Lift-Off-Prozesse belichtet, bei de-

nen geometrische Details der Metallstrukturen im Bereich von wenigen 10 nm liegen [1], [2].

### 3. Optische Lithographie

Im Bereich der konventionellen Optischen Lithographie besitzt das IMT einen Maschinenpark, mit dem der gesamte Lithographieprozess vom Resistenschleudern bis zum justierten Belichten mit einem Maskaligner für 6 Zoll Chrommasken durchgeführt wird. Die Nachfrage nach diesen Prozessen wird aus sehr unterschiedlichen Anwendungen gespeist. Zu nennen sind hier Bausteine und Komponenten nach dem LIGA- und AMANDA-Verfahren. So werden z.B. bei der Herstellung von Pumpenmembranen, elektrischen Heiz-Wendeln oder Leiterbahnen Methoden und Prozesse aus der Optischen Lithografie erfolgreich eingesetzt.

Neue Anwendungsfelder für die Optische Lithografie eröffnen sich mit der Strukturierung dicker Schichten aus den Resistensystemen EPON SU-8 oder DNQ-Novolak. Auf der Basis des Resistensystems EPON SU-8 wird ein Verfahren zur Herstellung von Formeinsätzen auf 6 Zoll Siliziumwafern entwickelt. Hierbei werden die Vorteile von industriell gefertigten und qualitativ sehr hochwertigen Halbfertigerzeugnissen wie Siliziumwafer mit den sehr zuverlässigen Methoden der Optischen Lithographie kombiniert. Diese Formeinsätze werden z.B. für mikrofluidische (Lab-on-Chip) oder mikrooptische Anwendungen wie Wellenleiter [3] hergestellt und sind durch eine Rauhigkeit von  $R_a < 20$  nm gekennzeichnet.

Die experimentellen Ergebnisse werden durch theoretische Untersuchungen untermauert. So wurde am Beispiel des DNQ-Novolak AZ4562 der Diffusionsvorgang des Lösungsmittels genau analysiert und in ein Simulationsprogramm eingebaut. Die Arbeiten berücksichtigen erstmalig den Einfluss des Restlösemittelgehaltes und ermöglichen

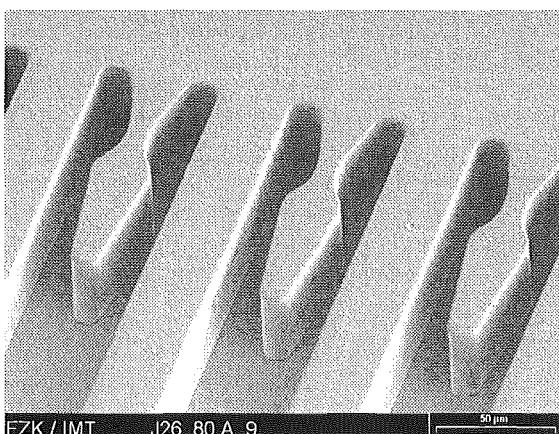


Abb 1: Detail eines Nickel Formeinsatzes, der mit EPON SU-8 Resist und Optischer Lithografie strukturiert wurde. Die Oberflächenrauhigkeit beträgt  $R_a < 20$  nm.

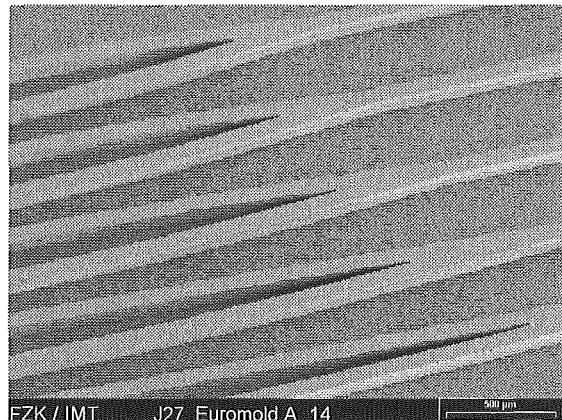


Abb. 2: Strahlteiler ( $B/H=40/60 \mu\text{m}$ ) auf einem Nickel-Formeinsatz (Außenmaß  $B \times L \times H = 65 \times 65 \times 2 \text{ mm}$ ) auf Basis des Resistensystems EPON SU-8 [3].

eine ausreichend genaue Berechnung der Resiststrukturprofile in Abhängigkeit der Strukturierungsparameter für Resistenschichten im Bereich von 100 Mikrometern [4].

### 4. Röntgentiefenlithographie

In der Röntgentiefenlithographie (RTL) wird eine Absorbersuktur einer Röntgenmaske durch Schattenprojektion in einen röntgenempfindlichen Kunststoff abgebildet. Wegen der hohen Intensität und der geringen Divergenz im Röntgenbereich wird hierzu Synchrotronstrahlung verwendet. In Verbindung mit dem Resist Polymethylmethacrylat und dem sogenannten GG-Entwickler werden am IMT Strukturen mit Strukturhöhen zwischen 20 und 3000  $\mu\text{m}$  hergestellt. Diese Kunststoffstrukturen zeigen Strukturdetails im Submikrometerbereich und eine Seitenwandrauhigkeit von besser als 35 nm. Damit ist dieses Verfahren gerade für mikrooptische Anwendungen besonders geeignet. Ein hervorragendes Beispiel stellt das in LIGA-Technik hergestellte Mikrospektrometer für unterschiedliche Spektralbereiche (UV-VIS bis Infrarot) dar [5].

Die Entwicklungsarbeiten im Bereich der RTL haben sich in den vergangen beiden Jahren im wesentlichen auf zwei Ziele konzentriert: Einerseits wurden Verfahren zur Erhöhung der Strukturtreue erarbeitet, um damit insbesondere verbesserte Komponenten für industrielle Kunden bereit zu stellen. Andererseits wurden Vorarbeiten durchgeführt, um die Röntgentiefenlithographie an der Karlsruher Synchrotronstrahlungsquelle ANKA etablieren zu können.

#### 4.1 Untersuchungen zur Verbesserung der Strukturtreue von RTL-Strukturen

Die Strukturtreue von röntgenlithographischen Strukturen wird sehr stark durch einen Dosisein-

trag unterhalb der Absorberstrukturen auf der Maske beeinflusst. Bestimmt wird der Dosiseintrag durch Fluoreszenzstrahlung aus der Maskenmembran und der Galvanikstartschicht, durch die endliche Divergenz der Synchrotronstrahlung aufgrund der Fresnelbeugung der Röntgenstrahlung an der Absorberkante und durch thermische Verformungen von Maske und Resist während des Bestrahlungsprozesses. Die resultierende Dosisverteilung an der Absorberkante ist dementsprechend leicht verschmiert.

Die thermischen Verformungen während des Bestrahlungsprozesses können durch eine leistungsreduzierte Bestrahlungstechnik minimiert werden [6], eine Verminderung des Dosisintrags durch sekundäre Strahlungsprozesse ist nur durch einen Austausch der eingesetzten Materialien möglich oder stößt an physikalische Grenzen. Aus diesem Grunde wurde verstärkt die Lösungsgeschwindigkeit des Entwickler-Resistsystems im Bereich niedriger Dosiswerte untersucht [7], um das Entwicklungsverhalten im Übergang von bestrahltem zu unbestrahltem Bereich beschreiben zu können.

In Abhängigkeit vom eingesetzten PMMA-Resistmaterial (vernetzt und unvernetzt) und der Entwicklertemperatur wurde das Kontrastverhalten des Resist/Entwicklersystems untersucht. Es wurde gezeigt, dass der Kontrast bei vernetztem Resistmaterial und bei verminderter Entwicklertemperatur deutlich grösser ist. Dies wurde durch die geometrische Vermessung von Gitterstrukturen eines IR-Spektrometerbausteins durch Rasterkraftmikroskopie nachgewiesen (siehe Abb. 3).

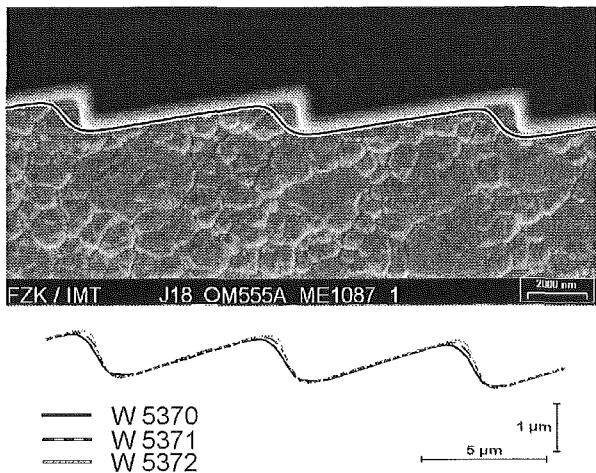


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines IR-Spektrometermaskendetails und das Profil von 550  $\mu\text{m}$  hohen direktlithographischen Spektrometerbausteinen, vermessen mit einem Rasterkraftmikroskop. W5370 und W5371 entsprechen unvernetztem Resistmaterial mit Entwicklungszeiten von 12 bzw. 6 Stunden. W5372 entspricht vernetztem Resistmaterial mit einer optimierten Entwicklungsdauer von 9 Stunden. Die Entwicklertemperatur betrug 21°C.

Diese verbesserte Strukturtreue wirkt sich auch auf das optische Leistungsvermögen von direktlithographischen Mikrospektrometern aus. Mikrospektrometer, die mit der optimierten Prozessführung hergestellt wurden, zeigen eine bis zu 1,7-fach höhere Transmission [8]. Durch diese verbesserten Eigenschaften der LIGA-Spektrometerkomponenten wird das Anwendungspotenzial zusätzlich erweitert.

Diese Fortschritte im Verständnis der Prozesse haben zu einem entscheidenden Durchbruch bei der Herstellung von defektarmen PMMA-Mikrostrukturen mit einer Höhe oberhalb von 1 mm geführt. Zur Herstellung von Strukturen mit beliebiger lateraler Geometrie ist es erforderlich das Resistmaterial auf ein Substrat aufzubringen. Die in der Röntgentiefenlithographie verwendeten Substratmaterialien Silizium ( $\alpha \approx 2 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ ) und Kupfer ( $\alpha \approx 16 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ ) haben einen deutlich geringeren linearen Ausdehnungskoeffizienten als das Resistmaterial PMMA ( $\alpha \approx 70 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ ). Unterschiedliche Prozesstemperaturen beim Aufbringen des Resists und dem Entwicklungsprozess induzieren daher Spannungen im Resistmaterial, die zu Brüchen in den Resiststrukturen in der Nähe des Substrates führen. Die resultierenden Kräfte nehmen mit der Resisthöhe deutlich zu. Durch eine kontinuierliche Prozessführung bei Raumtemperatur können die Spannungen minimiert und defektarme Strukturen hergestellt werden. In Abb. 4 ist eine 1100  $\mu\text{m}$  Resiststruktur neben einer 200  $\mu\text{m}$  hohen Nickel-Mikroturbine, in LIGA-Technik

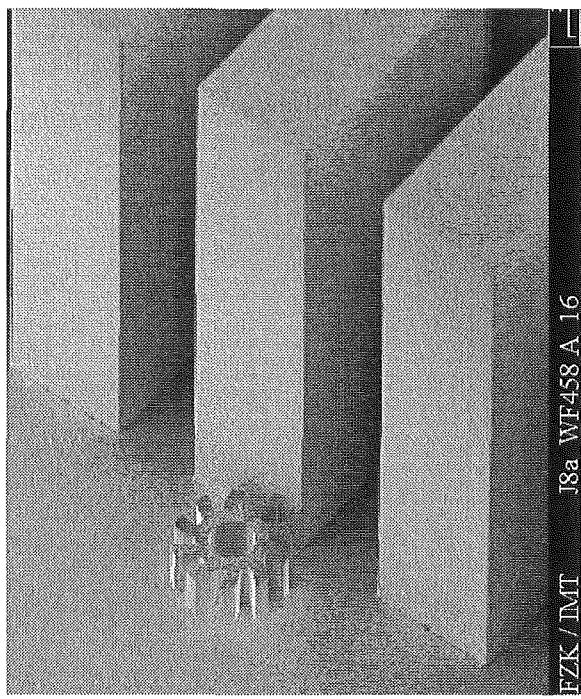


Abb. 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer 1100  $\mu\text{m}$  hohen PMMA-Struktur und einer 200  $\mu\text{m}$  hohen Nickelturbine, hergestellt in LIGA-Technik.

hergestellt, zu sehen. Das Strukturierungspotenzial der RTL in der Mikrosystemtechnik wird dadurch deutlich.

#### 4.2 Vorbereitende Experimente zur Etablierung der Röntgentiefenlithographie an ANKA

Die hohe Strukturgenauigkeit der RTL wird durch eine adaptierte spektrale Verteilung der Synchrotronstrahlung und durch Leistungsanpassung erst ermöglicht. Insofern muss eine Bestrahlungseinrichtung optimal an die Erfordernisse der Strukturierung von Resistsschichten zwischen 20 µm und mehreren Millimetern anzupassen sein.

Da bei der Maskenherstellung Zwischenmasken mit einer Absorberhöhe von ca. 2,2 µm in Resistsschichten von 30 bis 60 µm übertragen werden, muss eine weiche Röntgenstrahlung zur Ver-

fügung stehen, damit der Kontrast der primären Maske ausreichend ist. Nur so kann eine ausreichende Haftung der Resiststrukturen auf dem Substrat erzielt werden [9].

Für die eigentliche RTL mit typischen Resistdicken im Bereich von 100 bis 1000 µm müssen energiereichere Photonen verwendet werden, damit ausreichend Dosis in der Resisttiefe eingebracht wird und es nicht zum Aufschäumen des Resists an der Oberfläche kommt.

Um diese Anforderungen der RTL erfüllen zu können, benutzt das IMT derzeit den Beschleuniger ELSA des Physikalischen Instituts der Universität Bonn bei unterschiedlicher Elektronenenergie [10]. ANKA, eine Maschine für die Materialanalyse und Mikrofertigung, wird bei einer Elektronenenergie von 2.5 GeV betrieben. Unter diesen Bedingungen ist jedoch die Herstellung von hoch-

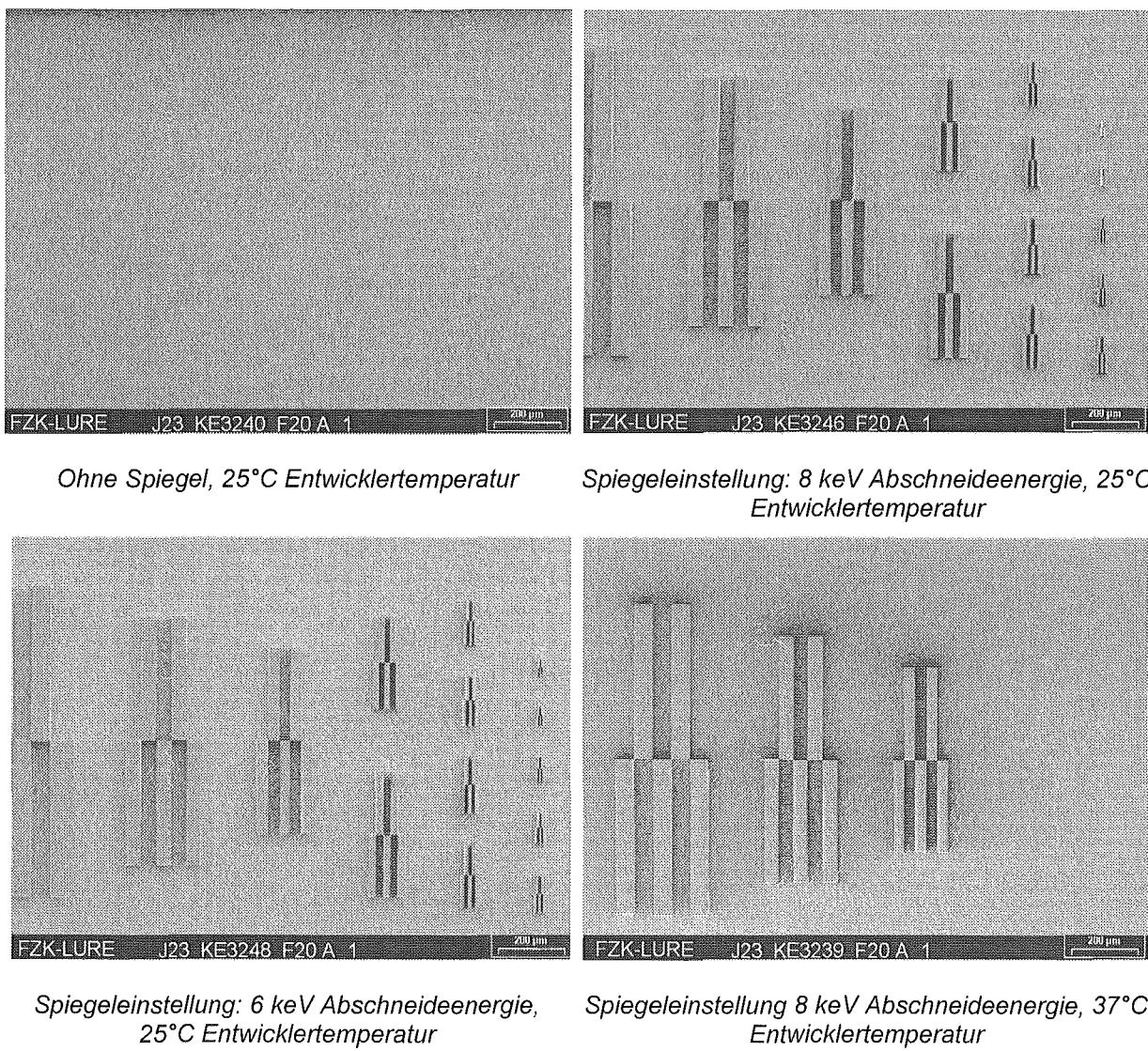


Abb. 5: Rasterelektronenmikroskopaufnahme eines 50 µm hohen PMMA-Testmusters auf einer TiOx-Galvanikstartsschicht strukturiert am Beschleuniger DCI unter Verwendung eines Spiegelsystems und unterschiedlicher Entwicklertemperatur. Die Au-Absorberhöhe auf der Röntgenmaske betrug 1 µm.

auflösenden Arbeitsmasken für die RTL nicht möglich. Aus diesem Grunde hat das IMT bereits frühzeitig Untersuchungen zum Einsatz eines Spiegelsystems für die RTL angestrebt. Aus diesem Grunde wurde zusammen mit dem französischen Partner Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique (LURE) ein Doppelspiegelsystem, bestehend aus zwei ebenen, mit Nickel beschichteten Zerodur-Spiegeln der Größe  $600*70*50$  mm<sup>3</sup>, einer Oberflächenrauhigkeit von besser als 5 Å rms und einem mittleren Neigungsfehler von 1,86 µrad rms am Strahlrohr H11 am Beschleuniger DCI installiert. Ein solches Spiegelsystem, das unter streifendem Einfall arbeitet, wirkt als Tiefpassfilter für die Röntgenstrahlung. In Abhängigkeit des Reflexionswinkels wird der niederenergetische Photonenanteil im abgestrahlten Synchrotronstrahlungsspektrum von einem solchen Spiegel reflektiert, während der hochenergetische Anteil im Spiegelkörper absorbiert wird. Dadurch wird die mittlere Photonenenergie nach Reflexion an einem solchen Spiegel zu niedrigen Energien verschoben. Die einfallende Röntgenleistung auf die Probe nimmt zwar ab und die Bestrahlungszeit steigt, aber gleichzeitig steigt der Kontrast der Röntgenmaske. Durch den Einsatz zweier Spiegelkörper kann die ursprüngliche Strahlrichtung beibehalten werden und somit eine Nachjustierung des Experiments zum reflektierten Strahl hin vermieden werden.

Experimente bei unterschiedlichen Einfallswinkeln und damit bei unterschiedlichen Abschneideenergien zeigen die gewünschten Vorteile. Eine Röntgenmaske mit Goldabsorberstrukturen der Dicke von 1 µm wurde in Abhängigkeit der Abschneideenergie in einen 50 µm dicken PMMA-Resist abgebildet. Die Resiststrukturen wurden anschließend mit dem GG-Entwickler freigelegt. Die experimentellen Ergebnisse sind in der Abbildung 5 wiedergegeben. Während ohne Spiegelsystem die PMMA-Strukturen auf dem TiO<sub>x</sub>-Substrat nach dem Entwicklungsprozeß weggewaschen werden, bleiben mit abnehmender Abschneideenergie die kleineren Strukturen auf dem Substrat haften. Durch den erhöhten Röntgenkontrast der Maske passieren weniger hochenergetische Photonen die Goldabsorberstrukturen. Die Anzahl der in den Resist zurückgestreuten Elektronen aus der TiO<sub>x</sub>-

Schicht wird reduziert und die eingetragene Dosis in den Resist am Fußpunkt minimiert. Der Entwickler kann die Interfaceschicht des Resists zum Substrat nicht mehr angreifen. Somit haften zunehmend kleinere Resist-Strukturen auf dem Substrat. Die Abbildung 5d zeigt zusätzlich den verbesserten Kontrast des Entwickler/Resistsystems durch eine herabgesetzte Entwicklertemperatur, wie es bereits im vorangegangen Abschnitt diskutiert wurde.

## 5. Ausblick

Die Arbeiten zur RTL werden sich in diesem Jahr auf die Etablierung der RTL an dem am Forschungszentrum Karlsruhe im Aufbau befindlichen Beschleuniger ANKA konzentrieren. Dazu muß zunächst die bisher erreichte Qualität der hergestellten Mikrostrukturkomponenten sichergestellt werden. Durch ANKA wird der Zugang zu einer Synchrotronstrahlungsquelle erheblich einfacher gestaltet, und durch die räumliche Nähe zwischen den Belichtungsstationen und den Prozesslabor am IMT wird die Fertigungssicherheit signifikant erhöht. Nachdem Fertigungsverfahren, die den Regeln des IMT-Qualitätsmanagementsystems entsprechen, an ANKA etabliert sind, können Untersuchungen zur Massenfertigung von Mikrostrukturkomponenten mittels RTL durchgeführt und entsprechende Strategien verfolgt werden [12]. Beispielhaft seien an dieser Stelle die parallele Bestrahlung von mehreren Proben bzw. der Einsatz von empfindlicheren Resistmaterialien (z.B. SU 8) erwähnt. Ziel dabei ist es, eine kostengünstige Fertigung von Prototypen und Serienfertigung mit kleineren und mittleren Stückzahlen als Standardfertigungsverfahren zu realisieren.

Darüberhinaus werden die Verfahren der Optischen Lithographie und der Elektronenstrahlolithographie gemäß dem Qualitätsmanagementsystem des IMT etabliert, um auch mit diesen Verfahren qualitätsgerechte Teile an Kunden liefern zu können.

Damit qualifiziert sich das IMT als Kompetenzzentrum zur Herstellung lithographischer OEM-Komponenten und Halbzeuge (Formeinsätze).

## Literatur

- [1] E.Scheer, H.V. Löhneysen, H. Hein "Fabrication of noble-metal nanoconstrictions and observation of conductance fluctuations", J. Vac. Sci. Technol. B 12, 3171 (1994)
- [2] R. Schäfer, S. Kaus, B. Limbach, P.v. Stein, A. Sypli, C. Wallisser; S. Achenbach, H. Hein; B. Obst, „Nanometerskalige Tunnelkontakte für die Einzelladungselektronik, Nachrichten Forschungszentrum Karlsruhe , Jahrg. 31 2-3/99, 1999
- [3] D. Krabe, W. Scheel "Optical Interconnects by Hot Embossing for Module and PCB Technology – The EOCB Approach - , Proc. 49<sup>th</sup> Electronics components & Technology Conference, 1-4 June 1999, San Diego, CA, p. 1164-1166
- [4] S.-J. Chung, H. Hein, J.Schulz, J. Mohr "Simulation of Structureprofiles in optical Lithography of thick DNQ-Novolak based Photoresist", SPIE Proc., Microlithography 2000, Vol. 3999, 27.02.-01.03. 2000, Santa Clara, CA, USA
- [5] R. Wechsung: „Wachstumsmarkt Mikrosystemtechnik am Beispiel des LIGA-Mikrospektrometers“, dieser Band
- [6] F.J. Pantenburg and J. Mohr "Influence of secondary effects on the structure quality in deep X-ray lithography", Nuclear Instruments and Methods B 97, (1995), 551-556
- [7] F.J. Pantenburg, S. Achenbach, J. Mohr "Influence of developer temperature and resist material on the structure quality in deep X-ray lithography", Journal of Vacuum Science and Technologies B, Vol 16 (Nov./Dec. 1998), 3547-3551
- [8] S. Achenbach, J. Mohr, F.J. Pantenburg "Application of Scanning Probe Microscopy for the determination of the structural accuracy of high aspect ratio microstructures", Proceedings of MNE 1999, Rome
- [9] F.J. Pantenburg, J. Chlebek, A. El-Kholi, H. L. Huber, J. Mohr, H. K. Oertel, J. Schulz "Adhesion problems in deep-etch lithography caused by fluorescence radiation from the plating base", Microsystem engineering 23, (1994) 226-226
- [10] F.J. Pantenburg, J. Mohr, H. O. Moser, K.-H. Häfele "Fertigung von Mikrostrukturen durch Röntgentiefenlithographie an der Karlsruher Synchrotronstrahlungsquelle ANKA", dieser Tagungsband
- [11] S. Megert, F.J. Pantenburg, S. Achenbach, R. Kupka, J. Mohr, M. Roulliay "Preliminary results on the use of a mirror-system for Li-GA-process", SPIE, Volume 3680 (March/April 1999), 917-923
- [12] V. Saile "Strategies for LIGA Implementation", H. Reichl; E. Obermeier (Editors); VDE-Verlag; Microsystem Technologies 98, 6<sup>th</sup> Int. Conf. On Micro Electro, Opto, Mechanical Systems and Components; Potsdam (1998) S. 25-30

# Fertigung von mikrostrukturierten Komponenten und Formeinsätzen aus Metall

Walter Bacher <sup>1)</sup>, Klaus Bade <sup>1)</sup>, Andreas Guber <sup>1)</sup>, Markus Guttmann <sup>2)</sup>, Wilhelm Pfleging <sup>3)</sup>,  
Thomas Schaller <sup>4)</sup>, Peter Schloßmacher <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik, <sup>2)</sup> Institut für Materialforschung III,  
<sup>3)</sup> Institut für Materialforschung I, <sup>4)</sup> Hauptabteilung Versuchstechnik

## Zusammenfassung

Innerhalb des LIGA-Prozesses wird die Mikrogalvanoformung für die Fertigung von Formeinsätzen für Abformwerkzeuge zur Erzeugung von Mikrostrukturen aus Kunststoff oder Keramik durch Replikationsverfahren oder für die Herstellung von metallischen Mikrokomponenten auf direktem Wege durch Kombination von Lithographie und galvanischer Metallabscheidung eingesetzt. Derartige mikrostrukturierte Bauteile aus Metall lassen sich auch mittels Laserstrukturierung, Mikrosenkerodieren oder durch Verfahren der Mechanischen Mikrofertigung herstellen. Der vorliegende Beitrag liefert eine Übersicht über aktuelle Arbeiten, die am Forschungszentrum Karlsruhe für die Weiterentwicklung dieser Fertigungsverfahren vorgenommen wurden.

## 1. Einleitung

Die Aktivitäten des PMT im Forschungszentrum Karlsruhe konzentrieren sich auf diejenigen Werkstoffe, die in der Silizium-Mikrosystemtechnik nicht Standard sind, nämlich Metalle, Kunststoffe und Keramiken. Über die Fertigung von Kunststoffkomponenten und keramischen Mikrokomponenten wird in den folgenden Beiträgen berichtet. Der vorliegende Beitrag hat die Fertigung metallischer Mikrobauteile zum Gegenstand.

Metallische Bauteile mit minimalen lateralen Abmessungen im Bereich unterhalb von 100 Mikrometern und mit Aspektverhältnissen, die je nach der Herstellungsmethode von ca. 1 bis 5 reichen, werden heutzutage von verschiedenen Firmen auf dem Markt angeboten. Die Fertigungsmethoden für solche Teile sind beispielsweise Photoätzen, Laserschneiden oder Schneiderodieren. Teile, die nach solchen Verfahren hergestellt werden, sind z.B. Siebfolien, Chip-Carrier oder Zahnräder für die Uhrenindustrie. Die Verfahren eignen sich für mittlere bis größere Stückzahlen, und die kleinen und mittelgroßen Unternehmen (KMU), die solche Erzeugnisse anbieten, stehen teilweise in einem hartem Wettbewerb.

Im Forschungszentrum werden metallische Mikrostrukturen zunächst innerhalb des LIGA-Verfahrens durch galvanische Metallabscheidung in verlorene Formen hergestellt, die ihrerseits durch die Bestrahlung von PMMA am Synchrotron und Entwickeln hergestellt werden. Nach wie vor ist das ein Weg zur Herstellung von metallischen Mikrobauteilen, die sich durch die LIGA-typischen Vorteile der beliebigen Strukturierbarkeit, des hohen Aspektverhältnisses und der extrem geringen Wandrauhigkeit auszeichnen.

Derzeit ist im PMT kein Kundenauftrag für die Herstellung einer großen Stückzahl von metallischen LIGA-Bauteilen nach dieser Methode in Bearbeitung. Das soll sich ändern, wenn, wie im vorherigen Beitrag ausgeführt, Fertigungstechniken für die primäre Strukturierung von Kunststoffen durch Röntgenlithographie an ANKA entwickelt sind, nach denen solche hochgenauen Mikrostrukturen in großen Stückzahlen wirtschaftlich produziert werden können. Die Entwicklung eines ISO 9001-kompatiblen Fertigungsverfahrens für die galvanische Metallabscheidung in solche verlorenen Formen ist bereits am IMT im Gange.

Neben den aus der LIGA-Technik abgeleiteten Verfahren sind im PMT auch andere Methoden in den sog. Teiltechniken im Einsatz, die sich von den Fertigungsverfahren, wie sie die KMU anwenden, unterscheiden, sei es, dass andere Werkstoffe eingesetzt werden oder Strukturierungsmethoden, die speziell im PMT entwickelt wurden und Alleinstellungsmerkmale darstellen. Einige Beispiele für die Mechanische Mikrofertigung und die Laserbearbeitung werden in diesem Beitrag gegeben.

Wenn Mikrostrukturen aus Kunststoffen in LIGA-Qualität und in hohen Stückzahlen gefertigt werden sollen, müssen geeignete Replikationstechniken existieren. Die Werkzeuge zur Replikation von Mikrostrukturen durch Kunststoffabformung sind wegen der mechanischen Stabilität und der Standzeit in der Regel aus Metall. Diese Werkzeuge sind selbst Mikrostrukturen oder enthalten mikrostrukturierte Bereiche und werden ihrerseits mit den Methoden der Mikrotechnik hergestellt. Im IMT, speziell im Funktionsbereich Mikrofertigung, gibt es Erfahrungen bei der Fertigung kleiner Serien solcher Formeinsätze für die Abformung von Mikrospektrometerbausteinen aus PMMA durch

Heißprägen im Auftrag der Fa. microParts und unter konsequenter Anwendung des Qualitätsmanagementsystems nach ISO 9001.

Auch durch Mechanische Mikrofertigung werden vielfach Abformwerkzeuge für Erzeugnisse hergestellt, die nicht die Submikrometer-Anforderungen der LIGA-Komponenten erfüllen müssen. Da solche Formeinsätze häufig im Kundenauftrag hergestellt werden, der im IMT nach ISO 9001 abgewickelt werden muss, ist die Hauptabteilung Versuchstechnik (HVT) als Unterlieferant eng in das Qualitätsmanagement eingebunden.

Durch Laserstrukturierung lassen sich ebenfalls Formeinsätze herstellen, die für spezielle Anwendungen durch Mikrospritzgießen bzw. Reaktionsgießen abgeformt werden können. Für das Prägen von Mikrokapillarstrukturen werden auch Formeinsätze durch Mikrosenkerodieren hergestellt, wobei diese Methode noch nicht unter Fertigungsgesichtspunkten eingesetzt wurde.

## 2. Herstellung metallischer Mikrostrukturen

Die Fertigung von metallischen Mikrokomponenten, soweit sie im Forschungszentrum Karlsruhe bereits angewandt wird, ist bisher noch auf Mustermengen oder kleine Stückzahlen beschränkt; sie eignet sich aber häufig für die relativ kurzfristige Herstellung geringer Stückzahlen von Prototypen im Industrieauftrag. Ein Teil der Methoden ist erst im Laborstadium; sie werden aber als aussichtsreich für eine zukünftige Fertigung eingeschätzt. Ein hochwertiges Erzeugnis aus diesem Bereich stellen die Röntgenmasken für die LIGA-Technik dar, die bereits heute nach Standardverfahren gefertigt werden.

### 2.1 Erzeugung metallischer Mikrostrukturen durch Kombination von Lithographie und Galvanik

Durch die Kombination von lithographischen und galvanischen Prozessen sind metallische Mikrostrukturen in einem weiten Bereich von geometrischen Abmessungen zugänglich. Auf einem elektrisch leitfähigen Substrat wird ein Resist durch UV- oder Röntgentiefenlithographie strukturiert und in die entstandenen freien Bereiche mit einem Metall oder einer Legierung gefüllt, so dass die Resistoberseite nicht überwachsen wird [1].

Vom Gesichtspunkt der Fertigungstechnik her ist die Kombination von Elektronenstrahl- oder Röntgentiefenlithographie unter Einsatz von PMMA als Resist oder die UV-Lithographie mit Novolakresisten in Kombination mit einer Nickelabscheidung aus einem Sulfatelektrolyten bzw. Gold aus einem Sulfatelektrolyten am weitesten fortgeschritten. So werden die Röntgenmasken für die Röntgentiefenlithographie durch die Goldabschei-

dung auf Titanfolien, die mit PMMA-Resiststrukturen versehen sind, sowie die Nickelabscheidung in höheren PMMA-Strukturen als ISO 9001 konforme Prozesse am IMT eingesetzt. Hinsichtlich der Serienfertigung von metallischen Mikrostrukturen wird auf die Planungen hinsichtlich ANKA/MARTA verwiesen.

Sind die strukturellen Anforderungen hinsichtlich der resultierenden Metalldicke und der Seitenwandqualität, wie Steilheit und Rauigkeit, nicht so zwingend wie bei optischen Anwendungen, können vorteilhaft auch UV-lithographisch strukturierte Resiste eingesetzt werden. In der Regel sind hier die erreichbaren Metalldicken begrenzt. Aktuell kann der Dickenbereich durch den Einsatz von SU-8 ausgedehnt werden. Diese Variante befindet sich in der Umsetzung zu einem fertigungstechnisch abgesicherten Verfahren.

Als Beispiel wird die Herstellung metallischer Mikrostrukturen aus Nickel-Eisen (NiFe) für ein mikrooptisches Choppersystem vorgestellt. Verglichen mit dem Mikrorelais [2] aus NiFe werden hierfür jedoch deutlich höhere Mikrostrukturelemente benötigt, wobei die magnetischen Eigenschaften erhalten bleiben sollen. Mit dem Ansatz des bewährten Sulfatelektrolyten konnte der Arbeitsbereich auf Schichtdicken bis zu 300 µm ausgedehnt werden (siehe P. Krippner et al., dieser Band).

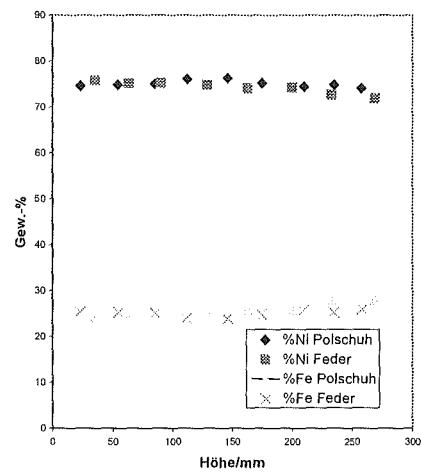


Abb. 1: EDX-Messungen der Legierungszusammensetzung an NiFe-Mikrostrukturen

Dazu wurde eine verkleinerte Anlage aufgebaut, die eine bessere Kapselung erlaubt. Bedingt durch das kleinere Badvolumen erhöhte sich der Aufwand zur Aufrechterhaltung konstanter Prozessbedingungen. Deshalb wurde eine automatische pH-Regelung eingebaut und der Elektrolytvolumenfluss konstant gehalten. Mit einem solchen Aufbau lassen sich konstante Legierungszusammensetzungen im gewünschten Schichtdickenbereich erreichen, wie mit in Abb. 1 dargestellten EDX-Messungen der Legierungszusammensetzung an den erhaltenen Mik-

rostrukturen belegen. Die magnetischen Eigenschaften des abgeschiedenen Materials bleiben erhalten [3].

Noch nicht befriedigend gelöst ist die Dickenverteilung der Nickel-Eisen-Abscheidung an inhomogen verteilten Mikrostrukturen. Die Dicke fällt in schmalen Strukturen deutlich höher aus als in breiteren Strukturelementen. Durch bewusstes Übergalvanisieren und eine mechanische Nachbearbeitung wurde das gewünschte Ergebnis erhalten. Für einen serienfähigen Prozess ist dieses Vorgehen in dieser Form nicht akzeptabel. Zu diesem Zeitpunkt ist für die Herstellung von Prototypen eine gezielte Anpassung von Prozessparametern sowie eine Layout-Iteration notwendig. Weitere Entwicklungen werden sich mit der Homogenisierung der galvanischen Abscheidung beschäftigen müssen.

Für eine Zusammenstellung der verfügbaren Galvanikprozesse (Au, Ni, NiFe, NiP, Cu) und typischer Strukturen wird auf den Beitrag von K. Bade et al. (dieser Band) verwiesen.

## 2.2 Erzeugung metallischer Mikrostrukturen durch galvanische oder stromlose Metallabscheidung in clustermetallisierte Kunststoffformen

Die mittels Heißprägen oder Spritzgießen hergestellten verlorenen Formen aus isolierenden Thermoplasten (R. Ruprecht et al., dieser Band) können dazu eingesetzt werden, um Mikrobauteile aus Metall auch in großen Stückzahlen durch galvanische oder stromlose Metallabscheidung herzustellen. Mit dem Ziel, eine gerichtete Auffüllung der verlorenen Formen zu erreichen, wurden am IMF III verschiedene Lösungsansätze entwickelt, über die bereits an anderer Stelle ausführlich berichtet wurde [4-6].

Eine mögliche Verfahrensvariante beinhaltet das Aufbringen einer dünnen Metallschicht auf dem Kunststoffsubstrat durch Beschichtung mit Metallclustern [5,7]. Nach der Erzeugung der Clusterschicht kann in Abhängigkeit davon, ob auf dem Substrat zusammenhängende oder isolierte metallisierte Strukturbereiche vorliegen, eine galvanische oder eine stromlose Metallabscheidung erfolgen.

Im Anschluß an frühere Arbeiten sind in Kooperation zwischen dem IMF III und der Universität Freiburg in jüngster Zeit Untersuchungen in Hinsicht auf eine Vereinfachung dieser Verfahrensvariante durchgeführt worden. Durch Einsatz des am Freiburger Materialforschungszentrum entwickelten Energetic-Cluster-Impact(ECI)-Beschichtungsverfahrens, (bei dem die Erzeugung der Metallcluster mittels eines Hochdruck-Sputtermagnetrone

folgt und die Metalcluster, d.h. Partikel aus mehreren hundert bis zehntausend Atomen, mit variabler kinetischer Energie auf eine zu beschichtende Unterlage beschleunigt werden) sind verschiedenartige mikrostrukturierte Kunststoffsubstrate aus PMMA (mit Teststrukturen) durch Aufbringen einer dünnen Palladiumschicht direkt metallisiert worden. (siehe [8] und dort zitierte Literatur).

Die am Boden und an der Front der Kunststoffmikrostruktur (die Seitenflächen bleiben auf Grund der gerichteten Beschichtung metallfrei) erzeugte glatte und auf dem PMMA-Substrat sehr gut hafende Pd-Schicht (ca. 20 nm) war ohne weitere Modifikation als Startschicht für die galvanische Abscheidung von Nickel aus einem Sulfamat-Elektrolyten geeignet (siehe Abb. 2).

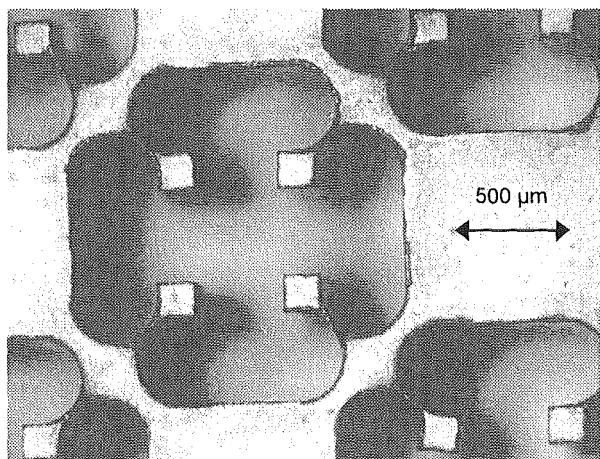


Abb. 2: Ausschnitt aus einer Teststruktur (Höhe 1300  $\mu\text{m}$ ), direkt galvanisch abgeformt von einer durch Beschichtung mit Pd-Clustern leitfähig gemachten verlorenen PMMA-Kunststoffform

Auch die stromlose Abscheidung von Nickel-Phosphor aus einem ammoniakalischen Bad kann direkt auf der Pd-Clusterschicht erfolgen. Dabei ist im Gegensatz zu bisherigen Arbeiten kein naß-chemischer Bekeimungs- bzw. Zementationsprozess (Austausch Clustermetall gegen Palladium) zur Erzeugung einer Oberfläche mit autokatalytischen Eigenschaften mehr erforderlich.

Mit diesem Verfahren ist eine gerichtete und homogene Auffüllung einzelstehender Mikrostrukturen (Gräben, Löcher, etc.) möglich, wenn die dazu erforderliche partielle Cluster-Metallisierung der verlorenen Formen nur im Strukturgrund realisiert werden kann. Mit diesem Ziel werden derzeit in Kooperation weitere intensive Arbeiten durchgeführt [9]. Die Weiterentwicklung dieser relativ einfachen Verfahrenskombination resultiert dabei aus dem hohen Potential, welches diese Methode für eine mögliche industrielle Serienproduktion vereinzelter Mikrobauteile aus Metall aufweist.

## 2.3 Lasergestützte Mikrofertigung von metallischen Komponenten

Die Bearbeitung von metallischen Oberflächen zur Mikrostrukturierung mittels Laserstrahlung kann am Forschungszentrum durch unterschiedliche Prozesstechnologien erfolgen:

- Laserstrahlschneiden
- Laserstrahlfügen
- Laserstrahlformabtrag
- Laserstrahlreinigen

Alle Prozesse haben gemeinsam, daß sie für eine Anwendung in der Mikrosystemtechnik nur eine geringe thermische Einflusszone im zu bearbeitenden Werkstoff aufweisen dürfen. Die Reflektivität und Wärmeleitfähigkeit metallischer Werkstoffe sind hierbei wichtige Materialparameter, die die Effizienz der jeweiligen Prozesstechnologie bestimmen. Ebenso müssen die Laserparameter wie Wellenlänge (1064 nm, 532 nm, 248 nm, 193 nm) und Pulsdauer (0,05-10 ms, 100-200 ns, 20 ns), auf die jeweilige Prozesstechnologie und den jeweiligen Werkstoff abgestimmt werden.

Das Laserstrahlschneiden und -fügen wird derzeit am Forschungszentrum für die Herstellung von Komponenten für die Medizintechnik und die Mikrosystemtechnik eingesetzt (z.B. Stents; Pumpengehäuse; Implantate; Instrumente für die Minimal Invasive Chirurgie). Das Potential des Laserstrahlmikroschneidens für die Serienfertigung wurde mehrfach demonstriert. Speziell bei der Bearbeitung zylindrischer Geometrien ist durch eine automatische Nachführung des Rohrmaterials eine Fertigung mit großen Stückzahlen möglich. (Für die anderen o.g. Prozesstechnologien siehe Kap. 3.4 und unter W. Pfleging et al., dieser Band.)

## 2.4 Erzeugung metallischer Mikrostrukturen durch spanabhebende Bearbeitung

Durch spanabhebende Bearbeitung können vielfältige Mikrostrukturierungsaufgaben gelöst werden. Auf CNC-Hochpräzisions-Bearbeitungsmaschinen werden mikrostrukturierte Bauteile in Einzelanfertigung oder Stückzahlen bis etwa 100 mikrometergenau gefertigt. Der Strukturvielfalt sind kaum Grenzen gesetzt: Nuten und Stege, ebene und gestufte Strukturen, gerade und geneigte Wände, Bohrungen, Stifte und Durchbrüche. Die typischen lateralen Strukturabmessungen liegen bei einigen 100 µm mit Aspektverhältnissen bis etwa 10. Aufgrund der Durchmesser der zur Verfügung stehenden Diamant- und Hartmetallfräser ist die realisierbare Nutbreite auf 200 µm (Diamant) bzw. 50-100 µm (Hartmetall) beschränkt. Mit Diamantwerkzeugen können Kunststoffe und Nichteisenmetalle bearbeitet werden, die Hartmetallwerkzeuge eignen sich zusätzlich zur Bearbeitung von Stahl.

Vor allem bei der Bearbeitung von Kunststoffen hat sich die Mechanische Mikrofertigung als schnelles, kostengünstiges und flexibles Verfahren zur direkten Herstellung von Prototypen bewährt: Ein Anwendungsbeispiel sind Lochplatten aus PMMA für optische Steckverbinder [10], die nach Kundenzeichnung in mehreren Strukturierungsvarianten gefertigt wurden.

Eine direkte Fertigung in Metallwerkstoffen ist ebenfalls möglich; meist werden die Metallstrukturen jedoch als Formeinsätze für die Replikation eingesetzt (siehe Kap. 3.5).

## 3. Fertigung von Abformwerkzeugen aus Metall

Die Abformwerkzeuge, deren Fertigung in den folgenden Abschnitten beschrieben wird, können in Bezug auf das LIGA-Verfahren als ein Spitzenerzeugnis aus dem PMT betrachtet werden. Eine Kleinserie von Formeinsätzen zum Prägen von Mikrospektrometerbausteinen wurde im Industriauftrag unter Anwendung der ISO 9001-Norm gefertigt. Sie vereinen höchste Präzision im Submikrometerbereich mit guter Reproduzierbarkeit und kontinuierlich steigender Ausbeute. Für die Formeinsatzfertigung, auch bereits im Auftrag externer Kunden, sind weitere Methoden im Forschungszentrum entwickelt worden. Teilweise erlauben die verschiedenen Fertigungsverfahren eine kombinierte Anwendung, wie z.B. bei der Herstellung von mehrstufigen Formeinsätzen.

### 3.1 Fertigung von Formeinsätzen durch Röntgentiefenlithographie und Nickelgalvanik

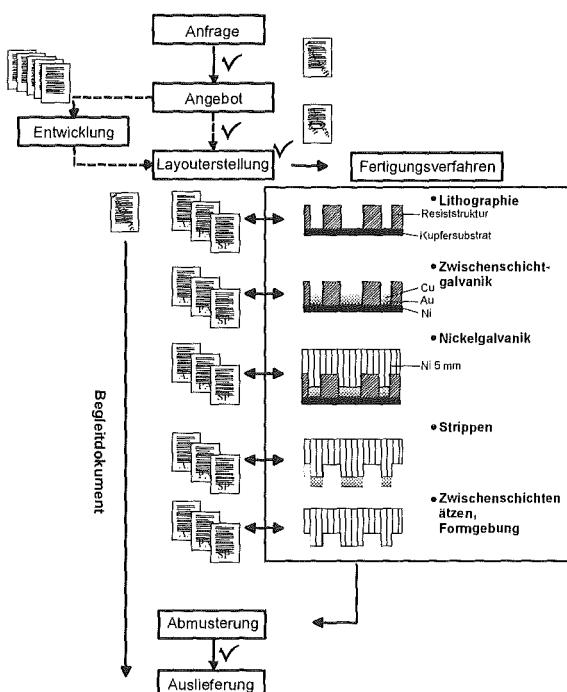


Abb. 3: Schematische Darstellung eines ISO 9001 gerechten Fertigungsablaufs zur Herstellung von Formeinsätzen

Formeinsätze mit sehr feinen Strukturdetails und höheren Aspektverhältnissen werden in der Regel über die Kombination Röntgentiefenlithographie und Nickelgalvanik erzeugt. Der Ablauf ist in Abb. 3 gezeigt.

Es ist gelungen, dieses Verfahren in das ISO 9001 QS-System einzubinden. Das Verfahren wurde in Arbeitsanweisungen gefasst und der Ablauf hinsichtlich der fertigungstechnischen Erfordernisse entsprechend etabliert (siehe D. Maas et al., dieser Band). Vor einer erfolgreichen Auftragsbearbeitung muss die Aufgabenstellung genau und eindeutig erfolgen. Eignet sich das zu fertigende Objekt für die Verfahrenskette, wird diese gestartet, andernfalls vorher die notwendige Entwicklung durchgeführt. Durch dieses Vorgehen werden stark explorative Entwicklungen von Verfeinerungen und auf Serientauglichkeit ausgerichtete Arbeiten deutlich und nachvollziehbar getrennt und damit serientaugliche Verfahren erst ermöglicht. Der Prozess an sich ist in [11,12] detaillierter beschrieben.

### 3.2 Werkstoffcharakterisierung

Ein zentrales Kriterium für den einzusetzenden Werkstoff ist der Härteverlauf nach Auslagerung bei Temperaturen im Bereich der Formgebung (250-350°C) von Kunststoffen wie PSU, PEEK und PFA. Die Härte soll dort möglichst keine Abnahme erfahren, da dies eine Verkürzung der Standzeit der Formeinsätze durch deren Verformung bedeuten würde. In Abb. 4 ist der Härteverlauf der drei Materialien Ni, NiCo, NiFe dargestellt.

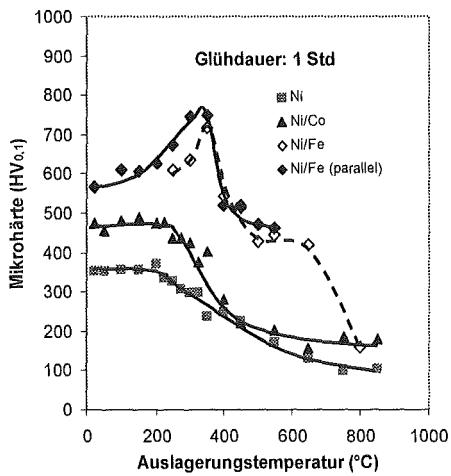


Abb. 4: Abhängigkeit der Härte von Ni, NiCo und NiFe von der Temperatur

Nickel, wie es galvanisch im standardisierten Verfahren erzeugt wird, zeigt dabei eine bei ca. 200 °C beginnende, rekristallisationsbedingte Härteabnahme. Ein ähnliches Verhalten zeigt der Werkstoff NiCo. Hier ist die Ausgangshärte höher,

aber der Härteverfall setzt bei vergleichbaren Temperaturen ein. Ein deutlich besseres Verhalten zeigt der Härteverlauf von NiFe. Die Ausgangshärte ist hier höher als bei den zuvor erwähnten Materialien. Nach einem Anstieg der Härte, der bei 350°C ein Maximum erreicht, wird nach einem Härteverlust bei höherer Auslagerungstemperatur ein Härteplateau erreicht. Im metallographischen Querschliff ist bis dahin kein Gefüge aufzulösen. Der Härteabfall bei 650°C geht mit einsetzender Rekristallisation einher, die auch im Querschliff beobachtbar ist.

Das Verhalten galvanisch abgeschiedener NiFe-Legierungen verspricht durch die erst bei vergleichsweise hohen Temperaturen eintretende Härteabnahme längere Standzeiten als die zur Zeit verwendeten Formeinsätze aus Ni.

Um den Härteverlauf von NiFe zu verstehen, wurden Strukturuntersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) durchgeführt. Die Auswertung ergab, dass das Gefüge im abgeschiedenen Ausgangszustand nanokristallin bzw. nanokristallin/ amorph (mittlere Korngrösse um 15 nm) ist. Nach dem Härtemaximum steigt die mittlere Korngröße auf etwa 80 nm an. Das Vorliegen eines nanokristallinen Gefüges bis in das Härteplateau hinein erklärt, warum im metallographischen Querschliff lichtoptisch kein Gefüge zu erkennen war.

Der Härteanstieg bis 350°C könnte auf eine zunehmende Kristallisation amorpher Gefügebestandteile und eine gleichzeitig wachsende Ordnung (geordnete Ni<sub>3</sub>Fe-Phase) des Kristallgitters zurückgeführt werden. Zwischen 350°C und 400°C könnte der aus dem Ni-Fe-Phasendiagramm bekannte Ordnungs-Unordnungsübergang ablaufen, was durch kalorimetrische Messungen (DSC) untermauert wird.

Trifft die Hypothese der Ordnungs-Unordnungs-umwandlung zu, kann aus dem Ni-Fe-Phasendiagramm die Zusammensetzung mit der maximalen Umwandlungstemperatur ausgewählt werden. Wird eine solche Legierung eingesetzt, ist der für die Kunststoffformgebung nutzbare Temperaturbereich ohne Härteverlust maximiert [13,14].

### 3.3 Fertigung bzw. Kopie von Formeinsätzen durch galvanische Replikation mikrostrukturierter Kunststoffformen

Die bereits in Kap. 2.2 genannten verlorenen Kunststoffformen können auch als Substrat- bzw. Ausgangsmaterial zur Fertigung von Formeinsätzen für die Kunststoffreplikation verwendet werden. Diese Technologie bietet sich insbesondere dann an, wenn ein bestimmtes Formeinsatzdesign mit nicht zu großen Aspektverhältnissen in mehrfachen Exemplaren benötigt wird und deshalb mehrmals kopiert werden muß. (Andererseits

lassen sich auch mikromechanisch hergestellte Formeinsätze aus Messing galvanisch umkopieren, wenn die mechanische Fertigung nur die Erzeugung der Negativform des gewünschten Designs ermöglicht.)

Zunächst werden mittels des Urformeinsatzes (Herstellung durch LIGA-Verfahren oder durch mikromechanische Fertigung) verlorene Formen (Negativ) in PMMA geprägt oder spritzgegossen, wobei sich alle Strukturdetails des Formeinsatzes im Kunststoffteil fehlerfrei wiederfinden müssen. Demzufolge wird für die Methoden der Kunststoffreplikation ein hoher Anspruch in Bezug auf die Oberflächengüte der verlorenen Formen vorausgesetzt.

Nach Vorliegen eines mikrostrukturierten Kunststoffteils muss dieses anschließend einer Oberflächenvorbehandlung unterzogen werden, welche insbesondere der Reinigung der Oberfläche, der Haftvermittlung und der Erzeugung einer leitfähigen Galvanikstartsicht dient [5,6]. Letzteres wurde für das am IMF III untersuchte, mittels Heißprägen erzeugte Strukturdesign (Teststruktur in PMMA mit Gräben; Aspektverhältnis zwischen 5 und 8, kleinstes Strukturdetail 20 µm) durch Aufbringen einer ca. 200 nm starken Goldschicht mittels Sputtern (Ar-Druck  $5 \cdot 10^{-3}$  mbar; 30-40 W) realisiert.

Die anschließende ungerichtete galvanische Abformung der vollflächig metallisierten Kunststoffform unterliegt auch bei einheitlicher Oberflächenleitfähigkeit hinsichtlich Strukturtiefe und Aspektverhältnis einer Begrenzung [5,6]. Für das untersuchte Formeinsatzdesign war jedoch eine fehlerfreie Auffüllung der Strukturen möglich. Hierfür wurde die goldbeschichtete Kunststoffform in geeigneter Weise kontaktiert und anschließend in einem Sulfamat-Elektrolyten einer spannungskontrollierten Nickelabscheidung unterzogen. Dabei hat es sich für eine fehlerfreie Auffüllung sehr enger Strukturbereiche als Vorteil erwiesen, die resultierende Stromdichte durch gezielte Einstellung der Spannung zunächst sehr gering zu halten und erst während der Abscheidungszeit zu einer höheren Stromdichte überzugehen.

Da bei entsprechend langer galvanischer Abformung stets auch die erforderliche Metallplatte entsteht, die die Mikrostrukturen miteinander verbindet, kann nach Beendigung der Galvanik, nach Auflösen des Kunststoffs und nach mechanischer Nacharbeitung das entstandene Bauteil aus Metall in die geforderte Formeinsatzgröße gebracht und für die Kunststoffreplikation eingesetzt werden.

Bei Vergleich der verlorenen Formen aus PMMA mit der galvanisch erzeugten Nickelstruktur wurde festgestellt, dass alle Strukturdetails (ohne Galvanikfehler) in Metall abgeformt wurden und die

Maßabweichungen mit < 3 % im geforderten engen Toleranzbereich lagen.

### 3.4 Fertigung und Reinigung von Formeinsätzen durch Laserstrahlbearbeitung

Der Laserstrahlformabtrag von metallischen Oberflächen wird derzeit am Forschungszentrum für die schnelle und kostengünstige Fertigung von Formeinsätzen verwendet. Hierbei sind der Laser-Sublimationsabtrag und der Laserspanabtrag zwei Prozessstrategien, mit denen je nach Werkstoff eine effiziente und nahezu nachbearbeitungsfreie Strukturierung möglich ist. Mittels Laser strukturierte Formeinsätze aus Hartmetall mit Aspektverhältnissen bis zu 10 konnten bereits erfolgreich mit Mikrospritzgießtechniken abgeformt werden.

Das Laserstrahlreinigen von LIGA-Nickelformeinsätzen ist ein Beispiel für den hochselektiven Materialabtrag durch Excimer-Laserstrahlung. Selbst bei hohen Aspektverhältnissen (siehe Abb. 5) werden kontaminierte Formeinsätze unter Beibehaltung ihrer ursprünglichen Oberflächenqualität wieder für die Abformtechniken nutzbar gemacht.

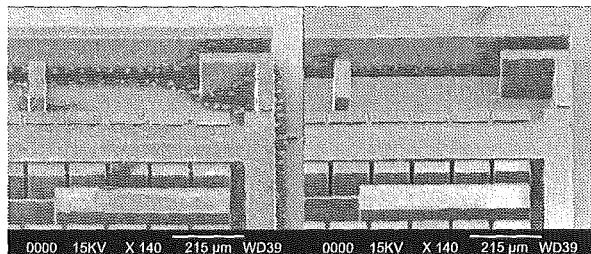


Abb. 5: LIGA-Ni-Formeinsatz vor (links) und nach (rechts) Reinigung mit Excimer-Laserstrahlung

### 3.5 Fertigung von Formeinsätzen durch mechanische Mikrofertigung

Für die Replikation von Mikrostrukturen werden mechanisch widerstandsfähige Formeinsätze gewünscht, vorzugsweise aus Stahl. Die Mikrobearbeitung von Stahl konnte jedoch bisher keine Mikrostrukturen in geeigneten Abmessungen und ausreichend guter Oberflächenqualität zur Verfügung stellen. Stand der Technik ist vielmehr die Bearbeitung von Nichteisenwerkstoffen (Messing, AlMg3, Kupfer, Aluminium) mit Hilfe von Diamantwerkzeugen [15]. Erst die Entwicklung kleinster Hartmetallfräser [16] ermöglichte die Mikrostrukturierung von Formeinsätzen aus Stahl. Gute Strukturierungs- und Abformergebnisse wurden mit Formeinsätzen aus Stahl 1.2709 erzielt (siehe Th. Schaller et al., dieser Band). Dieser Werkstoff ist durch Warmauslagerung nahezu verzugsfrei bis zu einer Härte von 55 HRC zu härten. Durch Elektropolieren können die Mikrostrukturen entgratet und die Oberflächenqualität verbessert werden. Die bisher im Forschungszentrum einge-

setzen mechanisch strukturierten Formeinsätze, die meist aus Messing bestehen, sollen langfristig, wenn möglich, durch solche aus gehärtetem Stahl ersetzt werden.

### 3.6 Fertigung von Formeinsätzen durch Mikrosenkerodieren

Ein interessantes Verfahren zur Übertragung feiner Strukturen in Metall, insbesondere auch in Stahl, stellt das Senkerodieren dar. Dabei wird die inverse Form einer Senkelektrode durch senkrechtes Verfahren relativ zum Werkstück in das Metall übertragen [17]. Abb. 6 zeigt ein Abformwerkzeug für Mikrokapillarstrukturen aus Edelstahl, welches durch Senkerodiertechnik gefertigt worden ist [18]. Die hier eingesetzte Senkelektrode ist zuvor durch Schneiderodiertechnik in Kupfer realisiert worden. Durch zwischenzeitliches Nachschneiden der Elektrode und Elektropolieren kann die Kanten- und Oberflächenqualität des Formeinsatzes erheblich verbessert werden. Die Stege auf dem Edelstahl-Formeinsatz sind zwischen 150 und 400 µm breit, etwa 400 µm hoch und teilweise mehrere Millimeter lang. Bisher wurde eine Mindeststegbreite von ca. 90 µm realisiert, was sich aber vermutlich noch deutlich reduzieren lässt.

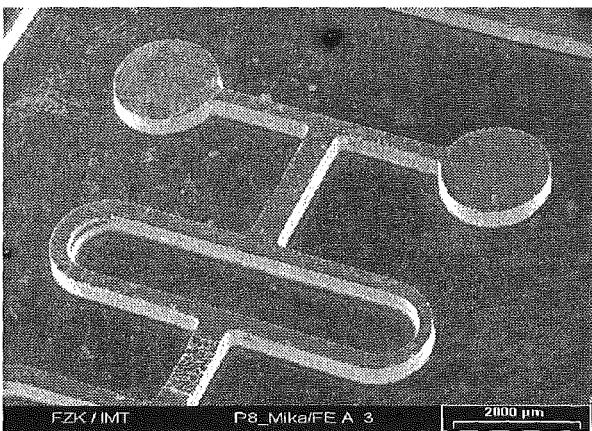


Abb. 6: Senkerodierter Formeinsatz aus Edelstahl, welcher die inversen Strukturen für fluidische Mikrokanäle enthält.

### 3.7 Fertigung von Formeinsätzen durch Ätzen von Siliziumsubstraten

Neben den bereits genannten Methoden können Formeinsätze für das Mikrospritzgießen auch mittels Tiefätzen von Mikrostrukturen mit nahezu senkrechten Wänden bis zu mehreren hundert Mikrometern Tiefe auf Siliziumsubstraten erzeugt werden. Dabei wurde bisher über Mikrostrukturen mit Aspektverhältnissen von  $\leq 30$  mit minimalen Strukturbreiten von 1,2 µm berichtet [19,20] und erste Anwendungen der Formeinsätze für den Mikro-Metallpulverspritzguß beschrieben [21]. Die Erzeugung der Strukturen erfolgt ähnlich der Li-

thographie mittels Belichtung durch eine Maske. Als strukturierbare Materialien (Dicke 2-4 µm) auf dem Siliziumwafer werden neben Resisten auch SiO<sub>2</sub> und Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> eingesetzt. Die Ätzselektivität liegt dabei zwischen 150:1 und 340:1.

Der eigentliche Prozess zum Silizium-Tiefätzen basiert auf einem zweistufigen Verfahren, das mehrfach hintereinander durchgeführt wird und bei dem der Ätzangriff unabhängig von der kristallographischen Orientierung des Substrates erfolgt. Zuerst wird Silizium in einem Plasma mittels chemischer Reaktion in eine flüchtige Verbindung überführt und entfernt. Im zweiten Schritt erfolgt die Passivierung der geätzten Strukturen. Bedingt durch den senkrechten Einfallsinkel der Ionen wird die Passivierungsschicht zuerst im Ätzgrund durchbrochen, wobei die Seitenwände geschützt bleiben. Durch Wahl der Parameter Temperatur, Druck und Dauer der beiden Schritte in Abhängigkeit von der Ätztiefe und Strukturbreite kann die Rauheit der Seitenwände gesteuert werden.

Der Prozess des Siliziumtiefätzens ist ein sehr ökonomisches Herstellungsverfahren. Die Ätzraten liegen bei diesem Verfahren bei drei bis neun Mikrometern pro Minute [22]. Arbeiten zum Ätzen von Silizium für die Herstellung von Formeinsätzen werden am Forschungszentrum Karlsruhe derzeit nicht durchgeführt, jedoch sollen derartig hergestellte Formeinsätze demnächst in der Spritzgießtechnologie für die Erzeugung von Mikrobauteilen sowohl aus Kunststoff als auch aus Keramik eingesetzt werden. (siehe K.H. Zum Gahr et al., dieser Band).

## 4. Ausblick

Die im vorliegenden Beitrag aufgeführten Methoden sowohl zur Fertigung von metallischen Mikrostrukturen als auch zur Fertigung von Formeinsätzen aus Metall für die Replikation primärer Mikrostrukturen sind als komplementäre Entwicklungen zu sehen, die nur bedingt die Aussage erlauben, dass in der nahen Zukunft nur noch ein Verfahren oder ganz wenige in die Anwendung gelangen werden. Welches Verfahren im konkreten Fall einer Erzeugnisentwicklung im Kundenauftrag die gestellte Aufgabe am besten erfüllt, hängt davon ab, wie die geforderten Mikrobauteile hinsichtlich des Materials, ihrer Abmessungen, ihrer Oberflächengüte, Standzeit usw. spezifiziert sind. Wenn wirtschaftliche Gesichtspunkte eine Rolle spielen, und das wird in der Mehrzahl der Fälle gegeben sein, ist auch die Stückzahl und der Preis entscheidend.

Mit der LIGA-Technik, den Laserverfahren, der Mechanischen Mikrotechnik und einigen Spezialverfahren verfügt das Forschungszentrum über ein ausreichendes Angebot von Lösungsmöglichkeiten für die Probleme der Auftraggeber. Die

Einführung eines Qualitätsmanagementsystems zunächst in Teilen des PMT gewährleistet für den Kunden, dass er bei entsprechend genauer Spe-

zifizierung der Aufgabe ein qualitativ hochwertiges Ergebnis unter verlässlichen Randbedingungen hinsichtlich Lieferzeit und Preis erwarten kann.

## Literatur

- [1] Bacher W., Bade K., Leyendecker K., Menz W., Stark W., Thommes A., „Electrodeposition of Microstructures: An important process in Microsystemtechnology“, in: *Electrochemical Technologies: Innovation and New Developments*, N. Masuko, T. Osaka, Y. Iti (Hrsg.), Kodanha Tokyo (1996), 159-189.
- [2] Rogge B., Schulz J., „Magnetische LIGA-Mikroaktoren“, F&M, 104 (1996), 278-280.
- [3] Fath, A., Leskopf, W., Bade, K., Bacher, W., „Der Einfluß von Zusätzen auf die Nickel-Eisen-Legierungsabscheidung an mikrostrukturierten Elektroden“, Vortragsband GDCh-Fachgruppentagung Angewandte Elektrochemie 1999, Freiberg (1999), 29, erscheint in den GDCh-Monographien (2000) (im Druck).
- [4] Ruprecht, R., Bacher, W., Piotter, V., Schmidt, L., „Abformen mit ungefüllten und gefüllten Kunststoffen“, Beitragsband 2. Statuskolloquium des PMT, FZKA-Bericht 5670, (1995), 145-150.
- [5] Thies, A., Schanz, G., Walch, E., Konys, J., Haußelt, J.H., „Metallische Abformung von Kunststoffmikrostrukturen“, Beitragsband 3. Statuskolloquium des PMT, FZKA-Bericht 6080, (1998), 109-114.
- [6] Bacher, W., Bade, K., Konys, J., Schanz, G., „Galvanische und chemische Abformung von Kunststoff-Mikrostrukturen“, NACHRICHTEN-Forschungszentrum Karlsruhe, 30, (1998), 251-260.
- [7] Thies, A., Piotter, V., Haußelt, J.H., Hagen, O.F., „A new method for mass fabrication of metallic microstructures“, *Microsystem Technologies*, 4 (1998) 110-112.
- [8] a) Haberland, H., Moseler, M., Qiang Y., Rattunde, O., Reiners, T., Thurner, Y., „Energetic Cluster Impact (ECI): a new method for thin-film formation“, *Surf. Rev. Lett.*, 3 (1996) 887; b) Kleer, G., Schäffer, E., Bodmann, M., Kraft, J., Qiang, Y., Haberland, H., „Hard and wear resistant coatings for moulding and embossing of glasses at elevated temperatures“, *Mat.-wiss. U. Werkstofftech.* 29 (1998) 545.
- [9] Rattunde, O., Guttmann, M., unveröffentlichte Ergebnisse, Publikation in Vorbereitung.
- [10] Jöhnck, M., Neyer, A., „2D optical array interconnects using plastic optical fibres“, *Electronic letters*, 33 (1997), 888 ff.
- [11] Bade, K., „Herstellung von Formeinsätzen für die Mikrotechnik durch Galvanoformung“, *Galvanotechnik*, 90 (1999), 801-807.
- [12] Bacher W., Bade K., Matthies B., Saumer M., Schwarz R., „Fabrication of LIGA mold inserts“, *Microsystem Technologies*, 4 (1998) 117-119.
- [13] Schloßmacher, P., Bade, K., Bacher, W., Ehrlich, K., Yamasaki, T., „Ni-W und Ni-Fe als Werkstoffe für die LIGA-Technik“, Bericht FZKA 6080 (1998), 103-108.
- [14] Bacher, W., Bade, K., Fath, A., Schloßmacher, P., „Electrodeposition of nickel alloys as materials for magnetic actuators“, *Proceedings ISE 1999*, Pavia, Italien (1999).
- [15] Schaller Th., Hecke M., Ruprecht R., „Mechanical Micromachining for Mold Insert Fabrication and Replication“, *ASPE 1999 Spring Topical Meeting, Proceedings Vol. 19* (1999), 3-8.
- [16] Schaller Th., Bohn L., Mayer J., Schubert K., „Microstructure grooves with a width of less than 50 µm cut with ground hard metal micro end mills“, *Prec. Eng.*, 24 (1999), 229-235.
- [17] Feurer, M., „Elektroerosive Metallbearbeitung“, Vogel-Buchverlag, Würzburg, (1983).
- [18] Guber, A.E., Bacher, W., Fritz, M., Hecke, M., Herrmann, D., Muslija, A., „Microcapillary structures for lab chips and micro/nanotiter plates to be used in biosensor technology and medical laboratory diagnostics“, *Journal of the International Federation for Medical & Biological Engineering*, 37 (1999), 360-361.
- [19] Bhardwaj, J.K., Ashraf, H., „Advanced silicon etching using high density plasmas“, *STS Ltd., SPIE Vol. 2639* (1998), 224-233.
- [20] Bhardwaj, J.K., Ashraf, H., „On inductively coupled plasma etching and HARMST“, *Proceedings of HARMST 99*, (1999) ,18-21.
- [21] Duong, T.V., Menz, A., Höper, R., Kunze, H.-D., Benecke, W., „Mikro-Metallpulverspritzguß mit Siliciumformeinsätzen“, *Ingenieur-Werkstoffe*, 8 (1999), 48-49.
- [22] Kiihamäki, J., Franssila, S., „Pattern shape effects and artefacts in deep silicon etching“, *J. Vac. Sci. Techn. A 17* (1999), 2280-228.

# Abformverfahren für mikrostrukturierte Bauteile aus Kunststoff und Metall

R. Ruprecht <sup>1)</sup>, T. Gietzelt <sup>1)</sup>, M. Gutmann <sup>1)</sup>, T. Hanemann <sup>1)</sup>, M. Heckele <sup>2)</sup>, K. Müller <sup>1)</sup>, V. Piotter <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Materialforschung III, <sup>2)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Unter Nutzung der ökonomischen und technischen Vorteile der Mikrosystemtechnik werden bessere und neue Produkte prognostiziert. Für diesen Fall müssen Produktionsverfahren für Mikrokomponenten meist in hohen Stückzahlen zu niedrigen Stückkosten aus anwendungsgerecht gewählten Werkstoffen zur Verfügung stehen. Dazu werden Abformverfahren für mikrostrukturierte Bauteile und Mikroteile aus Kunststoff und Metall entwickelt. Die Innovationen des Forschungszentrums Karlsruhe zu den Abformverfahren Mikrospritzgießen, Vakuumheißgießen, Photomolding für Kunststoffteile beziehungsweise Galvanoformung, Mikro-Pulverspritzgießen und Mikroguss für Metalle werden kurz beschrieben und der unterschiedliche Stand der Verfahrensentwicklungen gegenübergestellt.

## 1. Einleitung

Die Miniaturisierung von Baugruppen und Produkten ist ein herausragender Trend der letzten Jahrzehnte. Viele der etablierten Herstellungsverfahren der Mikrotechnik, wie die Siliziummikromechanik und die Lithographie sind auf wenige Werkstoffe mit beschränktem Eigenschaftsprofil anwendbar. Sie ermöglichen nur die Herstellung von dreidimensionalen Mikrokomponenten aus Silizium und aus speziellen ungefüllten Kunststoffen. Der absehbar steigende Bedarf an Mikrokomponenten mit spezifischen Anforderungen aus den Branchen Telekommunikation, Bio- und Medizintechnik, chemische Industrie und Analytik, Fahrzeugtechnik, Mess- und Regelungstechnik etc. erfordert jedoch wirtschaftliche Fertigungsverfahren für Mikroteile oder mikrostrukturierte Bauteile mit besonderen anwendungsspezifischen Eigenschaften, die nur von gefüllten oder Hochleistungskunststoffen, komplexen Metalllegierungen oder Keramiken erfüllt werden. Voraussetzung für die Verfügbarkeit dieser Werkstoffklassen für mikrotechnische Anwendungen ist es, dass entsprechende wirtschaftliche Fertigungsverfahren für die Klein-, Mittel- und Großserienfertigung entwickelt sind.

## 2. Abformverfahren für Mikrokomponenten

Das Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) konzentriert sich deshalb darauf, Formgebungsverfahren in Anlehnung an die aus der Feinwerktechnik bekannten Produktionsverfahren zu entwickeln. Es sollen mittelfristig wirtschaftliche Produktionsverfahren für eine große Materialpalette zur Fertigung von anwendungsgerecht ausgelegten Mikrokomponenten für die strategischen Anwendungsfelder Mikrooptik, Mikrofluidik, Mikroverfahrenstechnik, biologische und chemische

Analytik, Medizintechnik und Fertigungstechnik für Mikrosysteme zur Verfügung stehen. Diese Verfahren sind das **Mikrospritzgießen** mit gefüllten und ungefüllten Kunststoffen, das **Mikro-Pulverspritzgießen** mit hochgefüllten Formmassen (hier: metal injection molding, MIM) inklusive nachfolgendem Sintern zu dichten Metallteilen, das **Heißprägen** (Vakuumwarmumformen von plattenförmigen Kunststoffhalbzeugen), die **Galvanoformung** mit der Abscheidung von Metallen in abgeformten, verlorenen Kunststoffmikrostrukturen sowie der **Mikroguss** von Metallschmelzen in Keramikhohlformen, die durch Gießen von Keramikschlickern in verlorene Kunststoffmikrostrukturen und anschließendes Brennen erzeugt werden.

Durch Abformung werden Mikrokomponenten aus polymeren oder metallischen Werkstoffen mit Hilfe von mikrostrukturierte Urformen kopiert. Diese Formen sind meist als mikrostrukturierte Metall-**Formeinsätze** [1, 7] in makroskopische Werkzeuge integriert (Kap. 3; 4.2), können aber auch **verlorene Kunststoffformen** sein (Kap. 4.1, 4.3). Bei den abgeformten Mikrokomponenten, die als Labormuster oder Produkte hergestellt werden, unterscheidet man zwischen Mikroteilen, mikrostrukturierten Teilen und zwischen Mikrometer genauen Präzisionsteilen. Als Mikroteile bezeichnet man im allgemeinen einzelne/vereinzelte Bauteile kleiner ein Millimeter (s. Abb. 4). Heute sind jedoch häufig Produkte in Form von mikrostrukturierten Bauteilen gewünscht, die einige Milli- bis Zentimeter Außenabmessungen und auf einer oder mehreren Flächen dreidimensionale Mikrostrukturen aufweisen (s. Abb. 1). Mikrometer genaue Präzisionsteile sind meist feinwerktechnische Produkte, deren Toleranzen für Außenabmessungen oder Details -

mit deutlich unter 1% Genauigkeit der Maße - im Bereich weniger Mikrometer liegen.

Mikroteile und Mikrostrukturen besitzen trotz kleiner Volumina große Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisse. Deshalb macht die Herstellung von Mikroteilen oder mikrostrukturierten Teilen eine besondere Prozessführung notwendig [11]. Dem Mikrospritzgießen, dem Heißprägen (Vakuum-warmumformen), dem UV-Licht induzierten Reaktionsgießen (Photomolding) als auch dem Pulverspritzgießen und dem Mikroguss für Mikroteile und mikrostrukturierten Bauteile ist gemeinsam, dass unter Druck viskose Schmelzen oder Gießharze in mikrostrukturierte Formeinsätze eingefüllt werden. Die wichtigste, inzwischen gut bekannte Innovation gegenüber den konventionellen Abformverfahren ist die Evakuierung der Formen vor der Formfüllung, um Kompressionsdefekte in den sacklochartigen Mikrostrukturen der Formen zu verhindern. Weiterhin erwies es sich für die Herstellung von Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis (= Verhältnis von Mikrostrukturhöhe zu -breite bzw. Fließlänge der Formmasse zur Wanddicke der Mikrostrukturen) als erforderlich, einerseits eine gute Fließfähigkeit der Formmasse während der Formfüllung und andererseits eine ausreichende mechanische Festigkeit des Formstoffs für eine sichere Entformung zu gewährleisten. Bei ungefüllten und gefüllten Thermoplasten erfahren deshalb die Formeinsätze während des Abformprozesses einen Temperaturzyklus (Variothermprozess) mit hohen Werkzeugtemperaturen während der Formfüllung. Durch anschließende Werkzeugkühlung erhält man vor der Entformung ein ausreichend mechanisch stabiles Formteil. Beim Reaktionsgießen werden möglichst leichtfließende Gießharze eingesetzt und nach der Formfüllung eine vollständige Polymerisation angestrebt. Beim Heißprägen und Reaktions- bzw. Spritzgießen füllt eine viskose Formmasse mit einigen 10 bar bzw. bis 2000 bar Druck in laminarer Strömung die mikrostrukturierten Formeinsätze. Hingegen erfolgt die Formfüllung beim Mikroguss durch die niedrige Viskosität der Metallschmelze trotz turbulenter Strömung bei vergleichsweise geringen Drücken von heute noch 3 bar.

Bei der Galvanoformung in verlorene Formen aus unbeschichteten und beschichteten Polymeren wird zur fehlerfreien Metallabscheidung eine niedrige Abscheiderate gewählt. Zusätzlich wird dem Elektrolyten ein hochwirkames Netzmittel zugegeben, um die Oberflächenspannung zwischen dem Elektrolyten und den Flächen der verlorenen Formen zu minimieren. Damit wird bereits vor dem Start der Abscheidung ein vollständiges Benetzen der Mikrostrukturen auf der verlorenen Form mit Elektrolyten sichergestellt. Vorteilhaft für Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis sind verlorene Formen mit leitfähigem Strukturgrund

und isolierenden Mikrostrukturen, zwischen denen die Metallabscheidung mit Abbildungstreue im Nanometerbereich erfolgt.

### 3 Abformen in Kunststoffen

#### 3.1 Spritzgießen mit Kunststoffen (TIM)

Für komplexe Bauteile aus polymeren Werkstoffen stellt das Spritzgießen eine wirtschaftliche Prozeßtechnik für Mittel- und Großserien dar [9]. Zur Adaption der industriell etablierten Spritzgießtechnologie für die Herstellung von Mikrokomponenten bedurfte es der Implementierung von Zusatzeinrichtungen wie Werkzeugevakuierung und Variotherm-Temperierung. Durch Mikrospritzgießen können heute Strukturen mit minimalen Wandstärken von 20  $\mu\text{m}$  oder Aspektverhältnissen über 20 realisiert werden. Die minimal abformbaren Strukturdetails liegen derzeit bei ca. 200 nm. Ein Beispiel für die hohe Präzision des Mikrospritzgießens in technischen Thermoplasten wie PMMA, PC oder PA zeigt Abb. 1. Erst nach Einsatz von Softwaretools zur Simulation der Formfüllung (MOLDFLOW) und der Werkzeugtemperierung (ABAQUS) war die Prozessentwicklung erfolgreich.

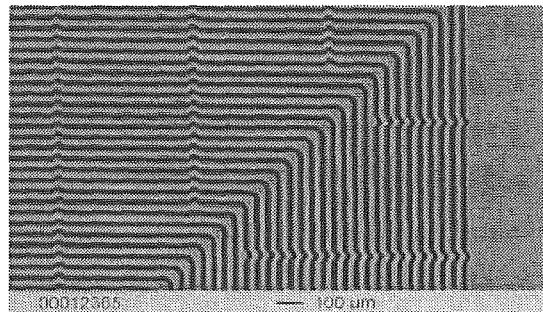


Abb. 1: Kunststoffgehäuse für eine Spule eines Mikrotransformators, spritzgegossen in PMMA mit Stegen von 20  $\mu\text{m}$  Breite und Aspektverhältnis 6

Als Werkstoffe kommen vorwiegend Thermoplaste zum Einsatz, die auch in der konventionellen Spritzgießtechnik Verwendung finden und somit kostengünstig zur Verfügung stehen. Die Verarbeitung leitfähig gefüllter Kunststoffe wie PA 12-C oder POM-C ermöglicht elektrisch leitfähige Mikrostrukturen, die durch Galvanoformung zu Metallkomponenten umkopiert werden (Kap 4.1).

Der Fortschritt zur Herstellung leicht vereinzelbarer spritzgegossener Mikrokomponenten lässt sich besonders deutlich an der Entwicklung des Rib-Con-Multifasersteckers erkennen, dessen Gehäusehälften in einem speziell konstruierten Abformwerkzeug durch Mikrospritzgießen hergestellt werden [3]. Weitere Beispiele für mikrostrukturierte Komponenten aus Hochleistungspolymeren wie PEEK oder LCP sind Gehäuse für Pumpen, Druck- und Flussraten-Sensoren in der Größenordnung von wenigen Millimetern [1].

In Entwicklung befinden sich auch neue Varianten der Mikrospritzgießtechnologie, die eine höhere Wirtschaftlichkeit versprechen oder zu neuartigen Produkten führen können. In Vorversuchen zum Micro Insert Injection Molding, welches durch Einsatz von Einlegeteilen umfangreiche Aufbau- und Verbindungstechnik ersetzen kann, wurden beim Umspritzen von Einlegeteilen bei Polymerwandstärken von 20 µm Aspektverhältnisse von 100 erreicht [13].

### 3.2 Heißprägen

Das Vakuumheißprägen, auch als Vakuumwarmumformen bezeichnet, ist durch die Einstellung sehr geringer Umformgeschwindigkeiten unter 1 mm/s besonders für die Herstellung von optischen Komponenten und Mikrostrukturen mit sehr hohen Aspektverhältnissen bis 50 geeignet [4]. Beispiele dafür sind mikrooptische Linsen und Mikrospektrometerbausteine sowie mechanische Haltestrukturen für Mikrochips (lead frames) [6].

Durch die Verwendung von Folien als Halbzeug erlaubt das Heißprägen einen Materialwechsel bei jedem Prägezyklus. Damit lassen sich sehr schnell Erstmuster und kleinere Serien von mikrostrukturierten Bauteilen in verschiedenen Thermoplasten von einem mikrostrukturierten Werkzeug augenblicklich bis zu einem Durchmesser von 4" abformen. Charakteristisch für das Heißprägen ist die Restschicht, die sich zwischen dem Formeinsatz und der Entformplatte ausbildet. Diese Restschicht wird zwar oft als störend betrachtet, da sie bei einer Vereinzelung der Komponenten einen zusätzlichen Nachbearbeitungsschritt erfordert. Andererseits kann die Restschicht die Funktion einer Entformhilfe und unter Verwendung eines zweischichtigen Halbzeugs künftig die eines Magazins für die Mikrostrukturen übernehmen [8]. Die aktuellen Entwicklungen beim Heißprägen haben deswegen das Ziel, die Restschicht so weit zu reduzieren, dass auch hohe LIGA-Strukturen und kleinste Komponenten zur einfachen Handhabung noch zusammenhängend entformt werden können. Die abschließende Nachbearbeitung erfordert nur noch wenig Aufwand [5]. Auf diese Weise konnten Gehäuseteile für Mikroventile aus PSU mit einer Strukturhöhe von 500 µm auf einer Restschicht von nur 100 µm geprägt werden (s. Abb. 2). Das Öffnen der Fluidanschlüsse erfolgt durch kurzes Stirnplan-Ultrafräsen zur Entfernung der Restschicht oder durch Durchstoßen der dünnen Restschicht mit Kanülen, die zum Anschluss der Schläuche für die Fluidversorgung dienen.

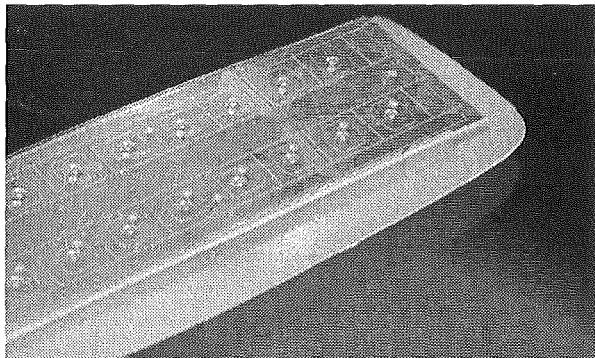


Abb. 2: Sechzehn Mikroventile aus PSU (Höhe 500 µm), zur Reduzierung der Nacharbeit heißgeprägt auf einer nur 100 µm dicken Restschicht.

### 3.3 Lichtinduziertes Reaktionsgießen

Neben der kostengünstigen Massenfertigung von Mikrokomponenten ist es notwendig, eine schnelle Prototypenherstellung u. U. auch aus selbst compoundierten Materialien zu realisieren. Das lichtinduzierte Reaktionsgießen von Reaktionsharzen auf MMA/PMMA-Basis bzw. Styrol/ ungesättigte Polyesterbasis (UP) ermöglicht die schnelle Abformung (< 1 min/mm Bauteildicke) von mikrostrukturierten Prototypen (s. Abb. 3, links). Der Aufbau des Werkzeuges wurde in Anlehnung an Mikro-Spritzgießwerkzeuge für das Einkoppeln von Licht in die mikrostrukturierten Bereiche adaptiert [10].

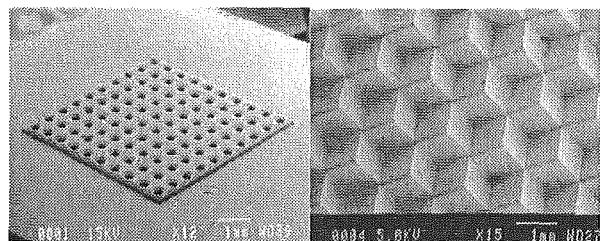


Abb. 3: Photomolding von Teststrukturen aus PMMA (links: Lochdimensionen 100 x 100 x 100 µm³) bzw. PMMA/Eisen (Tripelspiegel).

Die Verwendung von Kompositen (photopolymerisierbares Reaktionsharz plus feinskaliges keramisches bzw. metallisches Füllmaterial) erlaubt die gezielte Modifikation der physikalischen Eigenschaften (thermische Ausdehnung, mechanische Stabilität, elektrische Leitfähigkeit, u.a.) der hergestellten Formteile. Im Fall des Polymethylmethacrylates (PMMA) gefüllt mit Eisenpulver (mittlerer Partikeldurchmesser 4.5 µm) liegt die Perkolationsschwelle für eine akzeptable elektrische Leitfähigkeit des Formteils bei 85 Gewichts% Fe entsprechend 42 Volumen% in PMMA. Das abgeformte Tripelspiegelarray ist auf der Oberfläche elektrisch leitfähig (Abb. 3, rechts). Bei hinreichend hohen Füllstoffgraden ist eine Prototypenherstellung aus keramischen bzw. metallischen

Materialien in Analogie zum Mikro-Pulverspritzgießen möglich und wurde für  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{SiO}_2$  anhand von gesinterten Labormustern bereits gezeigt [7].

#### 4 Abformen in Metallen

##### 4.1 Galvanische und stromlose Abscheidung

Die mittels Spritzgießen oder Heißprägen erzeugten mikrostrukturierten Kunststoffformen aus vollständig leitfähigen bzw. isolierenden Thermoplasten (Kap. 3.1) werden auch als verlorene Formen zur Metallabscheidung verwendet. Damit handelt es sich - nach der Galvanoformung zur Formeinsatzherstellung - um die "Zweite Galvanoformung" beim LIGA-Verfahren. Für die Auswahl der galvanischen oder stromlosen Metallabscheidung existieren je nach verlorener Form verschiedene Verfahrensvarianten. Die Notwendigkeit und Art der Erzeugung einer Startschicht resultiert dabei sowohl aus den Eigenschaften der verlorenen Formen als auch aus den Anforderungen an das herzustellende Bauteil. Die galvanische bzw. stromlose Abformung von verlorenen, mikrostrukturierten Kunststoffformen bietet sich insbesondere dann an, wenn mikrostrukturierte Metallteile in größeren Stückzahlen mit hoher Detailtreue hergestellt werden sollen. Entwicklungsbedarf besteht noch in der Herstellung isoliert stehender Mikrobauteile insbesondere mit hohem Aspektverhältnis. In Zukunft ergibt sich mit dieser Technologie die Möglichkeit, Formeinsätze für die o.g. Verfahren der Kunststoffabformung in meist kostengünstigerer Weise zu kopieren [2].

##### 4.2 Pulverspritzgießen (Micro MIM)

Die Materialpalette in der Mikroabformung liegt heute schwerpunktmäßig bei thermoplastischen Kunststoffen (Kap. 3). Einige wenige Metalle wie Nickel bzw. Nickellegierungen, Kupfer und Gold werden galvanisch abgeschieden [2]. Die große Palette der metallischen Werkstoffe ist dagegen in der Mikrotechnik praktisch nicht verfügbar. Andererseits besteht der Bedarf, metallische Mikrokomponenten in einer beanspruchungsgerechten Materialvielfalt in großen Serien herzustellen können. Eine Lösungsmöglichkeit liegt in der Adaptation des Metallpulverspritzgießens für die Mikroabformung.

Diese Prozesstechnik beruht auf der Sinterung eines spritzgegossenen Formteiles (Grünlings) zu einem weitgehend porenfreien Festkörper. Um das Metallpulver überhaupt spritzgießtechnisch verarbeiten zu können, wird es mit einem organischen Binder zu einer thermoplastischen Formmasse, dem Feedstock, versetzt. Der Binder muss vor dem Sintern wieder entfernt werden, was meist durch Ausschmelzen oder katalytische Degradation geschieht.

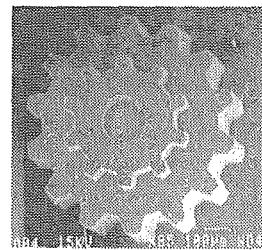


Abb. 4 : Gestuftes Zahnrad aus Edelstahl 316L auf einem Substrat aus gleichem Material

Zur Prüfung der prinzipiellen Eignung des Micro-MIM (Micro Powder Injection Molding) für Mikrostrukturen wurde zunächst auf die Entwicklung eines mikrospezifischen Feedstocks verzichtet [11] und kommerzielle Feedstocks mit Bindern auf Polyacetal-Basis verwendet. Sie enthalten verschiedene Pulver: reines Carbonyl-Eisen, Edelstahl (316L) oder legierter, härtbarer Stahl (17-4PH). In den Versuchen kamen sowohl mikrozerspanend gefertigte als auch durch das LIGA-Verfahren hergestellte Formeinsätze zum Einsatz. Ein Beispiel zeigt Abb. 4 mit einem gestuften LIGA-Zahnrad ( $\varnothing$  800  $\mu\text{m}$ ) aus Edelstahl 316L. Die kleinsten Strukturabmessungen nach dem Sintern betragen ca. 50  $\mu\text{m}$ . Neben der Entwicklung zur reproduzierbaren Serienfertigung hat sich die Entwicklung von Feedstocks hoher Festigkeit mit feinskaligen Metallpulvern mittlerer Partikelgröße deutlich unter 3  $\mu\text{m}$  als notwendig erwiesen. Versuche zur Herstellung eigener Feedstocks mit Bindern auf Polyethylen- und Polyamid-Basis werden durchgeführt.

Im Rahmen des HGF-Strategiefondsprojekts „Material- und Verfahrensentwicklung für mikrotechnische Hochleistungsbauteile (MALVE)“ wird u.a. das Mikropulverspritzgießen für verschleißbeanspruchte Mikrobauteile aus Metall und Keramik [12] wie z.B. Mikrozahnringpumpen entwickelt [15].

##### 4.3 Mikroguss

Ausgehend von Feingussverfahren wurde damit begonnen, den Mikroguss unter Verwendung von verlorenen Kunststoffmodellen und damit erzeugten verlorenen keramischen Gießformen zu entwickeln. Bisher konnten Mikrobauteile insbesondere aus Edelmetalllegierungen mit minimaler Wandstärke von 100  $\mu\text{m}$  sowie mikrostrukturierte Bauteile mit minimalen Details von 50  $\mu\text{m}$  Breite hergestellt werden. Obwohl die Oberflächen gegenüber den anderen Mikroabformverfahren u. a. bedingt durch die Grenzfläche zur Keramikgießform rauher sind, wurden die bisherigen Grenzen der etablierten Dental- und Schmuckgusstechnik deutlich unterschritten. Mit den bisherigen Experimenten wurde die prinzipielle Anwendbarkeit für Mikroteile nachgewiesen und der Entwicklungsbedarf geklärt [14].

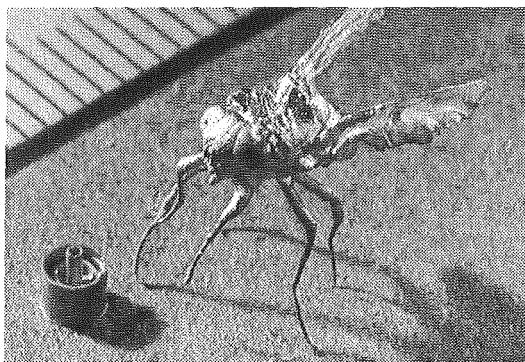


Abb. 5: Vereinzeltes Mikroturbinengehäuse aus der AgAlCu-Legierung (2,5 mm Außendurchmesser) und daneben eine Stubenfliege aus AuAgCu-Legierung vor einem Millimetermaßstab

Der kritische Schritt im Herstellungsprozess ist das Einbetten der Kunststoffmodelle, da es heute noch vom handwerklichen Geschick der durchführenden Person abhängt. Verbesserungen auch im Hinblick auf Mikrobauteile beispielsweise aus Kupfer-Aluminium-Legierungen werden durch die Verwendung von inerten Formen mit geringerer Oberflächenrauheit erwartet. Das Verfahren Mikroguss wird dann vorteilhaft eingesetzt werden, wenn hohe Anforderungen an den Werkstoff gestellt werden (korrosionsbeständig, biokompatibel)

und eine hohe dreidimensionale Gestaltungsfreiheit gefordert wird.

## 5 Gegenüberstellung und Ausblick

Im folgenden ist für die beschriebenen Abformverfahren der Stand im Forschungszentrum Karlsruhe gegenübergestellt. Die Werte für die Kriterien ergeben sich aus den bisher realisierten mikrostrukturierten Produkten und Labormuster aus Kunststoffen und Metall.

Das Mikrospritzgießen und das Vakuumheißprägen werden auch künftig nicht nur für Machbarkeitsstudien sondern bei Bedarf vermehrt für die Kleinserienfertigung von einigen tausend Stück für eine Erstbemusterung von Kunden während dem Produkt- und Technologietransfer zu einem Industrieunternehmen eingesetzt. Der Stand der anderen Abformverfahren hat noch Labormustercharakter.

Die Entwicklungen zur „Zweiten Galvanoformung“ werden aus eigenem Interesse, die Arbeiten zum Mikro-Pulverspritzgießen und zum Mikroguss sowohl grundlegend im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 499 "Mikro-Urformen" als auch im Rahmen von Industrieanfragen anwendungsnahe weiterentwickelt. Der grundlegende Stand beim Photomolding wird bei konkretem Bedarf an neue Materialien angepasst.

Stand im FZK	Spritzgießen (TIM)	Heißprägen	Photomolding
Erfahrungen mit Material	PMMA, PC, PSU; PE, POM, PA, PEEK, LCP PA12-C, POM-C	PMMA, PC POM, PVDF, PSU	PMMA, UP PMMA, Farbstoff gefüllt PMMA-Fe, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Maschinentechnik	serientauglich	kleinerserientauglich, ISO 9001 konform	für Labormuster
Zykluszeit	70 sec – 8 min	10 min – 25 min	60 sec – 30 min
max. Aspektverhältnis	20 (100 bei Umspritzen)	50	10
min. Strukturbreite / -detail [µm]	20 / 0,2	4 / 0,2	4 / 0,2
max. Strukturhöhe [µm]	1000	1000	400
strukturierbare Fläche	2 mal 20 x 60 mm <sup>2</sup> oder Teile	20 x 60 mm <sup>2</sup> bis Ø 100 mm <sup>2</sup>	2 mal 20 x 60 mm <sup>2</sup>
R <sub>z</sub> (formabhängig)	50 nm	50 nm	50 nm
Besonderheiten	Simulation zur Formfüllung und Werkzeugtemperierung	positionierte Abformung auf Substrat mit +/- 10 µm lateral	Eigene Compoundierung mit verschiedenen Füllstoffen

Tab 1: Stand der Abformverfahren für Mikrokomponenten aus Kunststoff. Die angegebenen Werte wurden an bisher am FZK realisierten Produkten oder Labormustern mit den jeweiligen Verfahren realisiert.

Stand im FZK	Pulverspritzgießen	2. Galvanoformung	Mikroguß
Erfahrungen mit Material	Fe, 316L, 17-4PH, (WC-Co), Keramik	Ni, Ni-Leg. Cu, (Au)	AuAgCu [Stabilor G] AgPdCu [Pallag M] AgCu28
Maschinentechnik	angestrebte: serientauglich	serientauglich	Labormuster, angestrebte mittlere Serien
Zykluszeit	2 – 6 min + 2 d	4 h – 20 d	1 min + 1 d
max. Aspektverhältnis	14	50	40
min. Strukturbreite / -detail [µm]	50 / 50	0,2 / 0,02	50 / 50
max. Strukturhöhe [µm]	1300	1300	2500
R <sub>z</sub> / R <sub>a</sub> (formabhängig)	3 µm / 50 nm	50 nm / 20 nm	5 µm / 1 µm
strukturierbare Fläche	2 mal 20 x 60 mm <sup>2</sup> oder Teile	20 x 60 bis Ø 100 mm <sup>2</sup>	5 x 20 mm <sup>2</sup>
Besonderheiten	Simulation zur Formfüllung und Werkzeugtemperierung	Abbildungstreue im Nanometerbereich	Biokompatible, korrosionsfeste Edelmetallwerkstoffe

Tab. 2: Stand der Abformverfahren für Mikrokomponenten aus Metall am Forschungszentrum Karlsruhe.

### Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft, dem BMBF, dem Land Baden-Württemberg, der HGF, den Firmen BASF Ludwigshafen, Hydraulik Nord Parchim, Männer Bahlingen, Metalllico Thale, microParts Dortmund, Rolla Micro Synthetics Grenchen, Schunk Sintermetalltechnik Gießen und Friatec Mannheim für ihre finanzielle und materielle Unterstützung sowie den FZK-Kollegen am IMF, IMT und HVT, insbesondere den Herren Biedermann, Holzer und Walch für ihre wertvolle Mitarbeit.

### Literatur

- [1] Ahrens, R., Rummler, Z., Schomburg, K.-W., Stingl, C., Wulff, K.: Einfluss der Luftfeuchtigkeit und anderer Umgebungsparameter auf AMANDA-Komponenten für die Mikrofluidik; dieser Bericht.
- [2] Bacher, W., Bade, K., Guber, A., Guttmann, M., Pfleging, W., Schaller, Th., Schlossmacher, P.: "Fertigung von mikrostrukturierten Komponenten und Formeinsätzen aus Metall"; dieser Bericht.
- [3] Dittrich, H., Wallrabe, U., Mohr, J., Ruther, P., Hanemann, T., Jacobi, O., Müller, K., Piotter, V., Ruprecht, R., Schaller, W., Zißler, W., "RibCon-Steckverbinder für 16 Multimode-Fasern"; dieser Bericht.
- [4] Heckele, M., Bacher, W.: „Herstellung von Kunststoffmikrostrukturen für die Mikrooptik und Mikrosensorik durch Heißprägen“; FZKA-6080, Forschungszentrum Karlsruhe (1998).
- [5] Heckele M., Müller K.D., Bacher W., „Micro-structured Plastic Foils Produced by Hot Embossing“, HARMST, Kisarazu, 1999, 84-85.
- [6] Heckele, M., Bacher, W., Hanemann, T., Ulrich, H.: „Hot Embossing an Injection Molding for Microoptical Components“; SPIE Vol 3135, San Diego, (1997), 24-29.
- [7] Loebel, P.: „Lichtinduziertes Reaktionsgießen für die Abformung von Mikrokomponenten“; Diplomarbeit Fachschule Nürnberg 1999.
- [8] Müller, K.D., Bacher, W., Heckele, M. "Flexible Integration of Nonsilicon Microstructure on Microelectronic Circuits", in "Proceedings MEMS 98", Heidelberg, 263-267.
- [9] Nöker, F.: „Bauteile mit Mikrostrukturen für die Medizintechnik“; FAKUMA Friedrichshafen, Fachsymposium 19.11.99.
- [10] Pfleging, W., Hanemann, T., Hofmann, W.: "Lasergestützte Entwicklung von mikrostrukturierten Komponenten und Abformwerkzeugen"; dieser Bericht.
- [11] Piotter, V., Benzler, T., Hanemann, T., Wöllmer, H., Ruprecht, R., Hausselt, J.: "Innovative Molding Technologies for the Fabrication of Components for Microsystems", SPIE, Vol. 3680, Bellingham WA, 1999, S. 456-463.
- [12] Ritzhaupt-Kleissl, H.-J., Bauer, W., Göhring, D., Knitter, R., Piotter, V., Ruprecht, R., Haußelt, J., "Fertigung keramischer Mikrokomponenten"; dieser Bericht.
- [13] Schwörer, M: Entwicklung fluidischer Mikrogelenke; FZKA-Bericht 6189, Forschungszentrum Karlsruhe (1998).
- [14] Wöllmer, H., Ruprecht, R., Haußelt, J.: „Präzisionsguss von Mikroteilen aus Metall“; Galvanotechnik 6(1999), 1692-1697.
- [15] Zum Gahr, K.-H., Knitter, R., Ruprecht, R., Seemann, K.: Material- und Verfahrensentwicklung für mikrotechnische Hochleistungsbauteile; dieser Bericht.

# Fertigung keramischer Mikrokomponenten

H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, W. Bauer, R. Knitter, V. Piotter, R. Ruprecht, J. Haußelt

Institut für Materialforschung III

## Zusammenfassung

Zur Herstellung keramischer Mikrokomponenten sind eine Reihe von Fertigungsverfahren entwickelt worden oder sind noch in Entwicklung begriffen, die jeweils die unterschiedlichen Anforderungen sowohl hinsichtlich Material und Gestalt der Mikrokomponenten als auch hinsichtlich ihres Einsatzbereiches in der Fertigungskette – Entwicklung, Einzel- oder Serienfertigung – am besten erfüllen können. Insbesondere das Spritzgießen keramischer Mikroteile mit seinen zwei Varianten, Hochdruck- und Niederdruckspritzgießen, erweist sich als äußerst flexibles, vielfach einsetzbares Verfahren, das die meisten Anforderungen erfüllen kann.

## 1. Einleitung

Geht man von der Annahme aus, dass zukünftige Mikrosysteme hoch belastbare, hoch präzise Komponenten enthalten sollen, die beispielsweise folgende Funktionen erfüllen müssen:

- Übertragung von Kräften und Momenten sowohl innerhalb des Systems als auch vom Mikrosystem zur Peripherie,
- Besonders hohe thermische und chemische Beständigkeit sowie geringen Abrasionsverschleiss
- Sensor- oder Aktoreigenschaften, d.h. Aufnehmen oder Aufbringen von mechanischen Größen wie Druck oder Kraft,

dann ergeben sich hieraus eine Reihe von Anforderungen an Material- und Bauteileigenschaften, die weder die Siliziumtechnologie noch die Kunststoff- oder Galvanoabformung erfüllen können. Dies bedeutet von der Materialseite her die Notwendigkeit, möglichst die gesamte Palette der im Makrobereich eingesetzten und bekannten Materialien - Metalle, Keramiken und Kunststoffe - auch für die Mikrotechnik nutzbar zu machen. Aus der Sicht der Fertigungstechnik bedeutet dies die Entwicklung bzw. Etablierung von Prozessen zur Fertigung von Mikroteilen, die sowohl für Klein- und Mittelserien wie auch für Großserien geeignet sind.

Die Haupteinsatzgebiete keramischer Mikrokomponenten liegen hierbei in den Bereichen der Mikrooptik (z.B. mikrooptische Bänke), wo Materialien mit niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten benötigt werden, auf den Gebieten der Sensorik und Aktorik, wo Mikrokomponenten aus speziellen Funktionswerkstoffen (Ferroelektrika, Piezoelektrika) zum Einsatz kommen sowie im Bereich mikromechanischer Funktionsteile. Ein

weiteres potentielles Einsatzgebiet ist die chemische Industrie, wo Systemkomponenten wie Pumpen, Ventile, Reaktoren, Wärmetauscher etc. aus korrosions- und meist auch temperaturbeständigen Werkstoffen benötigt werden.

In Abhängigkeit von verschiedenen Anforderungen sowohl hinsichtlich des Fertigungsprozesses allgemein (Entwicklungs- oder Produktionsphase, geforderte Stückzahl) aber auch hinsichtlich des vorliegenden Designs (Form, notwendige Detailfeinheit, Aspektverhältnis) und des keramischen Materials lassen sich Fertigungsverfahren definieren, die die jeweiligen Anforderungen am besten erfüllen.

## 2. Spritzgießen (CIM) keramischer Mikroteile

Als ebenso vielseitiges wie vielversprechendes Fertigungsverfahren für mikrostrukturierte Keramikkomponenten bietet sich das Spritzgießen an, denn

- Spritzgießtechnologie und -ausrüstung sind bekannt und bewährt,
- für polymere Werkstoffe steht mit dem Mikrospritzgießen ein Urformverfahren zur Serienfertigung von Mikroteilen aus Kunststoffen bereits zur Verfügung [1],
- keramische Werkstoffe liegen zumeist bereits in Pulverform mit geeigneten Partikelgrößen vor.

### 2.1 Hochdruck- (HD) Spritzgießen

Der gegenwärtige Stand der konventionellen keramischen Pulverspritzguss (CIM)-Technik zur Herstellung filigraner Bauteile wird mit minimalen Strukturbreiten von 0,2 mm bei 2 mm Teilgröße angegeben. Die geringsten Formteilmassen liegen

typischerweise bei ca. 1 g, doch werden in Sonderfällen auch Werte von nur 0,02 g für Aluminiumoxid-Keramik genannt. Kantenradien erreichen minimale Werte von 0,05 mm, während 0,4 mm als kleinstmögliche Bohrungsdurchmesser angegeben werden [2]. Andere Quellen [3] geben sogar nur 0,05 mm als minimal möglichen Lochdurchmesser beim keramischen Pulverspritzgießen an, wobei allerdings in diesen Fällen zu bedenken ist, dass nicht das eigentliche Formteil, sondern die Öffnung in demselben derart kleine Abmessungen aufweist.

Der gegenüber dem konventionellen Spritzgießen entscheidende Unterschied ist beim Mikrospritzgießen der Einsatz eines evakuierbaren Werkzeuges, das vor dem Einspritzen der Formmasse häufig über den Schmelzpunkt der Formmasse erwärmt wird. Diese Besonderheit liegt im hohen Oberflächen- zu Volumenverhältnis der sacklochartigen Mikrostrukturen in den Formeinsätzen begründet. Das Evakuieren der Spritzgießwerkzeuge ist notwendig, um Kompressions- und Dampfeffekte in den sacklochartigen Formeinsätzen und damit thermische Schäden an Formmasse und Formeinsätzen zu verhindern. Da Mikroteile wegen ihres geringen Volumens eine geringe Wärmekapazität aufweisen, findet ein schneller Temperaturausgleich zwischen der Formmasse und der Werkzeugwand statt. Um eine vollständige Formfüllung zu erreichen, müssen deshalb die mikrostrukturierten Formeinsätze vor und während der Formfüllung beheizt werden. Für eine deformationsfreie Entformung ist aber eine ausreichende mechanische Festigkeit der Grünlinge gefordert, wozu niedrige Werkzeugtemperaturen eingestellt werden. Dieser Temperaturzyklus im Spritzgießwerkzeug bestimmt letztendlich die Zykluszeit. Zur Umsetzung der besonderen Prozessführung wurden Sondersteuerungen in Kooperation mit dem Spritzgießmaschinenhersteller entwickelt, in die auch die Schnittstellen der Peripheriegeräte (Temperiergehäuse, Vakuumeinheit, Handhabung nach der Entformung) für einen vollautomatischen Betrieb integriert sind [4].

Zur Entwicklung von Spritzgießverfahren für die Fertigung von mikrostrukturierten Bauteilen ist

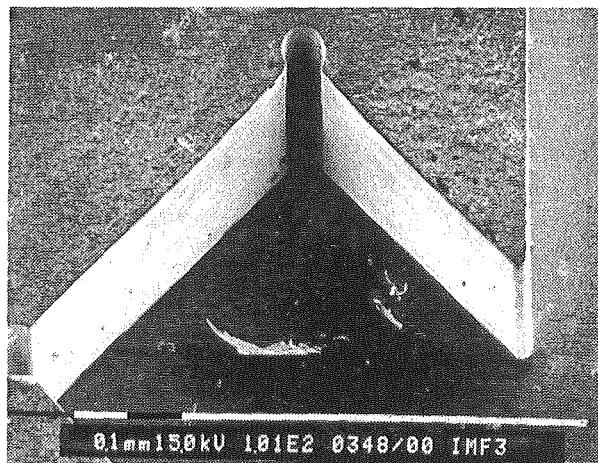


Abb. 1: Detailansicht eines Prototyps einer mikrooptischen Bank ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Der Radius der Spitze beträgt ca.  $15\mu\text{m}$ .

bekannt, dass unter Einsatz fertig konfektionierter, kommerziell erhältlicher  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Formmassen (Catamold® der Fa. BASF) Strukturen mit minimalen Breiten von  $10\mu\text{m}$  und Aspektverhältnissen (Strukturhöhe zu -breite) von bis zu zwei abgeformt wurden [5].

Am Forschungszentrum Karlsruhe wurden bisher mikrostrukturierte Bauteile sowohl mit mikromechanisch als auch durch das LIGA-Verfahren hergestellten Formeinsätzen aus verschiedenen keramischen Werkstoffen gefertigt [1, 6, 7]. Die hierbei erreichten kritischen Dimensionen, die noch nicht die verfahrenspezifisch limitierenden Größen sind, sind in Tabelle 1 wiedergegeben.

Besonders anspruchsvoll bei der Herstellung mikrostrukturierter Bauteile ist die Gewährleistung einer fehlerfreien Entformung der Grünlinge aus den mikrostrukturierten Formeinsätzen des Spritzgießwerkzeuges. Da die vorhandenen Formmassen nur geringe mechanische Festigkeiten (maximale Festigkeit der Grünlinge z. Z.  $10\text{ N/mm}^2$ ) aufweisen, ist beim Entformen aus dem Werkzeug die Gefahr der Deformation oder Zerstörung der Mikrostrukturen nicht immer auszuschließen. Bisher wurden Abform- und Entbindungsversuche mit bekannten Bindersystemen (Hostamont®, Catamold®) durchgeführt. Zur Ent-

Tabelle 1: Gegenwärtige kritische Bauteildimensionen beim Mikro-Pulverspritzgießen.

Werkstoff	$d_{50}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Min. Lateralmaße [ $\mu\text{m}$ ]	Min. Struktur-detaile [ $\mu\text{m}$ ]	Max. Aspekt-verhältnis	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Schwindung [%]
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$0,4\text{--}0,6$	50	10	14	0,35	$16,0\pm0,4$
$\text{ZrO}_2$	$0,2\text{--}0,4$	50	10	14	0,02	$22,0\pm0,2$

( $d_{50}$  = mittlerer Partikeldurchmesser;  $R_a$  = Mittenrauhwert).

binderung wurden thermische und katalytische Methoden, sowie überkritisches Kohlendioxid in die Untersuchungen mit einbezogen, die u.a. mit Hilfe von DSC-, FTIR- und TGA- Untersuchungen entwickelt und z.T. auf die jeweiligen Formteildimensionen optimiert werden konnten. Als Sinterparameter wurden bisher meist die Parameter gewählt, die für Präzisionsteile im Zentimeterbereich bekannt sind. Als Beispiel für die bis jetzt erreichte hohe Abformqualität im Mikropulverspritzguss zeigt Abb. 1 die REM-Aufnahme eines Details einer mikrooptischen Bank aus Aluminiumoxid.

## 2.2 Niederdruck- (ND) Spritzgießen (Heißgießen)

Während beim HD-Spritzgießen die Feedstocks auf thermoplastischen Kunststoffen basieren, die Verarbeitungstemperaturen von über 120°C und Einspritzdrücke von über 35 MPa erfordern, verwendet man zum ND-Spritzgießen ausschließlich Binder auf Wachs- oder Paraffinbasis [7, 8]. Die Wachse und Paraffine schmelzen bereits bei niedrigen Temperaturen und bilden eine sehr niedrigviskose Schmelze. Die daraus aufbereiteten Feedstocks weisen eine deutlich geringere Viskosität als HD-Feedstocks auf und können bereits bei Temperaturen von 70°C und Drücken von 0,2 MPa abgeformt werden. Üblicherweise sind ND-Spritzgießanlagen von Aufbau und Handhabung her wesentlich einfacher als HD-Spritzgießeinrichtungen. Dies gilt auch für die Auslegung der Werkzeuge und für die Ausführung der Formeinsätze. Durch die geringen mechanischen und thermischen Anforderungen kann das Werkzeug sehr kompakt ausfallen und durch die Verwendung von einfach zu bearbeitenden Metallen, wie Aluminium, kann der Bau sehr schnell durchgeführt werden.

Eine Limitierung der Größe von ND-spritzgegossenen Teilen ergibt sich aus der Notwendigkeit der Entbinderung. Mit zunehmender Wandstärke nehmen die erforderlichen Entbinderungszeiten zu. Als obere Grenze wird in [9] eine maximale Wandstärke von 15 mm, in [8] von 30 mm angegeben, wobei der kleinere Wert aufgrund praktischer Erfahrungen realistischer erscheint. Infolge der niedrigviskosen Konsistenz des Feedstocks erreicht man eine ausgezeichnete Formfüllung und dünnwandige Teile lassen sich mit Wanddicken deutlich unter 1 mm herstellen [8, 9].

Einer der größten Vorteile des Niederdruck-Spritzgießens liegt in der Flexibilität bei der Entwicklung von Feedstocks zur Mikroabformung mit unterschiedlichen Werkstoffen. Die Materialpalette umfasst auf Seiten der strukturkeramischen Werkstoffe  $Al_2O_3$  und  $ZrO_2$ . Erfahrungen auf dem Gebiet des Niederdruck-Spritzgießens von Funktionskeramiken liegen bisher vor für Piezokeramiken

auf Basis Blei-Zirkonat-Titanat (PZT),  $BaTiO_3$ , Hydroxylapatit und einer elektrisch leitfähigen Mischkeramik auf Basis  $Al_2O_3/TiN$  [10, 11]. So konnten aufgrund der vorliegenden Erfahrungen zur Feedstockentwicklung durch Niederdruck-Spritzgießen Mikrokomponenten hergestellt werden, deren minimale innere Strukturbreiten im Bereich von 10  $\mu m$  und deren Aspektverhältnisse bei freistehenden Elementen derzeit bei etwa 8 [12] liegen (Abb. 2). Die Abformpräzision und insbesondere die Oberflächenrauhigkeit wird hierbei eher durch die Korngröße des eingesetzten Materials als durch das Formgebungsverfahren limitiert, s. Abb. 3.

Unter Ausnutzung der moderaten Prozessparameter beim Niederdruck-Spritzgießen lässt sich aus den Einzelschritten Konstruktion, Modell- und Formenherstellung sowie Niederdruckspritzgießen eine Fertigungstechnik ("Rapid Manufacturing") etablieren, die insbesondere in der Produktentwicklungsphase aber auch im Bereich von Einzel-, Vor- und Kleinserienfertigung vorteilhaft eingesetzt werden kann [13]. Hierbei wird ein 3D-CAD-Datensatz unter Berücksichtigung der zu

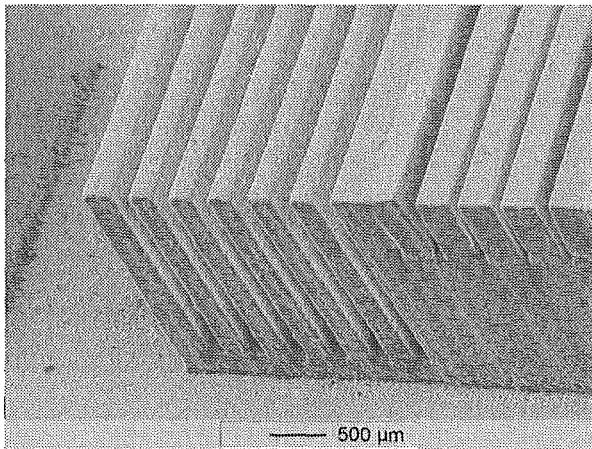


Abb. 2: ND-spritzgegossene freistehende Lamellen aus  $Al_2O_3$ .

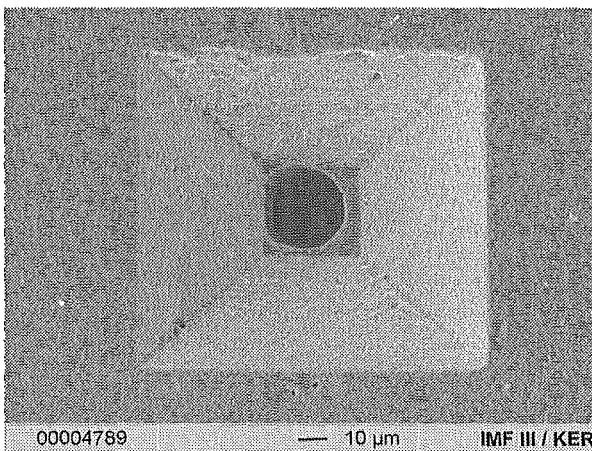


Abb. 3: ND-spritzgegossene Düse aus  $ZrO_2$ .

erwartenden Sinterschwindung in eine Anlage zur Modellherstellung übertragen. Hier lassen sich nun, beispielsweise durch Stereolithographie [14] oder durch die für Mikrokomponenten besonders interessante Mikrovariante der Stereolithographie, der RMPD-Technik [15] (Präzision 5 µm, Schichtaufbau in Schritten von 1 µm) polymere Urformen erzeugen. In einem weiteren Schritt werden diese Kunststoffpositive in Negativformen aus Siliconkautschuk umkopiert, die als Formeinsätze für den nachfolgenden Spritzgießschritt dienen (Abb. 4). Aufgrund ihrer Nachgiebigkeit und der vernachlässigbaren Benetzung mit Wachs besitzen sie eine ausgeprägte Trennfähigkeit und können leichter als starre Formen ohne Beschädigung von komplexen Strukturen abgezogen werden. Mit Hilfe dieses einfachen und kostengünstigen Verfahrens lässt sich die erforderliche Zeitspanne zwischen der Konstruktionserstellung und dem ersten fertigen Keramik-Prototypen auf einen Zeitraum von wenigen Tagen reduzieren.

Ein weiterer Vorteil des ND-Spritzgießens mit Hilfe von Formen aus Siliconkautschuk liegt darin, dass es nicht notwendigerweise auf eine bestimmte Primärfertigung wie z.B. die Stereolithographie angewiesen ist. Im Prinzip kann auf das gesamte Spektrum von generierenden und abtragenden Verfahren zur Mikrostrukturierung zurückgegriffen werden. Es ist daher möglich, dasjenige Verfahren auszuwählen, das die Gewinnung der Mutterform mit dem geringsten Aufwand ermöglicht. Die Mutterform muss dabei lediglich ein Designmodell darstellen, d.h. nur in seiner äußeren Form dem endgültigen Produkt entsprechen, während hinsichtlich der Materialauswahl keine Einschränkung existiert. Damit lassen sich alle

Fortschritte im Bereich der Mikrostrukturierung, sei es bei den Rapid Prototyping-Verfahren, der Mikromechanik oder bei den klassischen Verfahren des Formenbaus für das Verfahren ausnutzen.

Mit diesem Verfahren konnten sowohl im Bereich eigener F+E-Arbeiten als auch im Rahmen von Entwicklungsaufträgen bisher verschiedene Mikrokomponenten aus unterschiedlichen keramischen Materialien hergestellt werden. Insbesondere die Arbeiten zur Entwicklung eines keramischen Kompaktreaktors im Rahmen des HGF-Strategiefondsprojektes MALVE [16] konnten von der Flexibilität und Schnelligkeit profitieren, mit der sich so Designänderungen, die im Zuge der Entwicklung notwendig sind, realisieren lassen.

### 3. Andere Fertigungsverfahren

Bedingt durch die noch nicht auf die Anforderungen des Mikrospritzgießens hin optimierten keramischen Abformmassen können bei sehr feinen Strukturdetails mit hohen Aspektverhältnissen Probleme hinsichtlich der fehlerfreien Entformung auftreten. Dies kann auch insbesondere bei solchen Formen auftreten, deren Primärstruktur durch Stereolithographie erzeugt wurde. Die für dieses generative Verfahren charakteristischen Stufen in den vertikalen Details, die bei der Replikation in die Siliconkautschukform sehr präzise abgebildet werden, können hier als Oberflächenrauhigkeit oder sogar als eine Art Widerhaken wirken, wodurch bei der Entformung feine Details abgerissen werden können. In diesem Fall bietet sich die Herstellung keramischer Mikrokomponenten mit Hilfe von verlorenen Wachs-

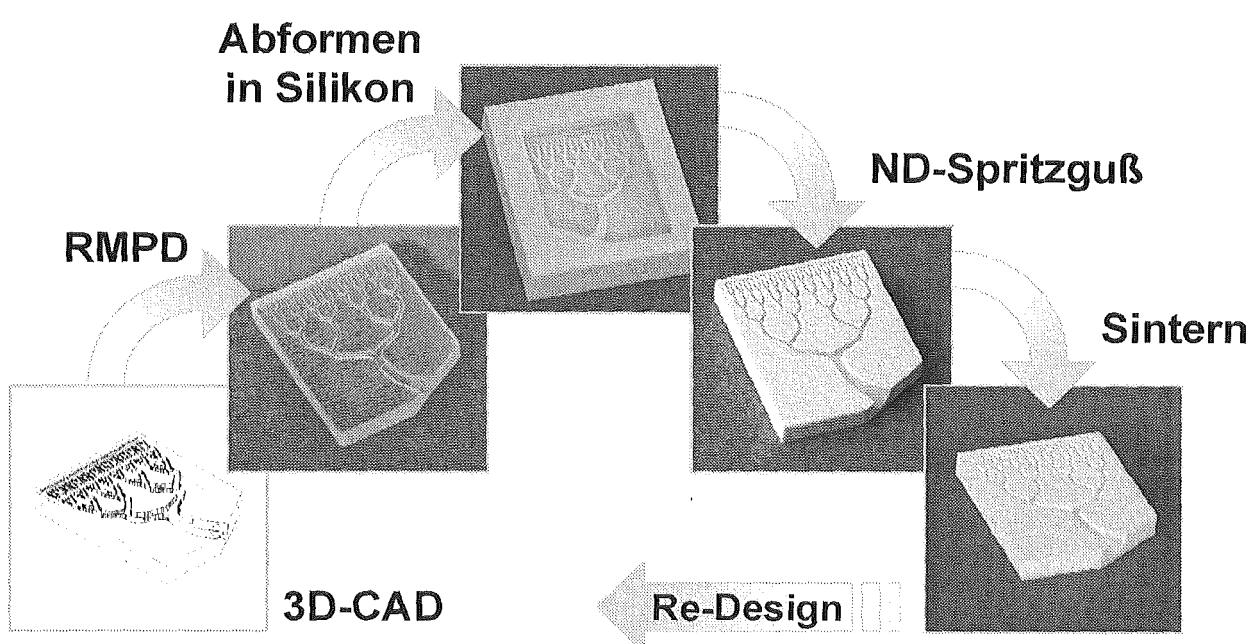


Abb. 4: Prozess-Stufen des Rapid Manufacturing zur Fertigung keramischer Bauteile.

formen an, z.B. durch das Zentrifugalgussverfahren, über das bereits berichtet wurde [17]. Mit diesem Verfahren lassen sich ohne Probleme auch sehr feine Details abbilden. Für mehr planare Strukturen, wie z.B. für den Katalysatorträger des keramischen Kompaktreaktors [16] stellt das Prägen keramischer Folien das effektivste Formgebungsverfahren dar [18]. Für Strukturen mit sehr kleinen Aspektverhältnissen kann auf den Siebdruck keramischer Pasten zurückgegriffen werden. Dieses Verfahren wird derzeit insbesondere zur Herstellung spezieller keramischer Heizstrukturen entwickelt, die auf elektrisch isolierende Keramiksubstrate aufgedruckt werden. Eine spezielle Formgebungs methode bietet sich für Mikrokomponenten aus elektrisch leitfähiger Keramik an. Hier kann mit Hilfe der Draht- oder Senkerosion strukturiert werden, sofern die Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit nicht zu hoch sind [10].

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Strukturierung keramischer Mikrokomponenten wurden eine Reihe von Verfahren entwickelt, die jeweils unterschiedlichen Anforderungen sowohl hinsichtlich Gestalt und Material als auch

hinsichtlich den Randbedingungen der Fertigung Rechnung tragen. Insbesondere die Verfahren des Hoch- und Niederdruckspritzgießens bieten eine breite Anwendungspalette zur Herstellung keramischer Mikrokomponenten. Vergleicht man die beiden Verfahren Hochdruck- und Niederdruck-Spritzgießen hinsichtlich ihres Potentials zur Herstellung keramischer Mikrobauteile, so zeigt das Niederdruck-Spritzgießen als die flexiblere Prozesstechnik seine Stärken besonders auf dem Gebiet der Entwicklung ("Rapid Prototyping"), der Muster- und Einzelfertigung sowie der Herstellung von Klein- bis Mittelserien. Jedoch eignet es sich aufgrund der geringeren Grünkörperfestigkeit nur eingeschränkt für automatisierte Fertigungslinien. Die serienmäßige Herstellung größerer Stückzahlen ist wiederum die Stärke des Hochdruck-Spritzgießens, da sich hierbei die vergleichsweise hohen Werkzeugkosten rechtfertigen lassen. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die hier beschriebenen Prozesstechniken sich hinsichtlich ihrer jeweiligen spezifischen Vorteile ergänzen, so dass sie nicht nur ihre Existenzberechtigung haben, sondern zusammen wichtige Beiträge zur Entwicklung und Fertigung keramischer Mikrokomponenten zu leisten vermögen.

#### Literatur

- [1] Ruprecht, R.; Piotter, V.; Benzler, T.; Haußelt, J., "Spritzgießen von Mikroteilen aus Kunststoffen, Metallen und Keramiken", Tagungsband 3. Statuskolloquium Mikrosystemtechnik, FZKA-Bericht 6080 Forschungszentrum Karlsruhe, 1998, S. 83-88.
- [2] German, R. M., "A Rationalization of the Powder Injection Molded Process for Stainless Steels based on Component Features", Proceedings of 1998 International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials, Las Vegas NV, S. 71-85.
- [3] Glutz, P.; Stebler, H., "Klonen von hochpräzisen Mikroteilen", Feinwerktechnik & Messtechnik; F&M 102. Jahrgang; 1994/1-2.
- [4] Ruprecht, R.; Bacher, W.; Piotter, V.; Schmidt, L., "Abformen mit ungefüllten und gefüllten Kunststoffen", Wissenschaftlicher Bericht 5670, Forschungszentrum Karlsruhe, November 1995.
- [5] Stadel, M. et al., "Abformung keramischer Mikrostrukturen durch die LIGA-Technik", Keram. Zeitschrift 48, 1996, S. 1112.
- [6] Benzler, T. et al., "Fabrication of structures by metal injection moulding (MIM) and ceramic injection moulding (CIM)", Powder Metallurgy World Congress & Exhibition, Granada, Spanien, 1998, S. 9-15.
- [7] Piotter, V. et al., "Innovative molding technologies for the fabrication of components for microsystems", Proceedings of SPIE Conference on Design, Test and Microfabrication of MEMS and MOEMS; SPIE Vol. 3580; Paris, 1999, S. 456-463.
- [8] Gütter, M.; Liebich, R., "Spritzgießen keramischer Werkstoffe", Silikattechnik 40, 1989, S. 62-65.
- [9] Lenk, R., "Hot Moulding – An Interesting Forming Process", cfi/Ber. DKG 72 [10] 1995, S. 636-642.
- [10] Winter, V., "Elektrische Heizbarkeit und Mikrostrukturierbarkeit einer Mischkeramik aus Aluminiumoxid und Titanitrid", Diss. Universität Karlsruhe, Juli 1998; Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6173 (Oktober 1998).

- [11] Bauer, W.; Göhring, D.; Knitter, R.; Piotter, V., "Werkstoffe und Abformverfahren für polymere, metallische und keramische Mikrostrukturen", dieser Tagungsband.
- [12] Bauer, W.; Knitter, R., "Formgebung keramischer Mikrokomponenten", in: Werkstoffwoche '98, Band 1. Hrsg. v. K. Kempter, J. Haußelt. Weinheim: Wiley VCH, 1998, S. 217-222.
- [13] Knitter, R.; Bauer, W.; Linner-Krcmar, B.; Hansjosten E., "Rapid Manufacturing of Ceramic Microcomponents", EUROMAT, 27.-30. Sept., München, 1999.
- [14] Knitter, R.; Göhring, D.; Ritzhaupt-Kleissl, H.-J.; Haußelt, J., "Schnelle Fertigung mikrostrukturierter Keramikbauteile", Keram. Zeitschrift 51, 1999, S. 1064-1069.
- [15] Götzen, R., "One-Step-Production für Mikrosysteme mit Rapid Micro Product Development (RMPD)", Tagungsband Microengineering'98, Symposium Fertigung mikrostrukturierter Teile, Messe Stuttgart 1998, S. 17-21.
- [16] Zum Gahr et al., "Material- und Verfahrensentwicklung für mikrotechnische Hochleistungsbauteile", dieser Tagungsband.
- [17] Bauer, W.; Ritzhaupt-Kleissl, H.-J.; Haußelt, J., "Mikrostrukturierung von keramischen Bauteilen im Wachszentrifugalverfahren", Keram. Zeitschrift 50, 1998, S. 411-415.
- [18] Knitter, R.; Odemer, C., "Foliengießen und Prägen als Verfahren zur Herstellung keramischer Mikrostrukturen", KfK-Nachrichten 4/94, S. 240-245.

## **Strategische Teilprojekte**



# Material- und Verfahrensentwicklung für mikrotechnische Hochleistungsbauteile

K.-H. Zum Gahr, R. Knitter, R. Ruprecht, K. Seemann

Institut für Materialforschung

## Zusammenfassung

Im Rahmen des HGF-Strategiefonds wird ein Forschungsprojekt zur Entwicklung mikrotechnischer Demonstratoren für Anwendungen als Mikroinduktoren, Komponenten für Zahrringpumpen und mikrostrukturierte Formeinsätze zum Spritzgießen sowie als keramischer Kompaktreaktor bearbeitet. Das gemeinsame Forschungsziel der drei Teilprojekte ist die Demonstration der Realisierbarkeit und Leistungsfähigkeit hochbeanspruchter mikrotechnischer Bauteile. Die ausgewählten Systeme mit anspruchsvollen Anforderungen an elektronische bzw. magnetische, mechanische und chemische Eigenschaften bieten z.B. ein hohes Anwendungspotential in der Kommunikationstechnik, miniaturisierten Antriebs-, Steuer- und Regelungstechnik oder chemischen Mikroverfahrenstechnik. Die Forschungsarbeiten werden gemeinsam von verschiedenen HGF-Zentren in enger und kontinuierlicher Kooperation mit der Industrie unter Berücksichtigung der für die Umsetzung in Produkte notwendigen Randbedingungen durchgeführt.

## 1. Einleitung

Der Entwurf und die Herstellung mikrotechnischer Hochleistungsbauteile erfordert die systemspezifische Entwicklung neuer Werkstoffe, Prozesstechniken, Modellierungswerzeuge und die Charakterisierung von Materialeigenschaften in Mikrodimensionen als auch die Integration der Komponenten in das jeweilige Mikrosystem und Prüfung der resultierenden Systemeigenschaften. Die Entwicklung neuer Werkstoffe und Prozesstechniken für Mikrokomponenten kann über das spezifische System hinaus ein weites Feld neuer Anwendungen eröffnen, z.B. in der Kommunikationstechnik, Verkehrstechnik, Haushaltstechnik, Medizintechnik oder der chemischen Mikroverfahrenstechnik.

Das Forschungsprojekt wird im Rahmen des Strategiefonds der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) unter Federführung des Forschungszentrum Karlsruhe, gemeinsam mit dem Forschungszentrum Jülich, Hahn-Meitner-Institut Berlin, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht sowie Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Köln bearbeitet und durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Das Forschungsziel des Projektes ist die Entwicklung von Materialien und Prozesstechniken sowie die Realisierung von mikrotechnischen Demonstratoren für ausgewählte Systeme mit anspruchsvollen elektronischen bzw. magnetischen, mechanischen und chemischen Anforderungen. Das Forschungsprogramm gliedert sich in drei Teilprojekte (Abb. 1).



Abb. 1: Gliederung, übergreifende Arbeitsschwerpunkte und Partner im HGF-Strategiefondsprojekt „MALVE“ mit den Teilprojekten Mikroinduktoren, Verschleißbeanspruchte Mikroteile und Keramische Kompaktreaktoren.

- (A) Mikroinduktoren zum Einsatz als Anpassungsnetzwerke im 1 bis 4 GHz-Bereich für die mobile Kommunikation oder als Mikrotransformator z.B. für DC/DC-Konverter unter Einsatz von Dünnschichttechnik und Lithographie in einem mikrosystem- und mikroelektronikkompatiblen Herstellungsprozess,
- (B) Entwicklung der Werkstoffprozesstechnik und Prüftechnik sowie Einsatz von Simulations-tools zur Realisierung dreidimensionaler verschleißbeanspruchter Mikroteile aus metalli-

schen und keramischen Werkstoffen mit und ohne Beschichtungen, insbesondere für Komponenten in Zahnringpumpen oder mikrostrukturierten Spritzgieß-Formeinsätzen sowie

- (C) Modular aufgebaute chemische Mikroreaktoren in Kompaktbauweise mit inneren Strukturdetails im Submillimeter-Bereich gefertigt aus chemisch resistenten keramischen Materialien.

Zur Erreichung der Projektziele mit funktionsfähigen Demonstratoren wurden schon zu Beginn der Definitionsphase relevante Industriefirmen eingebunden, die über die gesamte Laufzeit die Forschungsarbeiten der beteiligten HGF-Zentren im Rahmen von Arbeitskreisen begleiten. Als wesentlicher Beitrag der Industrie erfolgt die Mitwirkung bei der Aufstellung der Bauteilspezifikationen und der Labormusterprüfung.

## 2. Mikroinduktoren

Ferromagnetische Dünnschichten [1] und Mikroinduktoren [2] sind von steigendem Interesse für Hochfrequenzanwendungen im Bereich der Telekommunikation. Im Teilprojekt A werden unterschiedliche Schichtmaterialien für diese Anwendungen entwickelt und optimiert [3]. Diese Schichten sollen zur Entwicklung von Mikroinduktoren mit hohen Güten  $Q$  und niedrigen Verlusten bis zu Frequenzen von 4 GHz eingesetzt werden.

### 2.1 Zielsetzung

Um Informationen über die Frequenztauglichkeit der Schichten zu erhalten, müssen diese bezüglich ihrer magnetischen Eigenschaften, z.B. Magnetisierung und HF-Permeabilität, untersucht werden. Das magnetische Anisotropiefeld  $H_A$ , die Sättigungsmagnetisierung  $M_s$  und schließlich die ferromagnetische Resonanz  $f_r$  spielen eine entscheidende Rolle für die Hochfrequenztauglichkeit der Schichten. Abschirmstromverluste hängen vom spezifischen Widerstand sowie von der Dicke der magnetischen Schicht ab. Daher ist der spezifische Widerstand des magnetischen Materials durch Legierungszusätze oder auch durch hinreichend dünne Schichten in einem Viellagenverbund mit Isolierzwischenschichten zu minimieren. Die magnetischen Schichten mit der höchsten Grenzfrequenz werden in Mikrosputten wie z. B. Toroiden (Abb. 2) mit unterschiedlichen Windungszahlen und lateralen Abmessungen von etwa 100 bis 250  $\mu\text{m}$  integriert. Die Induktor-Leiterbahnen werden ebenfalls mit Hilfe der Dünnschichttechnik hergestellt.

### 2.2 Methoden

Die ferromagnetischen Schichten werden durch das Magnetron- oder Ionenstrahlspittern auf Siliziumsubstraten abgeschieden. Eine hohe Sättigungsmagnetisierung als auch ein hohes Anisotropiefeld werden benötigt, um bei den magnetischen Materialien hohe Grenzfrequenzen zu erzielen. Unter verschiedenen Sputterbedingungen sowie bei der Abscheidung im Bias-Magnetfeld auf Siliziumsubstraten erhält man für Fe-Co-, Ni-Fe- (polykristallin), Fe-Ta-N- (granular) und Co-B- (amorph) Legierungen unterschiedliche Anisotropiefelder. Abschirmstromverluste, die ein Herabsetzen der Grenzfrequenzen bewirken, werden durch einen Viellagenaufbau der magnetischen Schichten mit isolierenden Zwischenschichten aus  $\text{SiO}_2$  verringert.

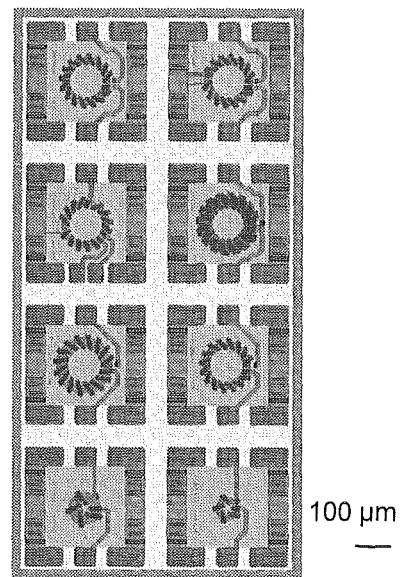


Abb. 2: Maskendesign von Toroid-Mikroinduktoren (Mit freundlicher Genehmigung der Firma TEMIC Semiconductors in Heilbronn)

Um die Schichten zu charakterisieren, werden unterschiedliche Methoden angewandt. Die Röntgendiffraktometrie und die Messung der Krümmung eines Silizium-Biegebalkens dient dazu, Eigenspannungen, die die magnetischen Eigenschaften beeinflussen, zu analysieren. Die Untersuchung der Schichtmikrostruktur erfolgt mit einem Transmissionselektronenmikroskop. Die chemische Zusammensetzung wird mit Hilfe der Augerelektronen- und Mikrosondenanalyse untersucht. Den Verlauf der Magnetisierungskurven erhält man mit Hilfe eines Vibrationsmagnetometers. Die Messung der frequenzabhängigen Permeabilität der Schichten bis ca. 3,5 GHz wird mit einem Netzwerkanalysator und einem Permeameter durchgeführt. Ein HF-Messaufbau für Messungen bis über 4 GHz befindet sich derzeit in der weiteren Entwicklung. Die Finite Elemente Methode (FEM) wird angewendet, um die Induktoren in ihrer Induktivität und Güte zu optimieren.

## 2.3 Ergebnisse

Bis jetzt wurden unterschiedliche kristalline Fe-Co-, granulare Fe-Ta-N- und amorphe Co-B- Einlagenschichten sowie Ni-Fe/NiO- und Fe-Co/SiO<sub>2</sub>-Viellagensysteme für den Einsatz in Mikroinduktoren hergestellt. Fe-Co-Schichten gesputtert mit Hilfe eines Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub>-6-Zoll-Targets wachsen in einer (110)- Textur auf dem Substrat auf. Durch die Variation des Ar-Drucks und der Beschichtungsleistung können die Schichteigenspannungen und die Magnetisierung in der Schichtebene geändert werden. Die bei einer Beschichtungsleistung von 100 W abgeschiedenen Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub>-Schichten zeigen starke Druckeigenspannungen, die in Verbindung mit der positiven Magnetostriktion des magnetischen Materials zu einer für hohe Grenzfrequenzen benötigten Anisotropie führen. Optimierte Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub>- Einlagenschichten erreichen eine Grenzfrequenz von etwa 1 GHz, wobei Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub>/SiO<sub>2</sub>-Viellagenverbunde eine Grenzfrequenz im Bereich von ca. 2,3 GHz zeigen. Dünnenschichten aus Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> (Permalloy) mit Zwischenlagen aus NiO wurden mit dem Ionenstrahlputtern in einem 0,55 mT Bias-Magnetfeld hergestellt. Diese Schichten zeigen gute weichmagnetische Eigenschaften mit niedrigen Koerzitivfeldern bei einer Sättigungspolarisation von ungefähr 1 T. Das dabei entstandene uniaxiale Anisotropiefeld in der Schichtebene beträgt 1,5 mT, was zu einer Grenzfrequenz von etwa 1,4 GHz führt. Magnetrongesputterte granulare Fe-Ta-N-Schichten, die von einem Fe<sub>95</sub>Ta<sub>5</sub>-3-Zoll-Target in Ar/N<sub>2</sub> Plasma mit einer N<sub>2</sub>-Konzentration von bis zu 50 Vol.-% hergestellt wurden, besitzen um einen Faktor 10 höhere spezifische Widerstände als Fe-Co-Schichten. Durch die Optimierung der Beschichtungsparameter und der Abscheidung in einem Bias-Magnetfeld von 15 mT, konnte mit einer 600 nm dicken Einlagenschicht eine Grenzfrequenz von ca. 2,8 GHz erreicht werden. Negativ magnetostriktive, amorphe Co<sub>85</sub>B<sub>15</sub>-Schichten, die mit Hilfe eines 3-Zoll-Co<sub>79</sub>B<sub>21</sub>-Targets gesputtert wurden, zeigen ebenfalls gute weichmagnetische Eigenschaften mit Koerzitivfeldern unter 0,2 mT und eine Sättigungspolarisation von bis zu 1,3 T. In einem Bias-Magnetfeld abgeschieden ergibt sich hier eine Grenzfrequenz von etwa 2 GHz.

FEM-Berechnungen werden durchgeführt, um das Design und die Geometrie der Mikroinduktoren zu optimieren. Die Simulation von Toroiden mit unterschiedlichen Windungszahlen und Durchmesser ergeben Induktivitäten im unteren nH- Bereich. Die Computersimulation zeigt auch, dass die magnetischen Schichten auf flachen, planarisier-ten Leiterbahnen für eine maximale Induktivitätsausbeute abgeschieden werden müssen.

## 3. Verschleißbeanspruchte Mikroteile

Durch den Trend der Miniaturisierung insbesondere in der Mechanik ist ein steigender Bedarf an verschleißbeständigen Mikroteilen festzustellen. Es fehlt jedoch nicht nur am Wissen und Verständnis tribologischer Vorgänge in Mikrodimensionen, sondern auch an den für Mikroteile notwendigen Herstellungsverfahren und Werkstoffen mit ausreichender Verschleißbeständigkeit.

### 3.1 Zielsetzung

Ziel des Teilprojektes B ist es, gemeinsam mit der Industrie Werkstoffe, Prozesstechniken, Prüfverfahren und Simulationswerkzeuge zu entwickeln. Der Erfolg der Arbeiten für dreidimensionale, verschleißbeanspruchte Mikroteile aus Metall und Keramik soll am Beispiel von Labormustern für Mikro-Zahnringpumpen und mikrostrukturierten Formeinsätzen für das Spritzgießen mit gefüllten Kunststoffen gezeigt werden.

### 3.2 Methoden

Die Entwicklung der Werkstoff- und Prozesstechnik ist auf das Pulverspritzgießen (PIM) von härtbaren Stählen oder Keramiken inklusive der Herstellung oder Konditionierung geeigneter Pulver und Formmassen, weiterhin dem Fließpressen von Metallgläsern und geeigneten PVD-Beschichtungen fokussiert. Untersuchungen an verschiedenen Werkstoffen werden hinsichtlich des Verschleißverhaltens, der thermischen und mechanischen Eigenschaften und der Struktur in Mikrodimensionen durchgeführt. Es werden Simulationen zum PIM-Prozess sowie zum tribologischen Werkstoff- und Bauteilverhalten angestrebt.

### 3.3 Ergebnisse

Zum Pulverspritzgießen (PIM) wurden mit vorhandenem Spritzgießwerkzeug und integrierten Formeinsätzen mikrostrukturierte Testbauteile aus verfügbaren Formmassen auf Polyacetalbasis mit Metall- und Keramikpulvern (Fe, 316L, WC-Co, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y-ZrO<sub>2</sub>, AlN) hergestellt. Vom Formeinsatz bis zum gesinterten Bauteil wurde eine Maßverfolgung über den PIM-Prozess durchgeführt, um den materialspezifischen Maßvorhalt zu bestimmen [4], der von den beteiligten Industrieunternehmen im Design der geplanten Formeinsätze für die Demonstratoren berücksichtigt wurde. Die Formeinsätze werden mit lithographischen Verfahren in galvanischem Nickel hergestellt, um die komplexe Geometrie der Mikrokomponenten mit den geforderten Toleranzen realisieren zu können. Parallel werden Formeinsätze aus Silizium auf Abformbarkeit getestet [5].

Insbesondere für Mikrobauteile aus härtbaren Stählen weisen die verfügbaren Formmassen ungeeignete Pulver mit relativ großen Partikeln auf, die zu rauen Oberflächen und Grobkornbildung an gesinterten Teilen führen. Deshalb wird versucht durch Electrode Induction Melting Gas Atomization (EIGA-Technik) neue Formmassen mit feinen Pulvern aus härtbaren Stählen zu entwickeln. Bis-her wurden Feinpulverausbeuten von beispielsweise 3,6 Gew% mit  $< 10 \mu\text{m}$  Partikelgröße für den Werkstoff 1.4542 erreicht und Grobpulveranteile mit Hilfe eines 25  $\mu\text{m}$  Siebes in einer Ultraschallmaschine ausgesiebt. Daraus wurde mit einem Binder auf Polyvinylalkoholbasis eine neue Formmasse hergestellt, die auf Eignung für MikroPIM untersucht wird. Parallel zur Weiterentwicklung der EIGA-Anlage zur Erhöhung der Feinpulverausbeute wurde vom Ausgangspulver des Werkstoffs 1.2379 durch Windsichten Feinpulver mit Fraktionen von bis zu 99,5 Gew% kleiner 7  $\mu\text{m}$  Pulverpartikelgröße abgetrennt. Gleicher soll mit kommerziell verfügbaren Pulvern aus härtbaren Stählen versucht werden.

Daneben soll das Fließpressen von metallischen Gläsern für Mikrobauteile entwickelt werden. Hierzu wurde die Herstellung von Halbzeugen (Rohlingen) aus  $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$  (Pacunip) entwickelt. Die Versuche zur reproduzierbaren Herstellung von Materialproben aus den Metallgläsern Pacunip und V4 ( $\text{Zr}_{46,75}\text{Ti}_{8,25}\text{Cu}_{7,5}\text{Ni}_{10}\text{Be}_{27,5}$ ) zeigten, dass sich einzelne Primärkristallite und lokale Störungen durch Oxidverunreinigungen bilden können. Das V4-Glas ist während des Umformprozesses bei hohen Temperaturen ausreichend lange stabil gegen Kristallisation um Umformgrade über 50 % zu erreichen. Trotz störender Oberflächenschichten lassen sich durch Fließpressen glatte Oberflächen ( $R_a \sim 10 \text{ nm}$ ) erzielen. Oberflächenreaktionen zwischen metallischem Glas und Werkzeugwerkstoff können während des Umformprozesses zum Verschweißen von Werkstoff und Werkzeug führen. Die Prüfung verschiedener Werkzeugwerkstoffe ergab ausgeprägte Reaktionen mit BN, mäßige Reaktionen nur bei höheren Pressdrücken mit Cu, Stahl 1.4057 und Inconel 600, und keine Reaktionen mit Ta, Mo, SiC, Quarzglas und Si. Damit bietet sich Si, das in Mikrodimensionen besonders gut strukturierbar ist, als Werkzeugwerkstoff an.

Zur Verbesserung des Verschleißwiderstandes kann auch für Mikrobauteile eine PVD-Beschichtung notwendig werden. Zur Substratreinigung wird die Glimmentladung als Reinigungsverfahren gewählt, um unzulässige Temperaturerhöhungen der Mikroteile zu vermeiden. Nachfolgend werden verschleißbeständige Schichten auf gehärtetem Stahl (z.B. 1.4542) bezüglich hoher Schichthaf-  
tung optimiert. Dabei werden insbesondere Schichten aus metallischem CrAlN, amorphem C

und Viellagenschichten TiC/TiN aufgrund ihrer hohen Härte und ihres meist niedrigem Reibungskoeffizienten favorisiert.

Zur Vorbereitung der Werkstoffcharakterisierung wurde ein Mikrotribometer für hohe Gleitgeschwindigkeiten und demonstratorrelevante Flüssigkeiten konstruiert und gebaut. Es wurden Vorrichtungen zur Ermittlung von Streckgrenze, Biegefestigkeit und Thermographie speziell in Mikrodimensionen weiterentwickelt. Erste Probenkörper, die aus Formmassen mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - und  $\text{Y}-\text{ZrO}_2$ -Pulvern durch PIM hergestellt wurden, weisen als Grünlings einen Weibullparameter größer 16, als gesinterte Proben unter 8 und zusätzlich Mikroporen auf den am Grünlings bearbeiteten Oberflächen auf. Die Eigenspannungsanalysen mit Synchrotronstrahlung zeigen deutliche Gradienten im Bereich dieser Oberflächen. Demgegenüber wurden an unbearbeiteten Grünlings Druckeigenspannungen, an gesinterten Probenkörpern Zugeigenspannungen ermittelt. Nachfolgend wurde die Herstellung der Probenkörper durch PIM zur Charakterisierung des Werkstoff- und Bauteilzustandes in Mikrodimensionen durch Verwendung neuer Formeinsätze und modifiziertem Spritzgießwerkzeug verbessert.

Die Simulation des PIM-Prozesses mit Hilfe der für Kunststoffbauteile kommerziell erhältlichen Software MOLDFLOW ergab gegenüber den PIM-Versuchen mit Formeinsätzen für Probenkörper mit 50-150  $\mu\text{m}$  breiten Stegen abhängig von der verwendeten Formmasse einen stark unterschiedlichen, deutlich niedrigeren Druckbedarf für eine vollständige Formfüllung als im Experiment. Trotzdem können gute qualitative und teilweise auch quantitative Vorhersagen durch die Prozesssimulation getroffen werden. Mit der Simulation der Bauteilbeanspruchung auf Basis des aktuellen Designs der Zahrringpumpe wurde begonnen. Zur Simulation des Verschleißes wurde ein Kontaktmodell entwickelt sowie Strategien zur Modellbildung diskutiert und ausgewählt.

#### 4. Keramische Kompaktreaktoren

Dem neuen Gebiet der Mikroreaktionstechnik wurde in den letzten fünf Jahren viel Aufmerksamkeit geschenkt, verspricht man sich doch insbesondere bei schnellen, heterogen katalysierten Gasphasenreaktionen die Schlüsselprobleme der chemischen Reaktionstechnik minimieren zu können. Wenn diese Reaktionen in Reaktoren mit inneren Abmessungen im Milli- bis Mikrometerbereich durchgeführt werden, erwartet man durch den schnellen Masse- und Wärmetransport einerseits und die definierte Verweilzeit andererseits eine Erhöhung von Umsatz und Selektivität. Die Anwendungsmöglichkeiten der Mikroreaktoren sind bisher jedoch teilweise begrenzt

durch die Eigenschaften der verwendeten Materialien, wie Glas, Metalle, Silizium oder Polymere. Um chemische Reaktionen bei hohen Temperaturen oder unter Beteiligung hoch korrosiver Reaktanten durchzuführen, bieten sich Keramiken als die Materialien an, die dieses Defizit schließen können.

#### 4.1 Zielsetzung

Ziel des Teilprojektes C ist die Entwicklung von modular aufgebauten, keramischen Reaktoren oder Reaktorsystemen in Kompaktbauweise für den Einsatz in der chemischen Technik. Für diese Entwicklung sind Arbeiten sowohl auf den Gebieten der Werkstoffprozesstechnik und Materialoptimierung, als auch im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik erforderlich. Als Modellreaktion für den keramischen Kompaktreaktor wurde die oxidative Kopplung von Methan zu Ethen ausgewählt. Diese kommerziell sehr interessante Reaktion ist in herkömmlichen Reaktoren im Temperaturbereich zwischen 700 und 1000°C mit einer Vielzahl von Katalysatoren untersucht worden, doch liegen die bisher erzielten Ausbeuten nicht über 25% [6]. Für diese stark exotherme Reaktion müssen die Eduktgase auf eine definierte Temperatur aufgeheizt werden, bevor sie die mit einem Katalysator versehene Reaktionszone erreichen. Darüber hinaus muss der Kontakt mit heißen Metallflächen vermieden werden, da sonst die partielle oder vollständige Oxidation des Methans begünstigt wird.

#### 4.2 Methoden

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen der Modellreaktion ist ein modulares Reaktordesign erarbeitet worden. Die Herstellung der Einzelkomponenten erfolgt über Rapid Manufacturing, einer Kombination aus Stereolithographie und dem Niederdruckspritzguss (Heißgießen) von Keramik [7,8]. In diesem Prozess werden die einzelnen Reaktorkomponenten zunächst als 3D-CAD-Modelle generiert, durch Stereolithographie in Polymer aufgebaut und anschließend in Silikon umkopiert. Diese Silikonformen dienen dann direkt als Abformwerkzeuge beim ND-Spritzguss der Keramik [9]. Dies ist möglich, weil im Gegensatz zum Hochdruckspritzguss hier die Temperatur- und Druckanforderungen an das Werkzeug durch die Verwendung von niedrig schmelzenden Paraffinen als Binder deutlich reduziert sind. Für die Reaktionszone werden neben Beschichtungstechniken für Katalysatorsubstrate auch massive mikrostrukturierte Katalysatoreinsätze entwickelt [10]. Das Fügen der Medienanschlüsse erfolgt durch Löten mit einem Glaskeramiklot.

#### 4.3 Ergebnisse

Für die Durchführung von Gasphasenreaktionen wurden verschiedene Varianten des Kompaktreaktors erarbeitet, die als gemeinsames Merkmal die leichte Auswechselbarkeit der Katalysatorelemente besitzen, wie es insbesondere für das Katalysatorscreening wünschenswert ist. Das speziell für die Modellreaktion entwickelte Reaktordesign bietet darüber hinaus die Möglichkeit, die Eduktgase, Methan und Sauerstoff, bis zum Eintritt in die Reaktionszone getrennt zuzuführen und vorzuheizen (Abb. 3). In der Reaktionszone befinden sich zwei 20 mm lange, austauschbare Katalysatorelemente mit 450 µm breiten Kanälen. Aluminiumoxid wurde als Reaktormaterial ausgewählt, während die Katalysatorelemente aus beschichteten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Trägern oder massiven Katalysorelementen bestehen können. Nach Optimierung des Designs und der Prozesskette des Rapid Manufacturing wurden die Reaktorkomponenten in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  abgeformt, vorsichtig entwachst und bei 1700°C zu einer Dichte von 95% th.D. gesintert. Als ein möglicher Katalysator wurde Lithiumaluminat ( $\text{LiAlO}_2$ ) ausgewählt. Für dieses Material werden chemische Beschichtungen durch Sol-Gel-Technik und durch einen modifizierten Schlickerguss optimiert. Zudem werden Katalysatorträger durch RF-Magnetronspitzen beschichtet. Als Alternative zu den Beschichtungstechniken werden auch massive, mikrostrukturierte Katalysatoreinsätze über Foliengießen & Prägen entwickelt. Als Medienanschlüsse werden kommerzielle  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Rohre durch Löten mit dem Reaktorgehäuse gasdicht verbunden. Dazu wird ein Glaskeramiklot verwendet, welches im Ausdehnungskoeffizienten auf  $\text{Al}_2\text{O}_3$  abgestimmt ist, durch eine thermische Behandlung teilweise auskristallisiert und so eine Temperaturstabilität bis über 1300°C erreicht [10]. Um das Reaktorgehäuse mit dem Deckel dicht verschließen zu können, werden die Oberflächen hochglanzpoliert und mit einer Halterung aufeinander gepresst. Für die Beheizung des Reaktorgehäuses werden keramische Heizer auf der Basis  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$  [11] weiterentwickelt, die direkt in das Reaktorgehäuse integriert werden können.

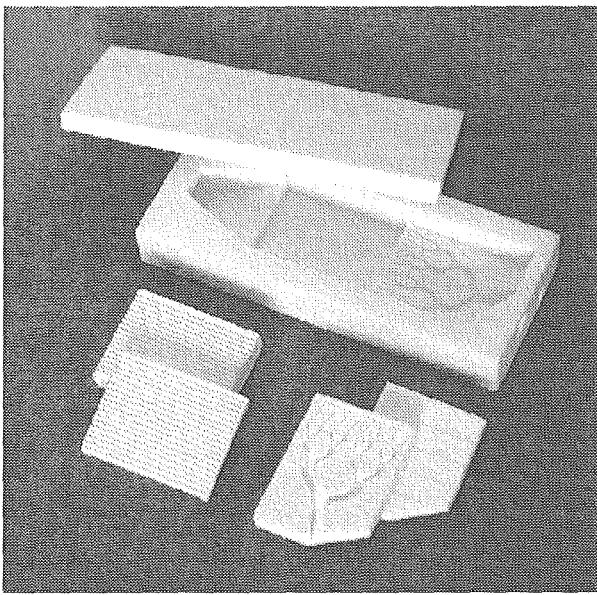


Abb. 3: Modulare Elemente einer Variante des keramischen Kompaktreaktors (Gesamtlänge ca. 7 cm) für heterogen katalysierte Gasphasenreaktionen.

### Danksagung

Für die Förderung des Projektes durch den Bundesminister für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des HGF-Strategiefonds sei herzlich gedankt. Weiterhin gebührt den Firmen TEMIC Semiconductors Heilbronn, Hydraulik Nord Parchim, Rolla Micro Synthetics Grenchen, Männer Bahlingen, Schunk Sintermetalltechnik Gießen, Metallico Thale, FRIATEC Mannheim, und Akzo Nobel Chemicals Research Obernburg sowie dem Institut für Mikrostrukturtechnik und der Hauptabteilung Versuchstechnik des Forschungszentrums Karlsruhe Dank für ihre Mitwirkung.

Neben den federführenden Autoren sind an den Forschungsarbeiten beteiligt: <sup>1)</sup>Forschungszentrum Karlsruhe, <sup>2)</sup>Forschungszentrum Jülich; <sup>3)</sup>Hahn-Meitner-Institut, Berlin; <sup>4)</sup>GKSS-Forschungszentrum Geesthacht; <sup>5)</sup>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln, insbesondere J. Aktaa<sup>1)</sup>, M. Bram<sup>2)</sup>, I. Fergen<sup>1)</sup>, T. Fett<sup>1)</sup>, R. Gerling<sup>4)</sup>, T. Gietzelt<sup>1)</sup>, H. Goedert<sup>4)</sup>, D. Göring<sup>1)</sup>, P. Grünberg<sup>2)</sup>, H. Leiste<sup>1)</sup>, M.-P. Macht<sup>3)</sup>, P. Mechlich<sup>5)</sup>, V. Piotter<sup>1)</sup>, A. Pyzalla<sup>3)</sup>, W. Reimers<sup>3)</sup>, M. Rohde<sup>1)</sup>, H. Seidel<sup>3)</sup>, H. Schimansky<sup>4)</sup>, J. Schneider<sup>1)</sup>, H. Steiner<sup>1)</sup>, A. von der Weth<sup>1)</sup>;

### Literatur

- [1] Senda, M., Ishii, O., "Permeability Measurement in the GHz Range for Soft Magnetic Films using the M/C/M Inductance-Line", IEEE Transactions on Magnetics 31 (1995) No. 2, 960-965.
- [2] Yamaguchi, M., Suezawa, K., Arai, K. I., Takahashi, Y., Kikuchi, S., Shimada, Y., Li, W. D., Tabanabe, S., Ito, K., "Micro-fabrication and Characteristics of Magnetic Thin- Film Inductors in the Ultrahigh Frequency Region", J. of Appl. Phys. 85 (1999) No. 11, 7919-7922.
- [3] Seemann, K., Fergen, I., "Development of Ferromagnetic Single- and Multilayer Films for High Frequency-Microinductors", dieser Tagungsband.
- [4] Piotter, V.; Benzler, T.; Gietzelt, T.; Ruprecht, R.; Hausselt, J.: Micro Powder Injection Molding; Proc. EUROMAT, München 1999.
- [5] Bacher, W. ; Bade, K.; Guber, A.; Guttmann, M.; Pfleging, W.; Schaller, T.; Schlossmacher, P.: Fertigung von mikrostrukturierten Komponenten und Formeinsätzen aus Metall; dieser Bericht
- [6] Hutchings, G. J., Scurrell, M. S., "Studies of the Mechanism of the Oxidative Coupling of Methane Using Oxide Catalysts" in: Methane Conversion by Oxidative Processes, E. E. Wolf (Hrsg.), Van Nostrand Reinhold, New York 1992, S. 200-258.
- [7] Knitter, R.; Bauer, W.; Linner-Krcmar, B.; Hansjosten, E., "Rapid Manufacturing of Ceramic Microcomponents", EUROMAT, 27.-30. Sept., München, 1999.
- [8] Knitter, R.; Göhring, D.; Ritzhaupt-Kleissl, H.-J.; Haußelt, J., "Schnelle Fertigung mikrostrukturierter Keramikbauteile", Keram. Z. 51 (1999) Nr. 12, 1064-1069.
- [9] Ritzhaupt-Kleissl, H.-J. et al., „Fertigung keramischer Mikrokomponenten“, dieser Tagungsband.
- [10] Knitter, R.; Göhring, D.; Bram, M.; Mechlich, P.; Broucek, R., "Ceramic Microreactor for High-Temperature Reactions", to be published in: Proc. IMRET 4, 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Micro-reaction Technology, March 5-9, Atlanta, Georgia, 2000.
- [11] Winter, V., "Elektrische Heizbarkeit und Mikrostrukturierbarkeit einer Mischkeramik aus Aluminiumoxid und Titannitrid", Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6173, 1998.

# Materialflusssysteme für die Produktion von Mikrosystemen

Ulrich Gengenbach, Friedhelm Engelhardt, Andreas Hofmann, Rudolf Scharnowell

Institut für Angewandte Informatik

## Zusammenfassung

Ein wesentlicher Aspekt in der Produktion von Mikrosystemen ist die Sicherstellung des Materialflusses zwischen den Fertigungsgeräten. Während die Silizium-basierte Mikrosystemtechnik von der Materialflußtechnik der Halbleiterindustrie profitiert, werden in der Fertigung hybrider Mikrosysteme im Wesentlichen Sonderlösungen zur Verkettung der Fertigungseinrichtungen eingesetzt. Im Normungsausschuß DIN NAFuO AA F3 "Fertigungsmittel für Mikrosysteme" wurde ein Werkstückträger für den Einsatz in der Fertigung von Mikrosystemen genormt. Er orientiert sich an den Standards der Halbleiterindustrie und erlaubt somit einen Teil des dort vorhanden Equipments (Reinraumtransportbehälter, Handler) auch für Nicht-Si-Mikrotechnik nutzbar zu machen. Im Verbundprojekt Microfeed2 dient der Werkstückträger als Grundlage für die Verkettung von Fertigungsgeräten in der Mikrosystemfertigung zweier Industriepartner. Neben dem innerbetrieblichen Materialfluss kann er in Reinraumtransportbehältern auch in einer vernetzten Mikrofertigung mit räumlich verteilten Fertigungsstätten eingesetzt werden. Dies ist ein Baustein für die verteilte Fertigung von Mikrosystemen in einem Netzwerk von klein- und mittelständischen Unternehmen, einem sogenannten "Virtuellen Unternehmen zur Fertigung von Mikrosystemen (MicroWebFab)".

## 1. Einleitung

Bei der Klassifizierung von Mikrosystemen wird oft zwischen zwei Bereichen, welche sich in Teilen überlappen, unterschieden: die Silizium- und die Nichtsiliziumtechnik. Kennzeichnendes Merkmal der Fertigung bei der siliziumbasierten Mikrotechnik ist die überwiegende Nutzung von Materialien und Prozessen der klassischen Halbleitertechnik. Sie profitiert somit von den in dieser Technologie etablierten industriellen Standards (z.B. SEMI) und Fertigungsstrukturen (z.B. Dienstleistungsangebote für einzelne Prozessschritte). Im Bereich der Nicht-Si-Mikrotechnik ist der Standardisierungsgrad der Fertigungsgeräte dagegen weit geringer. Hierfür gibt es mehrere Ursachen. Beispielsweise gibt es eine viel größere Bandbreite an einsetzbaren Materialien und Komponenten mit entsprechend großer Variation der Bauteileigenschaften (Geometrie, Material, usw.). Folglich gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Fertigungsprozesse, welche vor allem auch an den Materialfluss zwischen den Fertigungsgeräten erhöhte Anforderungen stellt.

Betrachtet man nun die Situation der KMUs, wie sie sich zur Zeit darstellt, lässt sich feststellen, dass sich einerseits schon Firmen im Bereich der Nicht-Si-Mikrotechnik etabliert haben andererseits sich neue Unternehmen in der Gründungsphase befinden. Bei den schon etablierten Firmen bestehen die Herausforderungen aus Sicht des Materialflusses in der Verknüpfung der

verschiedenen Fertigungseinrichtungen, welche oftmals nicht unter dem Gesichtspunkt eines optimalen Materialflusses zusammengestellt wurden. Bei den Neugründungen besteht dagegen die Möglichkeit die besonderen Anforderungen an die Logistik von Beginn an mit in die Planung einfließen zu lassen.

Ein erster Schritt in Richtung Standardisierung der Logistik im Bereich der Fertigung von hybriden Mikrosystemen wurde mit dem Normentwurf eines flexibel anpassbaren Werkstückträgers gemacht.

Dieser Normentwurf DIN 32561 „Fertigungsmittel für Mikrosysteme - Werkstückträger - Anschlußmaße und Toleranzen“ [1] standardisiert Werkstückträger, die Werkstücke geordnet aufnehmen und zu deren Lagerung, Transport und Handhabung standardisierte Handhabungs- und Fertigungseinrichtungen der Halbleiterfertigungstechnik eingesetzt werden können. Die Norm legt die einheitliche äußere Gestaltung, Anschlußmaße und Toleranzen, die Bezeichnung und das Feld für Kennzeichnung sowie die Ausführung dieser Werkstückträger fest. Der Anwender der Norm ist in der Gestaltung der Nutzfläche des Werkstückträgers völlig frei. Er kann sie mit Halteelementen, Formnestern oder anderen Funktionselementen belegen. Schon im abgeschlossenen BMBF-Verbundprojekt MFV-Mikrosysteme stellte sich heraus, dass es zweckmäßig ist auf dem Werkstückträger Funktionen zu integrieren, die über reine Spann- und Haltefunktionen hinausgehen [2]. Auf einem 8"-Werkstückträger wurden neben

Spannelementen, fluidische Komponenten integriert, die eine automatische Vereinzelung und lagerrichtige Zuführung der zu montierenden Einzelteile am Sauggreifer sicherstellen (Abb. 1).

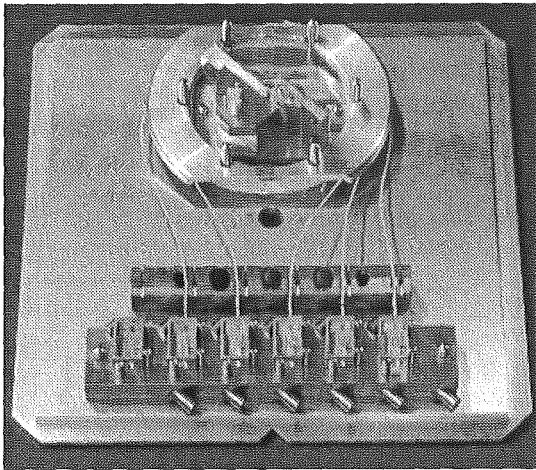


Abb. 1: Werkstückträger für mikrooptische Aufbauplatten mit integrierten fluidischen Zuführungssystemen.

Im BMBF-Verbundprojekt Microfeed2 wird die Werkstückträgernorm als Grundlage für die Entwicklung standardisierter Lösungen für die industrielle Fertigung von Mikrosystemen bei den Industriepartnern Microparts und Meonic verwendet. Auch bei diesen Arbeiten zeigt sich, dass der Werkstückträger zunehmend Funktionen im Prozess übernimmt und nicht nur als Palette zur Materialzuführung dient.

## 2. Standardisierte Materialflusskomponenten in einer existierenden Fertigung von optischen Mikrosystemen

Ein Referenzprodukt in diesem Verbundprojekt ist das LIGA-Mikrogitterspektrometer der Fa. Microparts.

Die Kernkomponente des LIGA-Mikrogitterspektrometers ist ein durch Heissprägen strukturierter Kunststoffschichtaufbau, der als Folienlichtwellenleiter ausgebildete eigentliche Spektrometerbaustein, in den Licht mit einer Glasfaser eingekoppelt wird [3]. Das eingekoppelte Licht wird an einem mikrostrukturierten Gitter, mit Zahnhöhen im Submikrometerbereich, spektral zerlegt. Das gebeugte Licht wird auf den Auskoppelbereich abgebildet und hier über eine Photodiodenzeile ausgelesen (Abb. 2). Die wesentlichen Montageschritte werden bisher manuell durchgeführt, und sollen zukünftig automatisiert werden. Zur Erfassung der Anforderungen an den Materialfluss wurde eine Prozessanalyse der Mikrospektrometerfertigung durchgeführt. Alle Prozessschritte beginnend mit der Abformung der Spektrometerbausteine bis zum gehäuseten, mit Faser und Dio-

denzeile verbundenen Spektrometerwurden untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass durch die Randbedingungen, die durch die schon vorhandenen Fertigungsgeräte, wie z.B. Bedampfungsanlage und Montageautomat, vorgeben wurden, standardisierte Lösungen nur in den letzten Prozessschritten der Montage (Ofenprozess, Häusung des Bausteins und Endkontrolle) zum Einsatz kommen können.

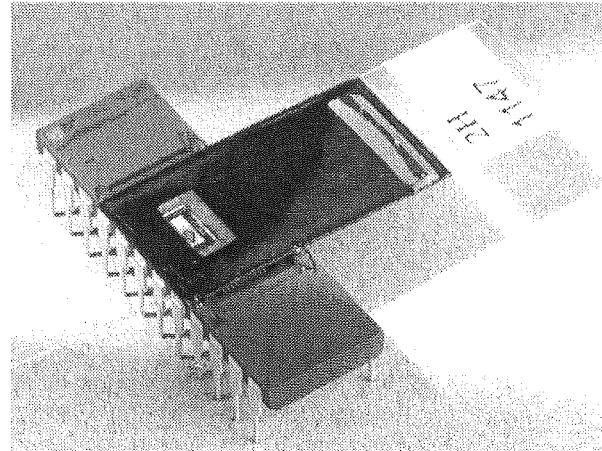


Abb. 2: Mikrogitterspektrometerbaustein auf Photodiodenzeile montiert.

Diese drei Prozessschritte sollten nach Möglichkeit alle auf einem Werkstückträger durchgeführt werden, um manuelle, für die bruchempfindliche Faser gefährliche, Umhordevorgänge zu vermeiden. Vom Industriepartner Fa. ACR wurde ein Werkstückträger konzipiert, der alle Anforderungen dieser drei Prozessschritte erfüllt (Abb. 3). Der 8"-Werkstückträger besteht aus einem Edelstahlrahmen, der die standardisierte mechanische Schnittstelle bildet. Darauf ist eine Leiterplatte befestigt, die vier ZIFF-Sockel zur Aufnahme der Spektrometerbausteine trägt. Diese Sockel sind elektrisch mit einem Stecker am Rand der Platin verbunden. Ein wesentlicher Aspekt bei der Gestaltung des Werkstückträgers war, die Fasern so zu versorgen, dass eine Biegebelastung der Faser am Gehäuse (Bruchgefahr) ausgeschlossen wird. Dazu wurde ein ringförmig gefräster Kunststoffkanal zusätzlich auf dem Werkstückträger angebracht, der die Glasfasern sicher fixiert.

Somit ergibt sich nun folgender Montageablauf: Nach der Anbringung der Diodenzeile wird ein Spektrometerbaustein in das Gehäuseunterteil eingelegt und mit den Pins der Diodenzeile in den ZIFF-Sockel auf dem Werkstückträger eingesteckt. Die Umgebung des ZIFF-Sockels wurde als Widerlager für das Gehäuseunterteil ausgeführt. Auf das Unterteil wird Klebstoff dosiert, das Gehäuseoberteil aufgesetzt und mittels eines kreuzförmigen Spannelementes angepresst. Zum Prüfen der Bausteine wird eine Faser aus der

Halterung entnommen und Licht eingekoppelt. Das Signal der Diodenzeile wird über den Stecker am Außenrand des Werkstückträgers abgegriffen. Der Werkstückträger integriert somit folgende Funktionen:

- Montageplattform für das Häusen der Spektrometerbausteine,
- Spannvorrichtung zum Fixieren der Gehäuseoberteile während des Aushärtevorgangs des Klebers und
- Prüfadapter für die Kontaktierung der Diodenzeilen während der Endkontrolle der Bausteine.

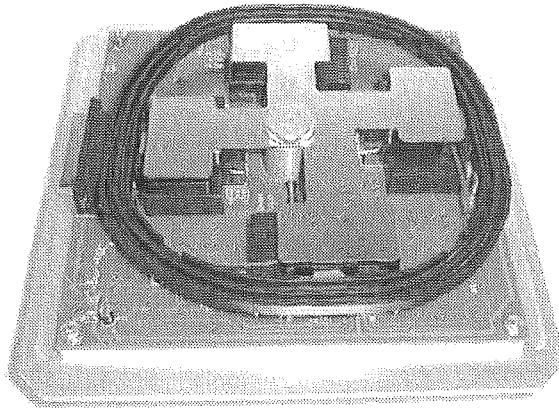


Abb. 3: Werkstückträger für die Häusung und Prüfung von vier Spektrometern. (Fa. ACR)

### 3. Standardisierte Materialflusskomponenten in einer neu geplanten Fertigung von fluidischen Mikrosystemen

Das zweite Referenzprodukt in Microfeed2 ist ein komplexes Mikrosystem zur chemischen Analyse wässriger Lösungen. Das System besteht aus einem mikrostrukturierten fluidischen Grundkörper mit einer Kantenlänge von 10 cm, der auf der einen Seite mit Sensoren und Aktoren und auf der anderen Seite mit fluidischen Anschlusselementen bestückt werden muss. Bisher wurde dieses System von Hand montiert, nun wird eine (teil)automatisierte Montageanlage neu geplant. Bei der Auslegung dieser Montageanlage ist es möglich, Aspekte eines standardisierten Materialflusses von Anfang an zu berücksichtigen. Frühzeitig wurde entschieden, das DIN 32561 Werkstückträgerformat als Grundlage für die Teilezuführung festzulegen. Da sich das Produkt zu Beginn des Microfeed2-Projektes in einer Redesignphase befand, nützte Fa. Meonic diese Gelegenheit die Produktgestaltung noch einmal unter montagetechnischen Gesichtspunkten zu über-

denken [5]. Ergebnis dieser Überlegungen war ein einheitliches Design der chipförmigen Bauelemente, der Sensor- und der Aktorchips. Beide Bauelemente haben nun die Abmessungen 5 x 5 mm. Die Dicke variiert je nach Bauelementtyp. Die Bauelementfläche wurde unterteilt in (Abb. 4):

- Funktionsbereich,
- Greifbereich für Sauggreifer,
- Greifbereich für mechanische Greifer,
- Kennzeichnungsecke,
- Kennzeichnungsfläche (z.B. für Barcode) und
- Kontaktierungsbereich.

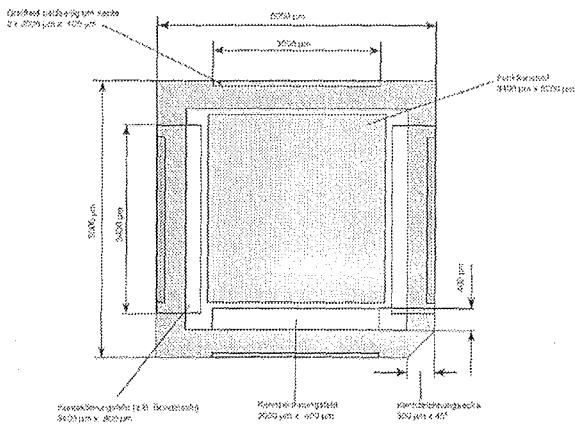


Abb. 4: Vereinheitlichtes Bauteildesign (Fa. Meonic)

Diese Vereinheitlichung des Bauteildesigns führt zu einer erheblichen Vereinfachung der Magazinier-/Zuführtechnik und der Greiftechnik. Damit können die Bauteile in einheitlichen Magazinen zugeführt und mit demselben Greifer montiert werden.

Das Grundelement für die Montage ist der fluidische Grundkörper. Er wird auf einen Werkstückträger aufgespannt und im Montageprozess von beiden Seiten bestückt. Der Montageprozess lässt sich in folgende Hauptschritte untergliedern:

- 1 Klebefolie aufbringen,
- 2 Montage der fluidischen Anschlusselemente,
- 3 Aushärten im Wärmeschränkchen,
- 4 Klebstoffdosierung,
- 5 Montage der Aktorchips,
- 6 Aushärten im Wärmeschränkchen,
- 7 Klebstoffdosierung,
- 8 Montage der Sensorchips,
- 9 Drahtboden der Sensorchips.

Für alle diese Prozessschritte werden 6"-Werkstückträger zur Zuführung der zu montierenden Bauteile eingesetzt. Die Vereinheitlichung der Geometrie der Sensor- und Aktor-Chips erlaubt die Verwendung kommerziell erhältlicher ChipTrays. Diese wurden auf einem entsprechend gestalteten Werkstückträger (Abb. 5) befestigt. Es besteht daher die Möglichkeit die Zulieferer die Chips in den Chiptrays liefern zu lassen und diese dann erst zum Zeitpunkt der Montage in die Formnester auf den Werkstückträgern einzusetzen. Damit ist eine geordnete Bereitstellung der Bauteile sicher gestellt und die Anzahl der im Umlauf befindlichen Werkstückträger wird minimiert.

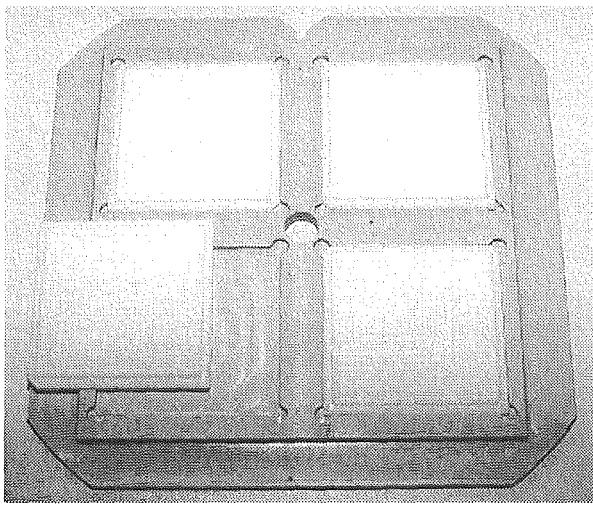


Abb. 5: Werkstückträger mit integrierten Chip-Trays (Fa. ACR)

Der Werkstückträger, der den fluidischen Grundkörper trägt, läuft durch alle Montageprozesse hindurch. Während der Montage dient er als Grundplatte zur Fixierung des Grundkörpers für die Bestückvorgänge. Während des Aushärtens im Wärmeofen dient er als Grundplatte einer Anpressvorrichtung, mit der die montierten Bauteile angepresst werden. Danach dient er wiederum als Grundplatte für das Drahtboden der Sensorchips mit der Leiterplatte. Ein weiterer 6"-Werkstückträger dient zur Bereitstellung der fluidischen Anschluselemente. Damit kann im gesamten Montageprozess ein einheitlicher Materialfluss auf Basis dieser Werkstückträger realisiert werden.

#### 4. Standardisierte Materialflusskomponenten in einer vernetzten Fertigung

Die vorstehenden Fallbeispiele illustrierten den innerbetrieblichen Einsatz standardisierter Materialflusskomponenten. Auch im überbetrieblichen Materialfluss können standardisierte Komponenten einen wesentlichen Beitrag für Fertigungsnetzwerke von mittelständischen Unternehmen

leisten. Im Unterschied zu Großunternehmen, die meist alle notwendigen Prozesse zur Fertigung von Mikrosystemen im Haus haben, sind klein- und mittelständische Firmen Spezialisten auf einigen wenigen Prozessen der Mikrotechnik, wie z.B. Mikrospritzguss, Mikrogalvanik, Beschichtungstechnik oder Mikroelektronik. Einer mittelständischen Firma ist es nicht möglich, komplexe Mikrosysteme im eigenen Haus komplett herzustellen. Sobald dafür Prozesse notwendig sind, die über ihre Kernkompetenz hinausgehen, entgehen ihr folglich Aufträge, zu denen sie mit ihren Kernkompetenzen im Grunde beitragen könnte. Gleichzeitig existieren jedoch auf dem Markt andere klein- und mittelständische Firmen, die mit ihrem Prozess-Know-how diese Lücken schließen könnten.

Um diese Situation zu verbessern wurde vom Forschungszentrum Karlsruhe und der Fa. ACR ein Zusammenarbeitsmodell - die virtuelle Fabrik für Mikrosysteme (MicroWebFab) - entwickelt. Diese Kooperationsform erlaubt klein- und mittelständischen Mikrotechnologiespezialisten ihre Kapazitäten und ihr Know-how zusammenzuschließen, und versetzt sie damit in die Lage komplexe Fertigungsdienstleistungen im Bereich der Mikrosystemtechnik anbieten zu können. Dazu bilden diese Firmen ein Konsortium, dessen Zusammenarbeit in der virtuellen Fabrik und das Auftreten nach außen von einem Koordinator gesteuert werden. Der Koordinator aquiert Aufträge am Markt, erstellt Angebote und führt die Auftragsklärung mit dem Kunden durch. Auf der Grundlage der Spezifikation des zu fertigenden Produkts legt er die Prozesskette fest und identifiziert die Technologiepartner im Konsortium, die für die entsprechenden Prozessschritte in Frage kommen. Zur Abarbeitung des Auftrags müssen diese Partner nun materialfluss- und informationstechnisch verknüpft werden (Abb. 6). Da es sich bei den zu transportierenden Produkten um Mikrokomponenten handelt, lassen sich größere Stückzahlen auf den o.a. standardisierten Werkstückträgern in Reinraumtransportbehältern unterbringen. Mit einer geeigneten Umverpackung können diese Reinraumtransportbehälter zu geringen Kosten über Nacht zwischen den Firmen von herkömmlichen Kurierdiensten transportiert werden. Die informationstechnische Verknüpfung in der virtuellen Firma erfordert ein zentrales Steuerungs- und Planungssystem beim Koordinator und den Datenaustausch (kaufmännisch administrative Daten, Produktionsdaten) mit den Firmen im Konsortium. Diese Aspekte werden in [6] behandelt.

Für jeden Auftrag wird aus den Technologiepartnern ein Verbund, „die virtuelle Firma für Mikrosysteme“, temporär zusammengestellt, d.h. es können auch mehrere solcher Verbünde parallel existieren und Aufträge bearbeiten. Das Micro-

WebFab-Konzept erlaubt es somit klein- und mittelständischen Firmen flexibel am Markt zu agieren, ihre Kernkompetenzen auszubauen und neue Märkte zu erobern und zu sichern.

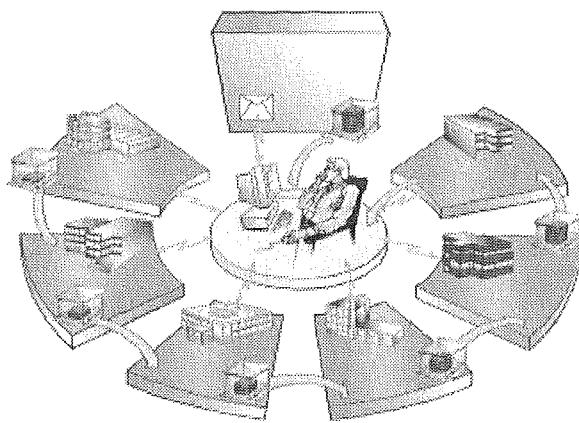


Abb. 6: Materialfluss- und informationstechnische Verknüpfung in einer MicroWebFab.

Mit der MicroWebFab besteht die Chance die eingangs erwähnten, weit entwickelten Fertigungsstrukturen, welche sich in der „Siliziumwelt“ am Markt etabliert haben, in ähnlicher Form auch im „Nichtsiliziumbereich“ abzubilden.

### Danksagungen

Wir bedanken uns bei unseren Projektpartnern den Firmen ACR, Microparts und Meonic im Verbundprojekt Microfeed2 für gute Zusammenarbeit. Ferner danken wir der Werkstattmannschaft des IMB und der Hauptwerkstatt für ihre Unterstützung beim Aufbau unserer Prototypen.

### Literatur

- [1] DIN 32561 "Fertigungsmittel für Mikrosysteme- Werkstückträger - Anschlußmaße und Toleranzen, DIN NaFuO, 1999
- [2] NN, "Entwicklung und Erprobung von fertigungsgerechten Montage- und Fügeverfahren zum Aufbau von Mikrosystemen", VDIVDE-IT, Reihe Innovationen in der Mikrosystemtechnik Band 60, Teltow 1998
- [3] Müller,C., Mohr, J "Miniaturisiertes Spektrometersystem in LIGA-Technik, Wissenschaftliche Berichte Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 5609, Karlsruhe 1995
- [4] Wyzgol, R.; Ernst, G.; Gengenbach, U.; Hoer, D.; "Magazinieren und Zuführen von Mikrooptiken am Beispiel des VIS-LIGA-Mikrospektrometers", veröffentlicht in "Montage von Mikrosystemen" Abschlusspräsentation und Statusseminare zu Verbundprojekten, VDIVDE-IT, Stuttgart 1999
- [5] Roscher, Dietrich; Gestaltung einer Microfeedingzelle unter Berücksichtigung der Besonderheiten eines kleinen mittelständischen Unternehmens" veröffentlicht in "Montage von Mikrosystemen" Abschlusspräsentation und Statusseminare zu Verbundprojekten, VDIVDE-IT, Stuttgart 1999
- [6] Dickerhof, M.; Jakobs, P.; Schmidt, A.; Bulling, F.; "INFOFLOW- ein prozessorientiertes Informationssystem zur Unterstützung inner- und überbetrieblicher Abläufe bei Einzel- und Kleinserienfertigungen", dieser Tagungsband



# ELMINA - Elektronische Mikronasen für Überwachungs- und Regelaufgaben

J. Goschnick

Institut für Instrumentelle Analytik

## Zusammenfassung

Im Strategieprojekt ELMINA der Helmholtzgesellschaft wird am Forschungszentrum Karlsruhe in institutsübergreifender Zusammenarbeit das Ziel verfolgt, Elektronische Nasen (EN) auf mikrosystemtechnischer Basis zu entwickeln, die zu niedrigen Kosten hohe analytische Leistung bei geringem Energieverbrauch und Platzbedarf realisieren. Ausgehend von den EN des Instituts für Instrumentelle Analytik auf Basis von Metalloxid- bzw. SAW-Sensorik soll auf breiter Front durch hybride Integration der Gassensorarrays mit der zugehörigen Elektronik, Kompaktierung der Arraybauweise, Verkleinerung und Umbau der vorhandenen Mikrostruktur, Verbesserung der chemischen Ausrüstung sowie der Aufbau- und Verbindungstechnik eine neue Generation von modularartigen EN-Systemen entstehen, die kostengünstig bestehenden Geräten oder Anlagen sensorische Intelligenz verleihen oder sogar neue intelligente Produkte begründen. Dabei sind ausdrücklich Massenprodukte des Konsumbereichs wie auch industrielle Anlagen im Visier. Die Entwicklung orientiert sich repräsentativ an drei konkreten Anwendungen, einem Luftqualitätsmonitor als Massenprodukt für die Gebäudetechnik, einem Überwachungssystem für die Erdgasförderung und einem EN-gestützen Kontrollsysteem für eine multifunktionelle chemische Produktionsanlage, in denen zusammen mit Industriepartnern projektbegleitend die Anwendbarkeit der Elektronischen Mikronasen erprobt wird. Angesichts der Komplexität der Überwachungsobjekte wird zugleich an einem intelligenten EN-Verbund gearbeitet, der eine multilokale Kontrolle inklusive netzweiter Erfassung und Prognose von Ausbreitungsvorgängen ermöglicht.

## 1. Einleitung

Das Strategieprojekt der Helmholtzgesellschaft mit dem Titel ELMINA (Elektronische Mikronasen) ist der Entwicklung Elektronischer Nasen (EN) als hochintegrierte Mikrosysteme gewidmet, um für private und industrielle Nutzung zu demonstrieren, wie mit Mikrosystemtechnik EN-Systeme hoher analytischer Leistung erzielt werden können, die zu niedrigsten Kosten und mit geringem Energie- wie Platzbedarf vielseitige Aufgaben kontinuierlicher Überwachung oder Regelung übernehmen können.

Ziel sind kompakte Module, deren Integration in Geräten oder Anlagen des Konsumentenbereichs wie auch der Produktion ohne wesentlichen finanziellen, räumlichen oder energetischen Mehraufwand erfolgen kann. Im Konsumenten- wie im Dienstleistungs- oder Produktionsbereich lassen sich damit intelligente Prozesse oder Instrumente erhalten, die autonome Funktionalität und Komfortzuwachs mit nachhaltigem Wirtschaften verbinden.

Entsprechend der Interdisziplinarität der Aufgabe bearbeiten vier Institute des Forschungszentrums das Projekt gemeinschaftlich:

- Institut für Instrumentelle Analytik (IFI)<sup>#</sup>
- Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT)
- Inst. für Angewandte Informatik (IAI)
- Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (HPE)

<sup>#</sup> Federführung

Neben dem beträchtlichem innovativem Potential für Produkte oder Anlagen, die schon jetzt Gasanalytik einsetzen, wird damit eine weite Palette neuartiger gasanalytischer Anwendungen erst erschlossen, die aufgrund eines ungenügenden Preis-Leistungs-Verhältnisses weder mit klassischer Gasanalytik noch mit kommerziellen EN realisierbar sind. Dies gilt insbesondere für Massenprodukte im Verbraucherbereich, bei denen Herstellungskosten unter 100 DM unabdingbare Voraussetzung für die Einsatzbarkeit von Gasanalytik darstellen. Wenngleich für industrielle Anwendungen etwa um eine Größenordnung höhere Kosten für anlagenintegrierte Sensorsysteme als akzeptabel gelten, sind dafür in der Regel aber auch höhere Leistungsansprüche zu befriedigen.

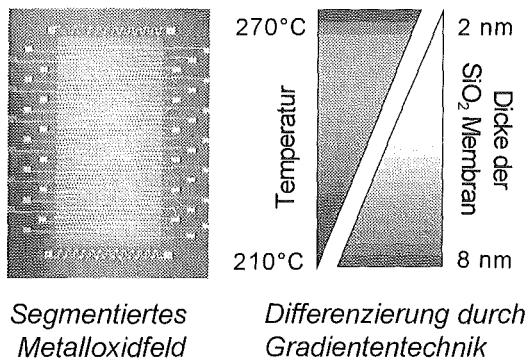


Abb. 1: Sensorherz der Karlsruher Mikronase KAMINA ist das hochintegrierte Gradienten-Mikroarray (links), ein fingernagelgroßer Chip mit durch parallele Elektrodenstreifen unterteiltem Metalloxidfilm auf oberflächenoxidiertem Siliziumsubstrat, dessen derzeit 38 Segmente die Sensorelemente des Mikroarrays bilden. Diese werden durch Gradienten sensorisch differenziert, indem die Betriebstemperatur und die Dicke einer nanometerdicken Membranschicht über dem Metalloxid (übliche Werte sind angegeben) entlang der Längsachse des Metalloxidfilms variiert. Zwei Platinmäander seitlich des Metalloxidfilms dienen der Temperaturmessung, um die Leistung der derzeit rückseitigen vier Heizmäander zu regeln.

Da die Überwachung häufig Objekte mit innerer Struktur gilt, wie es Gebäude oder Produktionsanlagen darstellen, ist eine detaillierte multilokale Überwachung solcher Komplexe durch ein Netz Elektronischer Nasen unabdingbar.

Um die Praktikabilität der Entwicklungsergebnisse unter Beweis zu stellen, werden die Entwicklungsergebnisse von ELMINA beispielhaft in drei Anwendungsbereichen in Zusammenarbeit mit Industriepartnern erprobt: in der Gebäudetechnik und in zwei Produktionsbereichen.

## 2. Basis der Entwicklung

ELMINA wird auf dem am IFIA bereits etablierten, hohen technologischen Niveau für EN in Mikrosystembauweise aufbauen. Mit Gründung des Projekts Mikrosystemtechnik wurde die Arbeit an gasensorischen Systemen aufgenommen, die hohes Gasunterscheidungsvermögen und quantitative Gasbestimmung mit kompakter Bauweise und niedrigen Kosten kombinieren, um die technologische Lücke zwischen einfachen billigen Einzelsensoren ohne Gaserkennung und teuren gascharakterisierenden EN-Laborsystemen zu schließen.



Abb. 2: KAMINA, die Karlsruher MikroNAse. Das Gradienten-Mikroarray und seine komplettete mikroprozessorgesteuerte Betriebselektronik in einem Gerät. Der angehobene Meßkopf enthält den Mikroarraychip, der durch einen Ventilator die Meßluft zugeführt bekommt.

Zwei weitgehend alternative Meßprinzipien wurden für die Entwicklung ausgewählt, die beide vielseitige Anwendbarkeit, hohe Empfindlichkeit bzw. Selektivität der Arrays und Mikrosystemfähigkeit bieten. Einerseits ist das die konduktometrische Gassensorik, die die empfindliche Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Metalloxidhalbleitern von der Atmosphärenzusammensetzung ausnutzt. Damit sind nahezu alle Gase erfaßbar, häufig sogar in sub-ppm-Konzentrationen. Daraus ist das KAMINA-System (Karlsruher MikroNAse) entwickelt worden, das ein fingernagelgroßes Mikrosensorarray (s. Abb. 1) einsetzt.

Dessen neuartige patentierte Technologie beruht auf besonders kostengünstiger einfacher Segmentierung eines Metalloxidfelds zur Ausbildung der Sensorelemente des Arrays, die durch Gradiententechnik differenziert werden, sodaß unterschiedlich reagierende Sensorelemente entstehen. Diese ergeben gascharakteristische Leitfähigkeitsmuster, die Art und Menge von einzelnen Gasen oder Gaskollektiven (wie Gerüchen) empfindlich zu bestimmen erlaubt. Vier Heizelemente auf der Chiprückseite sorgen für eine Betriebstemperatur üblicherweise um 300°C und einen Temperaturgradienten. Die hohe Temperaturresistenz erlaubt sogar den Betrieb bis etwa 600°C, weswegen auch Abgasanwendungen möglich sind. Das derzeitige KAMINA-Instrument in Größe eines Mobiltelefons enthält neben dem Mikroarraychip, die komplette Betriebselektronik und einen aktiven Lufttransport zur Probenahme (s. Abb. 2).

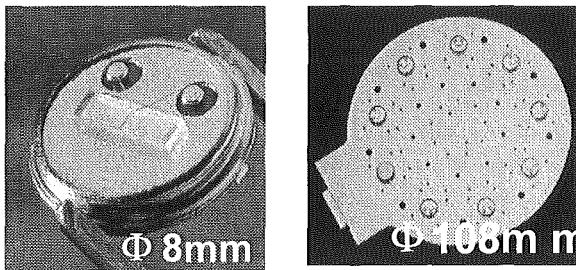


Abb. 3: Derzeitiges SAW-Sensorelement (links) bei dem ein einzelner SAW-Resonator auf einem Quarzkristall (3x1.5mm) in ein Standard-Gehäuse für elektronische Bauelemente eingeklebt ist. Die Grundfrequenz von 434MHz wird durch Adsorption von Gasen auf der Polymerbeschicht des Resonators verändert. Das radiale SAW-Array (rechts) nutzt 8 mit unterschiedlichen Polymeren beschichtete SAW-Sensoren, die ein für Gase charakteristisches Muster von Frequenzverschiebungen ergeben, aus dem Gasart und -quantität bestimmt werden kann.

Andererseits ist ein Gassensorarray entwickelt worden, das mit Sensoren nahe Raumtemperatur (also ohne wesentlichen Heizaufwand) arbeitet, die den Einfluß adsorbierender Gase auf die Ausbreitung akustischer Oberflächenwellen (Surface Acoustic Wave= SAW) auf Polymeroberflächen ausnutzen(s. Abb. 3). Die mit einer Grundfrequenz von 434MHz betriebenen SAW-Sensoren werden mit unterschiedlichen Polymeren (Polysiloxanen, Polyethern oder Polyisobutylene) beschichtet, wodurch Gasexpositionen des Arrays unterschiedliche Frequenzverschiebungen an den Sensorelementen auslösen, die von der Gasart und -quantität abhängen. Hiermit sind vor allem Gase mit mittlerer und höherer Molmasse in ppm-Mengen detektierbar und mit hoher Selektivität quantifizierbar.

Daraus ist das SAGAS-System (SAW-Aroma- und -GasAnalyseSystem, s. Abb. 4 ) entstanden, das sich vor allem für eine zuverlässige Quantifizierung organischer Gase oder Gaskollektive (Gerüche) einsetzen lässt. Dank der hohen Selektivität ist selbst bei großer Variabilität von Nebenkomponenten die Bestimmung einer Gemischkomponenten oberhalb von 10ppm in vielen Fällen problemlos durchführbar.

Die am IFIA bestehende Kleinserienfertigung der für die Massenanwendung konzipierten Gradienten-Mikroarrays bietet eine ausgezeichnete Plattform für dieses System, neue Strukturen und Materialien versuchsweise herzustellen. Hochfrequenzputterverfahren mit Schattenmaskentechnik und chemische Gasphasenabscheidung mit Ionenstrahlunterstützung bilden das Rückgrat dieser Fertigung, die nanometer-

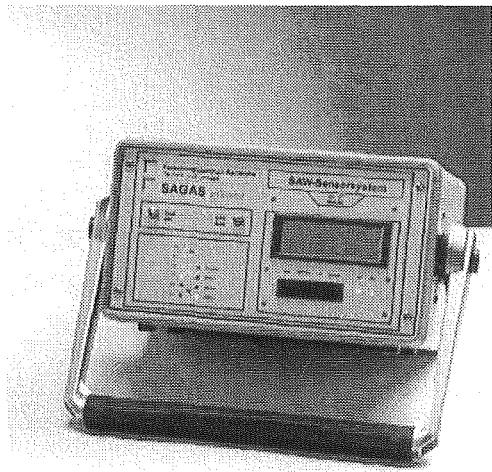


Abb. 4: Aktuelles SAGAS-Gerät SAGAS  $\mu$ Control. Mikroprozessorgesteuertes Betriebsgerät mit integriertem SAW-Array und aktiver Probenahme, das die komplette Musteranalyse (qualitativ und quantitativ) im Gerät selbst vornimmt und auf einem Display zur Anzeige bringt.

dicke Multischichten mit lateraler Mikrostruktur von etwa 10 $\mu$ m Auflösung erzeugen kann. Die routinemäßige Fertigung von Polymerüberzügen von Transducerstrukturen für oberflächenakustische Gassensorarrays und deren Aufbau zu SAW-Arrays bildet eine gute Basis für deren Weiterentwicklung. Ein umfangreiches Arsenal von Untersuchungsmethoden steht zur Verfügung, um die Entwicklungsergebnisse strukturell und chemisch eingehend zu prüfen, wie Profilometrie, Optische- und Elektronenmikroskopie, Ellipsometrie und Oberflächen- und Schichtanalytik, wie Photoelektronenspektrometrie und die Tiefenprofilanalyse mit Sekundärmassenspektrometrie.

### 3. Konkrete Ziele

ELMINA hat sich die Entwicklung von EN als kompakte Mikrosensorsysteme mit integrierter Elektronik für zwei fundamentale Anwendungsklassen mit kontinuierlicher Ergebnisausgabe vorgenommen. Eine EN für den Einsatz als (oder integriert im) Massenprodukt sowie die EN als Einbaumodul für den industriellen Einsatz. Für beide Anwendungsklassen werden aktive Demonstratoren entwickelt, deren Leistungsfähigkeit in drei repräsentativen Anwendungsfeldern unter Beweis gestellt wird. Um auch den multilokalen Einsatz der Sensorsysteme demonstrieren zu können, wird ein intelligentes Sensornetzsystem für die Auswertung eines Verbunds Elektronischer Nasen entwickelt. Dementsprechend sind konkret vorgesehen:

### **3.1 KOKAMINA= KOmpakte KArlsruher MikroNAsE**

Ein Mikrosystem auf Basis der KAMINA vornehmlich für Massenanwendungen zur semiquantitativen Multikomponentenanalyse von Gasen oder Gaskollektiven (wie Gerüchen) in Atmosphäre, das erheblich unter 1W Betriebsenergie verbraucht und bei Massenproduktion einen Herstellungspreis von deutlich unter 100 DM erwarten läßt.

### **3.2 SAMONA= SAW-MetallOxid-Nase**

Eine EN als industrielles Meßgerät für hochwertige Gasanalyse zur Produktionsüberwachung oder Qualitätskontrolle. Hierfür wird ein kompaktes SAW-Mikroarray (SAWMA) mit integrierter Elektronik entwickelt und eine instrumentelle Plattform geschaffen, die auch eine Kombination mit der KOKAMINA erlaubt, um nötigenfalls die analytischen Fähigkeiten der beiden Meßtechniken zu vereinen und so hohe Empfindlichkeit (auch für niedermolekulare Gase) mit großer Selektivität und hochwertiger Quantifizierbarkeit auch im komplexen Gemisch zu verbinden. Diese Entwicklung orientiert sich an einem Herstellungspreis von etwa 1000 DM.

### **3.3 Intelligentes Netzsystem für EN**

Datensystem zur Überwachung und Auswertung eines Netzes von ENs, das dem Nutzer nicht nur jederzeit gestattet, die Summe der Datenausgaben aller Elektronischen Nasen im Netz übermittelt zu bekommen, sondern ihm darüberhinaus aus den vielen lokalen gasanalytischen Statusmeldungen netzweite räumliche Verteilungen und Ausbreitungsentwicklungen mitteilt, sodaß sogar die Ortung von Schadstoff- und Geruchsquellen sowie Prognosen für Ausbreitungsvorgänge im Überwachungskomplex möglich wird.

Dabei wird sich die Entwicklung bewußt nicht nur an der erwünschten Funktionalität sondern auch an den Kostenerfordernissen orientieren, die beide von entscheidender Bedeutung für die Einsatzchancen der ins Auge gefaßten Systeme angesehen werden. Darüberhinaus werden ein anwen-

dungsgerechter Platzbedarf, hohe Zuverlässigkeit und auch die Handhabbarkeit für das vorgesehene Bedienungspersonal zu berücksichtigen sein.

## **4. Drei exemplarische Anwendungen**

ELMINA orientiert sich exemplarisch an drei Anwendungsgebieten, zu denen Industriepartner die Entwicklung begleiten und an praktischen Erprobungen teilnehmen. So wird KOKAMINA zu einem massenmarktfähigen Modul mit geeigneter Empfindlichkeit und Selektivität ausgebaut, um als Luftqualitätsmonitor mit Brandmelde-eigenschaften für die Gebäudetechnik eingesetzt zu werden. Ferner wird die SAW-Meßtechnik zu einem kompakten Modul weiterentwickelt, um einzeln oder in Kombination mit KAMINA zur multilokalen Überwachung an Erdgasbohrstellen bzw. bei der Herstellung chemischer Produkte in komplexen Produktionsanlagen als chemischer Statusgeber eingesetzt zu werden. In allen drei Fällen werden anwendungsangepaßte Probenahmetechniken entwickelt und eine multivariate Datenauswertung für die Elektronischen Nasen für den jeweiligen Einsatz konfektioniert, die sowohl in stationären wie auch transienten Situationen Erkennung und Quantifizierung von Gaskollektiven oder Einzelgasen in der Meßluft ermöglicht, um lokale Warnmeldungen oder Schaltsignale auszugeben.

## **5. Derzeitiger Entwicklungsstand**

Die Arbeiten zu ELMINA sind Ende 1999 aufgenommen worden. Da das Projekt Entwicklungsarbeiten in allen Funktionselementen einer Elektronischen Nase erfordert, so in der Probenahmetechnik, wie natürlich bei den gassensorischen Mikroarrays als auch in der Aufbau- und Verbindungstechnik, der Mikroelektronik und der Software für den Betrieb der Elektronik und der Datenauswertung des einzelnen Meßsystems sowie die Software zur Verwaltung und Auswertung des Sensornetzes. Dementsprechend werden verschiedenste wissenschaftlich-technische Disziplinen für ELMINA gebraucht, was sich in einer hochgradig vernetzten Kooperation der Partnerinstitute widerspiegelt (s. Abb. 5).

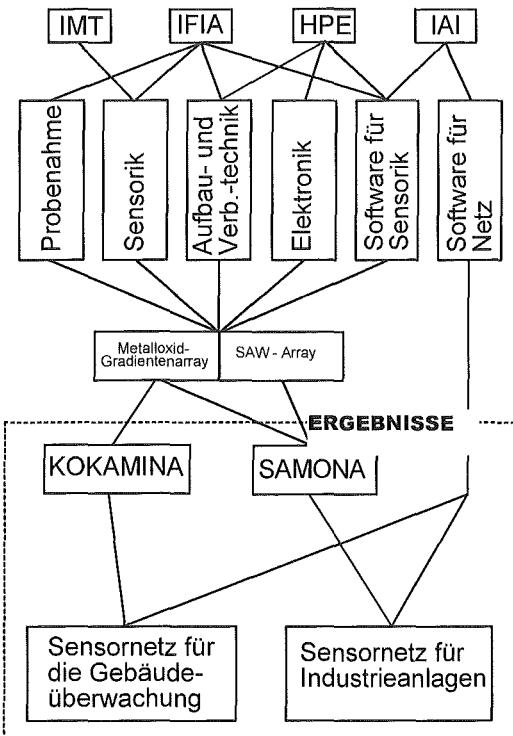


Abb. 5: Disziplinen der Entwicklung und Arbeitsaufteilung.

Das am IFIA entwickelte Metallocid-Gradienten-Mikroarray (MOGMA) lässt massenmarktfähige Preise bei Herstellung entsprechend großer Stückzahlen erwarten. Allerdings ist das derzeitige KAMINA-System mit rückseitiger Heizstruktur auf Siliziumsubstraten und beidseitiger Kontaktierung sowie separater Betriebselektronik von Massenproduktfordernissen dazu noch nicht geeignet. Deshalb wird eine Kompakt-KAMINA (KOKAMINA) als halbscheckkartengroßes Steckmodul für Massenanwendungen entwickelt, das aus einem einseitigen Mikroarray auf verkleinerter Fläche sowie einer erheblich komprimierten Mikroelektronik für Datenakquisition und -auswertung auf einem gemeinsamen Träger besteht. Ein neuer einseitiger Aufbau auf unterhöhltem Aluminiumoxid als Substrat wird zunächst den Energieverbrauch deutlich senken und auch den Aufwand für die Aufbau- und Verbindungstechnik entscheidend verbilligen. Ein erster Prototyp eines einseitigen Chips aus Aluminiumoxid als Substrat samt neuem Träger ist in Abb. 6 dargestellt.

Um für aussagekräftige Luftqualitätsbestimmungen einen stabilen Nachweis niedrigster Konzentrationen im ppb-Bereich wie auch des CO<sub>2</sub>- und Feuchtegehalts zu erreichen wird die chemische Ausrüstung des MOGMA-Systems durch Dotierungen der für die Gasdetektion verwendeten

Grundmaterialien, SnO<sub>2</sub> und WO<sub>3</sub>, weiterentwickelt. Um das Gasunterscheidungsvermögen erheblich zu verstärken wird die Gradiententechnik zur Differenzierung der Sensorsegmente weiter ausgebaut, indem Form und Steigung der nm-dicken keilförmigen Membranschichten aus Silizium- und erstmalig auch aus Aluminiumoxid wie auch der Temperaturgradient über dem Sensorarray optimiert werden. Dabei unterstützt die Verwendung von Aluminiumoxid als Substrat die Gradientendifferenzierung der Sensorelemente, weil wegen der schlechteren Wärmeleitung im Vergleich zum Silizium größere Temperaturdifferenzen über das Mikroarray ermöglicht werden. Auf dem gleichen Träger wie der MOGMA-Chip wird eine mikroprozessorgesteuerte Elektronik mit einem neuen Meßprinzip und erheblich verkleinerten Dimensionen untergebracht, die Module für Messung und Speicherung der Daten sowie die Regelung der integrierten MOGMA-Heizung und die Kommunikation enthält.

Darüberhinaus wird eine kostengünstige kontinuierliche Probenahme ausgearbeitet, die ein Höchstmaß an Passivität gegenüber den Messgasen aufweist und den überwachten Bereich repräsentativ erfasst. Schließlich wird eine multivariate Datenverarbeitung ausgearbeitet, die eine effiziente Auswertung und Interpretation der MOGMA-Signale erlaubt und auch die Dynamik der Gaskompositionsentwicklung einzubeziehen versteht.

Für die hochwertige Gasanalyse in der Produktionsüberwachung soll ein kostengünstiges EN-System geschaffen werden, das wahlweise mit einem oder beiden im Zuge von ELMINA entwickelten Mikroarrays ausgestattet werden kann: einer neuen hochintegrierten Version eines Mikroarrays aus oberflächenakustischen Gassensoren (SAWMA=Surface-Acoustic-Wave-Mikroarray) und/oder dem neuen MOGMA-System. Mit dem SAMONA-System wird eine Elektronische Nase mit höchster analytischer Leistung erreicht, die die hohe Empfindlichkeit des MOGMA-Prinzips (insbesondere für die mit SAW kaum meßbaren niedermolekularen Gase) mit der außerordentlichen Selektivität und der hohen Genauigkeit zur Gasquantifizierung des SAWMA-Prinzips vereint.

Entsprechend den MOGMA-Entwicklungen wird auch das SAWMA erheblich verkleinert, indem die SAW-Sensorelemente nicht mehr einzeln gehäust, sondern direkt nebeneinander im Abstand weniger mm auf einem Träger montiert werden. Dazu wird eine präzise automatische Fügetechnik entwickelt. Eine neue HF-Betriebselektronik wird dank Multiplexansteuerung der

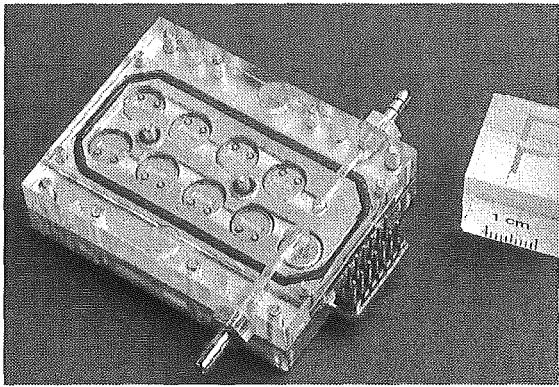


Abb. 7: Erste Vorstufe zu einem neuen, weiter miniaturisierten SAW-Sensorarray auf der Basis eines neuen Multiplexverfahrens. Gezeigt ist ein Demonstrationsgehäuse aus Plexiglas. Der Sensorkopf trägt die gesamte HF-Elektronik auf der Rückseite und besitzt bereits deutlich verringerte Abmessungen von  $60 \times 46 \times 17 \text{ mm}^3$  gegenüber dem radial aufgebauten Standardarray von 108mm Durchmesser. Im Rahmen von ELMINA wird diese Anordnung separater Sensorelementen durch ein monolithisches Sensorarray ersetzt, das zur Steigerung der analytischen Leistung mit Sensorelementen ausgerüstet ist, die neuartige Polymerdoppelschichten tragen.

SAW-Elemente auf der Unterseite des Arrays untergebracht werden. Ein erster Prototyp dieser Aufbauweise ist bereits erfolgreich erprobt worden (s. Abb. 7). Um Empfindlichkeit und vor allem die Selektivität der SAW-Elemente zu steigern, wie es sowohl die Erdgasanwendung als auch die Überwachung der chemischen Produktion erfordern, wird ein neuartiges Doppelfilm-System für die gasempfindliche Polymerschicht entwickelt, dessen Außenschicht für die Gasrezeption sorgt, während die Zwischenschicht Haftvermittlung zur Außenschicht, Korrosionsschutz und empfindlichkeitsverstärkende Eigenschaften bietet. Mit dem erstmaligen Einsatz lateral aufgelöster Polymerabscheidung durch einen richtbaren Mikrotröpfchenstrahl wird die Kompaktierung des Arrays erst möglich, indem die einzelnen Sensorelemente im mm-Abstand separat beschichtet werden können. Zusätzlich wird eine neuartige Phasencantentechnik dazu entwickelt, die gassensitiven Schichten unmittelbar nach Deposition detailliert auf ihre Brauchbarkeit untersuchen zu können.

Auch für das SAW-Sensorarray wie das Kombisystem wird flankierend eine geeignete Probenahme und eine zusätzliche Datenverarbeitung entwickelt, die die Daten der beiden gassensorischen Prinzipien für eine integrale Auswertung angleicht.

Um die Gesamtheit der Informationen von vielen EN-Systemen in einem für multilokale Überwachung geeigneten Netz auszuwerten, wird schließen-

lich ein übergreifendes intelligentes Zuverlässigkeitstestsystem auf der Basis der INSPECT-Software vom IAI geschaffen (s. Abb. 8). Dessen Funktion besteht zunächst in der einfachen Anzeige und Archivierung der Daten aller einzelnen Sensorsysteme sowie der Hauptaugenmerk der Entwicklung wird aber der kollektiven Auswertung der Informationen der einzelnen Sensorsysteme gewidmet werden, indem die Raum/Zeit-Verteilung analysiert wird, um daraus Meldungen wie auch Prognosen für den Status und die Dynamik von Ausbreitungsvorgängen im gesamten Überwachungsbereich zu machen. Dies wird eine vorausschauende Eingriffableitung für die Regelfunktionen im Überwachungskomplex ermöglichen, sei es in der gebäudetechnischen Anwendung mit einer Vielzahl von Luftqualitätsmonitoren wie auch bei der detaillierten Überwachung eines Produktionskomplexes erprobt werden. Die Implementierung dieser intelligenten Funktionen ist im Gange.

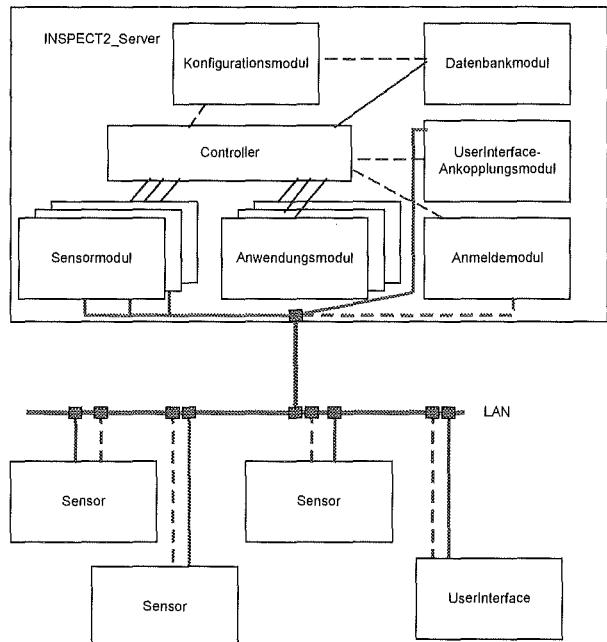


Abb. 8: Architektur des INSPECT-Systems zur Verwaltung und Auswertung eines Sensornetzes

## 6. Perspektive

Ähnlich wie das durch Verkleinerung und Mikrostrukturierung kontinuierlich verbesserte Preis/Leistungs-Verhältnis die Verbreitung der Mikroelektronik vervielfachte, wird die Anwendbarkeit elektronischer Nasen beträchtlich wachsen, wenn durch Mikrosystembauweise bei Preis, Analyseleistung und Zuverlässigkeit erhebliche Fortschritte erzielt werden. Bereits die absehbare An-

wendungspalette ist enorm und umfaßt diverse Anwendungen im Konsumbereich, so in der Automobil-, Küchen- und Gebäudetechnik, wie auch im Produktionsbereich zur Überwachung der Hauptstoffströme, zur Arbeitsplatzüberwachung, zur Sicherstellung von Umweltverträglichkeit oder zur Qualitätsendkontrolle, um nur einige zu nennen.

Ein hoher Anteil der Entwicklungsergebnisse von ELMINA ist von allgemeiner Bedeutung, sodaß eine weitgehende Übertragbarkeit auf andere Anwendungen gegeben ist. Da das Forschungszentrum Karlsruhe bereits vielfältige Kooperationen mit der Industrie für den Einsatz Elektronischer Nasen in den Anwendungsfeldern

- Automobiltechnik (Abgas & Klima)
- Filtertechnik
- Medizintechnik

- Überwachung von Großbränden
- Entsorgungstechnik
- Lebensmitteltechnik
- Sicherheitstechnik bei Tankanlagen

besitzt, wird ein Transfer neuer Erkenntnisse, Verfahren und Instrumente aus ELMINA umgehend auch in diese Anwendungsgebiete erfolgen können.

ELMINA wird so das immense Potential demonstrieren, wie mit Elektronischen Nasen intelligente Prozesse und Produkte gestaltet werden können, die selbstregelnd Energie und Material sparen, inhärenten Umweltschutz ermöglichen, die Sicherheit in Gebäuden sowie von Industrieanlagen erhöhen und nichtzuletzt durch autonome Prozeßlenkung zu Kosten- und Zeitersparnis verhelfen.



# Entwicklung und Fertigung mikrofluidischer Komponenten für analytische Anwendungen in den *Life Sciences*

Matthias Kautt<sup>1)</sup>, Werner Schomburg<sup>2)</sup>, Mathias Heckele<sup>2)</sup>, Werner Hoffmann<sup>3)</sup>, Johannes Reichert<sup>3)</sup>,  
David Moss<sup>3)</sup>, Thomas Schaller<sup>4)</sup>, Wilhelm Pfleging<sup>5)</sup>, Thomas Hanemann<sup>6)</sup>, Eric Gottwald<sup>7)</sup>

<sup>1)</sup> Programm Mikrosystemtechnik, Programmleitung

<sup>2)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik

<sup>3)</sup> Institut für Instrumentelle Analytik

<sup>4)</sup> Hauptabteilung Versuchstechnik

<sup>5)</sup> Institut für Materialforschung I

<sup>6)</sup> Institut für Materialforschung III

<sup>7)</sup> Institut für Medizintechnik und Biophysik

## Zusammenfassung

Die Mikrosystemtechnik gewinnt für Anwendungen in den Biowissenschaften zunehmend an Bedeutung. Es werden im Programm Mikrosystemtechnik (PMT) des Forschungszentrums Karlsruhe entwickelte Beispiele mikrofluidischer Komponenten für biologische und analytische Zwecke vorgestellt. Neben der Entwicklung miniaturisierter Analysentechniken und neuer methodischer Ansätze stellt insbesondere die Entwicklung von geeigneten Fertigungstechniken für eine kostengünstige Herstellung großer Stückzahlen einen der Schwerpunkte der Arbeiten des PMT dar. Die im PMT entwickelten mikrofluidischen Komponenten für die Bio-Analytik sind aus Kunststoff aufgebaut. Beispiele für mikrofluidische Komponenten sind eine in Kooperation mit der BASF entwickelte IR-Messzelle für den Einsatz im Pharmascreening, ein Zellcontainersystem für die dreidimensionale Kultivierung verschiedener Zellarten, das mit einem Industriepartner für Wirkungstests von Pharmazeutika und Kosmetika eingesetzt wird, und ein miniaturisierter Kapillarelektrophorese-Chip, anhand dessen die Leistungsfähigkeit eines Verfahrens zur schnellen Herstellung von Testmustern demonstriert wurde. Weiterhin wird ein Prozessablauf beschrieben, der eine wirtschaftliche Fertigung mikrofluidischer Analysensysteme aus Polymeren erlaubt.

## 1. Einleitung

Mit der Mikrosystemtechnik verbanden sich in der Vergangenheit im wesentlichen Entwicklungen für abiotische Anwendungen, wie etwa im Automobilbereich, der Telekommunikation oder zur Datenverarbeitung. In zunehmendem Maße erschließt der Einsatz miniaturisierter Komponenten aber auch in den verschiedenen Disziplinen der Biowissenschaften neue Möglichkeiten. Dabei zeigen sowohl die seit Mitte der neunziger Jahre stattfindenden Konferenzen als auch aktuelle Veröffentlichungen insbesondere im analytischen Bereich eine Reihe mikrotechnischer Innovationen, die zum Teil auch schon kommerziell umgesetzt werden [1]. Beispiele solcher Entwicklungen sind die Konzepte des „Lab on a Chip“ oder von miniaturisierten Totalanalysesystemen ( $\mu$ TAS) sowie von DNA- oder Oligonukleotid-Chips [2, 3].

Der Einsatz von miniaturisierten Komponenten in den Biowissenschaften erfolgte bislang im Wesentlichen in folgenden Bereichen:

- Medizinische Diagnostik

- Molekularbiologische Anwendungen: z. B. Polymerase-Kettenreaktion oder N-terminaler Abbau von Proteinen zur Sequenzanalyse
- Synthese und Identifizierung von neuen pharmazeutischen Wirkstoffen
- Genexpressionsanalyse (Genomics)

Dabei ist das Anforderungsprofil biowissenschaftlicher und biotechnischer Anwendungen an die Mikrosystemtechnik entsprechend den unterschiedlichen Einsatzgebieten sehr heterogen und unterscheidet sich häufig grundlegend von den Anforderungen, die durch abiotische Anwendungen definiert sind. Die Unterschiede betreffen sowohl typische Größen von Strukturdetails, die in mikrofluidischen Anwendungen im Bereich einiger zehn Mikrometer liegen, als auch ein gegenüber abiotischen Anwendungen häufig verwendete Silizium oder Glas um verschiedene Kunststoffe erweitertes Materialspektrum. Typische Anforderungen sind:

- Materialien sollen in einer Vielzahl verschiedener Anwendungen einsetzbar sein
- Optische Transparenz in bestimmten Spektralbereichen und Lichtleitfähigkeit

- Biokompatibilität
- Mechanische Robustheit, chemische Inertheit, Sterilisierbarkeit

Am Forschungszentrum Karlsruhe werden seit einiger Zeit mikrofluidische Komponenten für den Einsatz in den Biowissenschaften und die zu ihrer Herstellung erforderlichen Verfahren entwickelt. Die Wahl von Kunststoff als Substratmaterial ermöglicht dabei insbesondere eine in großen Stückzahlen kostengünstige Fertigung von Mikrokomponenten. Ziel der Arbeiten ist es neben der Entwicklung neuer mikrofluidischer Komponenten mit hoher Funktionalität, angepasste Fertigungstechnologien zu entwickeln. Wie sich gezeigt hat, kommt der Fertigungstechnik bei der industriellen Nutzung mikrotechnischer Entwicklungen eine entscheidende Rolle zu, die jedoch in der Vergangenheit grob unterschätzt wurden [4].

Das Programm Mikrosystemtechnik verfügt mittlerweile über eigens entwickelte Fertigungsverfahren, mit denen der zu erwartende steigende Bedarf [5] an kostengünstigen mikrofluidischen Bauteilen aus Kunststoffen gedeckt werden kann. Diese Fertigungsverfahren stehen insbesondere industriellen Interessenten im Rahmen von Kooperationen und Aufträgen zu Verfügung.

Die wirtschaftliche Fertigung von mikrofluidischen Komponenten am Forschungszentrum Karlsruhe beruht dabei auf dem Einsatz der Mikroabformung. Mit dieser können kostengünstige Einwegkomponenten hergestellt werden, was in einer Vielzahl bioanalytischer Anwendungsfälle hinsichtlich hygienischer Aspekte oder hinsichtlich der Vermeidung einer Verschleppung von Kontaminationen vorteilhaft ist.

## 2. Vorteile der Miniaturisierung

Die Miniaturisierung von analytischen Methoden in den Biowissenschaften verspricht eine Reihe von Vorteilen, wie

- Erhöhung der Qualität der Analysenergebnisse,
- Parallelisierung von funktionalen Komponenten,
- Systemintegration
- Verringerung der Analysenzeiten,
- Verringerung des Bedarfs an Probe und Reagenzien,
- Verringerung des anfallenden Abfalls,
- Verminderung anfallender Kosten,
- Portabilität miniaturisierter Systeme.

Eine Priorisierung der möglichen Vorteile gegeneinander ist abhängig vom betrachteten Anwendungsfall und somit nicht allgemein möglich. Hinsichtlich des insbesondere in der pharmazeutischen Industrie erwünschten hohen Durchsatzes an Einzelproben ist die Parallelisierbarkeit von

funktionalen Komponenten in mikrofluidischen Analyseneinheiten ein entscheidender und auch zeitlicher Faktor. Bei chromatographischen Trennungen ist die bei Kombination miniaturisierter Kanalgeometrien mit elektrokinetischen Effekten erreichbare erhöhte Trennleistung durch eine Verringerung charakteristischer Dimensionen und damit ermöglichte Steigerung der Qualität des Analysenergebnisses erwünscht [6]. Die Qualität des Analysenergebnisses ist allerdings auch von der Empfindlichkeit der eingesetzten Detektionsverfahren abhängig.

### 2.1 Der Einsatz von Kunststoffen für den Aufbau mikrofluidischer Komponenten für die Bio-Analytik

Aus der Wahl von verschiedenen Kunststoffen als Substratmaterial zum Aufbau von mikrofluidischen Analysenkomponenten lassen sich für den jeweiligen Einsatzbereich individuell angepasste Mikrokomponenten herstellen. Für Kunststoffe ergeben sich in Abhängigkeit des Einsatzbereichs der daraus gefertigten mikrofluidischen Komponenten vor allem die folgenden Vorteile für die Bioanalytik:

- Kunststoff ermöglicht die Wahl eines biokompatiblen Polymers, wie z. B. PEEK oder PC<sup>1</sup>.
- Die Materialvielfalt abformbarer Kunststoffe ermöglicht die Anpassung der Funktionalität gefertigter Komponenten, wie etwa bei gewünschter spektraler Transparenz in bestimmten Spektralbereichen.
- Kunststoffe sind im Vergleich zu spröderen Werkstoffen tolerant gegenüber mechanischer Belastung.
- Die Oberflächen von Kunststoffen sind prinzipiell vielfältig modifizierbar, was eine zusätzliche Funktionalisierung erlaubt.
- Viele Kunststoffe sind direkt mikromechanisch strukturierbar, was insbesondere bei der Entwicklung neuer Komponenten von Vorteil ist, da relativ einfach erste Testmuster gefertigt werden können (siehe auch Abschnitt 3.1).
- Eine wirtschaftliche Massenfertigung mikrofluidischer Komponenten scheint nur in Kunststoff realisierbar zu sein. Abschätzungen zeigen, dass die Verwendung von Kunststoff eine bis zu hundert mal kostengünstigere Herstellung erlaubt als diejenige von Glas oder Silizium [7].

Am Forschungszentrum Karlsruhe wurden bereits die folgenden Kunststoffe abgeformt: Neben den Hochleistungskunststoffen PSU, PEEK und LCP sind das PMMA, PC, POM, PA, PE, PP, PS und

---

<sup>1</sup> Polyethyletherketon (PEEK); Polycarbonat (PC)

PVDF<sup>2</sup>. Darüber hinaus kommen im Prinzip alle thermoplastischen Polymere für die Mikroabformung in Frage.

### 3. Fertigungstechnik für mikrofluidische Analysensysteme

Am Forschungszentrum Karlsruhe werden Fertigungstechnologien entwickelt, die eine kostengünstige Herstellung mikrofluidischer Komponenten aus Kunststoffen erlauben. Nachfolgend wird eine typische Fertigungskette vorgestellt.

Die Randbedingungen, welchen sich die Fertigungstechnologien stellen müssen, ergeben sich sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus funktionalen Gesichtspunkten. Während die Rolle von Kunststoff zur Herstellung kostengünstiger mikrofluidischer Komponenten in großen Stückzahlen bereits angesprochen wurde, stellt insbesondere die zunehmende Systemintegration in miniaturisierten Analysensystemen höchste und bis heute nicht gelöste Ansprüche an die Fertigungstechnologien. Beispielhaft kann hierfür die mit einer Parallelisierung von funktionalen Einheiten auf planaren Substraten verbundene Zunahme des Formats angeführt werden. Diese „Vergrößerung“ von eigentlich miniaturisierten Systemen birgt aufgrund der weiterhin im Mikrometerbereich liegenden Strukturdetails eine nicht zu unterschätzende Gefahr von Fehlern bei der Abformung oder der Verbindung strukturierter Komponenten. Weiterhin stellt die Integration metallischer Strukturen, wie etwa zur Detektion, auf einem Kunststoffsubstrat erhöhte Anforderungen an die Fertigungstechnologie.

#### 3.1 Wirtschaftliche Fertigung mikrofluidischer Komponenten aus Kunststoff in größeren Stückzahlen

Die im Programm Mikrosystemtechnik entwickelte Fertigungskette zur Herstellung von kostengünstiger Kunststoffkomponenten für mikrofluidische Anwendungen ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Grundlage der Fertigung ist die Mikroabformung. Mikroheißprägen und Mikrospritzguss haben sich in den letzten Jahren als bewährte Techniken etabliert. Die in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum entwickelten Prägemaschinen können kommerziell erworben werden und der Mikrospritzguss wird z. B. von STEAG microParts in großem industriellen Maßstab eingesetzt.

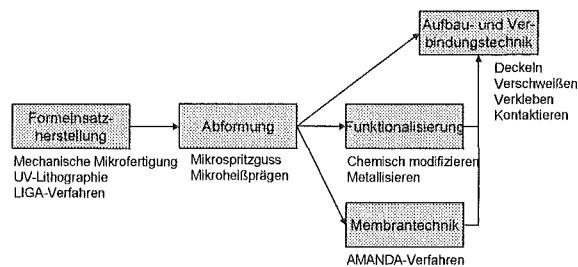


Abb. 1: Schema zur Serienfertigung mikrofluidischer Kunststoffkomponenten

**Formeinsatzherstellung:** Die Herstellung metallischer Formeinsätze erfolgt im Programm Mikrosystemtechnik im wesentlichen durch die direkte Strukturierung metallischer Substrate mittels mechanischer Mikrofertigung (Hochpräzisionsfräsen, -drehen und -bohren) oder je nach Anforderungen durch UV-Lithographie oder mit dem LIGA-Verfahren [8].

Werkstoff	Strukturabmessungen	Minimale Nutbreite	Aspektverhältnis	Werkstück
Nichteisenmetalle und -legierungen (Cu, Al, Messing, AlMg3)	Einige 10 bis einige 100 µm	50 µm	bis 10	typisch: 66 mm x 26 mm; max. ca. 100 cm <sup>2</sup>
Stahl 1.2709 (härbar bis > 55 HRC)	Einige 10 bis einige 100 µm	80 µm	bis 3	typisch: 66 mm x 26 mm; max. ca. 100 cm <sup>2</sup>

Tab. 1: Überblick über Leistungsdaten der Mechanischen Mikrofertigung

Bei der im PMT für mikrofluidische Anwendungen üblicherweise eingesetzten mechanischen Mikrofertigung werden insbesondere Diamantfräser oder eigens hergestellte Hartmetallfräser [9] mit Durchmessern bis minimal 200 µm (Diamant) oder 50 µm (Hartmetall) verwendet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über typische Daten.

Die Fräser erlauben auch in Mikrodimensionen die aus der „klassischen“ Feinwerktechnik bekannte vielseitige Bearbeitung von Oberflächen. Nur begrenzt durch die Fräserabmessungen, sind Strukturen wie Nuten, Stege und Taschen mit senkrechten, geneigten oder gestuften Wänden realisierbar. Die Bearbeitung von Formeinsätzen aus Nichteisenwerkstoffen mit Diamantwerkzeugen hat sich bereits vielfach für Abformungen bewährt [10], allerdings werden in jüngster Zeit immer häufiger Formeinsätze aus widerstandsfähigeren Werkstoffen nachgefragt. Dem genügen die neuerdings im Forschungszentrum verfügbaren Formeinsätze aus gehärtetem Stahl, die durch Elektropolieren entgratet und in ihrer Oberflächengüte verbessert werden können [11].

**Abformung:** Die Abformung der mikrostrukturierten Formeinsätze kann im Forschungszentrum

<sup>2</sup> Polysulfon (PSU), Liquid Crystal Polymer (LCP), Polymethylmethacrylat (PMMA), Polyoxymethylen (POM), Polyamid (PA), Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS), und Polyvinylidenfluorid (PVDF)

entweder mittels Heißprägen oder Spritzgießen durchgeführt werden. Beim Vakuumheißprägen wird ein mikrostrukturiertes Werkzeug (Formeinsatz) in einer evakuierten Kammer mit hoher Kraft in eine thermoplastische Kunststofffolie hineingedrückt, die über die Erweichungstemperatur erhitzt ist. Anschließend wird der Aufbau abgekühlt und der Formeinsatz aus dem Kunststoff gezogen. Durch die vertikale Strukturierungsrichtung und die Möglichkeit sehr geringer Umformgeschwindigkeiten eignet sich der Heißprägeprozess zur Herstellung von besonders anspruchsvollen Mikrostrukturen [12].

Beim Spritzgießen für Mikrobauteile wird der sogenannte Variothermprozess gefahren, der sich von der konventionellen Technik dadurch unterscheidet, dass die heiße Kunststoffschmelze in ein beheiztes Abformwerkzeug unter hohem Druck und großer Geschwindigkeit eingespritzt wird. Das Werkzeug wird abgekühlt bis die Schmelze erstarrt ist, danach wird das Bauteil entnommen. Der Spritzgießprozess ist auch in kleinen Dimensionen ein schnelles Fertigungsverfahren, das für große Stückzahlen hervorragend geeignet ist. Im PMT wurden Zykluszeiten bis zu 70 s realisiert. Ein Beispiel für ein spritzgegossenes mikrofluidisches Teil ist das in Abschnitt 4.1. beschrieben Mikrozellcontainersystem aus Polycarbonat.

**Aufbau- und Verbindungstechnik:** Damit die für mikrofluidische Anwendungen notwendigen Hohlräume entstehen, müssen die abgeformten Teile miteinander oder mit einem Deckel versehen werden. An die dazu nötige Verbindung werden hohe Anforderungen gestellt, denn in der Regel ist schon eine einzige undichte Stelle an einer Komponente nicht tolerierbar. Außerdem darf der Querschnitt einer mikrofluidischen Struktur meistens nicht durch das Verbindungsverfahren verändert werden. Polymere können verklebt, thermisch oder mit Ultraschall verschweißt oder mit Lösungsmitteln verklebt werden [13]. Welches Verfahren das richtige ist, hängt sehr von der jeweiligen Anwendung ab. Zum Systemaufbau gehört schließlich auch der Anschluss der Mikrokomponenten untereinander und der Zugang zur Außenwelt. Auch in diesem Bereich wird in Zukunft noch viel Entwicklung nötig sein, weil sich bisher die meisten Arbeiten auf die Herstellung und vor allem auf die Funktion der Mikrokomponenten selbst konzentriert haben. Im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik ist für kleine und mittelständische Unternehmen die größte Wertschöpfung zu erwarten, deshalb ist die Entwicklung dieser Verfahren in Bezug auf die Schaffung von neuen Arbeitsplätzen besonders wichtig.

**Funktionalisierung:** Verschiedene bioanalytische Anwendungen von mikrofluidischen Komponenten erfordern neben der Strukturierung noch zusätzliche funktionale Bereiche auf den Substraten. Am bekanntesten sind hier elektrisch leitfähige Bereiche an der Polymeroberfläche. Im Forschungszentrum Karlsruhe wird für die Beschichtung von polymeren Mikrostrukturen insbesondere das Sputterverfahren eingesetzt. Dieses führt zu dünnen Schichten mit Dicken von wenigen Nanometern bis hin zu etwa 1 µm. Die laterale Strukturierung erfolgt bei geeigneter Geometrie mittels Schattenmasken, wobei Minimalstrukturbreiten von ca. 100 µm erzeugt werden können. Strukturen mit kleineren Lateralabmessungen lassen sich fotolithografisch erzeugen, entweder durch nass-chemisches Ätzen über eine mikrostrukturierte Resistmaske oder durch lokal selektives Ablösen des Metalls nach Beschichtung auf eine vorstrukturierte Resistmaske beim sog. „Lift-off“-Prozess.

**Membrantechnik:** Hierzu sei auf einen eigenen Beitrag im vorliegenden Band verwiesen [13].

#### 4. Beispiele von mikrofluidischen Komponenten und Fertigungsverfahren für die Biowissenschaften

Nachfolgend werden zwei Beispiele für bioanalytische Mikroanalysensysteme und ein Verfahren zur schnellen Fertigung von Testmustern für mikrofluidische Bauteile vorgestellt.

##### 4.1 Mikrozellcontainersystem

Das am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte und gefertigte Mikrozellcontainersystem besteht aus einem planaren mikrostrukturierten Polymerträger (PC oder PMMA) und einer Aufnahmeverrichtung (welche als Reaktionsgefäß oder Inkubator dient) mit genormten fluidischen Anschlüssen [14]. Dies ist in Abbildung 2 gezeigt. Die eigentlichen Zellcontainer befinden sich im Polymerträger und sind Vertiefungen mit 300 µm Kantenlänge. Am Boden des nach oben offenen Containers befinden sich Poren mit einem Durchmesser von unter 5 µm. 784 dieser kleinen Container sind auf einem Quadratzentimeter enthalten. Die Container werden durch 50 µm breite Wände voneinander getrennt.

Entsprechend der Schaltung der fluidischen Anschlüsse kann eine hierdurch erfolgende Nährstoff- und Sauerstoffversorgung überströmend oder durchströmend erreicht werden. Im Falle einer Medienversorgung, die für Ober- und Unterseite getrennt erfolgt, ist ein Konzentrationsgradient über dem Gewebe aufbaubar.

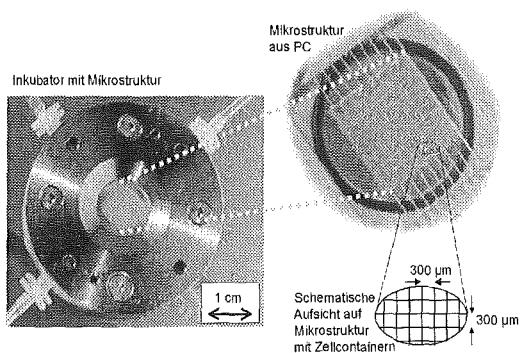


Abb. 2: Inkubator mit eingesetzter Mikrostruktur aus Polycarbonat. Rechts oben ist die Mikrostruktur bei geöffnetem Inkubator gezeigt.

Die Besonderheit des Zellkultursystems ist es, Gewebekulturen dreidimensional über einen langen Zeitraum (Wochen bis Monate) zu kultivieren. Durch die dreidimensionale Gewebekultur wird der Differenzierungsstatus der Zellen besser aufrechterhalten. Es stellt damit eine Erweiterung konventioneller, zweidimensionaler Kultivierungs-techniken dar.

In Versuchen mit Zelllinien und mit Primärzellen wurde das Zellcontainersystem bereits erfolgreich eingesetzt, wobei eine Erweiterung des Einsatzbereiches über die im Forschungszentrum untersuchten Kulturen hinaus nahezu beliebig zu realisieren ist. Die hohe Flexibilität kann dabei durch Beschichten der Mikrostruktur mit Extrazellulär-matrix erfolgen oder durch geringe Veränderung des Containerdesigns erreicht werden.

Augenblicklich wird das Zellcontainersystem von einem industriellen Partner für die wirkungsbezo-gene Analytik von Pharmaka bzw. Kosmetika eingesetzt. Mit ersten Ergebnissen dieser interes-santen Untersuchungen ist bald zurechnen.

#### 4.2 Mikrotechnische IR-Messzelle für die Wirkstoffanalyse

Ziel dieser im Auftrag der BASF AG durchgeführten Arbeiten war die Entwicklung eines Verfahrens für die FTIR-spektroskopische Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Proteinen und Li-ganden in wässrigen Lösungen. Die Messmetho-de ist für den Einsatz im sog. High-Throughput-Screening der Arzneimittelindustrie vorgesehen. Bei diesem automatisierten Verfahren werden eine Vielzahl von Verbindungen auf ihre Eignung als Leitsubstanzen für die Pharmazeutikaent-wicklung hin getestet. Auf diesem Einsatzgebiet verspricht die FTIR-Spektroskopie entscheidende Vorteile gegenüber herkömmlichen Meßmetho-den, wurde aber aufgrund erheblichen techni-schen Schwierigkeiten – vor allem bei der Fluidik – bislang nicht eingesetzt.

Kernstück der im PMT entwickelten Lösung ist eine mikrostrukturierte Durchflusszelle mit einer Schichtdicke von 10 µm, die daher FTIR-spekto-skopische Untersuchung von Protein-Ligand-Wechselwirkungen in wässrigen Lösung erlaubt.

Für das High-Throughput-Screening wird die Durchflusszelle mit einem Mikromischer und ma-kroskopischen HPLC-Fluidikkomponenten kombi-niert, um Protein-Ligand-Mischungen nacheinan-der im FTIR-Spektralphotometer zu messen. Er-fasst werden aufgrund der Komplexbildung resul-tierende strukturelle Änderungen am Protein, die zu sehr kleinen Änderungen im FTIR-Spektrum führen.

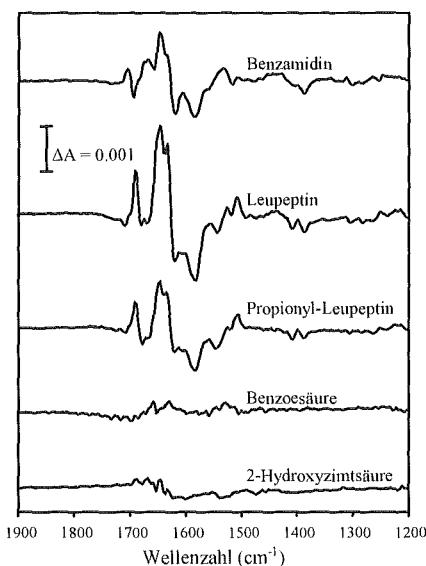


Abb. 3: FTIR-Differenzspektren, aufgenommen in einer Mikrodurchflusszelle.

Abbildung 3 zeigt die Komplexierung von fünf organischen Verbindungen durch das proteolyti-sche Enzym Trypsin. Eine signifikante Abwei-chung des Differenzspektrums von einer flachen Basislinie deutet auf hemmende Eigenschaften hin. Auf Basis solcher Informationen ist es mög-lich, aus einer Vielzahl an Substanzen die beste Leitsubstanz für die weitere Pharmazeutika-Entwicklung zu identifizieren.

#### 4.3 Schnelle Fertigung von Testmustern für mikroanalytische Komponenten

Das vorgestellte Verfahren beruht auf der direkten Strukturierung eines metallischen Formeinsatzes mittels Laserstrahlformabtrag und anschließen-dem Abformen mit lichtinduziertem Reaktionsgie-ßen in PMMA [15]. Das Verfahren ermöglicht in-nerhalb von rund zwei Tagen nach Vorliegen des Designs den Zugriff auf Testmuster. Dabei ist im Gegensatz zur direkten Strukturierung von Kun-ststoffsubstraten mittels Excimerlaserstrahlung eine

mit geringem Aufwand verbundene Herstellung von kleinen bis mittelgroßen Serien möglich.

Aufgrund der Relevanz im Bereich der Biowissenschaften wurde zu Testzwecken ein einfaches Design eines Kapillarelektrophoreschips abgeformt, der in Abbildung 5 gezeigt ist. Der Vergleich der REM-Bilder von Formeinsatz und Formteil zeigt eine gute Übereinstimmung.

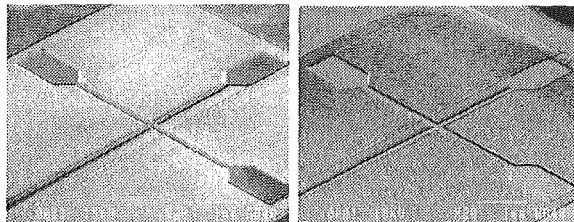


Abb. 4: REM-Aufnahmen des Formeinsatzes und des abgeformten Teils

Die Verfahrenskombination von Formeinsatzherstellung über Laserstrahlformabtrag und Reaktionsgießen erlaubt eine schnelle Prototypenfertigung mikrostrukturierter Komponenten, die auch externen Interessenten zur Verfügung steht.

## 5. Ausblick

Ziel der weiteren Entwicklungen mikrofluidischer Komponenten für analytische Anwendungen in den Biowissenschaften im PMT ist die Nutzung von Synergien, die sich aus interdisziplinären Arbeiten ergeben, um so für die Biowissenschaften spezifische Vorteile einer Miniaturisierung von biotechnischen Komponenten zu erschließen. Das PMT wird dies im Rahmen interdisziplinärer Verbundprojekte tun. Ein Beispiel hierfür ist das im HGF-Strategiefonds 2000 beantragte Projekt „Entwicklung und Fertigung mikrofluidischer Analysensysteme aus Polymeren mit integrierter Probenbehandlung und Detektion“ EFAPRO [16]. Ein wesentliches Anliegen der künftigen Arbeiten im PMT ist es dabei, die industrielle und wirtschaftliche Nutzung wissenschaftlicher Entwicklungen durch die Bereitstellung angepasster Fertigungstechnologien zu unterstützen und Kooperationspartnern oder Auftraggebern zur Verfügung zu stellen.

## Literatur

- [1] Harrison D. J., Van den Berg A. (Eds.), „Micro Total Analysis Systems 98“, Proceedings of the  $\mu$ TAS 98 Workshop, held in Banff, Canada, 13-16 October 1998, seit 1994 in zweijährigem Rhythmus veranstaltete Konferenz
- [2] Manz A., Gruber N., Widmer H.M., „Miniturized Total Analysis Systems: A Novel Concept for Chemical Sensing“, Sensors and Actuators, 1990, **B1**, 244-248
- [3] Craston D., Cowen S., „The Laboratory on a Chip: A New Approach to Chemical Analysis and Beyond“, Sci. Prog., 3/1998, **81**, 225-244
- [4] Shulga O., Cammann K., „Mikrosystemtechnik in der Umweltanalytik“, in Henze G., Köhler M., Lay J.P. (Hrsg.) „Umweltdiagnostik mit Mikrosystemen“, Wiley-VCH Weinheim New-York, 1999, 14-32
- [5] Paulus A., „Integrated Capillary Electrophoresis Using Glass and Plastic Chips for DNA-Analysis“, in Rubenstein K., Savage L.M. (Eds.) „Drug Discovery Technology for the New Millennium“, 1999, Drug and Market Development Publications, 87-95
- [6] Effenhauser C.S., „Integrated Chip-Based Microcolumn Separation Systems“, in Manz A., Becker H. (Eds.) „Microsystem Technology in Chemistry and Life Sciences“, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1998, 51-82
- [7] Wilkinson J.M., „Cost Models for Microsystem technology“, Micromach. Dev., **4**, 3/1999, 1-3
- [8] Bacher, W., „Fertigung von mikrostrukturierten Komponenten und Abformwerkzeugen aus Metall“, in diesem Band
- [9] Schaller Th., Bohn L., Mayer J., Schubert K., „Microstructure grooves with a width of less than 50  $\mu$ m cut with ground hard metal micro end mills“, Prec. Eng. 4/1999, **23**, 229-235
- [10] Schaller Th., Heckele M., Ruprecht R., „Mechanical Micromachining for Mold Insert Fabrication and Replication“, ASPE 1999 Spring Topical Meeting, Proceedings Volume **19**, 3-8
- [11] Schaller Th., Heckele M., Ruprecht R., Schubert K., „Microfabrication of a Mold Insert Made of Hardened Steel and First Molding Results“, 1999 ASPE 14th Annual Meeting, Proceedings Volume **20**, 224-227
- [12] Heim, U.; Heckele, M., „Prägeanlagen“, in diesem Band
- [13] Schomburg, W.K., „Fertigung marktgerechter mikrofluidischer Systeme mit dem AMANDA-Verfahren“, in diesem Band
- [14] Knedlitschek G., Schneider F., Gottwald E., Schaller Th., Eschbach E., Weibezahl K.F., „A Tissue-Like Culture System Using Microstructures: Influence of Extracellular Matrix Material on Cell Adhesion and Aggregation“, J. Biomech. Eng., 2/1999, **121**, 35-39
- [15] Pfleging W., Hanemann T., Hoffmann W., „Lasergesetzigte Mikrostrukturen für die Kapillaranalytik“, in diesem Band
- [16] Bley P., „Stand und Perspektiven des Programms Mikrosystemtechnik“, in diesem Band

# Brückenschlag vom Labor zum Markt

## Das Forschungszentrum Karlsruhe Industrieforum Mikrofertigungstechnik (FIF)

J. Fahrenberg <sup>1)</sup>, R. Czolk <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Programm Mikrosystemtechnik, Programmleitung

<sup>2)</sup> ANKA GmbH, Karlsruhe

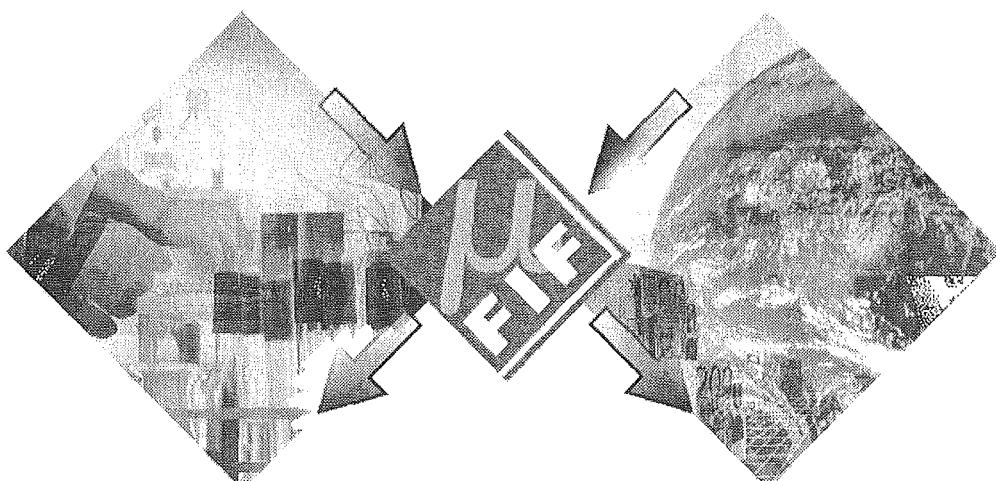
### Zusammenfassung

Das Forschungszentrum Karlsruhe Industrieforum „Mikrofertigungstechnik“ – kurz FIF – ist eine Initiative zur Verbesserung des Technologietransfers im Bereich Mikrosystemtechnik. Die Basis dafür ist das gesammelte Wissen der Experten des Programms Mikrosystemtechnik (PMT) am Forschungszentrum Karlsruhe, in dem über 200 Mitarbeiter aus verschiedenen Fachdisziplinen zusammenarbeiten. Den Mitgliedsunternehmen des FIF werden die Möglichkeiten und Chancen des Einsatzes von Fertigungsverfahren für Mikrokomponenten und –systemen zur Erschließung neuer Produktionsmethoden durch einen professionellen Service nahe gebracht. Dafür steht ihnen ein spezielles Dienstleistungsangebot in Form von Beratung und Analyse sowie wissenschaftlich-technischem Service und Training zur Verfügung. Aufgrund der Einbindung in ein Netzwerk aus Anwendern und Wissenschaftlern schafft FIF den geeigneten Rahmen für eine langfristige und vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschung. Dadurch wird den Unternehmen neben der Übernahme von neuen Technologien auch ermöglicht, Themen im Dialog mit Wissenschaftlern zu identifizieren, die bei der Planung der Forschungsarbeiten des PMT Berücksichtigung finden sollen.

### 1. Einleitung

Nach einer ersten Euphorie hinsichtlich der Chancen und den Märkten der Mikrosystemtechnik herrscht im Moment eine Phase der nüchternen Analyse. Viele Studien [1-3] befassen sich mit der Frage, warum Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik nicht schneller in marktfähige Produktentwicklungen umgesetzt werden. Neben technischen Hemmnissen werden vielfach nicht-technische Hemmnisse – wie beispielsweise mangelnde Kommunikation oder Un-

kenntnis der Situation der beteiligten Partner – als Problem erkannt. Als Konsequenz daraus beschäftigte sich eine Arbeitsgruppe aus Industrievertretern des PMT-Programmbeirats mit der Frage, wie am Forschungszentrum die Zusammenarbeit mit der Industrie im Bereich der Mikrosystemtechnik optimiert werden kann. Ergebnis dieses Diskussionsprozesses war die Idee eines Industrieforum.



*Mit dem Forschungszentrum Karlsruhe Industrieforum (FIF) wird eine Plattform zum verbesserten Know-how-Transfer im Bereich Mikrofertigungstechnik geschaffen.*

## 2. Etablierung

Um aus der Idee ein tragfähiges Konzept zu entwickeln, wurde von März bis November 1998 eine Task-Force eingesetzt. Diese hatte als Aufgabe, ein für die Industrie attraktives Dienstleistungsangebot für ausgewählte Bereiche des PMT auszuarbeiten. Zunächst wurden in einem moderierten Prozess die Kompetenzen in den Bereichen Mikrooptik und Mikrofertigung herausgearbeitet. Darauf aufbauend wurde ein Dienstleistungsangebot entwickelt, das als Hauptkomponente Beratungsleistungen auf Basis des vorhandenen Expertenwissens und der interdisziplinären Struktur des Zentrums beinhaltete.

Um dies aus einer internen Sicht erarbeitete Angebot kritisch zu prüfen, wurden zahlreiche Ge-

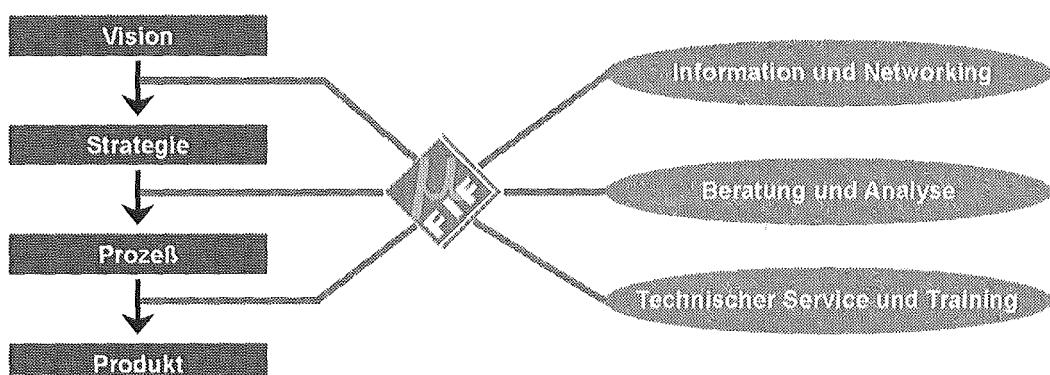
spräche mit Industrievertretern geführt. Durch Anpassung entlang der Rückmeldungen aus externer Sicht, konnte ein für die Industrie attraktives Dienstleistungsangebot zusammengestellt werden. Die durchweg positiven Rückäußerungen von den Unternehmen waren der Grund für die Gründung des FIF mit dem Schwerpunkt „Mikrofertigungstechnik“ zu Anfang 1999.

## 3. Das Angebot des FIF

Das Angebot des FIF gliedert sich in drei Bausteine, die an verschiedenen Stellen des Produktentwicklungsprozesses eines Unternehmens im Sinne einer Beratung Hilfestellung leisten können.

Von der Idee zum Markterfolg:

### Die Prozeßkette der Produktentwicklung



Um eine schnelle Umsetzung von Forschungsergebnissen in die industrielle Praxis zu erzielen, bietet das FIF ein Dienstleistungsangebot bestehend aus drei Bausteinen an.

#### 3.1 Information und Networking

Vielfach ist es für klein- und mittelständische Unternehmen schwierig, über die vielfältigen Entwicklungen im Bereich der Mikrosystemtechnik einen Überblick zu behalten und auf dem aktuellen Stand zu bleiben. An dieser Stelle wird das Expertenwissen am Forschungszentrum in einer exklusiv für die Mitgliedsfirmen gepflegten Datenbank erfasst. In dieser Datenbank werden Literaturstellen zum Thema Mikrofertigung kommentiert abgelegt. Ebenso Berichte von Veranstaltungen, die von Fachleuten des PMT besucht wurden. Über eine Suchmaschine können Zugriffsberechtigte menügeführt oder durch Volltextsuche in dieser Datenbank recherchieren. Darüber hinaus werden diese Informationen vierteljährlich in aufgearbeiteter Form als Newsletter an die Mitgliedsunternehmen verschickt. Um den Austausch zu spezifischen Themen zu intensivieren, finden zweimal im Jahr Workshops mit hochkarätigen Referenten statt. Hiermit werden im intensiven Dialog zwischen Anwendern und Wissenschaft-

lern mikrotechnische Aspekte beleuchtet, die für die Wettbewerbsfähigkeit der Firmen wichtig sind. Gerade diese Vernetzung soll mit dem Baustein „Information und Networking“ gestärkt werden. Neben den Workshops und dem persönlichen Gespräch sind hierzu entsprechende Bausteine in der Datenbank angelegt. Außerdem hilft dieser nachhaltige Austausch zwischen Industrie und Forschung Themen zu identifizieren, die aus Sicht der Mitgliedsunternehmen bei der Planung der Forschungsarbeiten berücksichtigt werden sollten.

#### 3.2 Beratung und Analyse

Neben der allgemeinen Information zu Trends und Entwicklungen im Bereich der Mikrofertigungstechnik erfolgt eine gezielte Beratung der Firmen. Will beispielsweise ein FIF-Mitglied eine neue Technologie im Unternehmen einführen, evaluiert ein FIF-Expertenteam den Stand der Technik in der Firma. Auf Basis dieser Erhebung werden Empfehlungen für die Implementierung der neuen

Technologie gegeben. Dieser Prozess wird selbstverständlich von den Fachleuten des Forschungszentrums ebenfalls begleitet. Aber auch zu konkreten Fragestellungen wie z.B. der Beschaffung einer Maschine oder Auswahl eines geeigneten Softwaretools für die Mikrofertigung steht diese Beratungsleistung zur Verfügung. Dies geht bis hin zur komplexen Problemlösung durch die Wissenschaftler im Forschungszentrum, bei der das vernetzte Know-how und die vielfältigen hochwertigen Apparaturen zum Einsatz kommen müssen.

### **3.3 Wissenschaftlich-technischer Service und Training**

Diese moderne Geräteausstattung steht den Mitgliedsfirmen selbstverständlich auch für einfache, spezifische Fragestellungen zur Verfügung. Im Sinne wissenschaftlich-technischer Serviceleistungen können die Mitgliedsfirmen ihre Mess- oder Fertigungsaufgaben durch das Fachpersonal des PMT kundenspezifisch bearbeiten lassen.

Da der Technologietransfer – oft zitiert – am besten über Köpfe geht, bietet das FIF an dieser Stelle auch gezielte Trainingseinheiten von Mitarbeitern der Mitgliedsfirmen in den Labors und an den Apparaturen im Bereich Mikrofertigung an.

## **4. Organisation**

Um eine einfache und schnelle Bearbeitung der Anfragen von FIF-Mitgliedern zu ermöglichen, wurde das sogenannte FIF-Büro eingerichtet. Von dort werden die Kundenwünsche an die passenden Fachleute weitergegeben und die Abwicklung von Aufträgen und Projekten koordiniert. Darüber hinaus kümmern sich die Mitarbeiter im FIF-Büro zusammen mit einem für die Beratung geschulten Team um die reibungslose Bereitstellung des FIF-Angebots.

Das Angebot selbst wird neben dem FIF-Team von den übrigen im PMT tätigen Mitarbeitern getragen. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass zum Einen die Teammitglieder aufgrund ihrer Zusatzqualifizierung die Bedürfnisse der Industriepartner erfassen können und zum Zweiten die für die Lösung der angefragten Problemstellung notwendigen Experten zur Verfügung stehen.

## **5. Ausblick**

Nach der Sondierungsphase 1998 und Anlaufphase 1999 hat FIF sich etabliert. Die Zahl der Mitgliedsfirmen zeigt, dass das FIF-Angebot sehr attraktiv für klein- und mittelständische Unternehmen ist. Die Rückmeldungen der Mitgliedsfirmen stimmen zuversichtlich, dass das Konzept von FIF erfolgreich sein wird. Weitere Informationen zum FIF sind erhältlich bei:

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

FIF-Büro

Leitung: Dr. Jens Fahrenberg

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1

76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Telefon: 07247-826272

Telefax: 07247-826273

Email: [fif@pmt.fzk.de](mailto:fif@pmt.fzk.de)

Internet: [www.fzk.de/fif](http://www.fzk.de/fif)

## **Literatur**

- [1] E. Staudt (Hrsg.): „Innovationsbarrieren und Transfermaßnahmen in der Mikrosystemtechnik“, Bericht aus der angewandten Innovationsforschung, No. 168, Bochum (1997)
- [2] P. Egelhaaf, K.M. Mayer: „Mikrosystemtechnik: Von der Forschung zu innovativen Produkten“, Empfehlungen zur Innovationsförderung in der Mikrosystemtechnik, Stuttgart (1995)
- [3] D. Schaudel: „Innovationsfeld Mikrosystemtechnik – Thesen zur Innovationsförderung“, ZVEI Gesprächskreis Mikrosystemtechnik, Frankfurt/Main (1998)



# Fertigung von Mikrokomponenten nach DIN EN ISO 9001 an einem Forschungsinstitut

Dieter Maas, Rolf Ehnes, Peter-J. Jakobs, Bernhard Karl, Uwe Köhler  
Christian Lienert, Volker Saile, Joachim Schulz

Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Im Zuge der durch die Einführung eines Qualitätsmanagementsystems nach DIN EN ISO 9001 notwendig gewordenen Umstrukturierung des Instituts für Mikrostrukturtechnik wurde zum 01.01.1999 der Funktionsbereich „Mikrofertigung“ gegründet. Die Mikrofertigung arbeitet im Sinne einer High-Tech-Werkstatt und hat die Aufgabe, IMT-Erzeugnisse (das sind derzeit im wesentlichen Zwischen- und Arbeitsmasken für die Röntgentiefenlithographie, LIGA-Formeinsätze, abgeformte LIGA-Bauteile und fluidische Mikrokomponenten) mit erprobten und dokumentierten Fertigungsverfahren (LIGA- und AMANDA-Verfahren in verschiedenen Verfahrensvarianten) herzustellen. Es wird aufgezeigt, wie es möglich ist, an einem Institut, das seinem Wesen nach als Forschungsinstitut angelegt ist, einerseits eine sichere Erzeugnisfertigung nach industriellem Vorbild durchzuführen, andererseits Freiraum für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu erhalten und ein QM-System gemäß einer weltweit anerkannten Norm zu etablieren und zu unterhalten.

## 1. Einleitung

Dem Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) des Forschungszentrums Karlsruhe wurde am 05. Januar 2000 von der Zertifizierungsstelle des TÜV Rheinland/Berlin-Brandenburg bestätigt, dass es seine Tätigkeiten gemäß eines dokumentierten Qualitätsmanagementsystems (QM-System) nach DIN EN ISO 9001 ausführt.

Die DIN EN ISO 9001 ist die umfassendste Norm der ISO 9000-Reihe. Sie kommt üblicherweise dann zur Anwendung, wenn die Unternehmenstätigkeit Design, Entwicklung, Produktion und Kundendienst umfasst. Sie wurde daher auch vom Institut für Mikrostrukturtechnik angestrebt. ISO 9001 beinhaltet alle 20 Qualitätselemente der ISO 9000-Reihe.

Der Zertifizierung ging eine eineinhalbjährige Vorbereitungsphase auf das Audit durch unabhängige Prüfer des TÜV im Dezember 1999 voraus. Während dieser Zeit wurde das IMT neu strukturiert und die Geschäftsabläufe neu definiert. Parallel wurden die beschreibenden Dokumente erstellt und das neue QM-System Zug um Zug implementiert. Entgegen der ursprünglichen Planung, nur für ausgewählte Fertigungsabläufe eine Zertifizierung anzustreben [1], wurde ein für das gesamte Institut gültiges QM-System aufgebaut. Vor allem die

- Abläufe beim Kundenkontakt (von der Anfrage bis zur Auftragserteilung), die

- Durchführung von FuE-Projekten (Forschungsarbeiten, Erzeugnis- und Verfahrensentwicklungen), die
- Vorbereitung und Ausführung von Fertigungsaufträgen sowie das
- Beschaffungs- und Lagerwesen

wurden neu geregelt bzw. neu geschaffen. Zur Bearbeitung dieser Themen und zur Koordinierung aller qualitätsrelevanter Tätigkeiten wurden die neuen Funktionsbereiche „Mikrofertigung“, „Verwaltung, Controlling, Vertrieb“ und „Qualitätswesen“ gegründet. Der FuE-Bereich des IMT wurde in drei Funktionsbereiche aufgeteilt. Damit orientiert sich die heutige Struktur des IMT am Organigramm eines Unternehmens aus der Industrie.

In der Mikrofertigung werden IMT-Erzeugnisse unter den gleichen Bedingungen gefertigt, wie sie in einer professionellen, industriellen Halbleiterfertigung vorzufinden sind. Das bedeutet, dass die existierenden Fertigungsabläufe in Laufkarten abgebildet und die einzelnen Fertigungs- bzw. Prüfschritte schriftlich dokumentiert wurden. Zur Fertigung von IMT-Erzeugnissen werden nur eindeutig spezifizierte Materialien und freigegebene Fertigungsverfahren eingesetzt. IMT-Erzeugnisse werden so gekennzeichnet, dass ihre Herstellung anhand der Begleitdokumente jederzeit nachvollziehbar und rückverfolgbar ist. Die Bewahrung des spezifikationsgerechten Zustandes der Fertigungsräume (zum größten Teil Reinräume)

sowie der Fertigungs- und der Prüfmittel wird nach einem festgelegten Wartungs-, gegebenenfalls Instandsetzungs- und Kalibrierplanes durchgeführt.

## 2. Vorteile eines QM-Systems nach DIN EN ISO 9001

Gegenüber anderen Ordnungs- oder QM-Systemen, bietet ein genormtes Qualitätssicherungssystem eine Reihe von Vorteilen.

Eine Zertifizierung nach DIN EN ISO 9001 bedeutet, dass das betreffende Unternehmen über ein Qualitätssicherungssystem gemäß einer weltweit anerkannten Norm verfügt, es befolgt und seinem Kunden gegenüber auch nachweisen kann, „dass es das tut, was es behauptet zu tun und dass es dies auch dokumentieren kann“ [2].

Ein normgerechtes QM-System erzwingt Tätigkeiten und Regelungen, die ein nicht normgerechtes System unter Umständen vernachlässigt. Dazu gehören zum Beispiel eine formalisierte „Fehlererfassung“, der „kontinuierliche Verbesserungsprozess“, Regelung von „Verantwortlichkeiten“, kontinuierliche „interne Überprüfung“ des QM-Systems oder eine konsequente „Schulung“ der Mitarbeiter. Die Forderungen der Norm sind in den 20 Qualitätselementen der ISO 9001 zusammengefasst, die ein Unternehmen, das die Zertifizierung anstrebt, schriftlich regeln und erfüllen muss.

Der wesentliche Unterschied zwischen einem zertifizierten und nicht zertifizierten QM-System besteht jedoch darin, dass unabhängige Prüfer einer akkreditierten Zertifizierungsgesellschaft das vorgestellte QM-System prüfen und dem Unternehmen und seinen Kunden bescheinigen, dass die beschriebenen Qualitätssicherungsverfahren in Ordnung sind und eine laufende Überwachung erfolgt. Mit der Erfüllung der Norm ISO 9001 hat man im Umgang mit seinen Kunden die gleiche Ausgangsposition wie andere Betriebe mit Zertifikat. Das Vertrauen in das QM-System des jeweiligen Partners wird erhöht. Da viele Unternehmen zertifizierte Lieferanten bevorzugen, ergibt sich daraus auch ein Wettbewerbsvorteil. Mitunter wird eine Zertifizierung gemäß ISO 9001 oder nach noch strengerem Normen als Voraussetzung für den Eintritt in spezielle Märkte sogar verlangt.

Neben den genannten Vorteilen soll allerdings nicht unerwähnt bleiben, dass die Etablierung und Unterhaltung eines genormten QM-Systems mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden sind. Diesen Aufwand zu betreiben und auf Dauer zu rechtfertigen, ist immer eine Entscheidung der Unternehmensleitung. Sie wird sie immer dann treffen, wenn sie sich daraus wirtschaftliche Vorteile im oben genannten Sinn verspricht.

## 3. Forschung und Fertigung unter einem Dach

Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten sind dadurch gekennzeichnet, dass nicht jede Handlung sofort den gewünschten Erfolg bringt. Häufig müssen FuE-Tätigkeiten ausgeführt werden, um das nicht vorhersagbare Ergebnis herbeizuführen.

Im Gegensatz dazu bedeutet Fertigung, Tätigkeiten durchzuführen, deren Endergebnis (das Erzeugnis) in jeder Hinsicht sehr genau bekannt ist und das den Anforderungen des Kunden hinsichtlich Qualität, Preis und Lieferzeit unbedingt entspricht.

Es drängt sich die Frage auf, weshalb an einem Forschungsinstitut eine Fertigung nach industriellem Vorbild betrieben wird. Im Falle der Mikrofertigung am IMT gibt es dafür im wesentlichen zwei Gründe.

1.) Für die Entwicklung neuer mikrosystemtechnischer Komponenten wie zum Beispiel Mikrospektrometer aus Kunststoff werden verschiedene Werkzeuge benötigt, die aber kommerziell derzeit nicht verfügbar sind. Solche Werkzeuge sind beispielsweise Röntgenzwschen- bzw. Arbeitsmasken und Formeinsätze für die kostengünstige Herstellung von Mikrospektrometern durch Abformung. Diese Werkzeuge sind nicht der Entwicklungsgegenstand. Sie werden aber benötigt, um die zu entwickelnde Komponente überhaupt herstellen und deren Eigenschaften bestimmen bzw. im Rahmen von FuE-Tätigkeiten verbessern zu können (z. B. durch Änderungen des Layouts oder Designs). Daher müssen solche Standardwerkzeuge im oben beschriebenen Sinn „fertigbar“ sein.

2.) Fehlende Fertigungstechniken bremsen nach wie vor die Märkte für mikrosystemtechnische Komponenten, deren Entwicklungsphase zum Teil bereits weit fortgeschritten ist. Die Entwicklung geeigneter, stabiler Fertigungsverfahren hält mit der Entwicklung mikrosystemtechnischer Komponenten bei weitem nicht Schritt. Daher ist es in zunehmendem Maße eine Aufgabe von Forschungseinrichtungen, der Industrie auch die Fertigungstechniken für neu entwickelte Mikrokomponenten aufzuzeigen und zur Einsatzreife zu bringen. Anhand kleiner bis mittlerer Stückzahlen wird noch im Forschungsinstitut die Tauglichkeit von Fertigungsverfahren evaluiert und demonstriert. Geschieht diese Art der Fertigung bereits gemäß eines von der Industrie anerkannten QM-Systems, gestaltet sich die spätere Übergabe des Fertigungsverfahrens an ein Produktionsunternehmen um so leichter.

#### 4. Merkmale des QM-Systems des IMT bezogen auf die Mikrofertigung

„Das Institut für Mikrostrukturtechnik betreibt angewandte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Mikrostrukturtechnik. Die Arbeiten reichen von der Konzeption bis zur serienfertigungsreifen Entwicklung von Erzeugnissen und Verfahren. Die hierbei realisierbaren mikrostrukturtechnischen Erzeugnisse und Verfahren können an industrielle und öffentliche Auftraggeber einschließlich der Lieferung von Mustern und kleinen / mittleren Serien transferiert werden. Hierfür steht am IMT eine eigene Fertigungsline zur Verfügung“ [3].

In diesem Abschnitt wird das QM-System des IMT und seine Implementierung, allerdings nur soweit es die Arbeitsweise des Fertigungsbereiches betrifft, zusammenfassend beschrieben.

Im ersten Schritt der Implementierung wurde die frühere Abteilung „Technikum für die Kleinserienfertigung von Mikrosystemen“ [1] zu dem neuen Funktionsbereich „Mikrofertigung“ umstrukturiert (siehe auch die Abschnitte 5 und 6). Die früheren Aufgaben des Technikums auf dem Gebiet von Verfahrensentwicklungen wurden dem FuE-Bereich des IMT übertragen. Um einen im Sinne von Abschnitt 3 arbeitenden Fertigungsbereich zu etablieren wurden weitere Maßnahmen umgesetzt, die die vorherigen Geflogenheiten bei der Durchführung praktischer Arbeiten einschneidend und nachhaltig veränderten. Eine besondere Schwierigkeit bestand darin, Regelungen zu treffen, so dass experimentelle Arbeiten des FuE-Bereiches, die aus anlagentechnischen Gründen an der Fertigungsline durchgeführt werden müssen, auch zukünftig nicht behindert werden, die Fertigungsfähigkeit der Linie aber jederzeit erhalten bleibt.

Folgende Maßnahmen wurden getroffen:

- 1.) Bisherige IMT-Labors wurden zu „Fertigungsräumen“ umgewandelt. Dazu gehört insbesondere der überwiegende Bereich des Reinraumes. Charakteristisch für Fertigungsräume ist, dass in ihnen spezifizierte klimatische Bedingungen herrschen, die regelmäßig überwacht und dokumentiert werden. Der Zutritt zu den Fertigungsräumen ist geregelt und erfolgt nur nach vorheriger Genehmigung und Einweisung. In Fertigungsräumen wird nur mit freigegebenen Materialien, Fertigungs- und Prüfmitteln gearbeitet. Es werden dort keine Versuche, die die Fertigungsfähigkeit von Anlagen gefährden könnten, ohne vorherige Prüfung bzw. Genehmigung durchgeführt.
- 2.) Alle Fertigungs- und Prüfmittel in den Fertigungsräumen wurden systematisch erfasst. Für jedes Fertigungs- bzw. Prüfmittel wurde

ein Anlagenbuch angelegt. Die Anlagenbücher enthalten die folgenden Dokumente:

- Eine Fertigungs- oder Prüfmittelkarte mit Stammdaten, in der insbesondere der / die für das jeweilige Gerät verantwortliche Mitarbeiter / in benannt ist
  - Wartungs- und / oder Kalibrieranweisungen
  - Wartungs- und / oder Kalibrierprotokolle
  - Listen zur Fertigungs- bzw. Prüfmittelbelegung
  - Eine Liste der am Fertigungs- bzw. Prüfmittel eingewiesenen Mitarbeiter
  - Dokumente über Verbesserungsmaßnahmen
  - Anlagenbezogene Arbeits- und / oder Prüfanweisungen
  - Mitgeltende Spezifikationen
  - Eine Bedienungskurzanleitung oder Hinweis auf den Aufbewahrungsort der Bedienungsanleitung.
- 3.) Alle Fertigungs- und Prüfmittel werden nach vorgegebenen, spezifischen Wartungs- bzw. Kalibrierplänen in Stand gehalten.
  - 4.) An Fertigungs- und Prüfmittel arbeiten nur eingewiesene Mitarbeiter.
  - 5.) Die Einsatzfähigkeit der Fertigungs- und Prüfmittel ist durch eine farbliche Kennung am jeweiligen Gerät ersichtlich (grün = frei bzw. rot = für die Fertigung gesperrt). Es wird nur an ordnungsgemäß funktionierenden Fertigungsmitteln, bzw. kalibrierten Prüfmittel gearbeitet (Zustand = „grün“). Auf diese Weise wird die Reproduzierbarkeit von Fertigungsschritten verbessert.
  - 6.) Für Qualitätsprüfungen während der Fertigung werden nur (C-)Prüfmittel verwendet, die mit einem nationalen Standard kalibriert sind.
  - 7.) Fertigungsabläufe werden durch Laufkarten vorgegeben. In den Laufkarten reihen sich einzelne Fertigungs- und Prüfschritte zu Fertigungsverfahren aneinander. Fertigungs- und Prüfschritte sind durch Arbeits- bzw. Prüfanweisungen und zugehörigen Spezifikationen (z. B. Vorgabewerte und Toleranzen) beschrieben.
  - 8.) Es wird zwischen „Musterfertigung“ und „Freigegebenen Fertigungsverfahren“ unterschieden.

Erprobte und freigegebene Fertigungsverfahren sind in weißen Laufkarten festgeschrieben. Sie dürfen nur im Rahmen

einer definierten Vorgehensweise („Technische Änderung“) modifiziert werden. Fertigungsverfahren, die sich noch in der Entwicklung befinden, werden auf grünen Laufkarten vorgegeben („Musterfertigung“). Auf schriftlich vorgebrachten Wunsch des für die Verfahrensentwicklung verantwortlichen FuE-Mitarbeiters können grüne Laufkarten sowohl im Ablauf als auch bezüglich der Ausführung der Fertigungs- bzw. Prüfschritte vergleichsweise einfach geändert werden. Auf diese Weise werden neue Fertigungsverfahren weiter verfeinert bis sie schließlich in einer weißen Laufkarte formalisiert festgeschrieben und freigegeben werden.

Da ein Großteil der Fertigungs- und Prüfeinrichtungen am IMT nur einmal vorhanden ist, wird es durch die Einführung zweier Arten von Laufkarten möglich, einerseits festgeschriebene Fertigungsverfahren auszuführen (weiße Laufkarten), andererseits die für FuE-Arbeiten notwendige Flexibilität bzgl. Neuentwicklungen von Fertigungsverfahren und Erzeugnissen (grüne Laufkarten) zu erhalten. Auch im Falle grüner Laufkarten ist jederzeit gewährleistet, dass während des Fertigungs-umlaufes frühzeitig in der Entwicklungskette eine nachvollziehbare einheitliche Dokumentation erfolgt.

- 9.) Sowohl grüne als auch weiße Laufkarten sind durch eine je Laufkarte nur einmal vergebene, innerhalb des IMT fortlaufende Losnummer eindeutig gekennzeichnet.
- 10.) Die Losnummer der jeweiligen Laufkarte wird – sofern technisch möglich – dauerhaft auf dem zugehörigen Erzeugnis angebracht.
- 11.) Neben den Losnummern gibt es Erzeugnisnummern, anhand derer die IMT-Erzeugnisse unterschieden werden. Erzeugnisnummern werden – sofern technisch möglich – ebenfalls auf dem Erzeugnis angebracht. In der Regel sind Erzeugnisnummern Teil des Layouts und werden lithographisch, also zwangsgesteuert, übertragen. Aus der Erzeugnisnummer ist ferner der Revisionsstand und die Anzahl der Ebenen des IMT-Erzeugnisses ersichtlich.
- 12.) Die Beauftragung der Mikrofertigung erfolgt schriftlich. Die Vorgaben der Fertigungs-aufträge werden auf ihre technische und terminliche Machbarkeit hin geprüft, bevor sie angenommen bzw. ausgeführt werden. Dadurch wird das Risiko, die Fertigungsfähigkeit einzelner Anlagen z. B. durch die Verwendung

unzulässiger Materialien oder Einstellung falscher Parameter zu gefährden, verringert.

- 13.) Die Dokumentation von Prüfungen erfolgt teilweise in der Laufkarte, größtenteils jedoch auf vorgegebenen Formblättern.
- 14.) Während des Fertigungsablaufes wird die systematische Erfassung aller auftretenden Fehler mittels der Laufkarte erzwungen. Dadurch werden mögliche Schwachstellen in den Fertigungsverfahren statistisch erkannt und können gezielt behoben werden. Auftretende Fehler können dazu führen, dass eine Nacharbeit erfolgen muss. In unkritischen Fällen kann über die Erteilung einer Prüfausnahme formalisiert entschieden werden. Schlimmstenfalls müssen angearbeitete Erzeugnisse verschrottet werden.
- 15.) Zuverlässigkeitssuchungen (z. B. durch zeitraffende Methoden nach DIN ISO 9022) an Erzeugnissen erfolgen systematisch.

## 5. Aufgaben der Mikrofertigung

Die Mikrofertigung arbeitet im Sinne einer High-Tech-Werkstatt und hat die Aufgabe, IMT-Erzeugnisse (das sind im wesentlichen Zwischen- und Arbeitsmasken für die Röntgentiefenlithographie, LIGA-Formeinsätze, abgeformte LIGA-Bauteile und fluidische Mikrokomponenten) mit erprobten und dokumentierten Fertigungsverfahren (weiße Laufkarten für das LIGA-Verfahren und das AMANDA-Verfahren in ihren verschiedenen Verfahrensvarianten) herzustellen.

Die Mikrofertigung versteht sich darüber hinaus als Dienstleister innerhalb der Entwicklungs- und Fertigungskette für neue Erzeugnisse oder Verfahren und stellt ihre Fertigungs- und Prüfeinrichtungen bzw. ihre Infrastruktur dafür zur Verfügung. Die wissenschaftlich-technische Verantwortung für Entwicklungsarbeiten an neuen Verfahren und Erzeugnissen (grüne Laufkarten) verbleibt bei den FuE-Bereichen des IMT.

## 6. Struktur der Mikrofertigung

Die Arbeiten des Funktionsbereiches Mikrofertigung werden in vier Gruppen durchgeführt:

Die Fertigungsvorbereitung prüft die eingehenden Fertigungsaufträge und plant gemäß dem Vorbild eines industriellen Betriebes die für die Bearbeitung eines Fertigungsauftrages notwendigen Material-, Ausrüstungs- und Personalressourcen. Sie erstellt Zeitpläne und Laufkarten für die Fertigung und verfolgt die termingerechte Bearbeitung der Fertigungsaufträge.

In der Fertigungsausführung erfolgt die Bearbeitung der Fertigungsaufträge gemäß der jeweiligen Laufkarte unter Einsatz der am IMT verfügbaren Fertigungstechniken. Das sind im einzelnen:

- Plasmaprozesse: PVD, CVD, RIE
- optische Lithographie
- Elektronenstrahlolithographie unter Nutzung des vorhandenen hochauflösenden Elektronenstrahlschreibers (Vektor-Scan-Maschine vom Typ EBPG5-HR, Beschleunigungsspannungen 50 und 100 kV, maximale Belichtungsfrequenz 10 MHz) für LIGA-Zwischenmasken
- nasschemische Prozesse: Ätztechnik und Galvanik (Ni, Cu, Au)
- Beschichtungstechniken: Sputtern, Bedampfen und Belacken
- Prüftechniken: Tastschnittgerät, Rasterelektronenmikroskop, diverse Inspektions- bzw. Messmikroskope
- Abformung in Kunststoffen durch Heißprägen

Die Gruppe Service und Engineering ist für die Überwachung und ggf. Wiederherstellung des spezifikationsgerechten Zustandes der Fertigungsreinräume verantwortlich. Von dieser Gruppe werden auch alle Arbeiten zur Verbesserung der Fertigungs- und Prüfmittel und der Arbeitsplatzergonomie koordiniert.

In der Gruppe Mechanische Bearbeitung sind die institutseigene Werkstatt und die Arbeiten zum Mikrodrahterdieren, Glanzfräsen und Polieren sowie Vereinzelungs- und Laserbearbeitungstechniken zusammengefasst.

## 7. Ausblick

Die Zuerkennung des IOS-9001-Zertifikats an das Institut für Mikrostrukturtechnik hat nicht die Bedeutung eines Projektabschlusses. Vielmehr begann für das IMT damit die Phase der stetigen Verbesserung seines Qualitätsprogrammes.

Für den Fertigungsbereich ist es neben der Zuarbeit für FuE-Projekte das vorrangige Ziel, die Fertigungsverfahrensbibliothek des IMT kontinuierlich zu erweitern, d. h. neue Fertigungsverfahren nach Maßgabe der FuE-Bereiche in weißen Laufkarten festzuschreiben und zu übernehmen. Ein weiteres Ziel besteht darin, die Fertigungsvorbereitung durch den Einsatz EDV-gestützter Werkzeuge zu professionalisieren und den Fertigungsstand laufend zu erfassen. Hierzu wird gemeinsam mit dem IAI die Einführung des Workflowmanagementsystems INFOFLOW erfolgen [4]. Daten aus Fertigungsprüfungen werden künftig in einer elektronisch geführten Datenbank dokumentiert.

## Literatur

- [1] Behringer, U.: „Technikum für die Fertigung von Mikrosystemen“, FZKA 6080, 3. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik im Forschungszentrum Karlsruhe (1998), 11 - 16
- [2] Patterson, J. G.: "ISO 9000", Wirtschaftsverlag Carl Ueberreuter, ISBN 3-7064-0143-6
- [3] Zitat aus dem Qualitätsmanagementhandbuch des IMT in der Version vom 18.10.1999
- [4] Dickerhof, M. und Jakobs P.-J.: „Prozessorientierte Informationssysteme zur Unterstützung inner- und überbetrieblicher Abläufe in Vor- und Kleinserienfertigungen“, 4. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik im Forschungszentrum Karlsruhe (2000)



## **Berichte von Industriepartnern**



# Wachstumsmarkt Mikrosystemtechnik am Beispiel des LIGA-Mikrospektrometers

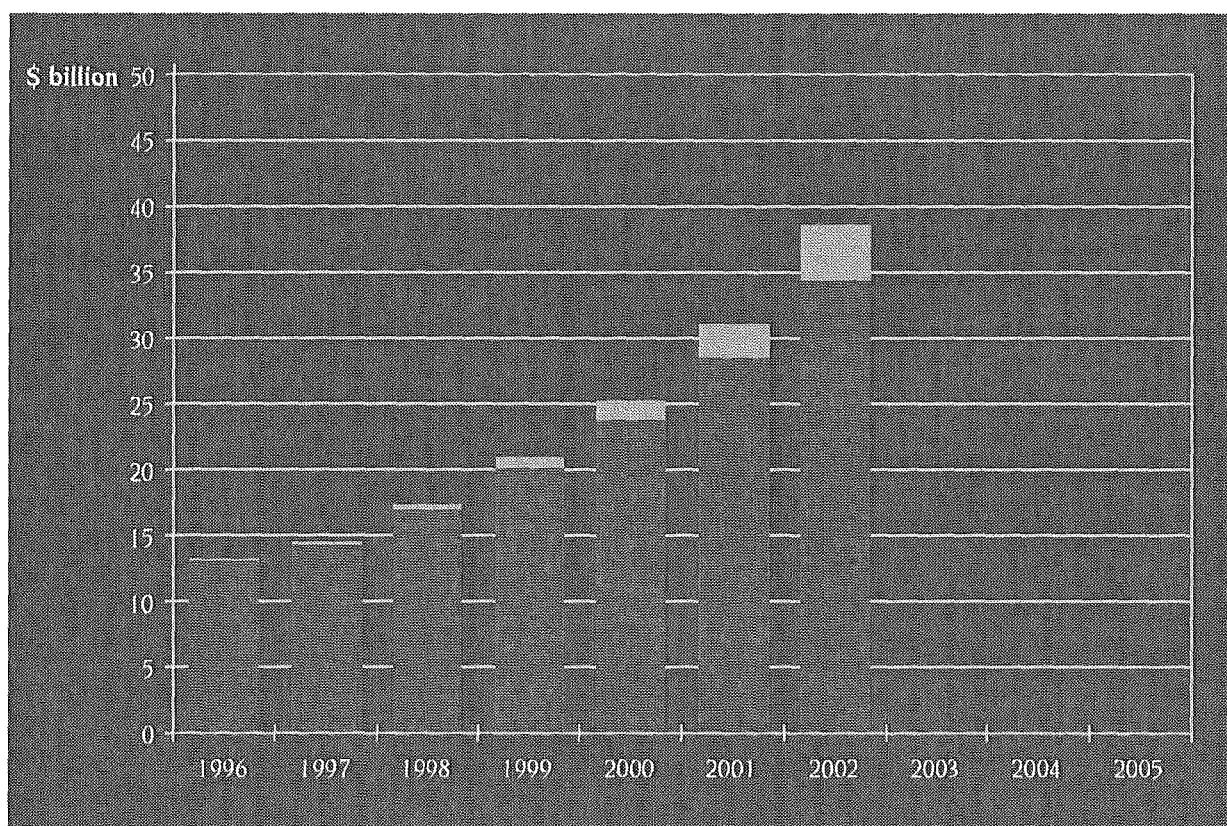
Reiner Wechsung  
STEAG microParts GmbH, Dortmund

## Zusammenfassung

Es wird erwartet, dass der gesamte Weltmarkt für Mikrosysteme von 26 Milliarden US-\$ im Jahr 2000 mit einer jährlichen Wachstumsrate von 20 % wächst. Neu aufkommende Produkte werden zu einem noch höheren Wachstum bis zum Jahre 2010 beitragen. Das größte Wachstum wird auf dem Gebiet der Biomedizin und der Informatiktechnologien stattfinden. Die Mikrosystemtechnik als Schlüsseltechnologie wird am charakteristischen Beispiel des LIGA Mikrospektrometers beschrieben mit Anwendungen auf dem Gebiet von nicht invasiver biomedizinischer Diagnostik.

Die Mikrosystemtechnik wird weltweit als eine neue Technologie mit einem enormen Zukunftspotential angesehen, wobei die meisten Prognosen zwar sehr visionär sind, es bisher jedoch an konkreten wirtschaftlichen Ergebnissen und be- lastbaren Vorhersagen mangelt. Die Initiatoren

der von der Industrie geführten und von der EG-Kommission geförderten europäischen Initiative NEXUS (Network of Excellence in Multifunctional Microsystems) haben daher eine eigene Marktstudie zur Mikrosystemtechnik erarbeitet, deren Ergebnisse nun vorliegen. Die NEXUS Marktstu-



neue sich entwickelnde Produkte in der Einführungsphase



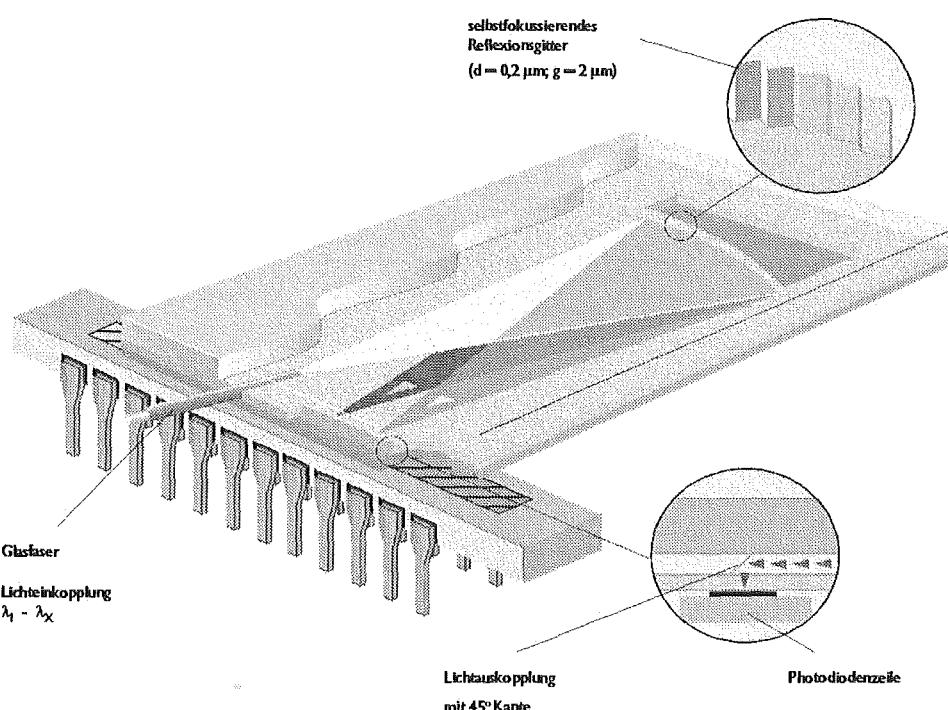
Produkte die bereits in 1996 existierten, aber kontinuierlich verbessert wurden

die belegt, dass Produkte in Mikrosystemtechnik bereits in diesem Jahr ein Marktvolumen von 25 Milliarden US Dollar erreichen mit einem prognostizierten Wachstum von jährlich über 20 %.

Die NEXUS Studie umfasst neben monolithischen Systemen in Silizium auch hybrid aufgebaute Mikrosystemtechnik aus verschiedenen Werkstoffen z.B. Kunststoffen, Metallen und Keramik. Die wichtigsten bereits etablierten Produkte in Mikro-Nachdem Anfang der 90-iger Jahre die Automobiltechnik die treibende Kraft für Entwicklungen in Mikrosystemtechnik war, liegen inzwischen die wichtigsten Anwendungen der Mikrosystemtechnik in der Informationstechnologie (Peripheriegeräte zum PC) und der Biomedizin; in diesen beiden Anwendungssegmenten liegt das größte Wachstumspotential für die Mikrosystemtechnik.

systemtechnik sind: Schreibleseköpfe für Speicherplattenlaufwerke, Tintenstrahldruckköpfe, Herzschrittmacher, Hörgeräte, Kanalplatten für medizinische Diagnose (lab on chip), Drucksensoren und Beschleunigungssensoren. Weitere wichtige Neuentwicklungen mit Produkteinführung bis zum Jahr 2002 werden bei der Medikamentendosierung und Zuführung erwartet sowie bei optischen Komponenten für die Telekommunikation.

Ein charakteristisches Beispiel für die Eröffnung neuer Anwendungsgebiete durch Einsatz der Mikrosystemtechnik ist die Entwicklung des LIGA-Mikrospektrometers; basierend auf Forschungsarbeiten des Forschungszentrums Karlsruhe hat STEAG microParts dieses MST-Produkt zur Marktreife geführt.



Prinzip des LIGA-Mikrospektrometers

Der LIGA-Baustein enthält alle Funktionselemente eines klassischen Spektrometers. Einkoppelstruktur, planarer Wellenleiter, Hohlspiegel, Echellette-Gitter und eine Auskoppelstruktur sind hier in einem monolithischen Block integriert. Die eigentliche Mikrostruktur ist das Reflexionsgitter mit einer Gitterkonstante von 1,7  $\mu\text{m}$  und einer Stufenhöhe von 0,5  $\mu\text{m}$ . Damit können spektrale Auflösungen von bis zu 5 nm erzielt werden. Ent-

scheidende Erfolgsfaktoren dieser Komponente sind u.a. ihre Kleinheit, Robustheit und das Potential zur kostengünstigen Serienfertigung durch Kunststoffabformtechnik. Verglichen mit konventionellen Systemen für Farbanalytik und Gasdetektion ist hier ein geringer Montage- und Justieraufwand erforderlich. Dies ist ein weiterer Erfolgsfaktor, der nur mit Mikrostrukturtechniken erzielt werden kann.

Nachdem die ersten Anwendungen des LIGA-Mikrospektrometers durch ein kleines tragbares Farbmessgerät für die Materialkontrolle erschlossen waren, konnte gemeinsam mit der amerikanischen Firma SpectRx ein Messgerät für die nicht-invasive Gelbsuchtfrüherkennung international eingeführt werden. Anstatt über eine Blutprobe die Bilirubinkonzentration zur vorbeugenden Gelbsuchtfrüherkennung bei neugeborenen Babys zu messen kann diese Untersuchung nun berührungslos durch die Analyse von rückgestreutem Licht durchgeführt werden. Aus dem von der Haut des Babys zurückgestreuten Licht kann nach Auflösung mit dem Mikrospektrometer die Bilirubinkonzentration quantitativ gemessen werden.

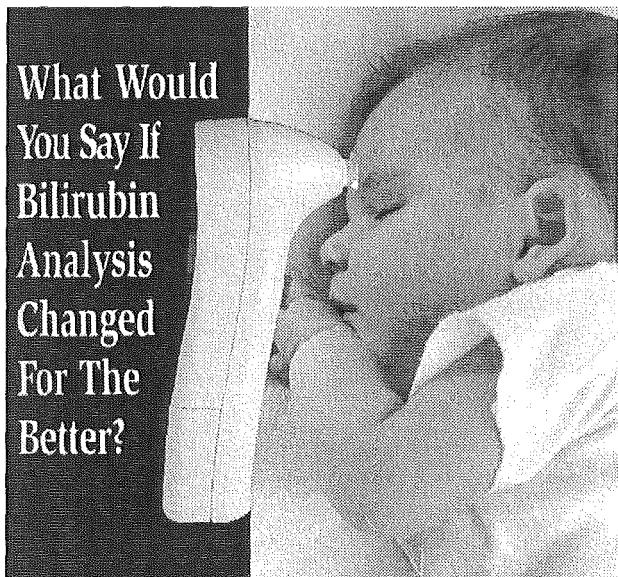
Das kostengünstige tragbare Handgerät Bilicheck wurde von den amerikanischen Gesundheitsbehörden zugelassen und wird bereits international

vermarktet. Diese erfolgreiche medizinische Analyse von Blutwerten durch die Haut ist nur ein erstes Beispiel für die außerordentlichen neuen Möglichkeiten, die die Mikrosystemtechnik bietet, und eröffnet weitere Anwendungsmöglichkeiten für die berührungslose Diagnose weiterer Blutwerte, wie z.B. Glukose, Hämoglobin oder Cholesterin; allerdings sind für diese Anwendungen noch prinzipielle Untersuchungen zur Erfassung der individuellen Körpereigenschaften des Patienten zu lösen.

Weitere große Anwendungspotentiale für das LIGA-Mikrospektrometer ergeben sich im Bereich der Farbanalyse für Farbdrucktechnik und Farbkopierer und in anderen Wellenlängenbereichen im nahen infrarot für die Lebensmittelanalyse und im infraroten zur Gasanalyse. Mit weiteren Fortschritten der LIGA-Technik und Erreichen noch besserer Auflösungen sind auch Anwendungen in der Telekommunikation, z.B. für das Wellenlängen demultiplexen absehbar.

Die weit über das eigene Marktgebiet hinausgehende Bedeutung der Mikrosystemtechnik liegt in ihrer besonderen Hebelwirkung, da Mikrosysteme zur Veredelung konventioneller Produkte beitragen und somit über deren zukünftige Wettbewerbsfähigkeit mit entscheiden.

Um in der Mikrosystemtechnik eine starke Marktposition zu gewinnen und zu erhalten, ist neben der Beherrschung einer kostengünstigen Massenfertigung für mikroskopisch kleine Komponenten die Entwicklung neuer Verfahren zur Aufbau- und Verbindungstechnik hybrider Mikrosysteme erforderlich; die Forschungs- und Industriestruktur in Deutschland, in der das Forschungszentrum Karlsruhe eine wesentliche Rolle spielt, bietet hierfür erstklassige Voraussetzungen.





# Mikrofluidische Komponenten für die chemische Analysenmesstechnik

A. Maute <sup>1)</sup>, W.K. Schomburg <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Agilent Technologies GmbH, Waldbronn

<sup>2)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

In der chemischen Analysenmesstechnik verlangt der Markt nach immer empfindlicheren Geräten, die kleinste Proben von wenigen Nanolitern in kürzester Zeit analysieren können. Dazu sind mikroskopisch kleine Komponenten notwendig, wie sie kostengünstig mit dem AMANDA-Verfahren hergestellt werden können.

Der vorliegende Artikel beschreibt einen Mikroentgaser für die Flüssigkeitschromatografie bei hohen Drücken (HPLC), der vom Forschungszentrum im Auftrag für Agilent Technologies entwickelt wurde und bei STEAG microParts gefertigt wird. Der Mikroentgaser gehört zu denjenigen Komponenten, die der neuen Generation von HPLC-Geräten von Agilent Technologies zu ihrer sehr guten Marktposition verhelfen.

## 1. Einleitung

Die chemische Analysenmeßtechnik ist ein Wirtschaftssektor mit einem weltweiten Jahresumsatz von ca. 18 Mrd. US\$. Sie findet Anwendung in so unterschiedlichen Bereichen wie der Arzneimittelentwicklung, der kriminalistischen Spurensuche, der Umweltüberwachung und der Kontrolle von Lebensmitteln. Der Bereich chemische Analysenmesstechnik von Agilent Technologies beschäftigt 3500 Mitarbeiter und erzielt einen Jahresumsatz von ca. 1 Mrd. US\$. Der vorliegende Artikel zeigt an einem Beispiel, wie durch die Zusammenarbeit von Agilent Technologies mit dem Forschungszentrum ein neues mikrosystemtechnisches Produkt entwickelt wurde, das in den nächsten Monaten dieses Jahres auf den Markt gebracht wird.

In der chemischen Analysenmeßtechnik geht der Trend ganz allgemein zu immer kleineren Probenmengen, die in immer kürzerer Zeit mit immer größerer Empfindlichkeit bestimmt werden sollen. Dazu müssen die einzelnen Komponenten der Analysegeräte immer kleiner werden, denn nur genügend kleine Komponenten können Probenmengen von wenigen Nanolitern mit der benötigten Präzision handhaben und untersuchen. Eine kleine Probenmenge ist nicht nur deshalb anzustreben, weil oft nur wenig Material für die Untersuchung zur Verfügung steht, sondern auch weil die für eine chemische Analyse notwendige Zeit stark abnimmt, wenn nur wenige Nanoliter in ihre chemischen Bestandteile zerlegt werden müssen [1]. Die Ionen und Moleküle müssen in einer kleineren Probe nur über einen verkürzten Weg transportiert werden, um eine Trennung zu erreichen, und dieser verkürzte Weg wird in weniger Zeit zurückgelegt. Dadurch kann die Dauer einer Analyse beträchtlich verringert werden, so dass

früher auf Fehlentwicklungen reagiert und Kosten gespart werden können.

Als willkommener Nebeneffekt ist mit einer Verkleinerung der Bestandteile eines Gerätes auch ein geringerer Platzbedarf verbunden, so dass entweder mehr Komponenten mit einer erhöhten Funktionalität eingebaut werden können oder das Analysegerät wird insgesamt kleiner und leichter.

Die Mikrosystemtechnik eröffnet neue Wege zur Miniaturisierung, ermöglicht höhere Zuverlässigkeit und oft gleichzeitige Kosteneinsparungen. Deshalb wurden das im Forschungszentrum entwickelte Mikrospektrometer [2] und die Mikropumpe [3] für einen Einsatz in Analysegeräten weiterentwickelt. Im Zentrum des vorliegenden Artikels soll die Entwicklung eines Mikroentgasers stehen, der in Hochdruck-Flüssigkeitschromatografen (englisch: High Performance Liquid Chromatography HPLC) eingesetzt wird.

## 2. Zielsetzungen, wichtigste Anforderungen

In der HPLC (vgl. Abb. 1) wird ein Lösungsmittelgemisch, der sogenannte Eluent, unter hohem Druck durch eine Trennsäule gepumpt. Vor der Trennsäule wird die zu untersuchende Probe in diesen Flüssigkeitsstrom injiziert. Die chemischen

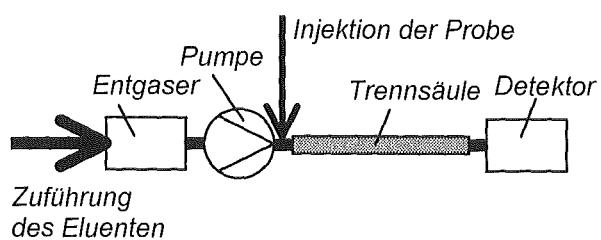


Abb. 1: Schematische Darstellung einer HPLC

Bestandteile der Probe passieren die Trennsäule unterschiedlich schnell, so dass eine Trennung stattfindet, und hinter der Säule werden die enthaltenen Inhaltsstoffe anhand der Zeit identifiziert, zu der sie einen Detektor passieren.

In der Regel ist es nicht zu vermeiden, dass im Eluenten Gase aus der Luft gelöst sind, die die chemische Analyse stören. Gelöste Gase können bei den starken Druckänderungen in der Pumpe der HPLC Blasen bilden und zu einem unregelmäßigen Transport des Eluenten führen oder ihn ganz unterbinden. Außerdem werden im Eluenten enthaltene Gase, vor allem Sauerstoff, auch im Detektor nachgewiesen und stören so die Analyse.

Deshalb müssen Gase mit einem Entgaser aus dem Eluenten entfernt werden, bevor er in die Pumpe der HPLC gelangt. Der Entgaser darf dabei keinerlei chemische Bestandteile an den Eluenten abgeben, weil diese sonst die Analyse stören könnten. Da eine Vielzahl von Lösungsmitteln als Eluenten in der HPLC eingesetzt werden, sollte der Entgaser möglichst aus chemisch inerten Materialien bestehen, die auch keine Fremdstoffe abgeben.

Das Totvolumen des Entgasers (Volumen des im Entgaser enthaltenen Eluenten) sollte möglichst klein sein, damit ein Eluent in kurzer Zeit gegen einen anderen ausgetauscht werden kann, und die Entgasungsleistung bei maximalem Durchfluss sollte mindestens einer Extinktionsdifferenz von 200 mAU entsprechen. Außerdem sollten die Herstellungskosten natürlich gering gehalten werden.

### 3. Stand der Technik

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Eluenten für HPLC-Geräte zu entgasen. Edelgase, die die gelösten Luftgase verdrängen, können durch den Eluenten geleitet werden, der Eluent kann durch Erhitzen oder mit Ultraschall entgast werden und die gelösten Gase können durch ein Vakuum aus dem Eluenten entfernt werden. Die Verwendung eines Vakuums hat sich besonders bewährt, weil die Effizienz fast nicht von der Art des Lösungsmittels abhängt und keine zusätzlichen Medien wie z.B. Edelgase benötigt werden.

Um eine Entgasung mittels Vakuum zu erreichen, wird der Eluent durch ein Bündel parallel verlaufender Kapillarschläuche geleitet und das Volumen um die Schläuche herum wird evakuiert. Je dünner die Schläuche sind und je größer ihre Oberfläche ist, desto höher ist die Leistung des Entgasers. Die Schläuche bestehen üblicherweise aus Polytetrafluorethylen (PTFE), das sich durch seine chemische Inertheit auszeichnet. Es sind mehrere 1,5 m lange Schlauchbündel zusammengefasst, die in einer Vakuumkammer von ca. 0,2 l

untergebracht werden. Die Dicke der Schlauchwände kann dabei aus technischen Gründen nicht unter 100 µm verringert werden. Das Totvolumen eines solchen Entgasers beträgt etwa 12 ml. Eine weitere Reduktion des Totvolumens und des insgesamt benötigten Raumes für den Entgaser erscheint mit dem bisherigen Fertigungsverfahren nicht mehr möglich.

### 4. Theoretische Grundlagen für den Mikroentgaser

In dieser Situation bot es sich an zu untersuchen, ob mit den neuen Fertigungsmethoden der Mikrosystemtechnik Mikroentgasen mit geringerem Totvolumen und Platzbedarf hergestellt werden können. Bei Agilent Technologies wurde ein völlig neues Konzept für einen Entgaser entworfen. Für die Realisierung bot sich das im Forschungszentrum entwickelte AMANDA-Verfahren an, bei dem nur wenige Mikrometer dünne Membranen auf Gehäuse übertragen werden, die preisgünstig durch Mikroabformung hergestellt werden [4, 5].

Abb. 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau des neuen Mikroentgasers [6]. Der Eluent wird über eine dünne Membran aus PTFE geleitet, die für Gase zehnmal durchlässiger ist als für Flüssigkeiten. Ein Vakuum auf der gegenüberliegenden Seite

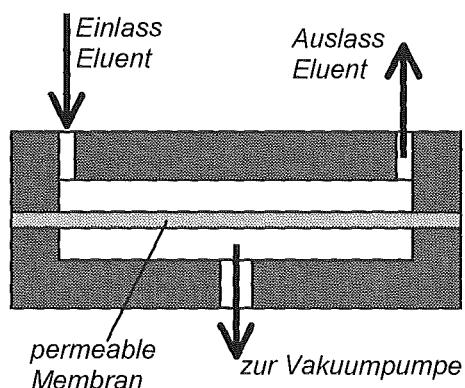


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau des entwickelten Entgasers

der Membran saugt die im Eluenten enthaltenen Gase durch die Membran ab.

Die Diffusionsgeschwindigkeit durch die Membran hindurch ist umgekehrt proportional zur deren Dicke. Deshalb kann der gesamte Entgaser verkleinert werden, wenn es gelingt, die Dicke der Membran zu reduzieren.

### 5. Entwicklung

Die Entwicklung im Forschungszentrum konzentrierte sich deshalb gleich auf die Methoden zur Fertigung dünner Membranen, wie sie für das

AMANDA-Verfahren eingesetzt werden. Schon nach relativ kurzer Zeit zeigte sich, dass nur 3 bis 5 µm dünne Membranen aus PTFE hergestellt und auf Rahmen übertragen werden können. Die Versuche mit diesen Membranen bestätigten dann, dass sie für die vorgesehene Aufgabe sehr gut geeignet sind. Die Permeabilität für Gase kommt teilweise durch nur ca. 200 nm große Öffnungen in den Membranen zustande, die bei der Herstellung entstehen (vgl. Abb. 3) und wird darüber hinaus auf eine Diffusion durch das Membranmaterial selbst zurückgeführt.

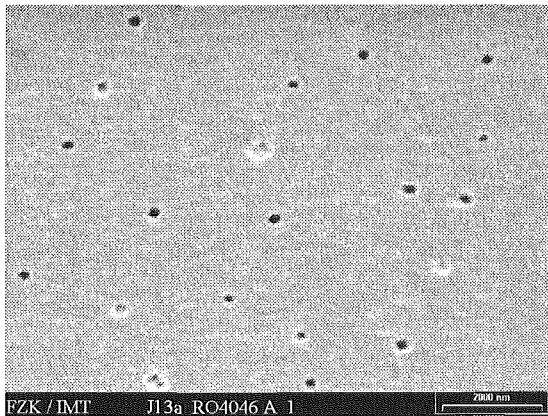


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer PTFE-Membran. Die nur ca. 200 nm großen Poren lassen Gase wesentlich leichter passieren als Flüssigkeiten.

Sehr dünne Membranen aus einem so weichen Werkstoff wie PTFE müssen an dicht liegenden Auflagepunkten unterstützt werden, wenn sie nicht schon durch geringe Belastungen beschädigt werden sollen. Für die Entgasung ist ein Druckabfall von mehreren hundert hPa über der Membran notwendig, sodass eine geeignete Abstützung unvermeidlich ist. Sie wurde zunächst mit einer Glasfritte realisiert, die eine mittlere Porenweite von nur 16 µm aufwies.

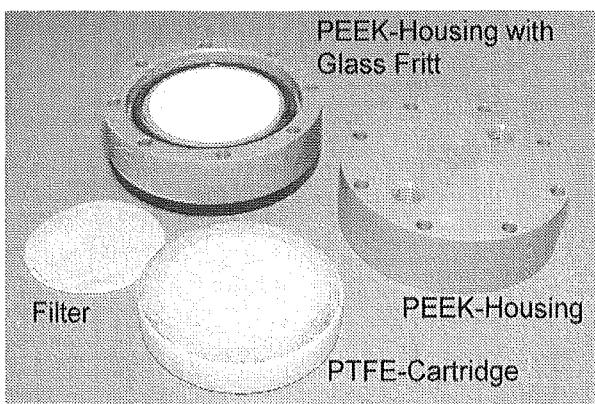
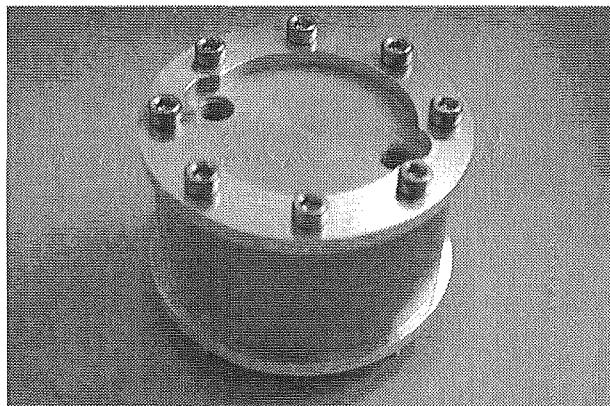


Abb. 4: Erstes funktionstüchtiges Muster des neu entwickelten Mikroentgasers. Links: die einzelnen Komponenten und rechts das zusammengebaute Muster. Der Außendurchmesser des Mikroentgasers beträgt 50 mm.

Das Design des Gehäuses hat einen wichtigen Einfluss auf die Funktion des Entgasers. Insbesondere hängt die Leistung von der Höhe der Kammer ab, durch die der Eluent fließt. Die gelöste Luft muss durch den Eluenten zur Membran hin diffundieren, damit sie dort abgepumpt werden kann. Ist die Kammer zu hoch, so wird der Diffusionsweg zu lang, was sich ungünstig auf die Entgasungsleistung auswirkt. Bei einer zu flachen Kammer kann es andererseits geschehen, dass der Eluent bei vorgegebener Fließgeschwindigkeit nicht lange genug über der Membran verbleibt, um ausreichend entgast zu werden. Diese Zusammenhänge sind ausgesprochen komplex und lassen sich deshalb nicht mit einfachen Gleichungen beschreiben. Deshalb wurden FEM-Berechnungen durchgeführt, mit deren Hilfe die optimale Kammerhöhe ermittelt wurde [6].

Für die Verbindung von Gehäuse und Membran wurde ein Schweißverfahren entwickelt, damit keine Klebstoffe verwendet werden müssen, deren Bestandteile die chemische Analyse in der HPLC hätten stören können [6]. Die Gehäuse wurden aus PTFE hergestellt, das feinwerktechnisch bearbeitet wurde. Dazu wurde die Membran zunächst auf einen Hilfsrahmen übertragen und dann mit einer Thermoode, die die Form der geplanten Verbindungsfläche hatte, bei erhöhter Temperatur auf das Gehäuse gedrückt. Eine ringförmige Folie aus FEP, die zwischen der Membran und dem Gehäuse platziert worden war, wurde durch die erhöhte Temperatur weich und stellte die feste und dauerhafte Verbindung her.

Abb. 4 zeigt ein erstes funktionsfähiges Muster des Mikroentgasers. Anhand dieses Musters wurde die prinzipielle Funktion nachgewiesen, bevor die weitere Entwicklung des Mikroentgasers und des Fertigungsverfahrens beim jetzigen Produzenten, der Firma STEAG microParts begann.



Die Membran dieses Musters hat einen Durchmesser von 25 mm und wurde zusammen mit einem Filter direkt auf eine Glasfritte gelegt, unterhalb derer ein Vakuum erzeugt wurde. Ein äußeres Gehäuse, das aus PEEK spritzgegossen wurde, nahm die PTFE-Kammer mit der aufgeschweißten Membran auf und diente dem Anschluss an die Außenwelt.

## 6. Industrielle Herstellung bei STEAG microParts und Agilent Technologies

Die Produktion der Mikroentgaser findet bei STEAG microParts in Dortmund statt. Weitergehende Untersuchungen zeigten, dass es günstiger ist, die PTFE-Membranen fertig zu kaufen, als sie selbst herzustellen. Statt eine Glasfritte zu verwenden, wird eine mikrostrukturierte, spritzgegossene Fritte aus PTFE mit verwendet, mit der sich eine größere Fertigungsausbeute erzielen lässt. Rechts in Abb. 5 ist eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer solchen Fritte zu sehen, bei der Pyramidenstümpfe, die in einem Abstand von 100 µm voneinander stehen, die Membran des Mikroentgasers unterstützen. Zur Zeit der Drucklegung dieses Artikels

sind 30 Mikroentgaser mit jeweils 4 parallelen Kanälen erfolgreich in der Dauererprobung.

Die mit diesen Mikroentgasern erreichbare Leistung entspricht einer Extinktionsdifferenz von 200 mAU und entspricht damit derjenigen der bisherigen Entgaser. Das Totvolumen ist allerdings mit 1 ml um einen Faktor 12 geringer. Damit kann der Wechsel von einem Eluenten auf einen anderen innerhalb von 2,5 Minuten vollzogen werden, während er bisher mindestens 30 Minuten benötigte und mit mehr Aufwand für die Handhabung verbunden war. Die äußeren Abmessungen des Mikroentgasers betragen nur noch  $130 \cdot 59 \cdot 23 \text{ mm}^3$ . Das entspricht einer Verminderung des Platzbedarfs um einen Faktor 2,5. Damit ist es sogar denkbar, ihn zum integralen Bestandteil der Pumpe einer HPLC zu machen.

Die Markteinführung ist zunächst als eigenständiges Modul geplant, damit ältere HPLC-Geräte mit den neuen Entgasern nachgerüstet werden können.

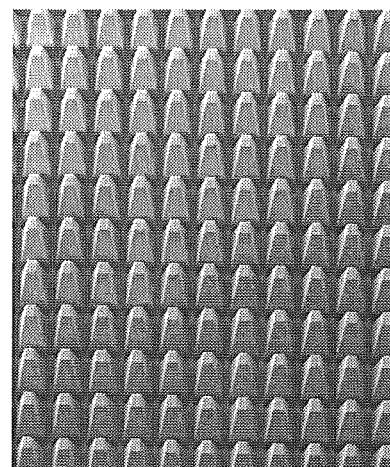
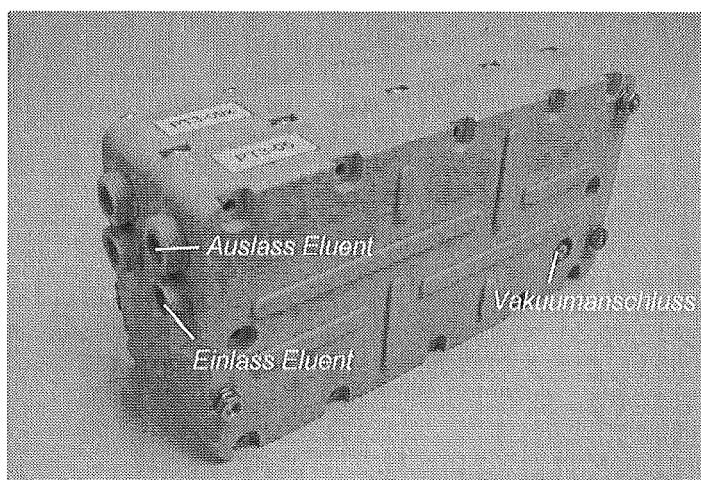


Abb. 5: Zwei zu einem System gekoppelte Mikroentgaser (links) und mikrostrukturierte Fritte aus PEEK.

## Literatur

- [1] Manz, A.; Gruber, N.; Widmer H.M., "Minaturized Total Chemical Analysis Systems: A Novel Concept for Chemical Sensing", Sensors and Actuators B **1** (1990) 244 – 248
- [2] Müller, C.; Mohr, J.; „Microspectrometer fabricated by the LIGA-Process“, ISR-Interdisciplinary Science Reviews 18 (1993) 273 - 279
- [3] Büstgens, B.; Bacher, W.; Bier, W.; Ehnes, R.; Maas, D.; Ruprecht, R.; Schomburg, W.K.; Keydel, L., "Micromembrane Pump Manufactured by Molding", Proceedings der 4th International Conference on New Actuators, Actuator'94, Bremen, 1994, 86 - 90
- [4] Schomburg, W.K.; Ahrens, R.; Bacher, W.; Martin, J.; Saile V., "AMANDA – Surface Micromachining, Molding, and Diaphragm Transfer", Sensors and Actuators A **76** (1999) 343 - 348
- [5] Schomburg, W.K., „Fertigung marktgerechter mikrofluidischer Systeme mit dem AMANDA-Verfahren“, in diesem Band
- [6] Rummler, Z.; Bacher, W.; Saile, V.; Schomburg, W.K., "Mass Separation Using Thin PTFE Membranes", DTM'99

# SAW Sensorsystem: Gemeinsame Entwicklung, Know-How-Transfer, Marketingstrategie und neue Anwendungen

Heinz Töpfer <sup>1)</sup>, Michael Rapp <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Bürkert GmbH & Co. KG, Großröhrsdorf

<sup>2)</sup> Institut für Instrumentelle Analytik

## Zusammenfassung

Dieser Bericht beschreibt den Werdegang einer erfolgreichen Industriekooperation des Projektes Mikrosystemtechnik mit der Firma Bürkert GmbH & Co. KG. Gegenstand war die gemeinsame Entwicklung von Sensorsystemen zur Detektion organischer Gase und Gasgemische auf der Basis von Polymer-beschichteten „Surface Acoustic Wave“ (SAW) – Sensoren. Über das daraus entstandene Sensorsystem „SAGAS“ wurde an dieser Stelle bereits mehrfach berichtet [1-2].

Basierend auf einer im Forschungszentrum entwickelten Kerntechnologie, einem Array aus acht unterschiedlich beschichteten SAW-Sensoren und deren elektronischer Ansteuerung sowie Datenauswertung, wurde bei Bürkert ein marktfähiges analytisches Sensorsystem mit dem Namen "GASYS" entwickelt, das sich flexibel für die verschiedensten Anwendungen anpassen lässt. Mit Hilfe einer gemeinsamen Vermarktungsstrategie wurden diese Sensorsysteme bei speziellen Kunden für verschiedene Meßaufgaben zugeschnitten. So konnten verschiedene Überwachungsaufgaben und auch quantitative Analysen einzelner Komponenten in Gasgemischen für die automatische Prozeßsteuerung in explosionsgeschützten Produktionsbereichen realisiert werden. In dieser Präsentation werden die grundlegende Funktionsweise und die derzeitige Leistungsfähigkeit dieser Systeme anhand einiger Beispiele aus der Praxis dargestellt.

## 1. Vorbemerkung

Die Fa. Bürkert kooperiert mit dem FZK seit dem Jahr 1987. Die erste Thematik der Zusammenarbeit war auf den Bereich der Mikrosystemtechnik fokussiert. Von 1987 bis 1990 und von 1991 bis 1994 waren dazu die Herren Dr. Kowanz und Dr. Kalb, als Bürkertmitarbeiter mit Arbeitsort FZK, im Bereich der Mikrosystemtechnik tätig. Sie beendeten ihren Aufenthalt mit dem Abschluß der Dissertation und waren danach in der Forschung und Entwicklung der Bürkert-Werken tätig.

Zum Thema SAW-Gassensorik wurden 1994 die ersten fachlichen Kontakte, aufbauend auf die positiven Erfahrungen bei der 7jährigen Zusammenarbeit zwischen FZK und Bürkert, aufgenommen.

Für die zu diesem Forschungs- und Entwicklungsthema vereinbarte Zusammenarbeit wurde 1995 vom FZK in Abstimmung mit Bürkert Herr Dr. Reibel im FZK eingestellt und von Bürkert finanziert, um einerseits den Know-how-Transfer vorzubereiten und andererseits aktiv bei der Weiterentwicklung der Sensorik mitzuwirken [2-8]. Nach 3 Jahren Tätigkeit am FZK und gelungenem Brückenschlag zu Bürkert nahm Dr. Reibel dann als Spezialist für den Einsatz der SAW-Sensoren seine Arbeit bei Bürkert auf.

## 2. Motivation für die Kooperation

Als Motivation für die Kooperation zwischen Bürkert und FZK lassen sich folgende Gesichtspunkte nennen:

- die Weiterverfolgung, die Überführung, die Umsetzung und der Ausbau neuer Ideen, Konzepte, Lösungen und Technologien für neue Produkte und
- die Nutzung hochspezialisierten Fachwissens und Erfahrungen von Fachleuten verschiedener Wissenschaftsgebiete und Anwendungsbereiche für die Lösung unterschiedlicher Probleme von Grundsatzfragen bis zu Detailaufgaben.

Das Blockschaltbild (Abb. 1) des SAW-Sensors unterstreicht die Aussage, daß Aufgaben zu unterschiedlichen Problemen für Hard- und Softwarefragen zu lösen sind, wie:

- Fluidtechnik: Beprobung des Sensors, d.h. externe und interne Zufuhr des zu detektierenden Fluides; Spülung des Sensors mit einem neutralen Gas oder mit Umgebungsluft

- Sensortechnik: Auswahl und Beschichtung des Sensors, Anregung des Sensors und seine Thermostatisierung
- Steuerungstechnik: Elektronische Steuerung des gesamten Meßablaufes
- Auswertetechnik: Verfahren, Hard- und Software für die Aufgaben der Datenverarbeitung sowie für die qualitative und quantitative Datenauswertung.
- Die Möglichkeit in der Wissenschafts- und Forschungskooperation „Alles aus einer Hand“ zu bekommen, hängt allerdings von einer guten internen Kooperation beim Forschungspartner ab.

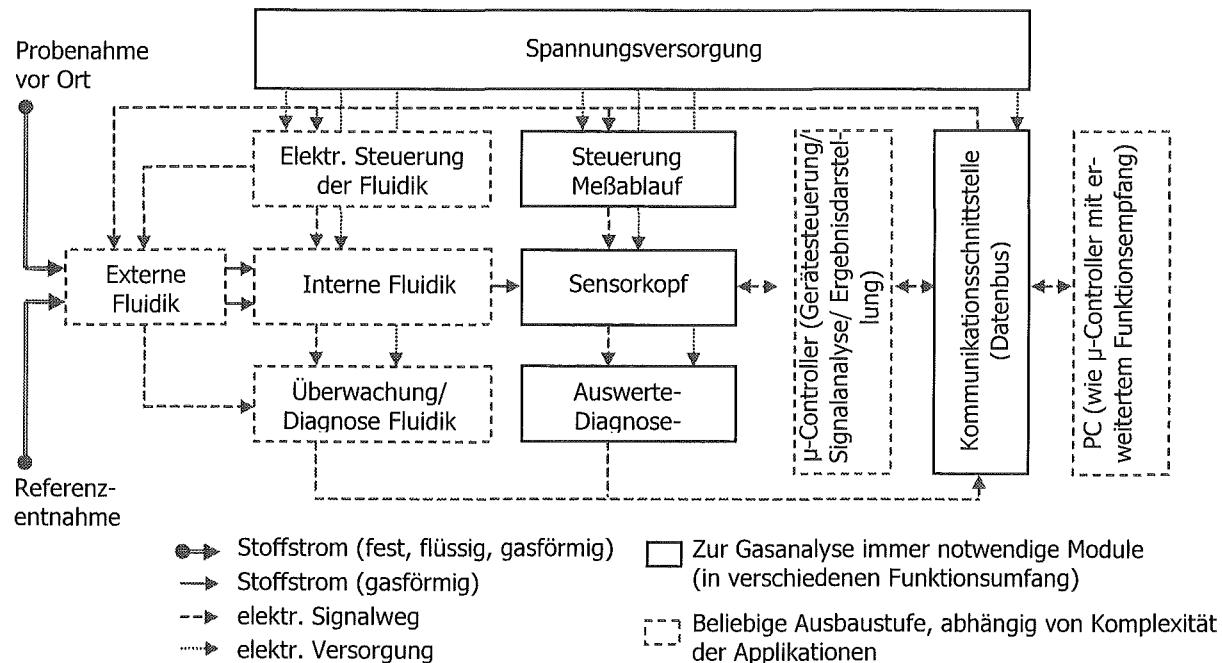


Abb. 1: Blockschaltbild Gas-Sensor-System GASYS

### 3. Form der Kooperation

- Langfristig orientierte Vorbereitung der Firmenmitarbeiter durch den Forschungspartner als Träger für den Know-How-Transfer.
- Integration des Transferträgers (Firmenmitarbeiter) in das Forschungsteam, was neben der Entwicklung persönlicher Beziehungen auch die „Gemeinsamkeit von Institut-Industrie“ wesentlich gefördert hat.
- Unterstützung der Phase des Überganges zur schrittweisen Eigenständigkeit der Industrie und Sicherung der weiteren Zusammenarbeit im Sinne der ständigen „Produktpflege“ unter besonderer Beachtung der Weiterentwicklung und Vermarktung der Forschungsergebnisse.
- Erarbeitung einer gemeinsamen Strategie zur marktorientierten Entwicklung im Sinne einer modularen Gerätetechnik (Abb. 1), um auf die

vielfältigen Kundenwünsche flexibel reagieren zu können.

- In Abb. 2 sind zwei typische Varianten von Geräteausführungen dargestellt, die die Entwicklung von einem vor Ort – auch im Exschutzbereich – einsetzbaren Gerät bis zu einer verkleinerten, konsequent modular aufgebauten Gerätevariante aufzeigen.
- Die Kooperation muß auch sicherstellen, daß die Mitarbeiter des FZK möglichst nahtlos und schnell über alle wichtigen Anwendungsprobleme informiert werden, um so über den Erfahrungsrückfluß auf die partielle Weiterentwicklung Einfluß nehmen zu können. Das bedeutet für die Zukunft ein Engagement des Forschungspartners auch nach dem Vertragsablauf im Sinne der „forschungsorientierten Produktpflege“.

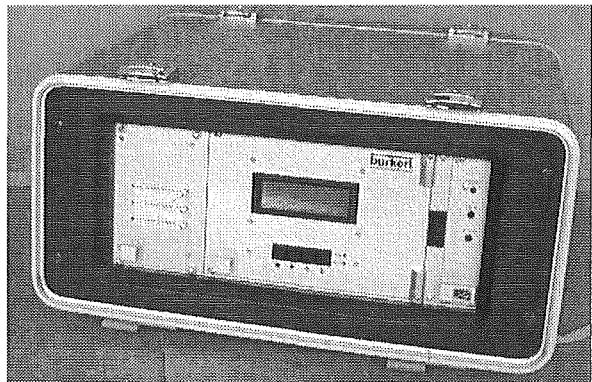
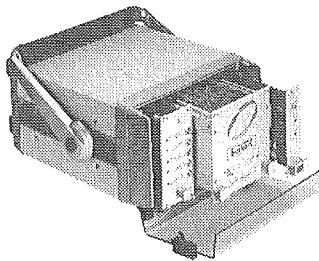


Abb. 2: Beispiele für Ausführungsvarianten von GASYS-Geräten

#### 4. Zusammenarbeit auch bei der Vermarktung

- Die Vermarktung bereitet auch wegen der Aktualität der Gassensorik nicht geringe Probleme, weil in einem relativ kurzen Zeitraum bis zu 20 „Anbieter“ auf dem Markt auftraten, die eine enorme Anwendungsbreite prognostizieren und durch Verbreitung sehr verführerischer Begriffe wie „künstliche Nase“, „elektronische Nase“ auf dem Markt praktisch nicht erfüllbare Hoffnungen wecken, mit denen sich solide Anbieter zunehmend konfrontiert sehen.
- Der konkrete Einsatz der entwickelten Geräte vollzieht sich in der Regel nicht in der Markt-kategorie des einfachen Komponentenverkaufs, sondern der Absatz ist praktisch immer mit einem teilweise erheblichen Beratungs- und Projektierungsaufwand einschließlich ex-perimenteller Arbeiten am Einsatzort sowie der Nachbetreuung der Kunden verbunden.
- Häufig ist dem Kunden die Aufgabenstellung bzw. das Ziel der Messung nicht völlig klar und die Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Prinzipien der Gasanalyse werden nicht selten überschätzt. In vielen Anwendungsfällen sind erst nach intensiven Kundenkontakten und experimentellen Untersuchungen vor Ort klare Aussagen zur Lösung einer konkreten Aufgabe möglich.
- Durch die enge Kopplung zwischen Bürkert und dem FZK werden nicht nur die Probleme der Fertigung und Anwendung, sondern auch die objektive Marktinformation hilfreich gefördert.

#### 5. Zu einigen Anwendungsbeispielen

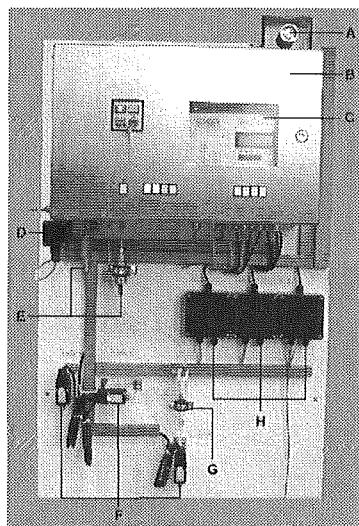
Für das Gas-Sensor-System GASYS gibt es ein weites Spektrum neuer Aufgaben und Einsatzbereiche, wie z. B. der Nachweis von Emissionen,

die Überwachung, Sicherung und Optimierung von Anlagen und Prozessen.

##### ⇒ GASYS-Anlage für den EEx-Bereich zur Überwachung der Eluentzusammensetzung von Lösungsmittelgemischen für die HPLC

Bei der präparativen HPLC (High Pressure Liquid Chromatography) bestand bei einem Anwender das Problem der Überwachung der jeweils aktuellen Zusammensetzung binärer bzw. ternärer Lösungsmittelgemische (Eluentzusammensetzung). Zur Lösung dieses Problems wurde eine GASYS-Anlage ausgewählt. In einem Gemeinschaftsprojekt wurde

eine Anlage mit einer speziellen Probennahme entwickelt, die für den Einsatz in Ex-Bereichen zugelassen ist (siehe Abb. 3 und 4). Die Auswertung der Sensordaten erfolgt in dieser Anwendung mit neuronalen Netzen und erzielte bei Testmessungen weitgehend die gestellten Forderungen hinsichtlich Meßgenauigkeit. Inzwischen hat diese Anlage eine ausführliche Validierungsprozedur ebenfalls erfolgreich bestanden [7,8].



A: Steuereinheit für EEx-Gehäuse  
 B: EEx-Gehäuse  
 C: SAW-Sensorsystem  
 D: Ventilweiche  
 E: Flammendurchschlagssicherungen  
 F: EEx-Ventile (externe Beprobung)  
 G: Probenkammer  
 H: EEx-Klemmkästen für Datenleitungen

Abb. 3: EEx-sichere GASYS-Anlage zur Bestimmung der Zusammensetzung einfacher Lösungsmittel gemische.

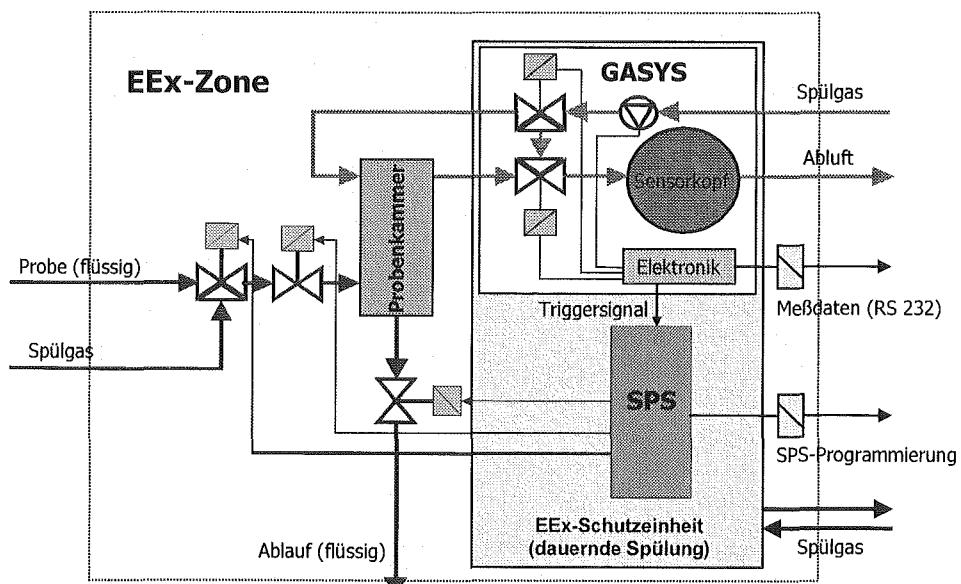


Abb. 4: Aufbauschema der in Abb. 3 gezeigten Anlage.

⇒ **Visualisierung des Reinigungsprozesses in einer Dekontaminationsanlage für Schutanzüge**

In diesem Anwendungsbeispiel ist das GASYS-Sensorsystem in eine transportable Anlage (Abb. 5) zur Dekontamination von Schutanzügen (Feuerwehren, Katastrophenschutz, usw.) integriert (siehe Abbildung). Diese Anlage reinigt bei einem Einsatz durch

Chemikalien kontaminierte Schutanzüge direkt vor Ort. Das Sensorsystem hat dabei die Aufgabe die Anwesenheit flüchtiger Verunreinigungen zu überprüfen und gegebenenfalls den Fortgang der Reinigungsprozedur zu visualisieren. Die gleichzeitige Verwendung mehrerer unterschiedlicher Beschichtungen (Sensorarray) wirkt sich insofern vorteilhaft aus, daß eine sehr breite Palette möglicher Verunreinigungen erfaßt werden kann.

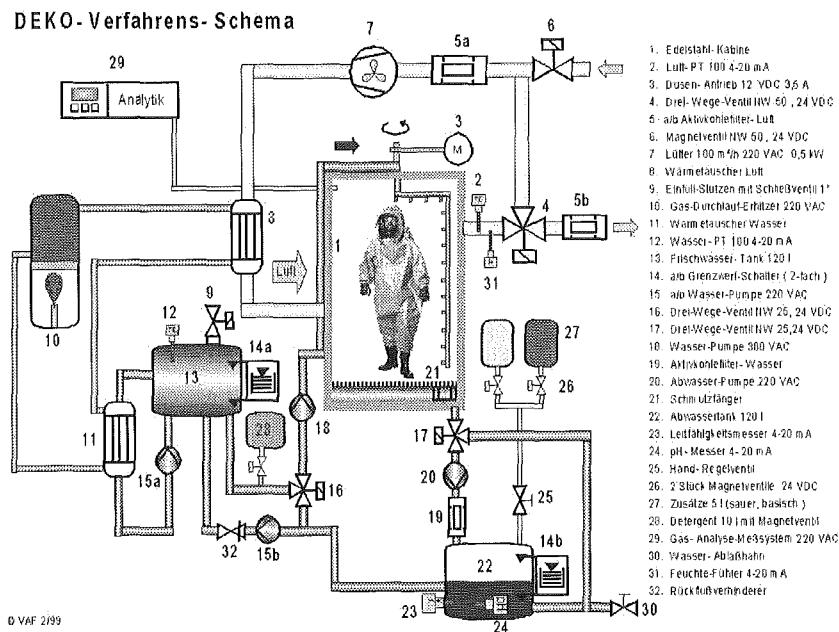


Abb. 5: Anlage zur Dekontamination von Schutanzügen.

#### ⇒ Prozeßkontrolle in chemischen Reinigungsanlagen

Im Falle von chemischen Reinigungsmaschinen soll Gasys zur Überwachung der Konzentration des Reinigungsmittels (z.B. Tetrachlorethylen) während des Reinigungsvorgangs und zur Bestimmung des Zeitpunktes

#### ⇒ Online-Überwachung von Erdgassonden

Die Anforderungen an die Überwachung bei der Förderung von Erdgas resultieren einerseits aus sicherheitstechnischen Aspekten, andererseits aus Gründen der Umweltbelastung für die Bevölkerung, besonders bei Sauergas, das bis zu 20% H<sub>2</sub>S enthalten kann. Dazu sind Undichtigkeiten durch Leckage o-

der Freigabe zur Trommelöffnung durch das Bedienpersonal eingesetzt werden. Zur Auswertung genügt hier prinzipiell zwar ein Sensorsignal, die übrigen Sensoren liefern jedoch willkommene Redundanzen und Zusatzinformationen über die Anwesenheit weiterer Komponenten (z.B. Feuchtegehalt) im Trommelfolumen.

der andere Störungen an den Sondenplätzen (Abb. 6) (Abmessungen von 60 m x 60 m) zu beachten. Probleme bereitet hier z. B. die Probenentnahme über die großen Flächen sowie der Einfluß von Störungen durch Umweltsignale z. B. durch Güllegabe auf naheliegenden Feldern. Hier erweist sich die relativ große Selektivität des SAW-Prinzips auf der Basis der Mustererkennung über neuronale Netze als gut geeignet.

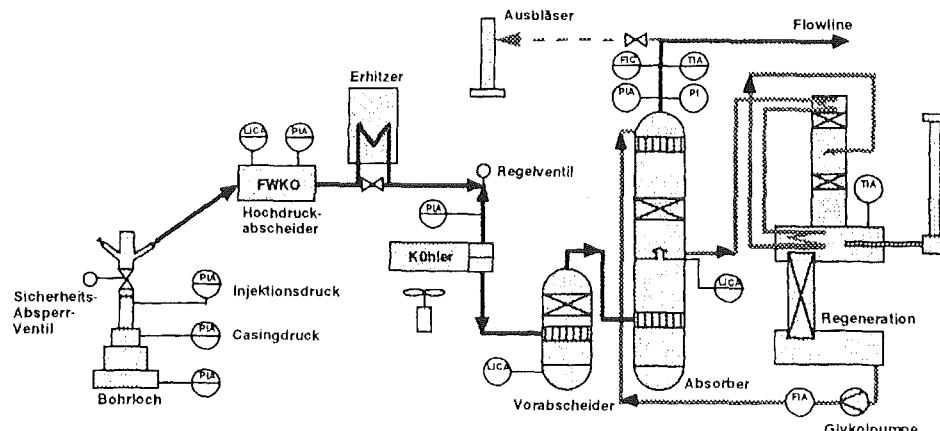


Abb. 6: Aggregate / Aggregatgruppen eines Sondenplatzes

## Literatur:

- [1] Rapp, M., Balzer, M., Böß, B., Coerd, W., Fromhein, O., Kühner, T., Stier, S., Voigt, A.: *Analytisches Mikrosystem auf der Basis von Surface Acoustic Wave Bauelementen*, 2. PMT-Statuskolloquium, 28. – 29. Nov. 1995, wissenschaftlicher Bericht FZKA 5670.
- [2] M. Rapp, J. Reibel, A. Voigt, O. Bülow, *Schnelle und flexible Gasanalytik mit masse-sensitiven Sensorarrays für die Qualitäts- und Prozeßkontrolle*, 3. PMT-Statuskolloquium, 2. – 3. April 1998
- [3] Rapp, M., Reibel, J.: *Gasanalytik mit Sensorsystemen: Ein Weg zur elektronischen Nase?*, Nachr. Chem. Tech. Lab. 44 (1996), S. 1088 – 1092
- [4] Rapp, M., Reibel, J., Stier, S., Voigt, A., Bahlo, J.: *SAGAS: Gas Analyzing Sensor Systems Based on SAW Devices – an Issue of Commercialization of SAW Sensor Technology*, Proc. of the IEEE Frequency Control Symp. 1997, S. 129 – 132.
- [5] Rapp, M.; Reibel, J.; Voigt, A.; Balzer, M.; Bülow, O., *New Miniaturized SAW-Sensor Array for Organic Gas Detection Driven by Multiplexed Oscillators*, Proceedings of the 7th Int. Meeting On Chemical Sensors, Beijing 1998, Sensors and Actuators, B, in press.
- [6] J. Reibel, U. Stahl, T. Wessa, M. Rapp: *Gas Analysis with SAW Sensor Systems*, Proceedings of the 7th Int. Meeting On Chemical Sensors, Beijing 1998, Sensors and Actuators, B, in press.
- [7] T. Wessa, S. Küppers, G. Mann, M. Rapp, J. Reibel, *On-line monitoring of process HPLC by sensors*, Organic Process Research & Development, submitted
- [8] T. Wessa, S. Küppers, M. Rapp, J. Reibel: *Validation of an industrial analytical sensor procedure realized with a SAW based sensor-system*, Sensors & Actuators B, special issue of Göpel in memoriam, submitted soon

# Heißprägen als Technologie für Produktion und Entwicklung

U. Heim <sup>1)</sup>, M. Heckele <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> JENOPTIK Mikrotechnik GmbH, Jena

<sup>2)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Das Heißprägen ist neben dem Mikrospritzgießen eines der Verfahren zur Herstellung von Mikrobauteilen, das in letzter Zeit vor allem bei der Herstellung von mikrostrukturierten Polymeroberflächen zunehmend Beachtung findet. Dabei kommt es nicht nur auf die Verfügbarkeit einer entsprechenden Anlagentechnik an, sondern auch darauf, kostengünstige Verfahren zur Herstellung von Prototypen und Kleinserien zur Verfügung zu stellen.

Im folgenden wird auf die Spezifika der Technologie und der Anlagentechnik insbesondere auch unter dem Gesichtspunkt der Einführung des Verfahrens in die Großserien- und Massenproduktion eingegangen. Es wird gezeigt, dass unter Beachtung bestimmter Randbedingungen das Heißprägen über technische und wirtschaftliche Merkmale verfügt, welche es zu einem produktionstauglichen Verfahren qualifizieren.

## 1. Das Heißprägeverfahren

### 1.1 Prinzip

Das Heißprägen von Polymeren ist eine schon lange bewährte Replikationstechnologie, bei dem eine Struktur von einem Master (Formeinsatz) mehrfach reproduzierbar auf ein Halbzeug unter Anwendung von Druck und Temperatur übertragen wird [1]. Dabei werden diese Parameter so variiert, dass der eigentliche Prägeprozess bei Temperaturen über dem Erweichungspunkt ( $T_g$ ) des Halbzeugs stattfindet und der Formeinsatz bis zur vollständigen Erstarrung des Halbzeugs im Eingriff verbleibt. Die Entformung findet dann im kalten Zustand statt. Ein typischer Prozessablauf für das Heißprägen von Mikrostrukturen mit einem vollständigen Temperatur- und Kraftzyklus ist in gezeigt.

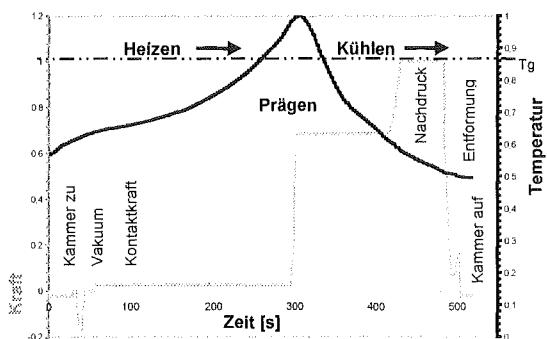


Abb. 1: Typischer Prozessablauf beim Heißprägen. Exakte Abstimmung von Temperaturverlauf bezüglich Kraftverlauf ist unabdingbar für präzise Abformergebnisse.

Für die Fertigung eines Mikrobauteils ist der Heißprägeprozess nur ein Schritt. Wie dieser in eine mögliche Gesamtprozessabfolge eingebunden ist, zeigt Abb. 2 am Beispiel einer mikrofluidischen Komponente. Erst die Be- trachtung eines solchen Gesamtprozesses lässt eine Beurteilung, auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, zu.

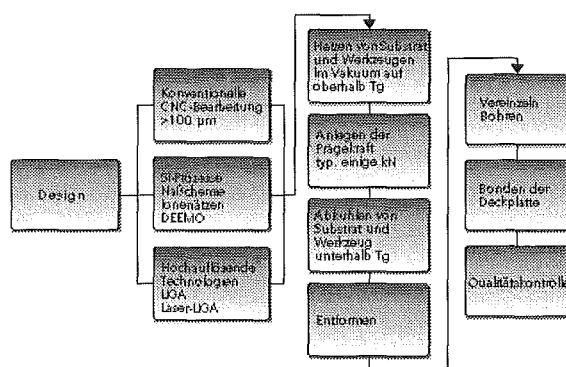


Abb. 2: Vom Design zum Bauteil. Die richtige Auswahl des geeigneten Werkzeugs und die Bestimmung optimaler Prägeparameter sind unverzichtbar für einen, auch ökonomisch sinnvollen, Gesamtprozess.

### 1.2 Anwendungsbeispiele

Mit dem Heißprägeverfahren lassen sich Strukturen vom Millimeter- bis hin zum Nanometermaßstab in Kunststoffe übertragen. Die gezielte Erzeugung von Oberflächeneffekten (Lotus-Effekt, Haifischhaut, etc.) ist ebenso

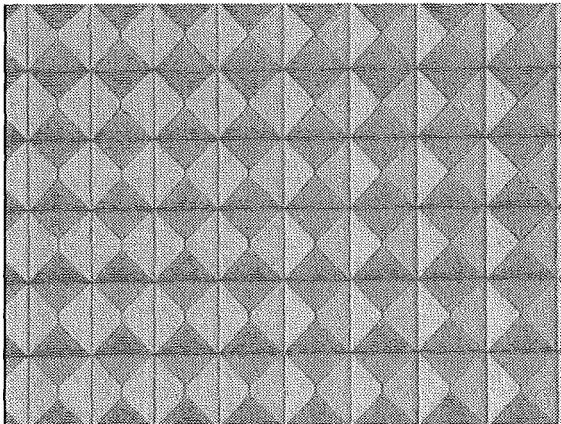


Abb. 3: Großflächige Prismenstruktur für die Beleuchtungstechnik (die Basislänge beträgt ca. 65 µm).

möglich wie die Strukturierung von Datenbits für die nächsten Generationen optischer Speicher. Mikrofluidische Kanalstrukturen in einem weiten Bereich von Kanaltiefen und -breiten können genauso geprägt werden wie diverse optische Anwendungen. Beispiel dafür sind refraktive und diffraktive Elemente mit Strukturhöhen von einigen 100 nm bis zu mehreren Millimetern sowie großflächige Prismenarrays (Abb. 3) für die Display- und Beleuchtungstechnik. Gerade beim Prägen von optischen Komponenten ist es wichtig, dass im Vergleich zum Spritzguss extrem geringe innere Spannungen im Material erzeugt werden. Aber auch die Möglichkeit zur Strukturierung von dünnen Folien (Dicke < 100 µm), insbesondere für optische Anwendungen (Reflektorfäden etc.) interessant, ist besonders gut mit dem Heißprägeverfahren zu realisieren [2]. Schließlich eröffnen sich durch Sondertechniken wie dem Strukturieren von Sandwich-Aufbauten und dem beidseitigen Prägen weitere Anwendungsfelder in optischen und IT-Anwendungen.

Ein besonderer Vorteil der Heißprägetechnik ist die Replikation von Werkzeugen mit extrem großen Aspektverhältnissen (über 50 bei freistehenden Säulen) [3]. Als Beispiel soll hier ein innerhalb des BMBF-Verbundprojektes PROBE hergestellter Beschleunigungssensor dienen (Abb. 4).

### 1.3 Entwicklungsstand

Unter dem Gesichtspunkt der Flexibilität (kurze Umrüstzeiten und wenig Aufwand für eine Prozessanpassung) sowie der relativ geringen Kosten für die Herstellung von Formeinsätzen ist das Heißprägen derzeit äußerst attraktiv als Prototyping-Technologie im Bereich der Mikrostrukturierung.

Zykluszeiten von typisch 6 bis 9 min bei einem Temperaturhub von ca. 20 K werden erreicht.

Die Größe der bearbeitbaren Flächen ist von der Herstellbarkeit entsprechender Formeinsätze und der Qualität (Spannungsfreiheit, Schrumpfverhalten) der Substratmaterialien abhängig. Typisch für die Mikrostrukturierung sind derzeit Flächen von 100 mm Durchmesser bei Strukturdimensionen von einigen 10 µm und Aspektverhältnissen um 6.

Hohe Aspektverhältnisse (>10), große Strukturdichten bei steilen Seitenwänden (Gitter) sowie große laterale Abmessungen sehr dünner (typ. 10 µm) und hoher (> 500 µm) Strukturen erfordern eine sehr präzise Prozessführung und detaillierte Kenntnisse von Werkstoffdaten und thermodynamischen Prozessen. Die Entwicklung eines solchen Verfahrens bis zur Fertigungsreife ist eine typische Aufgabe für ein spezialisiertes Entwicklungslabor.

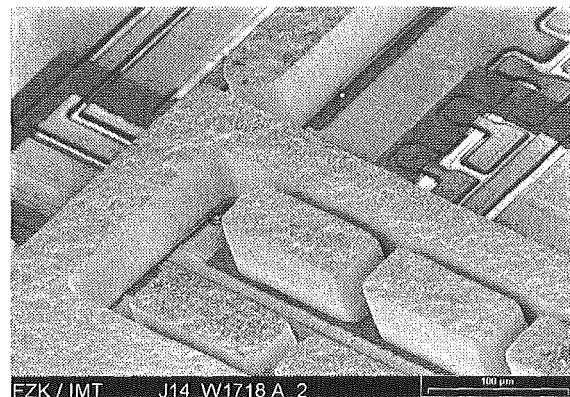


Abb. 4: Nickelmikrostruktur auf CMOS-Wafer als Beispiel für eine verlorene Kunststoffform [4] (positioniert abgeformt auf vorstrukturiertem Substrat).

### 1.4 Prozessanforderungen

Um die Heißprägetechnik im Vergleich zu den Spritztechnologien wirtschaftlich attraktiver zu gestalten ist eine Optimierung der Zykluszeiten hin zu 1 bis 2 min bei gleichzeitiger Erhöhung der Prägefäche (ca. 1 m<sup>2</sup>) erforderlich. Ohne diese Entwicklung lassen sich die technischen Vorteile des Prägeprozesses nicht am Markt durchsetzen [5].

Zwar bietet die Palette der thermoplastisch verarbeitbaren Kunststoffe eine Vielzahl von Möglichkeiten Mikrobauteile für die vielfältigsten Einsatzzwecke herzustellen. Aber eine Erweiterung dieser Materialauswahl hin zu höher-schmelzenden Kunststoffen sowie Gläsern und Metallen ist wünschenswert. Dazu sind jedoch Temperaturen von bis zu 700°C notwendig, die derzeit nur im Labormaßstab beherrscht werden.

Schwerpunkt und derzeit das am meisten interessierende Problem der gesamten Mikroreplikationstechnik ist jedoch die Formeinsatzherstellung [6]. Hier sind noch erhebliche Anstrengungen notwendig, um bestehende Verfahren, angefangen bei der LIGA-Technik bis hin zur Erosion und spanenden Bearbeitung, entsprechend den Bedürfnissen der Mikroreplikationstechnik zu qualifizieren. Wichtige Kenngrößen sind hier Standzeiten, Oberflächenqualitäten, Trennverhalten, chemische Modifikation von Oberflächen, Strukturtreue u.a.m..

## 2. Anlagentechnik

### 2.1 Technische Spezifikationen

Erste Versuche zur Nutzung des Heißprägeverfahrens fanden verbreitet mit Eigenbauten entsprechender Forschungslabore statt. Dabei wurden wesentliche Anforderungen an solche Prägeanlagen erarbeitet. Erst die Notwendigkeit, Mikrostrukturen für Industrikunden in einer Kleinserie zu fertigen, macht die Entwicklung einer Heißprägeanlagen als Fertigungsanlage notwendig. Die grundlegenden Forschungsarbeiten am IMT ermöglichen es in Kooperation mit JENOPTIK Mikrotechnik erste, für Fertigungszwecke einsetzbare zu bauen[7]. Dieser Prototyp einer Heißprägeanlage wurde bis heute für die verschiedensten Anwendungen weiterentwickelt. Unter anderem entstand innerhalb des Verbundprojektes PROBE der Prototyp einer Heißprägeanlage mit integriertem Überdeckungssystem, wie er heute unter der Bezeichnung HEX 03 weiterentwickelt und verkauft wird. (Abb. 5)

Eine solche Anlage verfügt über eine hochpräzise elektrische Presse (Wegauflösung <<1µm, Kraftauflösung einige N bei Maximalkraft 200 KN, Genauigkeit <<1% vom Endwert), an welche Druckplatten (Arbeitsdurchmesser 125 mm) mit einem komplexen Heiz- und Kühlssystem angeschlossen sind. Temperierungen von bis zu 320°C auf 0,5K genau sind damit möglich. Die Anlage verfügt über ein optionales Überdeckungssystem, mit dem auf 10µm genau justierte Prägungen möglich sind und über ein Vakuumsystem, welches das Prägen unter Vakuum (unverzichtbar für die exakte Replikation hoher Mikrostrukturen) gestattet. Die umfangreiche Steuerungssoftware ermöglicht den Zugriff auf alle Maschinenparameter und damit die Optimierung jedweder möglicher Prozesse.

Mit einer solchen Anlage können sehr leicht Technologiemodifikationen erprobt und bestimmte technische Details (z.B. automatische Entformung) getestet werden.

### 2.2 Entwicklungsstand

Die Heißprägeanlagen, wie sie heute verfügbar sind, sind ideale Instrumente zur Verfahrens-erprobung und zur schnellen und preiswerten



Abb. 5: Heißprägeanlage HEX 03 mit integriertem Überdeckungssystem zum positionierten Prägen auf vorstrukturierten Substraten.

Herstellung von mikrostrukturierten Prototypen und Kleinserien.

Durch den vollständigen Zugriff auf den kompletten Parametersatz kann die Technologie den verschiedensten Anwendungen angepasst werden.

Derzeit bestehen jedoch Einschränkungen bezüglich eines Einsatzes in der Massenproduktion von mikrostrukturierten Bauteilen. Das betrifft zum einen das im Sinne einer Zykluszeitverkürzung auf 1 bis 2 min unzulängliche Heiz- und Kühlssystem, zum anderen die Begrenzung der prägbaren Flächen auf einen Durchmesser von ca. 125 mm. Inwieweit Fragen zur Führungs-Genauigkeit der Presse zu adressieren sind, ist derzeit noch offen.

### 2.3 Anforderungen

Unter diesen Randbedingungen ergeben sich für den Einsatz von Heißprägeanlagen in der Fertigung klare Zielvorgaben. Eine solche Anlage muss große Flächen (ca.1 m<sup>2</sup>) in Zykluszeiten von 1 bis 2 min bearbeiten können. Dazu sind

neuartige Heiz- und Kühlsysteme und Führungssysteme zu entwickeln.

Eine dynamische Temperierung mit zeitlichen Gradienten von  $>100$  K / min und örtlichen Gradienten von  $<0,5$  K / min muss realisiert werden. Erst dann kann das technologisch

erforderliche Temperaturfenster in der notwendigen Schnelligkeit und Präzision getroffen werden.

Die Vergrößerung der Prägefäche ist nicht nur hinsichtlich der Formeinsätze problematisch. Hier spielen insbesondere Verzüge, thermische Dehnungen und Führungsgenauigkeiten eine Rolle. Der Keilfehler der beiden Prägefächen zueinander darf für typische Applikationen eine Größe von ca. 10  $\mu\text{m}$  über den gesamten Durchmesser nicht überschreiten. Dies gilt nicht nur für den Fall des Antastens (i.e. Herstellen des Kontaktes zwischen Formeinsatz und Substrat), sondern insbesondere für den Fall der Maximalkraft, die bei diesen Plattengrößen durchaus im 1000 KN Bereich liegen kann. Wird der zulässige Keilfehler überschritten, oder treten andere Verzüge in gleicher Größenordnung auf, so ist keine gleichmäßige Prägequalität mehr zu gewährleisten.

### 3. Einsatzfelder

#### 3.1 Mikrooptik

Für die großflächige Mikrostrukturierung von optischen Flächen wie sie bei der Displaytechnik, Reflektorflächen oder der Beleuchtungstechnik gebraucht wird (Abb. 7), bieten sich die Prägetechnologien an [8]. Bei diesen Anwendungen geht es zumeist darum, bestimmte geometrische Strukturen mit möglichst kleinem Abstand auf möglichst großer Fläche aufzubringen (Abb. 6).

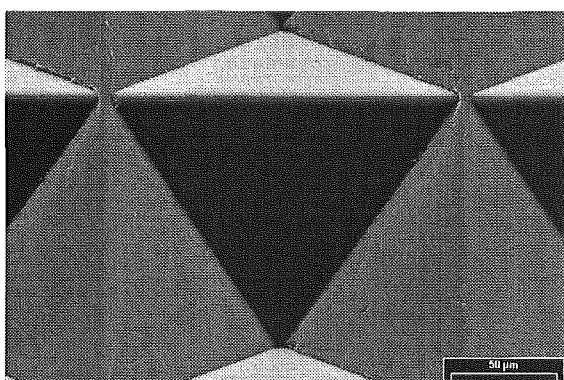


Abb. 6: Tripelspiegelstruktur auf einer Reflektorfolie. Präzisionsoptik mit einem Jahresbedarf im  $\text{km}^2$ -Bereich.

Andere Anwendungen nutzen die Prägetechnologien zur Herstellung von Lichtwellenleitern, Y – Splittern u.ä.

Neben der Abformung extrem komplexer Gitterstrukturen ist schließlich noch die Herstellung von anspruchsvollen asphärischen Kunststoffoptiken durch massive Parallelisierung mit Hilfe der Prägetechnologie möglich.

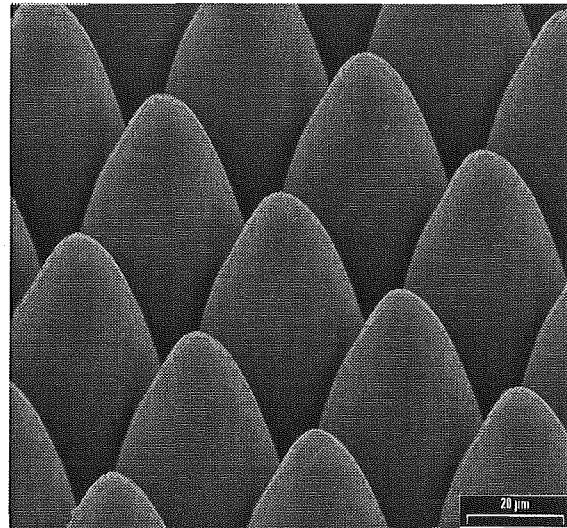


Abb. 7: Erst durch großformatige Abformung können refraktive Arrays zur Hintergrundbeleuchtung hergestellt werden.

Weitere Anwendungsbereiche finden sich in der optischen Speichertechnik (DVD) und entsprechenden Nanoimprintverfahren.

#### 3.2 Mikrofluidik

In der Mikrofluidik sind insbesondere die Bereiche, die auf extrem kostengünstige Fluidikchips angewiesen sind, an der Prägetechnologie interessiert. Für den Bereich medizinischer Anwendungen und der Bioanalytik existieren derzeit eine Vielzahl von Anwendungen (Abb. 8, Abb. 9).

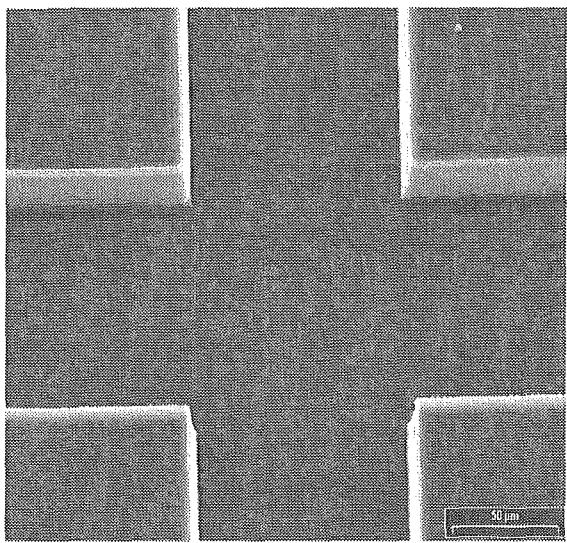


Abb. 8: Herzstück fast jeder Fluidikanwendung: Kreuzung zweier Kanäle mit präzisen Querschnitten und exakten Kanten. Hier am Beispiel eines PMMA – Elektrophoresechips.

Allerdings hängt die Verwendbarkeit mikrostrukturierter Polymerchips für die Mikrofluidik stark von Hilfstechnologien ab (i.e. Bonden, Bohren), die sich derzeit überwiegend noch im Entwicklungsstadium befinden.

Vorteile der Prägetechnik liegen hier insbesondere in der Möglichkeit der großflächigen Bearbeitung bei gleichzeitiger Einhaltung der Kriterien bezüglich minimalen Eckenradien und reproduzierbar steilen Wänden der Kanäle.

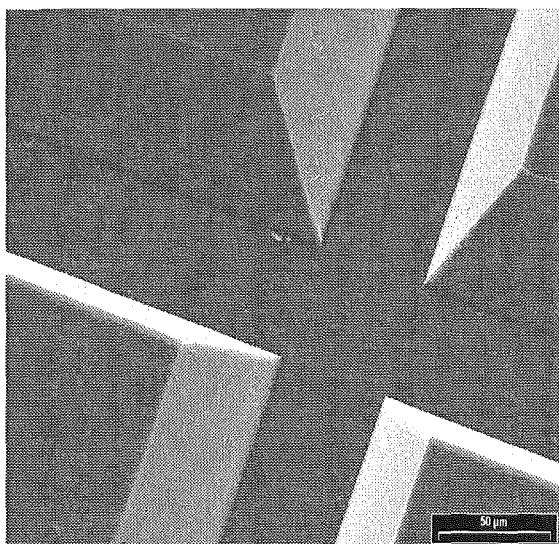


Abb. 9: Abhängig vom verwendeten Werkzeug ergeben sich unterschiedliche Kanalgeometrien. Hier die Kreuzung bei Verwendung von nassgeätzten Si – Werkzeugen.

#### 4. Ausblick

Derzeit befindet sich die Heißprägen von Mikrostrukturen noch weitestgehend im Bereich der Entwicklung. Jedoch sind schon zum heutigen Zeitpunkt Entwicklungen absehbar, die eine baldige Umsetzung der bislang gewonnenen Ergebnisse in Produktionsanlagen für größere Stückzahlen erwarten lassen.

Mit der Umsetzung der oben erwähnten Zielsetzungen wird das Heißprägen für einen größeren Applikationsbereich als Fertigungstechnologie interessant.

Es bleibt abzuwarten, inwieweit sich der für einige Produktfelder vorhandene technologische Vorteil auch in entsprechenden Marktanteilen wiederfinden lässt.

#### Literatur:

- [1] Heckele, M., Bacher, W.: „Herstellung von Kunststoffmikrostrukturen für die Mikrooptik und Mikrosensorik durch Heißprägen“; FZKA- 6080, Forschungsz. Karlsruhe (1998), 89-94.
- [2] Heckele, M., Dittrich, H., „Prägen von Mikrobauteilen ohne Restschicht“, dieser Bericht.
- [3] Heckele M., Müller K.D., Bacher W., „Micro-structured Plastic Foils Produced by Hot Embossing“, in "HARMST 99 Proceedings", Kisarazu, 1999, 84-85.
- [4] Müller, K.D., Bacher, W., Heckele, M. "Flexible Integration of Nonsilicon Microstructure on Microelectronic Circuits", in "Proceedings MEMS 98", Heidelberg, 263-267.
- [5] Becker, H., Heim, U., Polymer High Aspect Ration Structures fabricated with hot embossing ", in "Proceedings Transducers" 1998, 71-74
- [6] Becker, H., Heim, U., "Silicon as tool material for polymer hot embossing ", in "Proceedings MEMS 99", Orlando, 228-231.
- [7] Heckele, M., Bacher, W., "Modular Molding Equipment for Quasi Monolithic Integration of Micromechanical an Microelectronic Components", Mechatronics 1996, Besançon, 501-504.
- [8] Heckele, M., Bacher, W., Hanemann, T., Ulrich, H.: „Hot Embossing an Injection Molding for Microoptical Components“; SPIE Vol 3135 „Precision Plastic Optics for Optical Storage, Displays, Imaging, and Communications, San Diego, 1997, 24-29.



# Hochfrequente Ultraschallsysteme für die Mikrosystemtechnik

## - Unternehmensgründung durch Technologietransfer -

Joachim Straka <sup>1)</sup>, Aida El-Kholi <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> SONOSYS® Ultraschallsysteme GmbH, Neuenbürg

<sup>2)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik

### Zusammenfassung

In verschiedenen Fertigungsbereichen bietet die Megasonicenergie wirkungsvolle Unterstützung bei Ätz-, Entwicklungs- und Reinigungsprozessen.

Im Rahmen eines Technologie Transfer Projektes wurden gemeinsam mit dem Forschungszentrum Karlsruhe (IMT) Megasonicsysteme für die Anwendung in der „LIGA-Technik“ und für die Reinigung von Mikrosystemen entwickelt.

Die durch Megasonicenergie erzeugte Kavitation und Mikroströmung zum Teil in Verbindung mit chemischen Reaktionen ermöglichen das Ablösen von Partikeln im Submikrometerbereich von Substratoberflächen und fördert das Herauslösen aus tiefen Strukturen.

Die Fa. SONOSYS® hat sich auf die Entwicklung und Produktion von Ultraschall-Reinigungssystemen im Frequenzbereich von 400 kHz bis 3 MHz spezialisiert. Dieser hochfrequente Ultraschall ( Megasonic ) ermöglicht ein effizientes Reinigen empfindlichster Oberflächen von Partikeln ab einer Größe von 0,1 µm.

SONOSYS® Megasonicsysteme finden vorwiegend ihren Einsatz bei der naßchemischen Prozessierung von Halbleiter-Wafern, Substraten und Mikrosystemen.

### 1. Einleitung "Die Produktidee"

Als leitender Angestellter eines Herstellers von Ultraschall-Generatoren und Schwingersystemen mußte ich Anfang 1993, Anfragen von potentiellen Kunden nach hochfrequenten Ultraschallsystemen (sogenannte **Megasonicsysteme** ) abweisen. Eine hierfür notwendige Neuentwicklung mit erheblichem zeitlichen und finanziellen Aufwand wurde von der Firmenleitung abgelehnt.

Nach eingehenden Marktrecherchen zeigte sich, daß in der Halbleiterfertigung mit steigendem Bedarf, hochfrequente Ultraschallsysteme zur Reinigung der Wafer eingesetzt werden. Aufgrund der immer höheren Integration und der daraus resultierenden kleineren Strukturen, stellen die Verunreinigungen der Oberflächen mit Partikeln ein immer größer werdendes Problem dar.

Nur eine geringe Anzahl von Herstellern aus USA und Japan bediente zu diesem Zeitpunkt den Weltmarkt. In Europa wurden Megasonicsysteme nicht hergestellt.

So waren deutsche und europäische Hersteller von Fertigungsequipment für die Halbleiter-Produktion gezwungen, ihre benötigten Megasonicsysteme aus USA und Japan zu beziehen.

Nach dem Besuch der Fachmesse „SEMICON Europa“ und Gesprächen mit verschiedenen potentiellen Abnehmern, sah ich die besondere Chance in einem wachsenden Nischenmarkt tätig zu werden und eine selbstständige Existenz aufzubauen.

Mit Herrn Johann Brunner, als Elektronikentwickler, hatte ich den geeigneten Partner gefunden um die Fa. SONOSYS zu gründen und die Entwicklungsarbeiten zu starten.

Unser Ziel war es ein modulares und qualitativ hochwertiges Megasonicsystem, nach deutschen und europäischen Standards zu entwickeln und zu produzieren.

### 2. Funktionsweise eines Ultraschallsystems

Ein Ultraschallsystem besteht grundsätzlich aus drei Komponenten

- Ultraschall-Generator
- Ultraschall-Schwinger / Transducer
- Einer dem Reinigungsproblem angepaßten Flüssigkeit

Der Ultraschallgenerator wandelt die vom Netz gelieferte Wechselspannung von 50/60 Hz in eine Frequenz um, die der Betriebsfrequenz des Transducers entspricht. Üblich sind Frequenzen zwischen 20 kHz und 3 MHz. Die so gewonnene elektrische Energie wird über eine abgeschirmte Leitung dem Transducer zugeführt. Der Transducer wandelt diese elektrische Energie in mechanische Schallschwingungen um.

Er versetzt die Flüssigkeit, die ihn umgibt, damit in Schwingungen. Jede Schwingung bewirkt in der Flüssigkeit abwechselnd eine Überdruck- bzw. eine Unterdruckphase, je nachdem ob sich der Transducer ausdehnt oder zusammenzieht. Während der Phase des Zusammenziehens, die gleichbedeutend mit der Unterdruckphase ist, entstehen in der Flüssigkeit infolge ihrer begrenzten Zugfähigkeit kleine Hohlräume. Diese kleinen Hohlräume stürzen in der folgenden Ausdehnungsphase des Transducers, die gleichbedeutend mit der Überdruckphase ist, zusammen. Sie implodieren. Dieses Phänomen nennt man **Kavitation** (s. Abb.1).

Um die Kavitationsblasen herum entstehen durch das knallartige Implodieren hohe örtliche Drücke, sowie starke Turbulenzen und Strömungen in der Flüssigkeit.

Diese Erscheinungen sind die eigentlichen Kriterien, die zum Ablösen von Schmutzpartikeln auf einer Warenoberfläche führt.

Kavitationsblasen entstehen vorwiegend an den Grenzflächen zwischen Flüssigkeit und Reinigungsgut. Also genau dort wo sie erwünscht sind.

Bei einer Ultraschallfrequenz von z. B. 25 kHz entstehen kurzzeitig Temperaturen von über **5000° C** (Bedingungen wie auf der Sonnenoberfläche) und Drücke bis **500 bar**.

Diese hohen Temperaturen und Drücke können fragile Strukturen zerstören.

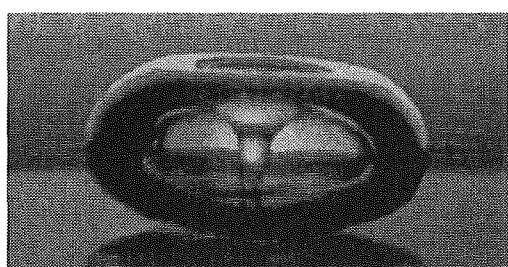


Abb. 1: Kavitationsblase bei einer Frequenz von ca. 25 kHz zum Zeitpunkt der Implosion. Die Blase hat einen Durchmesser von ca. 150 µm.

### 3. Megasonic-Energie

Die durch Megasonicenergie erzeugte Kavitation und Mikroströmung zum Teil in Verbindung mit chemischen Reaktionen ermöglichen das Ablösen von Partikeln im Submikrometerbereich von Substratoberflächen (s. Abb. 2 und 3)

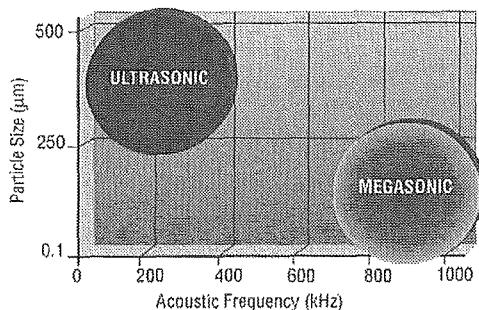


Abb. 2: Mit Ultraschall (< 400kHz) lassen sich Partikel bis 200 µm entfernen. Für kleinere Partikel bis in den Sub-µm-Bereich muß Megasonic eingesetzt werden (700-1200 kHz).

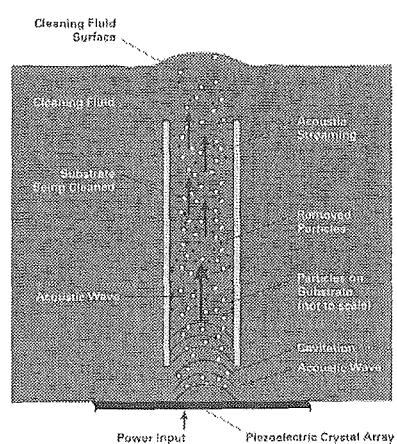


Abb. 3: Der Megaschall erzeugt eine gerichtete Mikroströmung entlang der zu reinigenden Substrate.

### 3.1 Vergleich der Ultraschallfrequenzen 40 kHz und 1 MHz beim Entwicklungsprozess in der LIGA-Technik

Bei einer relativ hohen Ultraschallfrequenz von 1 MHz ( Megasonic ) ist im Gegensatz zu konventionellem Ultraschall mit z. B. 40 kHz die Kavitationsenergie wesentlich geringer. Eine Zerstörung der Mikrostrukturen wird somit vermieden [1]. Abbildung 4 zeigt eine durch die hohe Kavitationsenergie bei 40 kHz Ultraschallfrequenz zerstörte Mikrostruktur. Die zerstörten Stege haben eine Stärke von ca. 4µm.

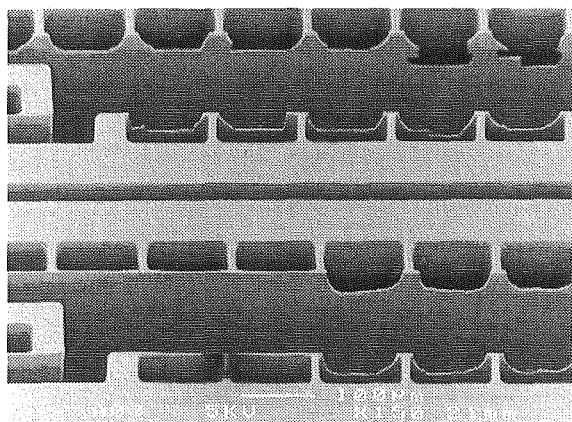


Abb. 4: Zerstörte Fragile Mikrostruktur ca. 200 µm hoch entwickelt bei einer Frequenz von 40 kHz

Bei einer Ultraschallfrequenz von 1 MHz bleibt die Mikrostruktur unbeschädigt ( Abb. 5 ).

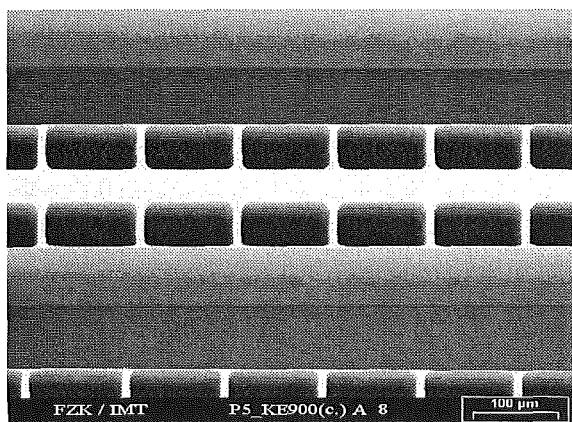


Abb. 5: Intakte fragile Mikrostruktur 400 µm hoch entwickelt bei einer Frequenz von 1 MHz

### 3.2. Prozessunterstützung bei der Entwicklung von Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis

Von besonderer Bedeutung bei der Herstellung von Mikrostrukturen durch Röntgenlithographie ist die rückstandsfreie Entwicklung enger und tiefer Strukturen. Bei Anwendungen der Mikrostrukturen im Bereich der Optik ist nicht nur die rückstandsfreie sondern auch die partikelfreie Entwicklung von entscheidender Bedeutung ( Abb. 6 und 7 ).

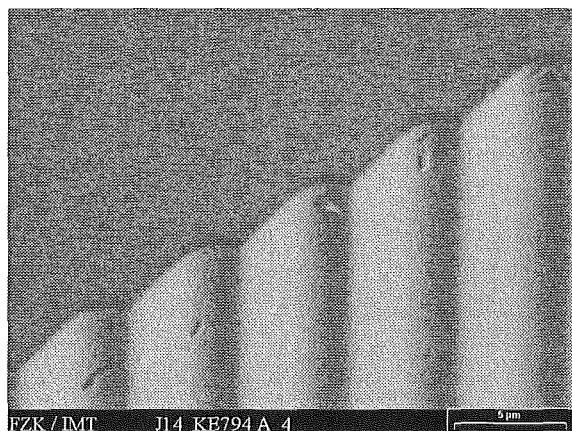


Abb. 6: Ohne Megasonic entwickelte Mikrostruktur mit systematischen Defekten

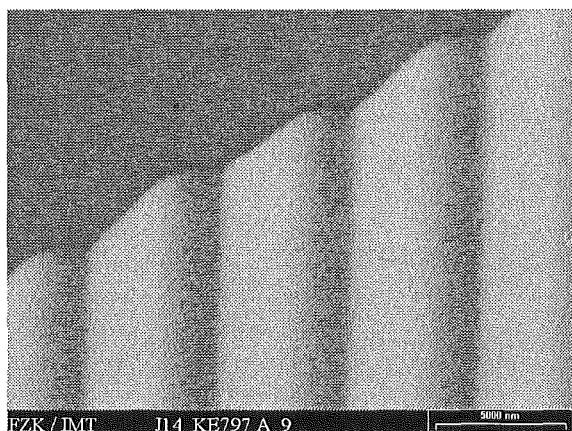


Abb. 7: Mit Megasonic entwickelte Mikrostruktur frei von Defekten.

Beim Entwicklungsprozess von Mikrostrukturen mit hohen Aspektverhältnis ( Abb. 6 und Abb. 7 ), werden durch die auftretende Mikroströmung die Partikel vollständig herausgespült und die Entwicklungszeiten um den **Faktor 7** verkürzt.

Für fragile Strukturen kann die Tiefe der Strukturen um den **Faktor 2** vergrößert werden.

#### 4. Von der Idee zum ersten Produkt

Durch einen Artikel in der Wirtschaftswoche vom 29. 10. 1993 sind wir erstmals auf die am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten LIGA-Technik aufmerksam geworden.

Durch den Hinweis in diesem Artikel, daß bei der LIGA-Technik ähnliche Fertigungsverfahren wie in der Halbleiterproduktion zur Anwendung kommen, sahen wir dort ebenfalls Einsatzmöglichkeiten unserer geplanten Megasonicsysteme.

Gezielt suchten wir den Kontakt mit dem Forschungszentrum Karlsruhe und führten auf der Messe "Micro Systems" im Oktober 1994 in Berlin die ersten Gespräche.

Im November 1994 stellen wir daraufhin die Produktidee und unseren **ersten Prototyp eines Megasonic-Generators** Herrn Dr. Mohr im Forschungszentrum Karlsruhe vor.

Von Herrn Dr. Mohr erhielten wir dann im Juni 1995 den Vorschlag zu einem gemeinsamen TTM-Projekt.

Ende 1995 bzw. im Januar 1996 konnte dann ein entsprechender Kooperations- und Lizenzvertrag mit dem Forschungszentrum abgeschlossen werden.

##### 4.1 Entwicklungsziel des TT-Projektes

Ziel des gemeinsamen Projektes war die Entwicklung von Megaschallanlagen für das Entwickeln von bestrahlten Mikrostrukturen nach dem LIGA-Prozeß oder verwandter Prozesse und die Reinigung von Mikrostrukturen tragende Substrate.

Die Vorstellung war eine Naßprozessanlage bestehend aus 3 Modulen für die einzelnen Schritte zur Entwicklung von Mikrostrukturen.

**Basis war der bereits von uns entwickelte Prototyp eines hochfrequenten Ultraschallgenerators ( Megasonic-Generator ).**

##### 4.2 Megasonic Tauchschwinger

Im Laufe des Projektes wurden neue Produktideen geboren, so entstand aus der Zusammenarbeit mit dem FZK/IMT unser Megasonic Tauchschwinger.

Die Transducer im Tauchschwinger sind hermetisch gekapselt und in einem Gehäuse aus Edelstahl oder Kunststoff ( z. B. PVDF ) untergebracht. Mittels eines flexiblen Anschlußschlauches wird

die elektrische Verbindung zum Megasonicgenerator hergestellt. Die Tauchschwinger eignen sich besonders zur Montage am Boden oder Seitenwand in vorhandenen Bädern und lassen sich somit flexibel im Laborbereich und für erste Versuche bei Interessenten für Tests einsetzen. Mittels dieser Tauchschwinger ist ein relativ kostengünstiges Nachrüsten von Prozeßbecken mit Megasonic möglich.

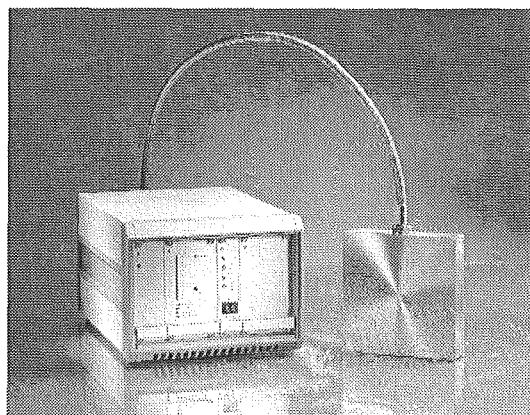


Abb. 8: Modularer Megasonic-Generator 250 Watt mit Tauchschwinger

Schon frühzeitig wurden durch das Forschungszentrum Karlsruhe / IMT potentielle Interessenten über das gemeinsame Projekt informiert.

Mehrmals hatten wir Gelegenheit ausländischen Besuchern am FZK unsere Produktentwicklung vorzustellen.

Aus diesen Aktivitäten resultierten relativ früh entsprechende Aufträge.

So erhielten wir bereits im Mai 1996 einen ersten Auftrag für ein Megasonicsystem mit Tauchschwinger aus Taiwan.

Ende 1996 und Anfang 1997 folgten weitere Aufträge aus China und den USA.

Da wir beim Projektstart bereits über einen funktionsfähigen Prototyp unseres Megasonic-Generators verfügten, waren wir dadurch in der Lage schon während der Projektlaufzeit entsprechende Megasonicsysteme zu verkaufen und auszuliefern.

Ende 1997 war auch die vom Forschungszentrum Karlsruhe bestellte Komplettanlage (bestehend aus 3 Modulen mit Edelstahlbecken, integrierten Megasonicsystemen, Temperaturregelung und Filtration) fertiggestellt und konnte nach Berlin an das BESSY ausgeliefert werden.

## 5. Der Halbleitermarkt

Parallel zu unseren Arbeiten im gemeinsamen TT-Projekt haben wir intensiv den Markt der Halbleiterfertigung bearbeitet.

Auch hier konnten wir bereits Anfang 1996 den ersten Anlagenhersteller von Naßprozesstechnik zum Kauf unserer Megasonicsysteme gewinnen.

1997 setzten wir uns beim größten deutschen Hersteller von Wafer-Reinigungsanlagen, im Rahmen einer Neuentwicklung, erfolgreich gegenüber amerikanischer Konkurrenz durch.

Entscheidend waren hierbei unser modulares System bei hoher Qualität, sowie unsere besondere Flexibilität und Kundenorientierung bei der Umsetzung der Kundenanforderungen.

In engem Dialog bzw. Kooperation mit unseren Kunden, entstanden auch hier weitere Produktentwicklungen, wie z. B. eine **Megasonic - Düse** (Abb. 9).

Der Transducer in der Megasonic - Düse erzeugt eine Megasonicwelle, die über fließendes Medium (z. B. DI - Wasser) auf eine Substratoberfläche übertragen wird.

Die Megasonic - Energie von ca. 60 Watt wird hierbei auf einen schmalen Punkt von 2 - 4,2 mm konzentriert.

Dieses danklose Megasonic „Spray Nozzle“ System ermöglicht einen kontaktlosen Reinigungsprozeß mit stets partikelfreiem Reinigungsmedium.

Unsere Megasonic-Düse findet hauptsächlich Anwendung für die Reinigung von Single Wafern, Masken und LCD's.

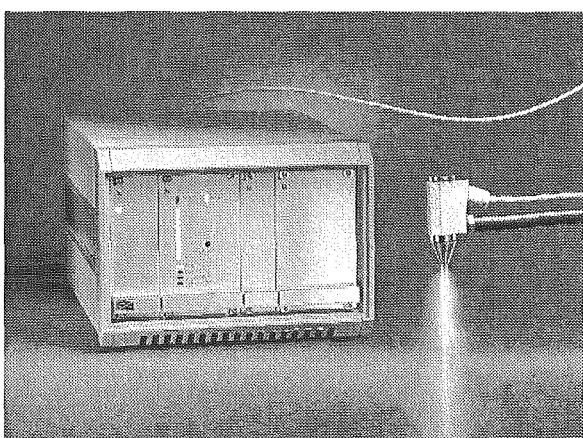


Abb. 9: Megasonic-Generator 100 Watt mit Megasonic-Düse in Titan

## 6. SONOSYS® heute und morgen

Heute ist SONOSYS® OEM-Lieferant von unterschiedlichen Megasonicsystemen an bedeutende Hersteller von Fertigungsmaschinen für die Halbleiterindustrie.

Durch unsere Kunden sind unsere Megasonic-systeme weltweit bei namhaften Halbleiterherstellern im Einsatz. Im internationalen Vergleich erzielen wir, durch innovative Lösungen und äußerst hohen Wirkungsgrad beste Reinigungsergebnisse bei Halbleiter-Wafern.

Nur durch die gute und partnerschaftliche Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Karlsruhe, ist es uns gelungen im Bereich der LIGA - und Mikrosystemtechnik eine besondere Markstellung zu erreichen. Gerade aufgrund unserer damaligen Existenzgründung war das gemeinsame TT-Projekt von großer Bedeutung.

Wirtschaftlich äußerst wichtig war dabei, daß relativ schnell nach der Existenzgründung, erste Umsatzerlöse mit dem Produkt erzielt werden konnten. Nach unserer Meinung war hierbei entscheidend, daß wir mit unserem Projekt-Partner eine international anerkannte Referenz haben.

Zukünftig wollen wir durch weiteres stetiges Erarbeiten von Innovationen einen **zwingenden Kundennutzen** erreichen. Dies bedeutet der Kunde hat einen Nachteil, sofern er nicht SONOSYS® Megasonic einsetzt.

Unser mittelfristiges Ziel ist es die **Marktführerschaft bei Megasonicsystem** zu erreichen, indem unsere Produkte bei allen namhaften Equipmenthersteller „eindesigned“ werden.

Im Sinne des Slogans „**SONOSYS® Inside**“.

## Literatur

- [1] A.El-Kholi, J.Mohr, R.Stransky, "Ultrasonic supported development of irradiated microstructures", veröffentlicht in, Microelectronic Engineering 23 (1994) 219-222



# **Systemtechniken und Materialentwicklung**



# Software-Tool für Analyse und Training von Sensordaten

V. Hartmann, W. Eppler, H. Gemmeke

Hauptabteilung für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik

## Zusammenfassung

Sensorsysteme, die nicht nur das Vorhandensein eines einzigen Gasgemisches - wie beispielsweise bei einem Feuermelder - feststellen, sondern zwischen mehreren Gasen unterscheiden bzw. deren Konzentration bestimmen sollen, umfassen meist Sensorfelder. Die anfallenden Sensordaten werden mit modernen Verfahren der Mustererkennung analysiert. KANGAROO (KArlsruhe Neural Gas Analyzing Robust Operating Observer) ist ein Softwaretool, das am Forschungszentrum Karlsruhe, HPE entwickelt wurde. Es handelt sich dabei um ein modulares Softwarepaket zur Akquisition von Daten von verschiedenen Sensorsystemen. Mit den aufgenommenen Sensordaten können Klassifikatoren erzeugt und diese anschließend zur Datenanalyse verwendet werden. Neben der hohen Flexibilität des Programms überzeugt vor allem die Einfachheit, mit der die einzelnen Module an die jeweilige Messaufgabe angepasst werden können. Dazu ist kein spezielles Expertenwissen notwendig. Im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen dem Forschungszentrum Karlsruhe und der Industrie kommt KANGAROO seit einiger Zeit zum Einsatz. Anhand von typischen Problemstellungen soll hier die Leistungsfähigkeit und die hohe Flexibilität der Software demonstriert werden.

## 1. Anforderungen an das System

Ein Gas-Analyse-System liefert einen kontinuierlichen Strom von Sensordaten. Diese stammen im allgemeinen von einem Feld von Sensoren, die unterschiedliche Selektivität aufweisen. Im Datenerfassungsteil des Systems werden die Sensordaten eingelesen und zu einem Vektor zusammengefasst. Im weiteren Verlauf der Verarbeitung ordnet das System diesen Eingangsmustern bestimmte Ausgangsvektoren zu, wobei jeder Ausgangswert die Konzentration oder das prozentuale Mischungsverhältnis einer bestimmten chemischen Substanz repräsentiert. Die Transformation der Eingangsdaten zu den Ausgangsdaten geschieht in mehreren Etappen (Abb.1). Die unbearbeiteten Sensordaten müssen zunächst gefiltert werden. Einschwingverhalten, Rauschen, das Altern der Sensoren oder die Reduktion der Dimension der Eingangsdaten sind nur einige Gründe für die Verwendung von Filteralgorithmen, die

die Analyse/Klassifikation der Eingangsdaten erleichtern sollen. Nach der Vorverarbeitung kann ein Algorithmus zur Klassifikation bzw. Konzentrationsbestimmung der Sensordaten eingesetzt werden. Welcher Algorithmus hier verwendet wird, hängt von den gewählten Datensätzen, der Qualität der Daten und hauptsächlich von den Anforderungen des Benutzers ab. Als letzter Bearbeitungsschritt folgt die Visualisierung der Ergebnisse.

Das Ziel eines modernen Sensorsystems, vielfältige Gasgemische zu erkennen und zu unterscheiden, kann sich im Laufe seines Lebenszyklus verändern. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn sich die Zusammensetzung eines Schadstoffgemischs verändert. Deshalb ist ein adaptives Sensorsystem wünschenswert, das teils mit, teils ohne Austausch einzelner Sensoren auf die neue Aufgabenstellung trainiert werden kann. Für ein solches System gelten unter anderem folgende Anforderungen:

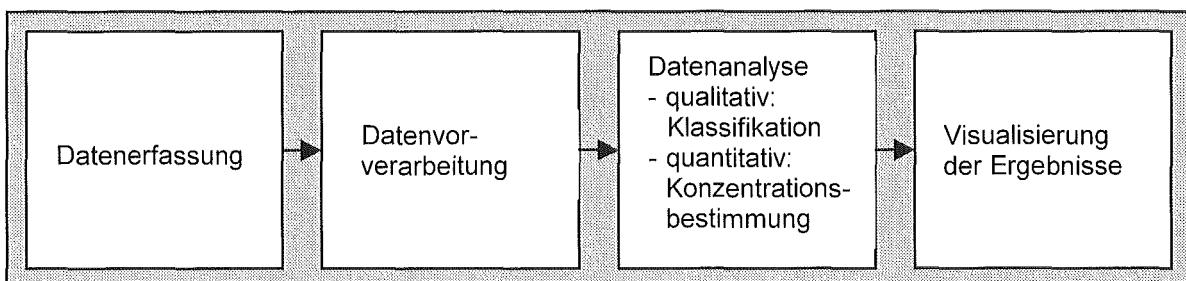


Abb.1 Schritte der Datenverarbeitung bei der Gasanalyse

- (1) Wenige Trainingsdaten müssen genügen, um das modifizierte Sensorsystem an die veränderte Aufgabe anzupassen, weil die chemischen Experimente zur Erstellung der Trainingsdaten zeitraubend sind.
- (2) Zur Analyse der Daten einer Reihe von Sensorwerten sind leistungsfähige Verfahren notwendig, die auf modernen Methoden der Statistik und Mustererkennung beruhen.
- (3) Diese Verfahren sind oft kompliziert zu bedienen, da sie von einer Reihe von Voraussetzungen abhängen. Deshalb muss die Zahl an einzustellenden Parametern gering gehalten werden, um für den Anwender eine möglichst intuitive Bedienung des Systems zu ermöglichen.
- (4) Die Qualität der Sensoren ist unterschiedlich und ändert sich zudem im Laufe der Zeit. Sie ist erst in der realistischen Umgebung endgültig zu bewerten, wofür geeignete Werkzeuge zur Verfügung stehen müssen.

Das im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte

System KANGAROO (KArlsruhe Neural Gas Analyzing Robust Operating Observer) erfüllt diese Anforderungen. Um eine große Einsatzbreite sicher zu stellen, wurde das Tool weitgehend plattformunabhängig implementiert.

## 2. Entwurfskriterien

Entsprechend den Zielen von KANGAROO existiert eine Sammlung von Algorithmen für die Transformation der Daten als Software-Bibliothek. Man wird keinen allgemeingültigen Algorithmus finden, der geeignet ist, beliebige Problemstellungen zufriedenstellend zu lösen. Je nach Problembeschaffenheit müssen gänzlich unterschiedliche Schritte zur Lösung ausgeführt werden. Der Benutzer muss also zwischen mehreren Alternativen auswählen können. Es muss jedoch möglich sein, die verschiedenen Algorithmen einfach zu bedienen, so dass auch ein unerfahrener Benutzer nicht überfordert ist. Als Folge dieser Anforderung sollte ein Algorithmus nicht mehr als einen frei wählbaren kritischen Parameter besitzen. Das bedeutet für die restlichen freien Parameter, dass

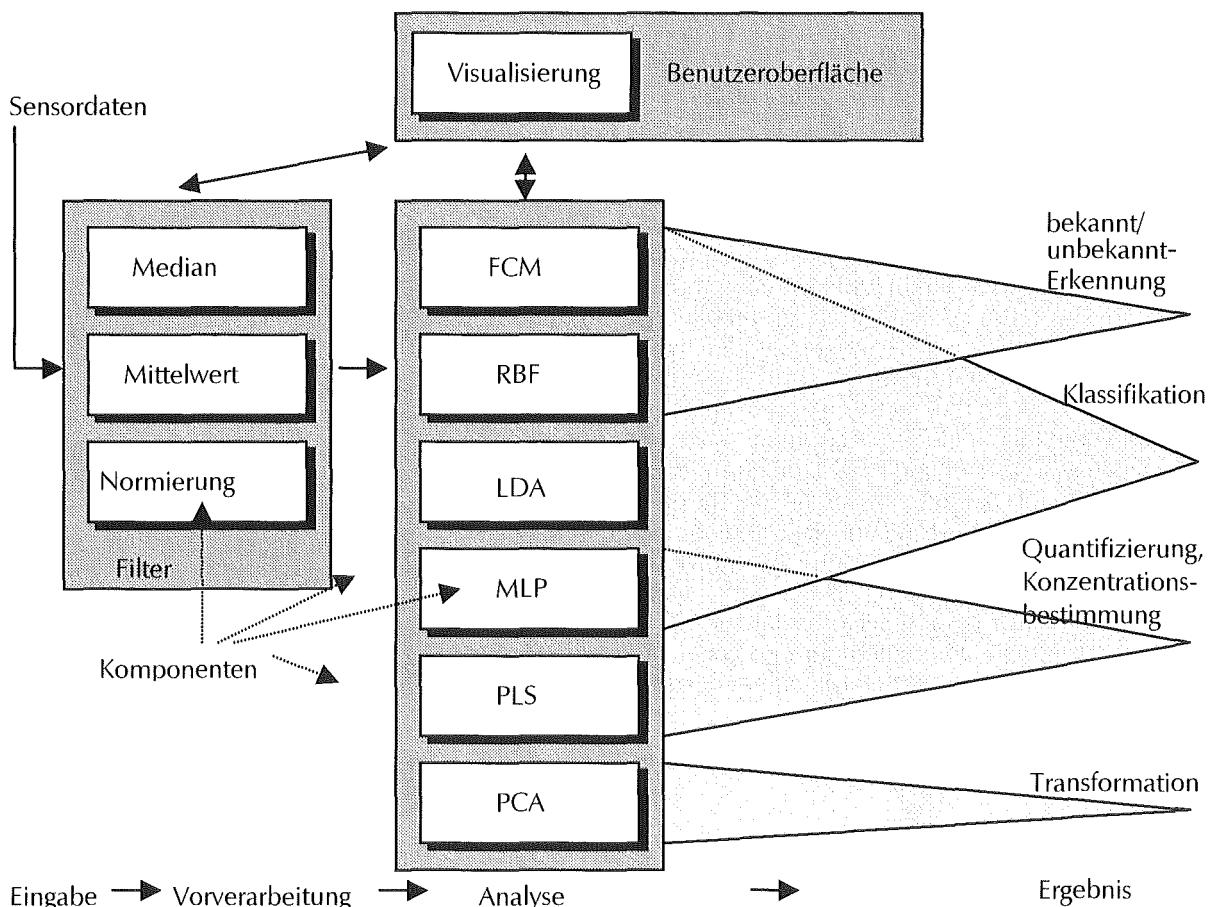


Abb. 2 Komponenten des KANGAROO-Systems, mit denen der Benutzer verschiedene Aufgabenstellungen der Gasanalyse bewältigen kann (Abkürzungen der Analyse-Algorithmen: FCM: Fuzzy-C-Means, RBF: Radial Basis Function Network, LDA: Lineare Diskriminanz-Analyse, MLP: Multi-Layer-Perzeptron, PLS: Partial Least Square, PCA: Principal Component Analysis)

sie (im schlechtesten Fall) fest eingestellt werden oder (im besten Fall) sich durch einen adaptiven Automatismus selber einstellen. Die Klassifikation teilt sich, wie oben bereits erwähnt, in mehrere Verarbeitungsschritte. Jeder Schritt wird dabei von einer eigenständigen Softwarekomponente übernommen (Abb.2).

Durch ihren modularen Aufbau und ihre genormte Schnittstelle können Softwarekomponenten wie Klötze in einem Baukasten zusammengesetzt werden. Die einzelnen Komponenten sind in unterschiedlichen Kontexten einsetzbar und unabhängig vom Zielsystem der Anwendung testbar. Das sorgt für eine hohe Sicherheit, da die von Informatikern so gefürchteten Seiteneffekte (Veränderungen in einem Unterprogramm beeinflussen - oft über globale Variablen - unbeabsichtigt andere Unterprogramme) nicht mehr auftreten können. Dennoch ist ein solches Komponenten-System sehr flexibel, so dass auf spezielle Wünsche des Kunden auch zu einem späten Entwicklungsstand des Systems noch eingegangen werden kann. Ein Komponenten-System ist leicht zu warten und zu ändern, und deshalb sehr zukunftssicher, da laufend alte Komponenten durch neue ersetzt werden können, ohne dass sich für den Kunden seine vertraute (Software-)Umgebung verändert. Ein weiterer großer Vorteil der Software-Komponenten ist ihre hohe Wiederverwendbarkeit: beim Entwurf eines neuen Systems mit einer ganz anderen Funktionalität können bereits früher entworfene Komponenten verwendet werden und so die Entwicklungszeit für neue Systeme entscheidend verkürzen.

Die Idee der Software-Komponenten ist schon alt, aber günstige Voraussetzungen dafür gibt es erst seit jüngster Zeit mit einigen Standardisierungsbestrebungen (z.B. CORBA, DCOM oder Java-Beans). Allerdings gelten solche Standards zunächst für relativ große Komponenten, bei denen der schnelle Transfer großer Datenmengen intern geregelt wird und außen nicht sichtbar ist. Die Vorteile der Software-Komponenten entfalten sich aber hauptsächlich dann, wenn auch "kleine" Komponenten verwendet werden und mit sehr hohen Transferraten Daten austauschen. Als Basis für kleine Komponenten in diesem Bereich stellte sich der Java-Beans-Standard als geeignet heraus. Auch mit anderen Sprachen (wie C und C++) programmierte Prozeduren lassen sich damit verpacken [1].

Die Komponenten haben eine genau definierte Schnittstelle für die graphische Oberfläche. Die graphische Oberfläche (GUI) ist in JAVA geschrieben, was die Plattformunabhängigkeit der Anwendung sichert. Die GUI unterstützt den Benutzer bei der Verwaltung und Visualisierung der gemessenen Daten. Für die Visualisierung stehen dabei mehrere Diagrammarten zur Verfügung, um

die Daten auf verschiedene Arten anzuzeigen. Das System ist benutzerkonfigurierbar. Die bereits in KANGAROO implementierten Klassifikatoren und Analysealgorithmen sind an typische Problemstellungen von Sensorsystemen angepasst und sind robust gegenüber Veränderungen durch die Parametereinstellung. So wird Zeit gespart und der Aufwand zur Parametrisierung und Anpassung an eine veränderte Aufgabenstellung minimiert. Für die Adaption an neue Aufgaben ist kein Expertenwissen erforderlich.

### 3. Kombination von mehreren Analysemethoden

Neuronale Netze haben sich für viele nicht-lineare Problemstellungen als geeignete Algorithmen herausgestellt. Ihre Fähigkeit gut zu generalisieren macht sie für das Training von Sensordaten besonders geeignet. Mehrere Anforderungen sollen damit abgedeckt werden:

- die Klassifikation, sowie die Bestimmung von Konzentrationen
- Erkennung von unbekannten bzw. ungültigen Sensordaten
- einfach zu handhabende Klassifikationsroutinen
- gute Generalisierung und
- stabiles Verhalten, auch bei ungültigen Eingangsdaten.

In der statistischen Musteranalyse unterscheidet sich die binäre Klassifikation (Klassen ja/nein, ein/aus oder gut/schlecht) grundlegend von der Funktionsapproximation. Beide Aufgaben können jedoch von Neuronalen Netzen erledigt werden. Eine gute Generalisierung ist nötig, um unbekannte Muster in gleicher Weise wie bekannte Muster, die für das Training verwendet werden, zu klassifizieren bzw. zu approximieren. In KANGAROO wird standardmäßig auf den Gradientenabstieg-Algorithmus RPROP [2] zurückgegriffen. Es handelt sich dabei um eine Variante des bekannten Backpropagation-Algorithmus. Alle Parameter dieses Algorithmus sind sehr robust und damit relativ unempfindlich gegenüber Änderungen. Für die Bestimmung des Neuronalen Netzes muss nur die Zahl der verdeckten Neuronen vom Benutzer festgelegt werden.

Bei der Gasanalyse mit Sensorfeldern wird im allgemeinen keine gleichmäßige Abdeckung des gesamten Eingangsraums erreicht. Von Eingaberaum spricht man bei dieser Gelegenheit, weil  $n$  Sensoraktivitäten zu einem bestimmten Zeitpunkt sich in einem  $n$ -dimensionalen Raum als Punkt darstellen lassen. Unterschiedliche Sensoraktivitäten entsprechen unterschiedlichen Punkten im Raum, wobei dicht zusammenliegende Punkte im allgemeinen ähnlichen Zusammensetzungen ent-

sprechen. Manche Gebiete des Raums werden völlig außer acht gelassen, andere sind nicht vollständig durch Trainingsdaten abgedeckt. Eingangsdaten aus nicht besetzten Gebieten sind in der Regel ein Hinweis auf unbekannte Substanzen bzw. defekte Sensoren. Die Erkennung solcher unzulässiger Eingangsdaten ist in den meisten Fällen nicht durch Neuronale Netze mit geraden Trennlinien realisierbar, wie sie beispielsweise bei Multilayernetzen verwendet werden. Im Gegensatz dazu eignen sich hierfür RBF-Netze (Radial Basis Function) mit elliptischen Trennlinien. In den Abbildungen 3 und 4 kann man deutlich den Unterschied erkennen.

Nachteil des Trainingsalgorithmus für diese Neuronalen Netze ist jedoch, dass er nicht einfach zu handhaben ist, da er einige empfindlich einzustellende Parameter besitzt. Ein konstruktiver Trainingsalgorithmus für das Training von RBF-Netzen, der DDA-Algorithmus (Dynamic Decay Adjustment) [3], schafft hier Abhilfe. "Konstruktiv" bedeutet hier, dass die optimale Zahl an verdeckten Neuronen vom Algorithmus sukzessive bestimmt wird. Die Überprüfung der Güte des Algorithmus zeigt, dass bei verrauschten Daten die Standardeinstellungen keine brauchbaren Ergebnisse liefern. Es werden zu viele verdeckte Neuronen erzeugt. Dies hat eine schlechte Generalisierung zur Folge. Fordert man zusätzlich, dass

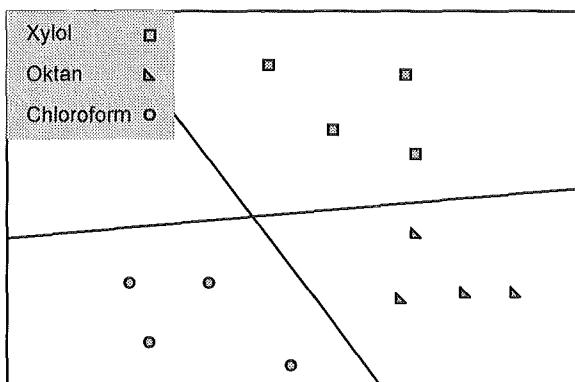


Abb. 3: Klassifikation durch ein Multilayer-Perzeptron mit linearen Trenngrenzen

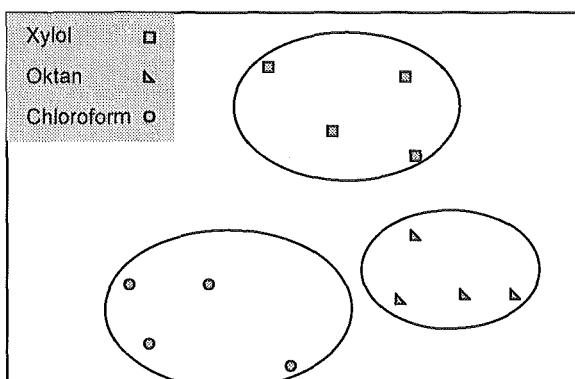


Abb. 4: Klassifikation durch ein RBF-Netz mit elliptischen Trenngrenzen

eine schwache Überlappung benachbarter Ellipsen noch erlaubt ist, reduziert sich die Zahl der verdeckten Neuronen erheblich. Dadurch kann eine gute Generalisierung erreicht werden. Leider funktioniert der DDA-Algorithmus nur im Zusammenhang mit Klassifikationsaufgaben. Für die quantitative Analyse zur Bestimmung der Konzentrationen der verschiedenen Substanzen muss deshalb ein anderer Algorithmus zur Bestimmung der unbekannten Eingangsdaten gefunden werden. Hier bietet sich der Fuzzy-C-Means-Algorithmus (FCM) [4] an. Bei diesem Algorithmus werden nur die Eingangsmuster verwendet, um eine Cluster-Analyse durchzuführen. Die Ausgangsmuster sind dabei nicht ausschlaggebend. Tritt ein neues Gasgemisch an einer Stelle auf, die von keinem Cluster abgedeckt wird, handelt es sich vermutlich um ein unbekanntes Gas. Durch die Verknüpfung zweier Neuronaler Netztypen (MLP, SOM) mit einem Fuzzy-C-Means-Verfahren (FCM) lässt sich also das Problem der Erkennung unbekannter Gase lösen.

#### 4. Anwendungen

Am Forschungszentrum Karlsruhe wurden u.a. zwei verschiedene Sensorsysteme entwickelt. Das eine basiert auf SAW-Bauelementen, die durch Beschichten mit einer selektiven Sorptionsschicht als hochsensitive Sensoren zur Detektion von Gasen eingesetzt werden können [5]. Durch die Sorption eines Analyten an einer für diesen Analyt sensitiven Beschichtung entsteht eine Massezunahme, was eine Verschiebung der Eigenfrequenz des SAW-Bauelements bewirkt. Diese Frequenzverschiebung ist das eigentliche Sensorsignal dieses SAW-Elements. Für aktuelle Anwendungen werden 8 Sensoren zu einem Sensorfeld zusammengefasst, die dann die entsprechenden Eingangsdaten liefern. Um eine qualitative bzw. quantitative Analyse von organischen Gasen durchführen zu können, ist es notwendig, die SAW-Sensoren mit verschiedenen Polymeren zu beschichten, die eine unterschiedliche Selektivität bezüglich der zu erkennenden Gaskomponenten besitzen. Nur dadurch können die Gaskomponenten anhand ihrer sich auf dem Sensorfeld ausbildenden Muster erkannt werden. Das komplette System mit der benötigten Temperaturregelung und der Fluidik findet in einem kompakten Gehäuse Platz. Die Auswertung der erwarteten Eingangsdaten wird mittels neuronaler Netze vorgenommen. Diese können sowohl für die qualitative als auch für die quantitative Analyse angewendet werden (Abb.5). Das Multilayer-Perzeptron wird für die Berechnung der Mischungsverhältnisse bzw. der Konzentrationen der Gase eingesetzt. In Zusammenhang mit den RBF-Netzen kann auch eine Erkennung der unbekannten Gase erfolgen.

Eine andere Anwendung bestimmt die Gaskonzentration mit einem Sensorfeld von 40 Metalloxid-Gassensoren (KAMINA / Karlsruher Mikro-

Nase) [6], die ebenfalls am Institut für industrielle Analytik (IFI) im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt wurde.

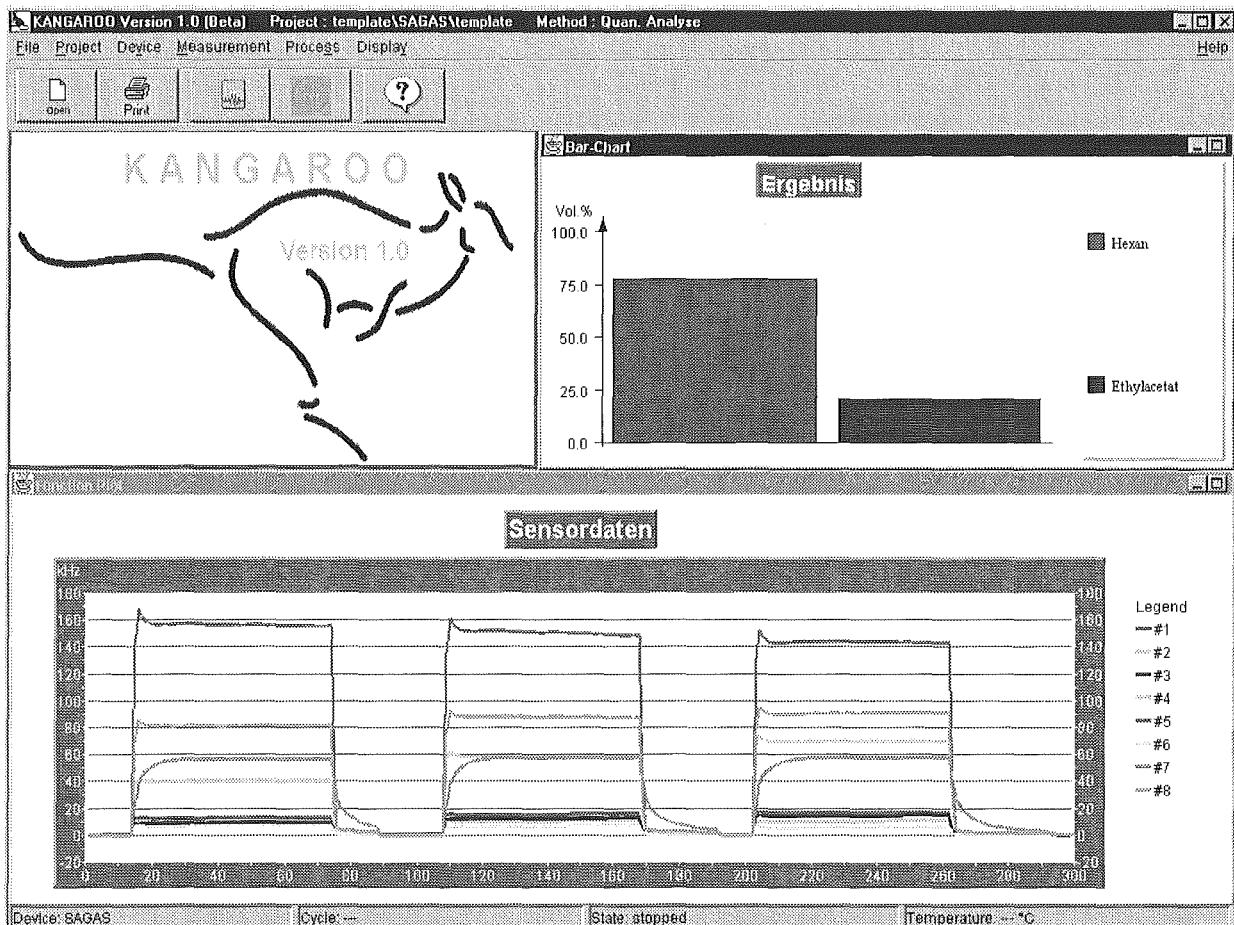


Abb. 5: Bildschirmausschnitt des SAW Gas Analyse Systems. Oben rechts sieht man die analysierten Gasmischungen von Hexan und Ethylacetat, darunter die gespeicherten Sensordaten über die Zeit aufgetragen.

Für eine einfache aber hochsensitive Detektion von organischen Gasen werden Metalloxid-Gassensoren verwendet, deren Leitfähigkeit von der Zusammensetzung der vorbeiströmenden Gase bestimmt wird. Im Moment besteht das Gassensorsystem aus einem Siliziumchip mit einer Abmessung von 8 mm x 9 mm. Auf diesem Chip sind 40 Platinstreifen, die die Sensorelemente bilden, und 2 Temperaturfühler untergebracht. Auf der Rückseite befinden sich zur Erzeugung der notwendigen Betriebstemperatur von 300 °C noch 4 Heizelemente. Die Differenzierung der verschiedenen Gase wird durch die Erzeugung eines Temperaturgradienten erreicht, was dazu führt, dass jedes Sensorelement eine etwas andere Temperatur als das Nachbarelement aufweist. Andererseits ist auf dem Chip eine wenige Nanometer dicke gaspermeable Beschichtung aus SiO<sub>2</sub> aufgetragen, deren Dicke über den Sensorelementen variiert. Die Gasdurchlässigkeit dieser Membran ist proportional zu Ihrer Dicke, so

dass auf der dickeren Seite weniger Gas mit dem Sensorelement reagieren kann. Aus diesen beiden Effekten kann nun mittels neuronaler Netze eine Mustererkennung für verschiedene Substanzen durchgeführt werden.

Die Steuerung der beiden Systeme ist völlig verschieden. Sie beinhaltet sowohl eine Durchfluss- und Temperaturregelung (SAGAS / KAMINA) als auch die für die Spül- und Messzyklen benötigte Ventilsteuerung.

Nach einigen Filteroperationen wird in beiden Anwendungen die Analyse der gemessenen Gase mit zwei neuronalen Netzen (MLP und RBF) und FCM realisiert. Andere Analysealgorithmen wie Hauptkomponenten-Analyse (PCA) oder Partial Least Square (PLS) sind ebenso verfügbar (siehe Abb.6 für die PCA). Die Neuronalen Netze können mit den verschiedenen Trainingsalgorithmen (Backpropagation, Quickprop, Rprop, DDA) eingelernt werden [7]. Als Standardalgorithmen sind

jedoch Rprop und DDA (für RBF-Netze) vorgesehen. Beide sind leicht zu handhaben, da sie nur einen kritischen einzustellenden Parameter haben (Rprop: Gewichtszerfall, DDA: Grad der zulässigen Überlappung zwischen verschiedenen Klassen). Die Messdaten und die Klassifikationsergebnisse werden kontinuierlich mit RadialPlot,

Balken-Diagrammen bzw. Funktionsdiagrammen dargestellt. KANGAROO ist so konfiguriert, dass es auch von Benutzern bedient werden kann, die mit der multivariaten Datenanalyse nicht vertraut sind. Deshalb ist es ein gutes Beispiel für ein Data Mining System.

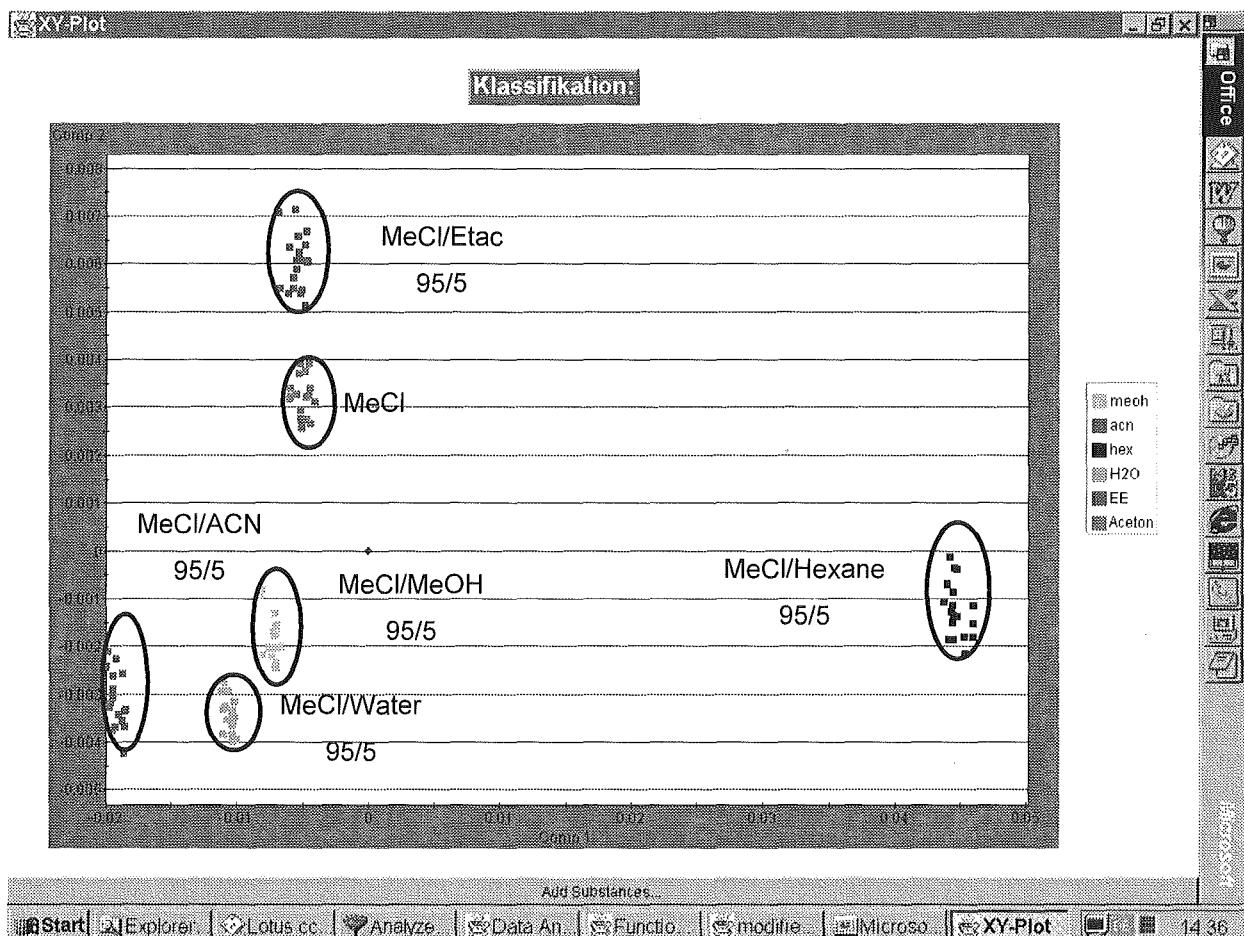


Abb. 6: Hauptkomponentenanalyse (PCA) von verschiedenen Gasgemischen zur Überprüfung der Separierung der Daten. Hier lassen sich die verschiedenen Cluster sehr deutlich von einander unterscheiden.

## Literatur

- [1] Müller, T., Stotzka, R., Neiber, H.J., Eppler, W., Gemmeke, H., "Bildgebende Verfahren in der Diagnose des Mammakarzinoms", FZK-Nachrichten 1, 2000
- [2] Riedmiller, Martin, Braun, Heinrich: „A direct adaptive method for faster backpropagation-learning: the RPROP algroithm“, ICNN, San Fransisco, 1993
- [3] Berthold, Michael R, Diamond, Jay: „Boosting the performance of rbf networks with dynamic decay adjustment“; in G. Tesauro, D. S. Touretzky and T. K. Leen, editors, Advances in Neural Information Processing Systems, volume 7, 1995

- [4] Bezdek, J. C., „Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms“, Plenum Press 1981, 256ff
- [5] Rapp, M., Reiberl, J., Stier, S., Voigt, A. Bahlo, J., „SAGAS: Gas Analyzing Sensor Systems Based on SAW Devices – an Issue of Commercialization of SAW Sensor Technology“, IEEE Frequency Control Symp. 1997, pp. 129 – 132
- [6] Althainz, P., Goschnick, J., Ehrmann, S., Ache, H. J., „Multisensor microsystem for contaminants in air“, Sensors and ActuatorsB, 33, (1996) 72 – 76
- [7] Eppler, W., Hartmann, V., Gemmeke, H., "KANGAROO - Analyzing Gases With Data Mining Methods", Transducers '99, Sendai, Japan

# Automatisierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für die Mikrosystemtechnik am Beispiel metalloxidischer Gassensor-Chips

Thomas Blank

Hauptabteilung für Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik

## Zusammenfassung

Das Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt mikromechanische Gassensor-Arrays auf metalloxidischer Basis. Seit ca. zwei Jahren wird im BMBF-Verbundprojekt „PROXI“ ein Fertigungsprozeß für diese Sensoren entwickelt, der die Produktion der Sensor-Chips in großen Stückzahlen erlaubt. Die Auswertung der Sensoren erfolgt durch eine Mikroelektronik, die über ein keramisches PGA-Gehäuse mit dem Chip verbunden ist. Es ist absehbar, daß das Gehäuse verkleinert werden muß, damit das Volumen der zu detektierenden Gasprobe reduziert und das Gesamtsystem verkleinert werden kann. Im Rahmen des HGF-Strategieprojektes „ELMINA“ wird ein neues, miniaturisiertes Gehäusekonzept und Sensorlayout erarbeitet, das einerseits die vollautomatische Integration des Chips in das Gehäuse zuläßt, andererseits die Bestückung des gehäusten Chips auf industrieüblichen SMD-Automaten ermöglicht. Besondere Bedeutung kommt dabei der Materialauswahl und der thermischen Gestaltung des Gehäuses zu, da der Sensor-Chip bei Temperaturen von 300°C betrieben wird und in sehr aggressiven Atmosphären eingesetzt werden kann. Die Ergebnisse der Analyse des gegenwärtigen Entwicklungsstandes im Hinblick auf eine automatische Fertigung werden dargestellt.

## 1. Einleitung

Metalloxidische Gassensoren werden zur Bewertung der Luftqualität seit ca. 20 Jahren kommerziell eingesetzt. Man findet sie beispielsweise in automatisch geregelten Dunstabzugshauben und in Lüftungsklappensteuerungen von Kraftfahrzeugen.

Das Institut für Instrumentelle Analytik hat im Rahmen des Projektes Mirosystemtechnik des Forschungszentrum Karlsruhe metalloxidische Gassensor-Arrays entwickelt und analysiert deren Tauglichkeit zur Detektion einzelner Gase in der Atmosphäre. Viele einzelne Metalloxidsensoren werden hierbei in einem Fertigungsschritt auf einem Substrat hergestellt. Die vereinzelten Sensoren werden durch eine Mikroelektronik ausgewertet [1]. Im BMBF-Verbundprojekt „PROXI“ [2] wird derzeit der Nachweis erbracht, daß massenfertigte Sensorarrays reproduzierbare gassensorische Eigenschaften besitzen.

Der Chip ist aus fünf Schichten aufgebaut, siehe Abb. 1. Die erste Schicht ist eine Heizungsschicht (L1). Sie wird benötigt, um eine Betriebstemperatur von ca. 250°C - 300°C im Metalloxid einzustellen. Die Heizung ist durch das Substrat (L2) von der Metalloxidschicht (L3) getrennt. Das Substrat dient zum einen als physikalischer Träger der Funktionsschichten, andererseits isoliert es die Heizungsschicht von der Metalloxidschicht. In dem aufgeheizten Metalloxid findet eine Redox-

reaktion zwischen den in der Atmosphäre vorhandenen Gasbestandteilen und der Oxidschicht statt, wodurch eine Änderung der elektrischen Leitfähigkeit des Metalloxides erfolgt [3]. Der Widerstand der einzelnen Sensorelemente wird durch eine Elektronik ausgewertet, die über ein Elektrodenfeld (L4) an die Sensorelemente angebunden ist. Zur Erhöhung der Selektivität für spezielle Gasgruppen und zum Schutz des Metalloxides wird über dem Metalloxid und der Elektrodenstruktur eine Filtermembranschicht (L5) aufgetragen.

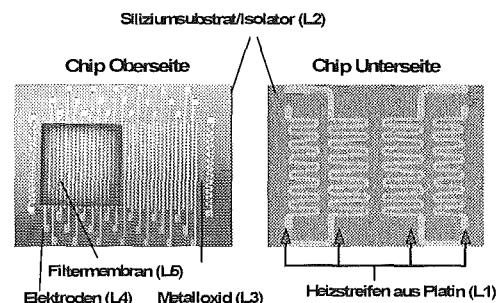


Abb. 1: Aufbau des am Institut für Instrumentelle Analytik entwickelten Metalloxid-Gassensorarrays

Die Anbindung des Chips an die Auswerteelektronik erfolgt durch ein 144 poliges, keramisches PGA-Gehäuse. Der wird Chip aus thermischen

Gründen sowie der Notwendigkeit der beidseitigen Kontaktierung auf keramischen Röhren in des PGA-Gehäuse geklebt.

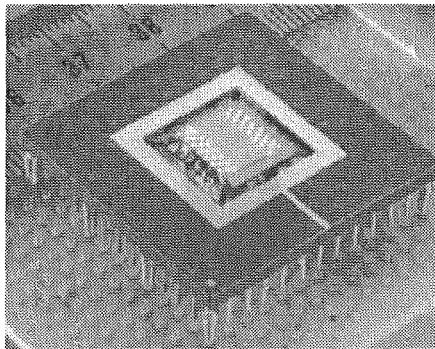


Abb. 2: Gehäuster Gassensorchip in einem 144-poligen PGA-Gehäuse.

Die Häusung des Chips ist aufwendig und teuer. Im Rahmen des Strategieprojektes „ELMINA“ werden ein neues Gehäusekonzept und Sensorlayout erarbeitet, die einerseits die vollautomatische Integration des Chips in das Gehäuse zulassen und andererseits die Bestückung des gehäusten Chips auf industrieüblichen SMD-Automaten ermöglichen. Die speziellen Fragen, die bei der Entwicklung eines Sensorgehäuses für mikrostrukturierte Gassensorarrays zu bearbeiten sind, befassen sich mit der Auswahl geeigneter Gehäusematerialien, mit dem thermischen Verhalten des Sensors und des Gehäuses, mit den Eigenschaften der elektrischen Verbindungen sowie der mechanischen Stabilität und der Zuverlässigkeit des Gehäuses [4].

## 2. Anforderungen an die Gehäuse für metalloxidische Gassensoren

Metalloxid-Sensorarrays werden auch zur Detektion von zum Teil sehr reaktiven Gaskomponenten wie Schwefelwasserstoff eingesetzt. Der direkte Kontakt des Sensors zur Umwelt und seine hohe Betriebstemperatur erfordern die Entwicklung spezieller Chipgehäuse, die nicht kommerziell verfügbar sind.

### 2.1 Materialauswahl

Das Gehäusematerial muß den hohen Betriebstemperaturen des Chips widerstehen. Die thermische Leitfähigkeit des Materials sollte sehr niedrig sein, da ein geringer Wärmewiderstand den Energiebedarf zur Einstellung der Betriebstemperatur drastisch steigert. Unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten des Chips und des Gehäuses führen zu stark unterschiedlichen Materialausdehnungen, welche frühzeitige Ermüdungsbrüche verursachen können. Neben den besonderen thermischen Anforderungen hat das Gehäusematerial speziellen chemischen Ansprü-

chen zu genügen. Es sollte aggressiven Gasen widerstehen und darf auch bei hohen Temperaturen nicht ausgasen. Es wäre ferner wünschenswert, wenn das Gehäusematerial bereits industriell eingesetzt wird, damit die Verfügbarkeit und eine preiswerte Verarbeitungstechnik gewährleistet sind.

Keramische Materialien wie beispielsweise Aluminiumoxid erscheinen für die Gehäusetechnik geeignet. Es ist temperaturstabil, chemisch inert und industriell verfügbar. Darüber hinaus wird es bereits seit langer Zeit im Bereich der Gehäusetechnik für elektronische Bauelemente eingesetzt. Da Aluminiumoxid jedoch sehr gut wärmeleitend ist, werden auch alternative Materialien wie Macor oder Zirkonoxid evaluiert.

### 2.2 Thermisches Design des Sensors und Gehäuses

Ein besonderes Kennzeichen des Karlsruher Metalloxid-Sensorarrays des Forschungszentrum Karlsruhe ist ein großer Temperaturgradient über dem Sensorfeld, der eine hohe chemische Selektivität und Sensitivität ermöglicht.

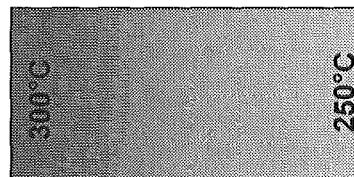


Abb. 3: Darstellung des Temperaturgradienten auf einem ca. 0,9cm x 0,8 cm großen Siliziumchip.

Das gegenwärtige Substratmaterial Silizium besitzt mit  $150 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit, wodurch der maximal einstellbare Temperaturgradient auf dem Chip auf ca.  $60^\circ\text{C}$  beschränkt ist. Die Verkleinerung der Chipausmaße einhergehend mit einer Reduktion der Energieaufnahme ist somit nur bedingt möglich. In ersten Untersuchungen wurde durch das Institut für Instrumentelle Analytik ein Chip auf einem Aluminiumoxidsubstrat aufgebaut. Die um einen Faktor fünf geringere Wärmeleitfähigkeit von Aluminiumoxid im Vergleich zu Silizium erlaubt größere Temperaturgradienten auf einem deutlich kleineren Chip. Hierdurch werden die chemischen Detektionseigenschaften verbessert und die Energieaufnahme reduziert. Ferner sind die Ausdehnungskoeffizienten zwischen einem keramischen Gehäuse und dem Chip optimal angepaßt. Durch thermische Simulationen [5] und Messungen konnte gezeigt werden, daß sich der Energieverbrauch eines  $1 \text{ cm}^2$  großen Chips um etwa 70% auf 3 Watt reduziert läßt ( $T_1=300^\circ\text{C}$ ,  $T_2=250^\circ\text{C}$ ). Als optimales thermisches Gehäuse-

konzept hat sich dabei der in einem Substrat „frei hängende Chip“ erwiesen.

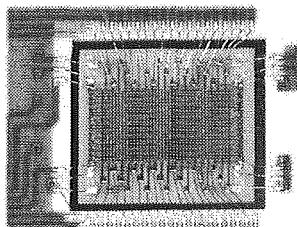


Abb. 4: Die optimale thermische Isolation erreicht man durch einen frei hängenden Chip, der nur durch die Bonddrähte gehalten wird.

### 2.3 Elektrische Verbindungen zwischen Chip und Chipträger

Ein weit verbreitetes, flexibles und sicheres Verfahren zur Herstellung der elektrischen Kontakte zwischen dem Chip und einem Chipträger ist das Drahtbonden. Ein stabiler und zuverlässiger Bondprozeß hängt unter anderem von der Oberflächenbeschaffenheit und des Verschmutzungs- oder Korrosionsgrades der Bondpartner ab. Darüber hinaus spielt die Einkopplung der Schweißenergie (Ultraschall, Kraft, Wärme) in die Bondstelle eine wesentliche Rolle [6].

Der Drahtbondprozeß ist prinzipbedingt nur für das einseitige Kontaktieren von Halbleiterbauelementen ausgelegt. Sollte die Kontaktierung eines Chips sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite erforderlich sein, muß der Chip nach dem Bonden einer Seite gewendet werden.

Durch die beidseitige Kontaktierung der Metalloxid-Chips in ihrer gegenwärtigen Aufbauform steigt das Risiko, daß die Bondstellen bei Wenden verschmutzt und mechanisch beansprucht werden. Diese Effekte können die Langzeitstabilität der Bondverbindungen negativ beeinflussen.

Der aufwendige Bondprozeß und die erhöhte Unsicherheit im Verarbeitungsprozeß, haben den Anstoß zur Weiterentwicklung der Sensoraufbautechnik gegeben. Ziel ist die Vermeidung der beidseitigen Kontaktierung und eine einfache Integration des Sensors in das gesamte elektronische System.

### 2.4 Anpassung des Sensoraufbaus zur optimalen Nutzung industrieller Fertigungseinrichtungen

Die HPE verfügt über umfangreiche technische Fertigungseinrichtungen zum automatischen Aufbau von Chip-On-Board- und Flip-Chip-Systemen. Hierzu zählen ein vollautomatischer Drahtbonder und eine hochpräzise Pick-und-Place-Maschine,

mit der Bauteile direkt aus einem Wafer verarbeitet werden können.

Der Pick-und-Place-Automat besitzt darüber hinaus eine Flip-Chip-Einheit und einen integrierten Dispenser, mit dem Kleber- oder Vergußmaterialien dispensierte werden können.

Zur Vereinfachung des Drahtbondprozesses ist es erforderlich, die Heizungsstrukturen sowie die chemisch sensitive Schicht auf derselben Seite des Substrates unterzubringen. Die elektrische Isolation der Heizungs- und der Metallocidschicht erfolgt durch das Aufbringen einer Isolationsschicht. In einem Dickschicht-Siebdruckschritt werden die Heizmäander auf einem Aluminiumoxid-Substrat aufgetragen und durch eine Glasschicht vom Metallocid getrennt. Die Metallocidschicht und das Elektrodenfeld werden wie bisher aufgesputtert.

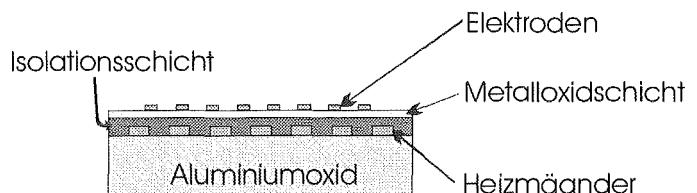


Abb. 5: Einseitiger Aufbau des MetallocidSensor-arrays.

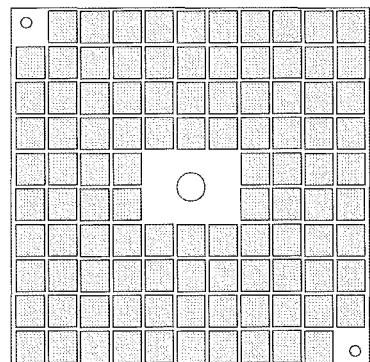


Abb. 6: Herstellung von 102 Chips auf einem 4x4 Zoll Keramiksubstrat. Grau markiert ist die Position der einzelnen Chips.

Nach der Herstellung der Chips erfolgt die Vereinzelung. Das Substrat wird dazu auf eine Folie in einen Waferring geklebt. Mit einer Wafersäge werden die einzelnen Chips auf dem Substrat voneinander getrennt und stehen zur weiteren Bearbeitung durch den Pick-und-Place-Automaten bereit. Der vereinzelte Chip wird aus dem Wafer ausgestochen und auf dem Schaltungsträger positioniert. Der Chip und das Substrat werden im Anschluß durch den Drahtbondprozeß elektrisch kontaktiert.

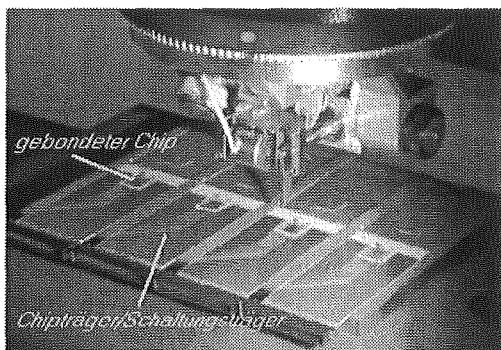


Abb. 7: Automatisches Drahtbonden der frei hängenden Chips

### 3. Qualitätsichernde Maßnahmen

Ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklung eines Fertigungsprozesses ist dessen Qualifizierung. Ein schlecht eingestellter Fertigungsprozeß kann zu einem enormen Ausschuß führen und treibt die Produktkosten deutlich in die Höhe.

#### 3.1 Anforderungen an die Heizungs- und Isolationsschicht für den einseitigen Chipaufbau

Die Widerstandswerte der Heizmäander sollten möglichst geringe Toleranzen aufweisen. Der Widerstand eines metallischen Heizmäanders hängt im wesentlichen von seiner Schichtdicke und der Leiterbahnbreite ab. Der Druckvorgang ist so einzustellen, daß die Breite und die Schichtdicke möglichst konstant gehalten werden.

Die Isolationsschicht muß zwei Anforderungen erfüllen. Zum einen können der Herstellung der isolierenden Schicht „Pinholes“ entstehen, die Kurzschlüsse zwischen der Heizungsstruktur und dem Metallocid verursachen. Zum anderen muß die Oberfläche der Isolationsschicht möglichst eben sein, um einen zuverlässigen Aufbau des Metallocidfeldes und der Elektroden zu ermöglichen.

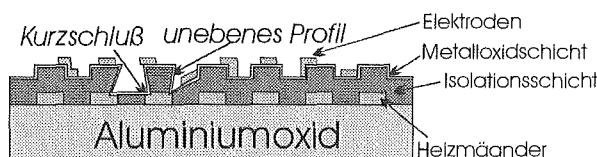


Abb. 8: Anforderungen an die Isolationsschicht – Dargestellt sind verschiedene Fehler im Aufbau der Isolationsschicht

Die Kontrolle der Strukturen der Heizungsmäander sowie der Planarität der Isolationsschicht erfolgt mit einem Laser-Mikroprofilometer zur berührungslosen Abstandsmessung. Die topographischen Karten sowie einzelne Profillinen erlauben

die Anpassung des Siebdruckprozesses, so daß eine ausreichend ebene Isolationsschicht hergestellt werden kann.

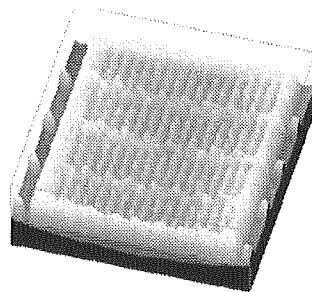


Abb. 9: Höhenprofil (8mm x 9mm) einer ungeeigneten Isolationsschicht. Die Heizungsstrukturen des Substrates bilden sich auf der Oberfläche deutlich ab.

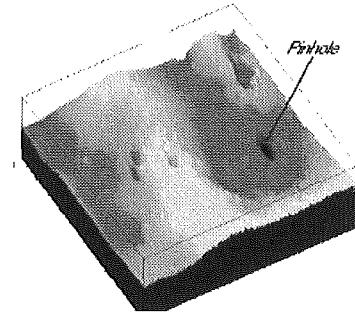


Abb. 10: Topographische Darstellung (0,6mm x 0,6 mm) eines „Pinholes“ (Loches) in der Isolationsschicht, das zu unerwünschten Kurzschläüssen zwischen dem Metallocidfeld und der vergrabenen Heizungsstruktur führen kann.

#### 3.2 Anforderungen an die Bondverbindungen

Die Qualität der Drahtbondverbindungen wird im allgemeinen durch Zug- („Pull“-) und Schertests ermittelt. Beim Pulltest wird der Bonddraht mit einem kleinen Haken von der Bondstelle abgehoben. Die Kraft, die aufgebracht werden muß, um den Draht vom Substrat zu lösen, sowie die Fehlerart (Drahtriß, Bruch des Drahtes an der Schweißkante oder Abheben des Drahtes vom Bondpad) geben Aufschluß über die Zuverlässigkeit des Bondprozesses. Darüber hinaus gestatten moderne Drahtbonder die Kontrolle des Schweißvorganges während der Verbindungs herstellung. Als Beispiel hierfür sei die In-Line-Verformungskontrolle des Drahtes während des Schweißvorganges genannt. Ein guter und reproduzierbarer Bondprozeß ist durch eine über der Zeit aufgetragene reproduzierbare Verformungscharakteristik gekennzeichnet.

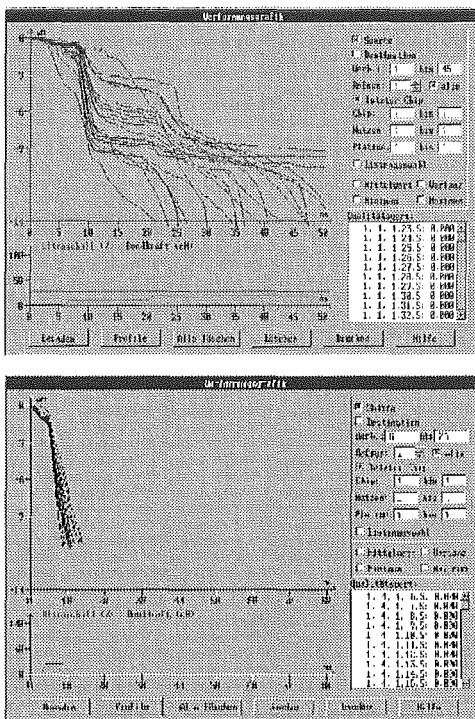


Abb. 11: Überwachung der Drahtverformung während des Schweißvorganges als Mittel zur Qualitätskontrolle bei einem Bondjet 710M der Firma Hesse & Knipps. Oben ist ein schlecht eingestellter, unten ein stabiler Bondprozeß dargestellt.

Die signifikanten Bondparameter wie Ultraschallleistung, Bondkraft, Verformung bis zum Abbruch des Schweißvorganges werden durch umfangreiche Parametervariationen ermittelt. Die Güte der Bondverbindungen wird in anschließenden Pulltests ermittelt. Die Prozeßstabilität des besten Parametersatzes wurde durch die Herstellung von 8450 Bondverbindungen überprüft:

Material (Heraeus Golddraht)	AU-PHTS 30 $\mu$
nominale Reißlast	17 cN
Anzahl hergestellter Bonds	8450
direkte Fehler beim Bonden	0
mittlere Reißlast der Bondverbindungen beim Pulltest	13,5 cN
Standardabweichung	1,2 cN

Tabelle 1: Testergebnisse zur Beurteilung der Zuverlässigkeit des Drahtbondprozesses. Die Pullwerte sind sehr gut, da sie nur knapp unter den nominellen Reißwerten liegen.

### 3.3 Prüfung der mechanischen Stabilität

Im täglichen Einsatz des Systems muß gewährleistet werden, daß die Bonddrähte nicht beschädigt werden oder Kurzschlüsse auftreten, wenn der Chip in Schwingungen versetzt wird. Zur Ermittlung der mechanischen Stabilität wird der im

Substrat frei hängende Chip einem Rütteltest nach DIN 58390 (Teil 3) unterzogen. Dabei wird das System sinusförmigen Beschleunigungsverläufen ausgesetzt und sein Verhalten überprüft.

Beschleunigung	49 m/s <sup>2</sup> (5g)
Frequenzbereich	10 bis 150 Hz
Anzahl Zyklen	5 (38 Minuten Testzeit.)

Tabelle 2: Beanspruchungsart 36 nach DIN 58390 – sinusförmiges Schwingen mit gleitender Frequenz des Schärfegrades 7

Die Rütteltests haben ergeben, daß bei ca. 85 Hz. eine Resonanzfrequenz der Chipaufhängung liegt. Bei Beschleunigungswerten von 5 g sind die Bonddrähte nach 30 Sekunden gerissen. Außerhalb der Resonanzfrequenz gab es bei dieser Beschleunigung keine Probleme. Da ferner Kurzschlüsse zwischen den Bonddrähten auftraten, erscheint die Aufbauvariante des frei hängenden Chips nicht geeignet, um in ihrer momentanen Form in einer Kleinserie weiter qualifiziert zu werden.

### 3.4 Ergebnis

Die Untersuchungen haben ergeben, daß der einseitige Chipaufbau in hoher Qualität in naher Zukunft in einen serientauglichen Fertigungsprozeß überführt werden kann. Die Einbindung des Sensors in einen Schaltungsträger muß allerdings noch überarbeitet werden.

### 4. Ausblick

Die zukünftigen Arbeiten werden sich darauf konzentrieren, ein Gehäusekonzept zu entwickeln, bei dem der Chip fest an das Gehäuse gekoppelt ist. Leistungsfähige Simulationstools wie Flotherm unterstützen den Entwurf und die Optimierung des Chip- und Gehäuseaufbaus. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, daß sich die Leistungsaufnahme des Chips im Betrieb auch bei einer festen Verbindung mit dem Gehäuse nicht signifikant erhöhen muß. Der zusätzliche Energiebedarf liegt bei entsprechendem Design und geeigneter Materialauswahl voraussichtlich unter 20%. Eine weitere Senkung des Leistungsbedarfs auf unter 1,5 Watt wird die Anpassung der Chipgeometrie erfordern.

Neben den thermischen und mechanischen Weiterentwicklungen wird das Gehäuse an die Auswerteelektronik angepaßt. Dies wird eine Verringerung der Zahl Anschlüsse von heute 144 auf zukünftig etwa 28 Pins ermöglichen.

Darüber hinaus wird auch in Zukunft die Automatisierbarkeit des gesamten Herstellungsprozesses ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklungsar-

beiten sein. In zahlreichen praktischen Anwendungen und Feldversuche wird das neue Konzept auf seine Einsatztauglichkeit überprüft werden [7].

## Literatur

- [1] P. Althainz und J. Goschnick, "Multigassensorchip auf Metalloxidbasis für Prozeßsteuerung und Umweltüberwachung", 2. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, 28./29. November 1995, ISSN 0947-8620 / ISSN 0949-7404, Wissenschaftliche Berichte des Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 5670 (1995) 131-135
- [2] A. Synowczyk, J. Goschnick und J. Benz, "Das PROXI-Projekt - Wirtschaftliche Produktionstechnik für oxidische Mehrschichtsysteme am Beispiel eines Mikrogassensorchips", Sensor Magazin 3/98 (1998) S. 7-9
- [3] Clifford K., „Selective gas detection and measurement system“, United States Patent US 4542640, 15.09.1983
- [4] Brown W. D., „Advanced Electronic Packaging“, IEEE Press, 1998, ISBN 0-7803-4700-5
- [5] Blank T., „Optimierung des thermischen Verhaltens von Metalloxidsensoren für die Gasanalyse“, Flomerics User Meeting - Bad Wildungen, 26.10.1999
- [6] Reichl H., „Direktmontage“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1998, ISBN 3-540-64203-x
- [7] [http://ifiasurf5.fzk.de/MOX-Sensors/Default\\_Ger.htm](http://ifiasurf5.fzk.de/MOX-Sensors/Default_Ger.htm), „KAMINA – Anwendungsstudien und Kooperationen mit Industriepartnern“

# INFOFLOW - ein prozessorientiertes Informationssystem zur Unterstützung inner- und überbetrieblicher Abläufe bei Einzel- und Kleinserienfertigungen

Markus Dickerhof <sup>1)</sup>, Peter Jakobs <sup>2)</sup>, Andreas Schmidt <sup>1)</sup>, Joachim Schulz <sup>2)</sup>, Frank Bulling <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Institut für Angewandte Informatik

<sup>2)</sup>Institut für Mikrostrukturtechnik, <sup>3)</sup>Informatikbüro Bulling, Speyer

## Vorbemerkung

Workflowsysteme haben im administrativen Geschäfts- und Organisationsbereich und zum Teil auch im Produktionsbereich inzwischen eine weite Verbreitung gefunden. Charakteristisch sind für die am Markt befindlichen Systeme eine Ausrichtung der Arbeitsabläufe auf hohe Fall-Stückzahlen mit geringen Änderungsraten [1].

Im Bereich der Einzel- oder Kleinserienfertigung oder auch bei strukturiertem Vorgehen im FuE Bereich sind jedoch geringe Stückzahlen mit hohen Änderungsraten, ein zumeist komplexer Aufbau und weitaus flexiblere Arbeitsstrukturen die Regel. Dennoch gibt es gerade hier sehr gute Gründe, die Mitarbeiter bei ihrer Arbeit durch eine entsprechende Ablaufsteuerung, bzw. die Integration von Informationselementen zu unterstützen. Bei solchen „ad hoc“ Abläufen kommt der Erfassung von Messdaten, Ressourcen, sowie den Anmerkungen der Mitarbeiter eine wichtige Rolle zu, denn erst diese Informationen ermöglichen eine Optimierung der Abläufe im technischen und arbeitsorganisatorischen Sinne.

## 1. Workflowbasierte Auftragssteuerung für die Mikrofertigung des Instituts für Mikrostrukturtechnik (IMT)

Im Zuge der Zertifizierung des IMT nach DIN EN ISO 9001 wurde 1997 damit begonnen, die zu erwartenden komplexen Planungs-, Steuerungs- und Überwachungsaufgaben durch den Einsatz von Softwarewerkzeugen zu unterstützen.

Es wurde schnell klar, dass herkömmliche Standard Enterprise Resource Planning (ERP) Werkzeuge für die besonderen Anforderungen einer Einzel- oder Kleinserienfertigung zu unflexibel, bzw. zu aufwendig zu konfigurieren sind.

Als Kompromiss zwischen der Nutzung von kommerziellen Standardsystemen und der notwendigen Anpassung an die speziellen Anforderungen einer Vor- und Kleinserienfertigung wurde das System INFOFLOW entwickelt. Es unterstützt die Mitarbeiter in der Planung und Fertigung, stellt aktuelle Informationen zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort zur Verfügung und hilft damit den Mitarbeitern ihre Aufgaben einfacher und schneller zu bearbeiten.

Neu an INFOFLOW ist neben vielen einzel- und kleinserienspezifischen Erweiterungen und Anpassungen herkömmlicher Workflowansätze das Gesamtkonzept das eine konsequente Nutzung, bzw. Adaption von Standardkomponenten vor sieht. Die Summe der damit verfügbaren Einzelfunktionen übersteigt die Funktionalität und Flexibilität der allermeisten Workflowsysteme.

Dennoch orientiert sich INFOFLOW an gängigen Ansätzen auf diesem Gebiet [2][3].

### 1.1 Intranet, Groupware und Workflow

Im folgenden Abschnitt soll zunächst eine Begriffsklärung vorgenommen werden, da die vorgestellten Begriffe im allgemeinen nicht eindeutig festgelegt sind:

- „*Intranet*“ ist ein lokales Netzwerk (Local Area Network), in dem vorrangig Software und Technologien eingesetzt werden, die ursprünglich für das Internet entwickelt wurden.
- „*Groupware*“ steht im Wesentlichen für die Erweiterung von Standard-Büroanwendungen, wie E-Mail, Scheduling, gemeinsame Nutzung von Daten zur Realisierung eines kontrollierten Mehrbenutzerbetriebs.
- „*Workflow*“(-management) beschreibt die teil-automatisierte, regelgesteuerte Abwicklung, Steuerung und Kommunikation von Abläufen in einem Unternehmen.

### 1.2 Anforderungen an ein Workflow-System für Einzel- oder Kleinserienfertigungen

Workflowmanagementsysteme sind heute vor allem im Bereich der Bürokommunikation zur Automatisierung von fest definierten organisatorischen Abläufen zu finden. Ein weiteres, erschlossenes Einsatzgebiet ist das Gebiet der

Großserienfertigung, wo sich der Aufwand zur detailgetreuen Modellierung der Abläufe lohnt.

Für Kleinserienfertigungen gab es in der Vergangenheit keine adäquaten Lösungen, die bei einem reduzierten Modellierungsaufwand eine flexible Planung von Abläufen, Dokumentation der Arbeitsschritte und - wichtiger noch - die Behandlung von Ausnahmen erlaubten.

### 1.3 Entwicklungsstand heutiger Systeme

Fast alle kommerziellen Workflowsysteme basieren heute auf einer zentralen Datenbank zur Ablage der Prozessinformationen. Ausgefeilte graphische Benutzeroberflächen erleichtern die Planung von Abläufen. Viele Produkte verfügen über Schnittstellen zu Standardanwendungen verschiedenster Art, die eine Anbindung an Produkte wie etwa das SAP/R3 System ermöglichen [1].

Eine Standardisierung dieser Schnittstellen (Administration und Überwachung, Workflow Clients, Eingebundene Anwendungen, Prozessplanungswerkzeuge, Interoperabilität) wie sie in dem Referenzmodell der Workflowmanagement Coalition vorgeschlagen wird (Abb.1), soll auch die Grundlage der weiterentwickelten INFOFLOW-Schnittstellen bilden :

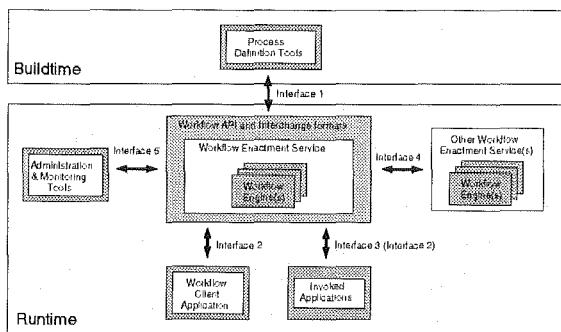


Abb. 1: Schnittstellen im WFMC Ref. Modell [4]

Schwächen heutiger kommerzieller Systeme liegen in den Bereichen: Korrektheit im Fehlerfall, Behandlung von Ausnahmesituationen, heterogene Betriebssystemumgebungen, etc.

### 1.4 Besondere Anforderungen an INFOFLOW

Primäres Ziel der Entwicklung war es, durch Online-Erfassung aller prozessrelevanten Daten eine höhere Transparenz der Abläufe in Planung und Ausführung für alle beteiligten Mitarbeiter zu erreichen. Dazu gehört insbesondere die

- Teilautomatisierung von Standardabläufen.
- Umsetzung von regelbasierten Abläufen (unterstützt damit Maßnahmen zur Qualitätssicherung).

- Beschleunigung von internen Abläufen.

Eine Betriebssystemunabhängigkeit durch Entwicklung von www-basierten Bedienerschnittstellen soll die Einführungskosten in eine vorhandene EDV-Landschaft, sowie den Administrationsaufwand reduzieren.

Im Sinne einer Dezentralisierung der Produktion muss ein solches System in der Lage sein, verteilte Fertigungsstandorte (am IMT BESSY in Berlin, ELSA an der Universität Bonn) z.B. mit Hilfe von Virtual Private Networks zu unterstützen.

Gerade in wenig automatisierbaren Prozessen ist es für die Auftragsverfolgung notwendig, sich ständig ein Bild über den aktuellen Stand der Entwicklungen machen zu können um frühzeitig Fehlentwicklungen erkennen und beeinflussen zu können. Hierzu müssen aktuelle Auftragsstati, sowie entsprechende Auswertungswerzeuge zur Verfügung stehen.

Aufgrund der z.T. häufigen Änderungen in der Vorbereitung nicht-standardisierter Arbeitsabläufe ist es notwendig, die Arbeitsanweisungen, Prozessparameter, etc. auf einem aktuellen Stand zu halten. Der Mitarbeiter sollte Informationselemente, wie History-Funktionen, tätigkeitsbezogene Arbeitsanweisungen, tätigkeitsbezogene Meßdateneingaben u.a.m. ohne Such- oder Aktualisierungsaufwand nutzen können.

Um die Akzeptanz eines solchen Systems zu erhöhen, sollte es in die gewohnte Arbeitsumgebung integriert sein und alle relevanten Informationen an der Benutzerschnittstelle zur Verfügung stellen.

## 2. Umsetzung

Der INFOFLOW-Ansatz baut im wesentlichen auf Standardsoftware auf, die um Zusatzmodule erweitert wurde. Gesteuert wird das System vom neu entwickelten Workflowmanager.

Das wichtigste Bedienermodul ist das Planungswerkzeug Project 98 von Microsoft, das um die INFOFLOW-Konfigurations-, Planungs- und Monitoringfunktionen erweitert wurde. Einen weiteren wichtigen Baustein bildet das Groupware - Werkzeug MS Exchange/Outlook - ebenfalls von Microsoft - dessen Webschnittstelle Outlook Web-Access um verschiedene Formulare, den sogenannten *elektronischen Laufkarten*, ergänzt wurde. Die Speicherung erfolgt mittels relationaler Datenbanksysteme.

In den folgenden Abschnitten soll auf diese Komponenten näher eingegangen werden:

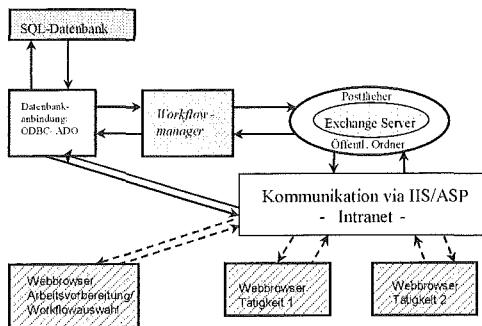


Abb. 2: Das komponentenbasierte INFOFLOW Modell

## 2.1 Workflowmanager

Das Workflowmanager-Modul ist die zentrale Komponente des INFOFLOW-Systems. Der Workflowmanager wurde als WindowsNT-Dienst realisiert, wodurch eine vollständige Integration in die Betriebssystemumgebung ermöglicht wird.

### Grundfunktionen

Seine Grundfunktionen bestehen darin, die in der Laufzeit-Datenbank abgespeicherten Abläufe, basierend auf den in der Datenbank abgelegten Regeln, zu steuern. Hierzu generiert er Nachrichten, wertet eingehende Nachrichten aus und speichert die mitgeführten Informationen.

Zusätzlich regelt der Workflowmanager die im Zusammenhang mit den Nachbearbeitungsprozessen (Reworks) stehenden Prozesse wie: Benachrichtigung des Projektverantwortlichen bei gleichzeitiger Anzeige der möglichen Nachbearbeitungszyklen, Statusverwaltung der verschiedenen zum Kundenauftrag gehörenden Fertigungs-aufträge, etc.

### Unterstützung von Nachbearbeitungsvorgängen

Eine der wesentlichen Neuheiten im INFOFLOW-Ansatz stellt die Systemunterstützung bei der Behandlung von Ausnahmefällen dar.

Stellt der Bearbeiter eines Prozessschrittes fest, dass der Auftrag nicht gemäss Spezifikation abgearbeitet werden kann, bietet das System ihm - je nach Konfiguration - folgende Möglichkeiten an:

- Eigenverantwortlicher Abbruch des Auftrags, bzw. Start eines dem Prüfschritt zugeordneten Nachbearbeitungsprozesses
- Beenden des Fertigungsschrittes mit dem status Nicht OK (NoK)

Im zweiten Fall wird die Nachricht an den Workflowmanager zurückgeschickt. Die Steue-

rungseinheit ordnet den unterbrochenen Workflow der für diesen Schritt oder den aktuellen Auftrag verantwortlichen Person zu und generiert eine Nachricht mit der Bitte um Entscheidung hinsichtlich: Abbruch, Zulassen einer Prüfausnahme oder Auswahl eines Nachbearbeitungsprozesses aus dem Pool der der aktuellen Tätigkeit zugeordneten Prozesse.

Der Hauptprozess wird zunächst angehalten und kann erst nach Beenden der Nacharbeit oder einer Prüfausnahme-Entscheidung weiterbearbeitet werden. Am Ende eines Nachbearbeitungszyklus erfolgt eine erneute Benachrichtigung des Tätigkeits- oder Prozessverantwortlichen in der dieser über den entgültigen Fortgang des eigentlichen Fertigungsprozesses entscheidet.

## 2.2 MS(T) Project mit den INFOFLOW-Extensions

MS Project beinhaltet in der Basisversion schon die wichtigsten Funktionen für eine vereinfachte Planung. Ziel der Anpassungen war es daher, diese Funktionen zu nutzen, zusammen mit den neuen Modulen in das Gesamtsystem zu integrieren und workflow-spezifische Aspekte, sowie mikrosystemspezifische Anforderungen zu ergänzen. Diese neuen Funktionen sollen anhand des INFOFLOW-Erweiterungsmenüs vorgestellt werden:

### 2.2.1 Konfiguration

Das Konfigurationsmenü beinhaltet folgende wesentlichen Unterpunkte:

#### Tätigkeiten anlegen

Hier werden die Tätigkeiten definiert, ausführungsberchtigte Mitarbeiter zugeordnet, Verweise auf die tätigkeitsspezifischen Informationselemente hinzugefügt, der Verantwortliche für die Tätigkeit festgelegt. Außerdem können verschiedene tätigkeitsspezifische Informationselemente zugeordnet werden.

#### Musterauftragsvorlage anlegen (Template)

Als Template wird im INFOFLOW-System jeder Ablauf verstanden der als Vorlage für Musteraufträge, Standardlaufkarten, etc. dient.

#### Laufkarte anlegen (Standardprozess)

In diesem Menü können Templates zu Standardprozessen umdefiniert werden. Im Zusammenhang mit den Standardprozessen können auch zugehörige Standardparameter definiert werden. Rework (Nachbearbeitungsvorgang anlegen)

Bei einem Rework handelt es sich um einen Nachbearbeitungsprozess, der in der Regel auf

einen Prüfschritt folgt. INFOFLOW erlaubt die Definition von bis zu 3 Reworks pro Tätigkeit.

## 2.2.2 Ressourcen

INFOFLOW nutzt hier die von MS Project über die Mehrprojekttechnik zur Verfügung gestellten Ressourcenplanung. Hinzu kommt noch eine datenbankbasierte automatische Zuordnung von Ressourcen zu Tätigkeiten.

## 2.2.3 Ausführung

### Interner Fertigungsauftrag anlegen/ speichern

In einem ersten Schritt legt der Planer einen internen Fertigungsauftrag an, indem er die Daten des Kundenauftrags mit dem Muster- oder Standardprozess verknüpft und kundenauftragsspezifische Details, wie, z.B. die zugehörige Layoutnummer hinzufügt. Das System generiert noch eine eindeutige Kennnummer für den neuen Workflow.

Im zweiten Schritt erfolgt die Kapazitätsterminierung und die Feindisposition durch den Feinplaner der auch die auftragsspezifischen Details vorgibt. Das System unterstützt ihn dabei durch das unterlagerte Informationssystem. Die Planungsdaten werden zusammen mit den Auftragsdaten in der Projektdatenbank abgespeichert.

### Workflow starten

Zuerst werden die Daten aus der Projektdatenbank in die Laufzeitdatenbank überführt, und dann eine den Workflowmanager initialisierende Nachricht generiert.

### Überwachungsmechanismen / Reportfunktionen

INFOFLOW erlaubt die automatisierte Abfrage des Status der einzelnen Kunden- oder Internen Fertigungsaufträge inklusive eventueller durchgeföhrter Nachbearbeitungsvorgänge. Die Aufträge können mit den von MS Project zur Verfügung gestellten Analysemethoden ausgewertet werden sowie über das Infosystem die Bemerkungen der Mitarbeiter abgerufen werden.

Die einzelnen Fertigungsaufträge lassen sich mit dem Reportgenerator in Form von individuell definierbaren Laufkarten oder Berichten ausdrucken.

## 2.2.4 Informationselemente

Die Informationselemente, wie z.B. die Arbeits- und Prüfanweisungen oder Spezifikationen, werden tätigkeitspezifisch, bzw. auftragstypspezifisch zugeordnet und sind an den entsprechenden Stellen in Planung und Produktion verfügbar.

INFOFLOW unterstützt alle gängigen Formate, wie HTML, Word und PDF.

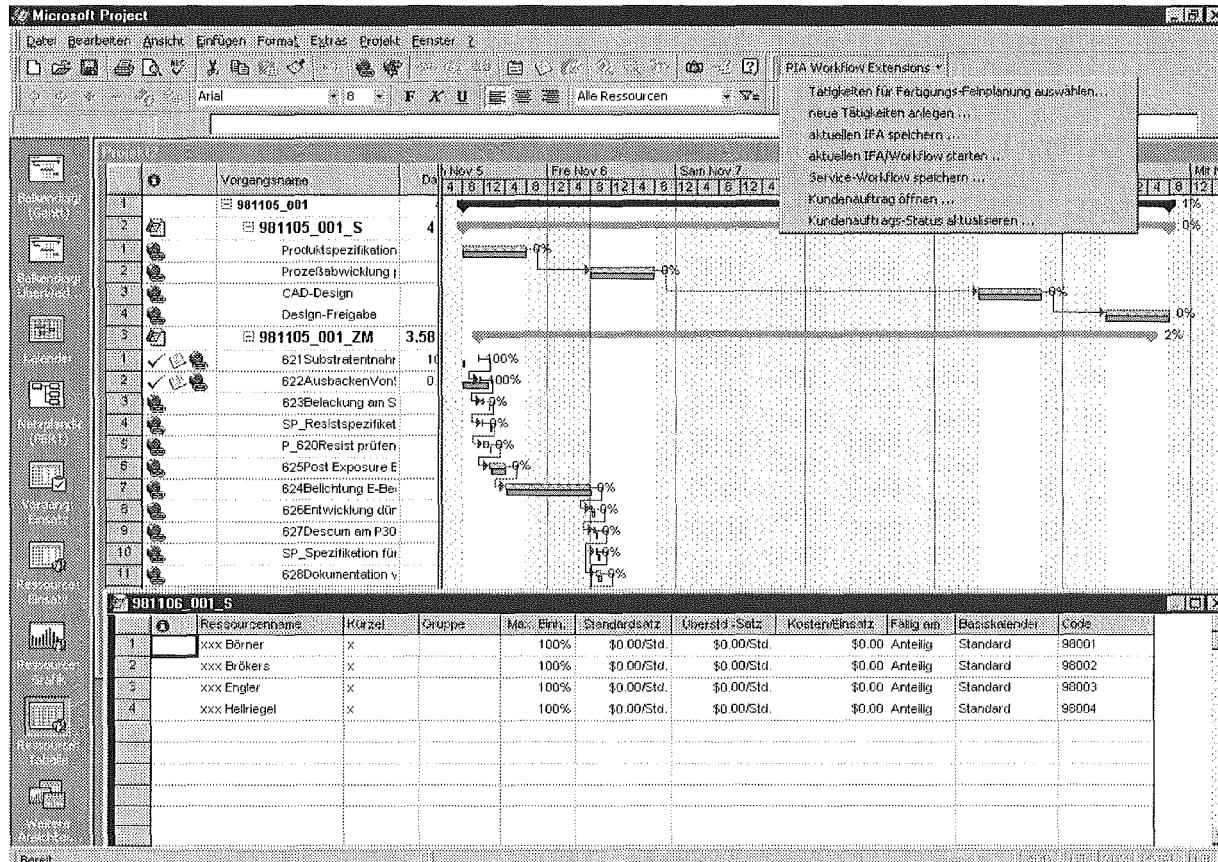


Abb. 3: Überwachungsanzeige in INFOFLOW

## 2.3 Groupwaresystem

### 2.3.1 Microsoft Exchange mit MST-Formularen

Das Groupware-System MS Exchange ist die zentrale Kommunikationskomponente im INFOFLOW - Konzept.

Hier werden die Ablagecontainer für die einzelnen Aufträge verwaltet. Die Ablagecontainer zeigen sich für den Benutzer in Form von „Postfächern“, in denen sich jeweils die offenen Aufträge zur aktuellen Tätigkeit befinden.

Das offene Konzept erlaubt die externe Generierung von Nachrichten, sowie die Modifikation der sich im System befindlichen Nachrichten. Zur Übermittlung werden die von Exchange zur Verfügung gestellten Methoden und Sicherheitskonzepte genutzt.

### 2.3.2 Microsoft Outlook Web Access – das Zugriffssystem auf die „Elektronischen Laufkarten“

MS Exchange verfügt über eine Web-Schnittstelle, die es ermöglicht, plattformunabhängig via Webbrowser auf das System zuzugreifen. Somit ist es hervorragend geeignet, in einem heterogenen Arbeitsumfeld mit verteilten Standorten als gemeinsame Kommunikationsbasis genutzt zu werden.

INFOFLOW nutzt insbesondere die Möglichkeit, selbst definierte elektronische Formulare einzubinden und über das Berechtigungssystem den Zugriff auf diese Nachrichten zu steuern. Unterschiedliche Formulartypen lassen sich definieren und den Tätigkeiten bzw. Abläufen zuordnen.

Die in Exchange verwalteten Profile unterstützen sowohl ein benutzer- als auch ein gruppenorientiertes Zugangssystem, über das die Anzeige der Postfächer gesteuert wird. Aufbauend darauf wird in den Formularen die Berechtigung, eine bestimmte Tätigkeit auszuführen, auf den Kreis der hierfür geschulten Personen eingeschränkt.

Der Benutzer meldet sich an das System an und öffnet eines der für ihn sichtbaren „Postfächer“ (entspricht einer Tätigkeit) seiner Gruppe. In jedem der Postfächer befinden sich Nachrichten, die von der Fertigungsplanung mit Prioritäten versehen werden können. Über eine konfigurierbare Anzeigetabelle lassen sich zudem wichtige Auftragsinformationen zu allen offenen Aufträgen auf einen Blick anzeigen (vgl. Abb. 4).

Die elektronischen Laufkarten selbst sind modular aufgebaut. In Abhängigkeit von der Tätigkeit können die elektronischen Formulare - wie bereits erwähnt - innerhalb eines Fertigungsauftrags variieren. Reicht ein Grund-Anzeigetyp aus können in Abhängigkeit eines bestimmten Fertigungsauftragstyps auch nur bestimmte Anzeigeelemente ein- oder ausgeblendet werden.

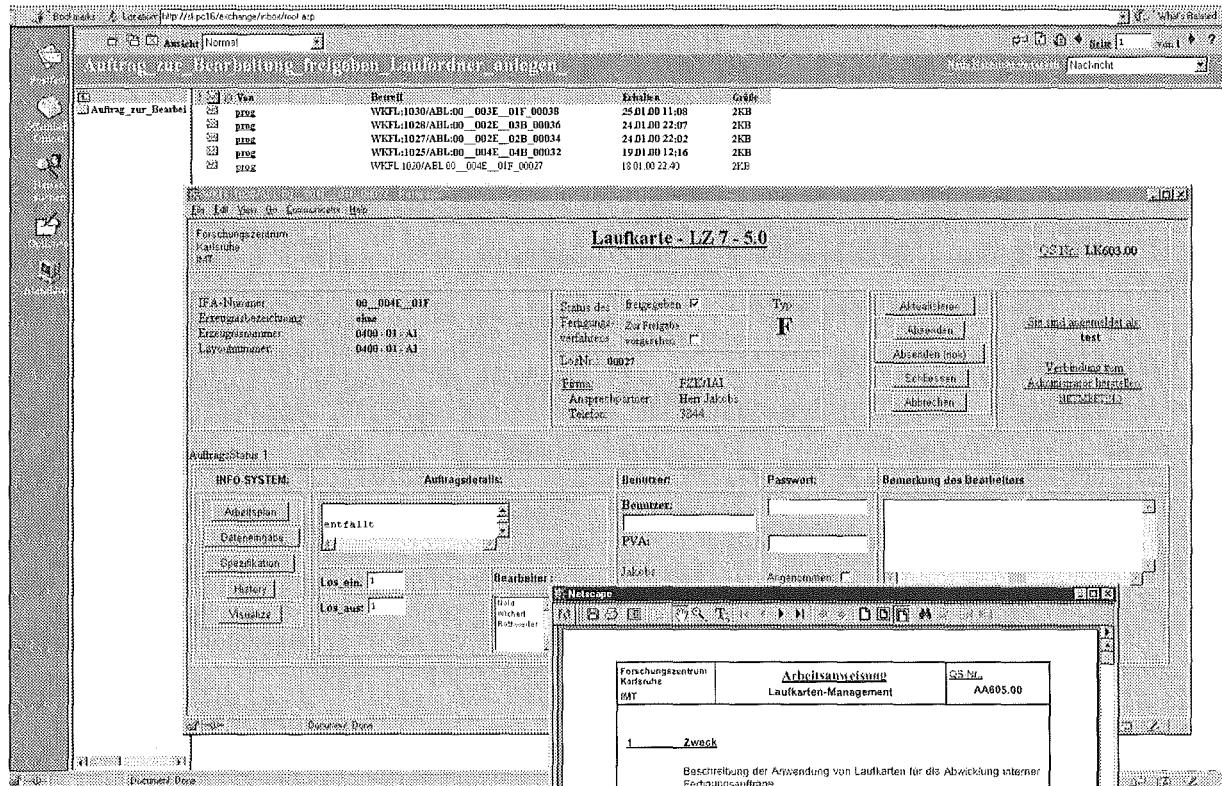


Abb. 4: „Elektronische Postfächer“ mit Laufkarte und INFOSYSTEM

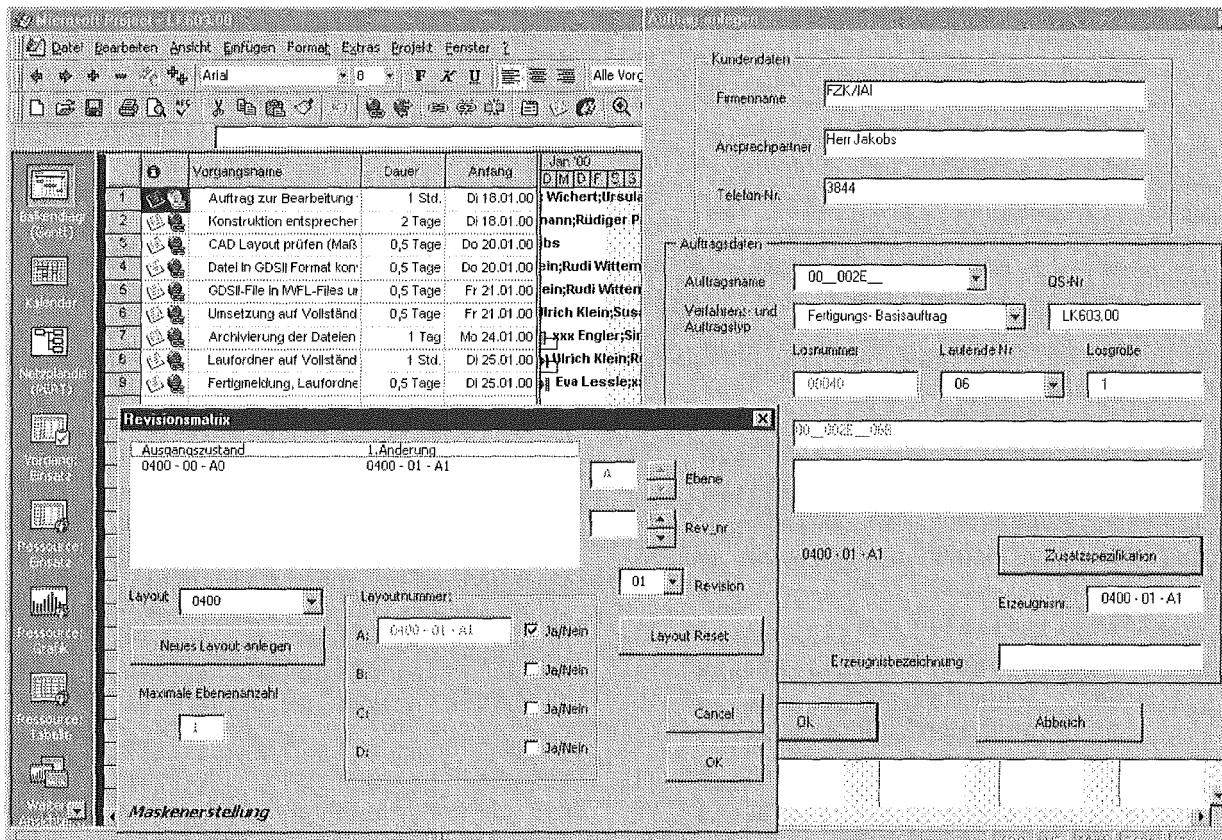


Abb. 5: Layout-Revisionsverwaltung

Eine elektronische Laufkarte besteht typischerweise aus folgenden Modulen:

- Auftragskopfdaten
- Info-Elemente mit den Arbeits-/Prüfanweisungen, den auftragstypabhängigen Spezifikationen, History- Funktion sowie die Verknüpfung zu Anwendungsprogrammen, wie z.B. Messdatenerfassung
- Mitteilungsfelder von/zur Auftragssteuerung
- Statusfelder der Laufkarte mit Aktivierung der frei definierbaren Nachbearbeitungs-Funktionen.

#### 2.4 Datenbanken in INFOFLOW

Das Datenbanksystem in INFOFLOW ist unterteilt in fünf Segmente:

- Vertrieb
- Standardprozesse
- Auftragsplanung
- Anwendungsspezifische Daten
- Auftragsverfolgung

Jedes dieser fünf Segmente kann einer der integrierten Standardkomponenten zugeordnet werden. Sollte eines dieser Werkzeuge ausgetauscht werden, so ist nicht das gesamte Datenbanksystem betroffen, es muss lediglich für dieses neue Modul

eine entsprechende Bibliotheksdatei angepasst, bzw. neu erstellt werden.

INFOFLOW kann über die ODBC-Schnittstellen (Open Database Connectivity) an die meisten marktüblichen Datenbanksysteme angepasst werden.

#### 3. Validierung des INFOFLOW-Konzepts am Beispiel der Mikrofertigung

Das INFOFLOW Konzept wurde in enger Anlehnung an die Bedürfnisse der Mikrofertigung des Institut für Mikrostrukturtechnik entwickelt. Somit sind viele der voranstehend beschriebenen Funktionalitäten aus den tagtäglichen Abläufen in der Mikrofertigung des IMT abgeleitet worden.

Gespräche mit anderen mittelständischen Unternehmen haben jedoch gezeigt, dass die prinzipielle Vorgehensweise auf viele Unternehmenstypen angewendet werden kann. Im folgenden Kapitel soll somit nur noch kurz auf IMT Spezifika eingegangen werden, die um eines allgemeinen Ansatzes Willen nicht vollständig in das Systemkonzept integriert wurden.

Eine wesentliche Komponente zur Unterstützung der IMT-spezifischen Anforderungen ist die Revisionsverwaltung der Layoutnummern, deren Logik automatisiert und in die INFOFLOW-Extensions eingebaut wurde.

Die Möglichkeit, in INFOFLOW fertigungstypabhängige Reports und Anzeigeelemente zu generieren wurde für drei Typen von Laufkarten umgesetzt: Halbzeugherstellung, Maskenherstellung und Musterfertigung.

Zur Zeit werden parallel zur Inbetriebnahme des Systems erste fertigungsspezifische Anwendungsprogramme entwickelt, bzw. sollen exemplarisch Maschinedaten zur automatisierten Bearbeitung einzelner Fertigungsschritte integriert werden.

#### 4. Weiterer Ausbau, Ausblick

- Integration von Enterprise Resource Planning - Systemen

INFOFLOW wurde als System zur Auftragsverfolgung konzipiert. Um eine schnelle Planung zu ermöglichen wurde auf die Mitführung der z.B. von ERP-Systemen verwalteten kaufmännisch administrativen Daten weitgehend verzichtet. In einem nächsten Schritt soll nun durch die Anbindung des Systems an SAP/R3 eine Durchgängigkeit zwischen ERP-System und Produktionssteuerung geschaffen werden.

- Simulationssysteme

Die mithilfe des Systems gewonnenen Daten sollen zur Planung und Analyse der Prozesse verwendet werden. Dazu wurde prototypisch das Geschäftsprozesssimulationswerkzeug INCOME der Firma PROMATIS angekoppelt. Mithilfe dieses Werkzeugs lassen sich primär kaufmännisch, planerische Aspekte, wie z.B. Fertigungs-Engpässe analysieren.

Analyse- und Planungswerzeuge zur Auswertung der gesammelten technischen Daten sind angedacht, bedingen aber zunächst die weitere elektronische Erfassung der Messdaten

- Integration von Werkzeugen zum Informations- und Wissensmanagement

Dieses Gebiet gewinnt in der Planung und Produktion zunehmend an Bedeutung. Ursache ist die Einführung neuer Organisationsstrukturen in den Unternehmen/der Forschung und die damit einhergehende Aufgabe, die Mitarbeiter an den verschiedensten Stellen des Unternehmens mit aktuellen, aufbereiteten Informationen zu unterstützen. Das INFOFLOW -Infosystem stellt hier einen ersten Schritt in diese Richtung dar [5]

- Integration in überbetriebliche Logistiksysteme für virtuelle MST Unternehmen

Wie schon im voranstehenden Abschnitt angesprochen befindet sich die Industrie in einem Wandel hin zum prozessorientierten Unternehmen. Die zugehörige Organisationsstruktur muss sich hierbei den Prozessanforderungen anpassen.

Die Mikrosystemtechnik als komplexes Fertigungsgeschehen mit einer hohen Marktunsicherheit bedingt geradezu neue Wege der Zusammenarbeit mittelständischer Unternehmen - sollen die Produkte, bzw. Produktideen der Kunden in den Markt überführt werden.

Im Rahmen zweier vom FZK zusammen mit der Firma ACR initiierten und beim BMBF, bzw. beim BMWi eingereichten Projekte  $\mu$ WebFab und  $\mu$ WebFabTools sollen die Rahmenbedingungen eines solchen gemeinsamen virtuellen Unternehmens erarbeitet und vor allem auch umgesetzt werden. Neben organisatorischen, juristischen und kaufmännisch administrativen Aspekten spielt der Kommunikations- und Informationsaspekt hierbei eine wesentliche Rolle. INFOFLOW kann hier als eine wichtige Basiskomponente integriert werden.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist auch der Materialfluss, auf den in einem weiteren Beitrag in diesem Tagungsband detaillierter eingegangen werden soll [6].

#### Literatur:

- [1] A. Schmidt: Ein Beitrag zur Realisierung von verteilten Workflow-Managementsystemen durch Entwicklung verfahrensunabhängiger Basiskomponenten; (Dissertation Fak. für Maschinenbau TU Karlsruhe 2000)
- [2] M. Dickerhof, M. Didic, U. Mampel: Workflow and CIMOSA- background and case study; Computers in Industry 40 (Elsevier 1999)
- [3] M. Dickerhof, M. Didic, U. Mampel: Infoflow and intranet.; 32nd Internat. Symp. on Automotive Technology and Automation (ISATA), Wien, A, 1999
- [4] D. Hollingsworth: The Workflow Reference Model (Technischer Bericht WMC, 1994)
- [5] M. Dickerhof, F.J. Kaiser, U. Mampel, M. Strempfer: Infoflow eine workflowbasierte Lösung im Intranet; Herausforderung Geschäftsprozess (Logis-Verlag 1998)
- [6] U. Gengenbach, F. Engelhardt, A. Hofmann, R. Scharnowell: Materialflusssysteme für die Produktion von Mikrosystemen (dieser Tagungsband)



# **Lasergestützte Entwicklung von mikrostrukturierten Komponenten und Abformwerkzeugen**

W. Pfleging <sup>1)</sup>, T. Hanemann <sup>1)</sup>, W. Hoffmann <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Materialforschung

<sup>2)</sup> Institut für Instrumentelle Analytik

## **Zusammenfassung**

Am Forschungszentrum Karlsruhe werden die materiakundlichen und anwendungsrelevanten Aspekte des Einsatzes von Laserstrahlquellen zur Bearbeitung von Keramiken, Halbleitern, Metallen und Kunststoffen untersucht. Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt in der Strukturierungstechnik und Verbindungstechnik für die Anwendungsgebiete Mikrosystemtechnik und Medizintechnik. In diesem Beitrag werden die grundlegenden Untersuchungen und Anwendungen der lasergestützten Herstellung von Formeinsätzen und der 3D-Strukturierung von Kunststoffen vorgestellt. Durch den Einsatz von Laserstrahlung werden durch hochpräzisen Formabtrag und Oberflächenmodifizierung Formeinsätze aus Stählen, Hartmetallen oder Keramiken für hohe Belastungen in der Mikroabformtechnik hergestellt. Diese Formeinsätze sollen die Abformung von polymeren, keramischen und metallischen Mikrostrukturen ermöglichen. Derzeit werden minimale Strukturgrößen von 40 µm bei einem Aspektverhältnis von 10 erreicht. Durch UV-Laserstrahlung werden in Kunststoffen hohe Aspektverhältnisse bis 40 erreicht und z.B. zur Herstellung von Biocontainerstrukturen oder Kanalstrukturen für die Medizintechnik eingesetzt. Die Strukturauflösungen liegen hierbei im Mikrometerbereich.

## **1. Einleitung**

In der Mikrosystemtechnik kommt der Strukturierung einer ganzen Palette von Materialien im Mikrometerbereich eine zentrale Bedeutung zu. Das am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte LIGA-Verfahren ermöglicht die Herstellung von strukturellen Details <1 µm mit hoher Präzision, hohen Aspektverhältnissen bis 500 und einer Oberflächenrauigkeit  $R_a < 50$  nm. Alternativ können Formeinsätze über Ultrapräzisionszerspanung, Erodierverfahren oder chemische Verfahren hergestellt werden [1]. Bei diesen Verfahren ist man jedoch hinsichtlich der Auswahl strukturierbarer Werkstoffe jeweils stark eingeschränkt. Speziell für die Abformung keramischer und metallischer Mikrokomponenten ist die Herstellung hoch belastbarer Formeinsätze aus Stahl oder Hartmetall erforderlich.

Eine Fertigungstechnik, die Stähle und Hartmetalle präzise strukturieren kann, ist der Laserstrahlformabtrag. Die hohen Anforderungen, die die Mikrospritzgießtechniken an die Formeinsatzstrukturen hinsichtlich der Oberflächenqualitäten stellen, machen eine Weiterentwicklung der Laserprozessstrategien erforderlich. Um mit der thermischen/photolytischen Lasermaterialbearbeitung von Stählen und Hartmetallen mit Nd:YAG- und UV-Laserstrahlquellen hochpräzise, defektfreie und hinreichend glatte, d.h. abformbare Strukturen herstellen zu können, ist eine intensive Materialforschung in Verbindung mit der Lasermaterialbearbeitung erforderlich.

Die Direktstrukturierung von Kunststoffhalbzeugen erfolgt durch Excimer-Laserstrahlung als „kalter“ Materialabtrag, wodurch eine hohe Strukturgüte bei vielen Kunststoffen gewährleistet wird. Beispiele für Anwendungen dieser Fertigungstechnik sind die Strukturierung von Lumenkathetern und Biocontainern für die Medizintechnik. Hierbei werden minimale Strukturauflösungen von 2 µm bei Aspektverhältnissen von 40 erreicht [2,3]. Ein weiterer Vorteil dieser Technologie ist die direkte Herstellung von dreidimensionalen Oberflächenstrukturen (z.B. sphärische Oberflächen; Hinterschneidungen) in Kunststoffen mit Strukturauflösungen im Mikrometerbereich [2].

Kurze Wellenlängen werden in der Dünnschichttechnik für den selektiven und hochpräzisen Abtrag von Schichten- und Schichtsystemen eingesetzt. Die hierbei vom Forschungszentrum verfolgten Anwendungen liegen u.a. in der Solar-technologie und in der Herstellung IC kompatibler Induktoren [4]. Der selektive Abtrag von dünnen metallischen Schichten ( $\leq 100$  nm) mit einem Laserpuls wurde bereits für ausgewählte Systeme demonstriert [5]. Der Abtragsprozess wird dabei durch die Diskontinuität der Grenzfläche Schicht-Substrat initiiert. Die Abtragsschwellintensität ist in diesem Fall schichtdickenabhängig.

In der „Makrowelt“ haben sich in den letzten 5 Jahren verschiedene Verfahren des Rapid Prototyping, (RP) oder Rapid Tooling (RT) etabliert. Darunter sind weitestgehend aufbauende Verfahren zusammengefasst, bei denen CAD-

Konstruktionsdaten schichtweise direkt in ein geometrisches Formmodell umgesetzt werden: Stereolithographie (SL) [6,7], Multi-Jet Modeling (MJM), und selektives Lasersintern (SLS) [6-9]. Bisher gibt es wenige Ansätze, RP- und RT-Verfahren in der Mikrosystemtechnik zu etablieren. Die Miniaturisierung der Stereolithographie führt zum „Micro Photoforming Process“ [10] mit einer erreichbaren Auflösung von minimal 8 µm. Im MPL-Verfahren (Micro-Photo-Verfestigung mittels LCD-Maskentechnik) werden kleinste laterale Strukturabmessungen von derzeit 10 µm erzielt [11]. Das als „Rapid Micro Product Development“ (RMPD) bezeichnete Verfahren der Fa. microTEC, Duisburg, basiert auf eng fokussierten Laserspots und erlaubt die Herstellung von Mikrostrukturen aus Kunststoff mit vergleichbaren strukturellen Details wie das MPL-Verfahren [12].

## 2. Formeinsatzherstellung und Abformung

### 2.1 Lasergestützte Fertigung von Formeinsätzen

Formeinsätze für Anwendungen in der Mikroabformtechnik werden derzeit durch die LIGA-Technik und/oder mikromechanische Verfahren (Fräsen mit Mikrowerkzeugen) in Nickel, Messing und neuerdings auch in härtbarem Stahl hergestellt. Die Herstellungsdauer, beginnend von der CAD-Zeichnung bis zum fertigen Formeinsatz, kann im Fall eines LIGA-Formeinsatzes mehrere Wochen reine Prozesszeit betragen. Im Unterschied dazu kann eine direkte Strukturierung von Metallen über eine Laserstrahlmaterialbearbeitung eine schnelle Formeinsatzfertigung innerhalb weniger Tage ermöglichen, allerdings nicht in der hohen Präzision und Oberflächenqualität wie beim LIGA-Verfahren.

Hartmetallformeinsätze zeichnen sich im Unterschied zu den üblicherweise verwendeten Formeinsätzen aus Nickel oder Messing durch eine erhöhte Abrasionsbeständigkeit aus. Dies ist im Hinblick auf die Abformung keramischer Formmassen von besonderer Wichtigkeit. Wolframcarbidhaltige Hartmetalllegierungen wie WIDIA® (WC6Co) lassen sich mittels Laserablation strukturieren [13]. Ein Q-switch Nd:YAG Laser ( $\lambda=1064$  nm bzw. 532 nm, Pulsdauer 100 ns) wird auf die Hartmetalloberfläche fokussiert und mittels eines Spiegelsystems über die Oberfläche gelesen (Scangeschwindigkeit bis zu 2000 mm/s). Zusätzlich lässt sich der zu strukturierende Formeinsatzrohling über ein x,y,z-Positioniersystem mit einer Genauigkeit von 2 µm (x,y) bzw. 1 µm (z) verschieben.

Strukturen mit einer Gesamthöhe von bis zu mehreren Millimetern werden bei Pulsfrequenzen von 4–8 kHz erzeugt. Pro Puls werden bis zu  $2 \times 10^3$  µm<sup>3</sup> Material ablatiert. Die Oberflächen-

rauheit der Grundfläche (chemisch-thermisch beeinflusste Zone) bzw. der Seitenwände sind mit  $R_a=1\text{--}5$  µm noch sehr hoch. Daher wird in einem zweiten Bearbeitungsschritt mittels eines KrF-Excimer-Lasers ( $\lambda=248$  nm, Pulsdauer 20 ns) die Oberfläche bis zu einem  $R_a$ -Wert von 400 nm geglättet. Das Verfahren „UV-Glättens“ kann in diesem Zusammenhang als laserinduzierter Trockenätzprozess mit sehr kleinen Abtragsraten (0.2 nm/Laserpuls) beschrieben werden. Durch diese Nachbearbeitung wurde es zum erstenmal möglich, mit Laserstrahlformabtrag Grabenstrukturen in Hartmetall mit einer Breite von 40 µm und einer Tiefe von 400 µm für die Mikrospritzgießtechnik erfolgreich herzustellen (Abb. 1).

Stahl hat im Vergleich zum Hartmetall eine höhere Duktilität, und mechanische Spannungen werden innerhalb von Temperaturzyklen besser abgebaut, so dass spröder Bruch speziell bei schwingenden oder schmalen Strukturgeometrien vermieden wird. Die Makrostrukturierung von Stählen durch Q-switch Nd:YAG-Laserstrahlung wurde bereits eingehend untersucht [14,15]. Wesentliche Verfahrensparameter konnten hierbei für Abtragsgeometrien im mm-Bereich bestimmt werden:

- Kombination von Schrullen und Schlitten (Zweistufenprozess)
- Minimierung der Oberflächenrauheit durch eine Ortho-Scan-Technik (Abtragsstrategie)
- Einstellung des Kantenwinkels hergestellter Gesenke durch Variation des Einstrahlwinkels

Durch den Zweistufenprozess wird die Bearbeitungszeit infolge des langwierigen Schlittens deutlich erhöht. Außerdem ist bei der Stahlstrukturierung durch Q-switch Nd:YAG-Laserstrahlung die Präzision begrenzt durch auftretende Bartbildung an den Strukturkanten und durch Debrisformationen (Schmelzpartikel, Ablagerung rekondensierter Materie) außerhalb strukturierter Bereiche. Zur deutlichen Verkürzung der Prozesszeit und weiteren Erhöhung der Präzision der Strukturierung ist ein Einstufenprozess ohne Schlitten wünschenswert. Hierzu soll das sogenannte „Lasermikrospanen“ eingesetzt werden [16,17]. Laserspanen ist ein laserinduzierter Oxidationsprozess, bei dem der Stahl durch den Laserstrahl lokal aufgeheizt und durch den im Prozessgas enthaltenen Sauerstoff oxidiert wird. Um den Prozess der Oxidation zu initiieren, muss die Stahloberfläche durch den Laserstrahl auf eine Mindesttemperatur erwärmt werden. Der sich bildende Span wird selektiv abgetragen. Ein gebrauchsfähiger mikrostrukturierter Formeinsatz inklusive der Oberflächenglättung lässt sich, beginnend bei der Eingabe der CAD/CAM-Daten bis zum fertigen Hartmetall- oder Stahlformeinsatz, innerhalb von zwei bis vier Tagen realisieren.

## 2.2 Abformung durch lichtinduziertes Reaktionsgießen (UV-RIM)

In Analogie zur Stereolithographie lassen sich Reaktionsharze auf MMA/PMMA bzw. Styrol/ungesättigte Polyesterbasis (UP) nach Zugabe von Photoinitiatoren mit UV- oder sichtbarem Licht innerhalb kurzer Zeit aushärten und in einer Versuchsanlage zur Abformung von mikrostrukturierten Formeinsätzen verwenden (lichtinduziertes Reaktionsgießen). Der Prototyp eines einfachen Laboraufbaus wurde in einer Presse mit maximaler Presskraft von 60 kN realisiert. Der vertikale Aufbau besteht aus zwei Hauptkomponenten: der untere Teil beinhaltet die Strahlungsquelle (breitbandiges UV/VIS-Spektrum von 300–500 nm) sowie eine transparente Werkzeughälfte aus Borsilikatglas. Im oberen Teil befinden sich die Formeinsatzhalteplatte mit zwei Formeinsätzen (maßlich kompatibel zu den gängigen Abformverfahren (Heißprägen, Spritzgießen) in der Mikrotechnik), ein Auswerfersystem, ein Anschluß für eine Vakuumpumpe zum Evakuieren der Formnester sowie die Einspritzeinheit mit Materialreservoir. Durch den einfachen modularen Aufbau ergeben sich kurze Rüstzeiten für den Formeinsatz- und Abformmassenwechsel von weniger als 30 min, so dass erste Prototypen aus unterschiedlichen Mischungen je nach Zusammensetzung des Photopolymers innerhalb von 1-2 Stunden erhalten werden können.

Ein typischer Abformzyklus, komplett durchgeführt bei Umgebungstemperatur, besteht aus den folgenden Prozessschritten [16]:

1. Schliessen des Abformwerkzeuges und Evakuieren der Formnester (Restdruck <1 mbar)
2. Einspritzen/Eingießen des Reaktionsharzes mit einem Einspritzdruck <20 bar
3. Photopolymerisation mittels intensivem UV/VIS-Licht (Intensität bis 1 W/cm<sup>2</sup>) unter Beibehaltung eines Formmassenachdrucks
4. Öffnen des Werkzeugbereiches und Formteilentnahme

Die Polymerisationszeit hängt von der Reaktionsharzzusammensetzung, der Bauteilschichtdicke, der Bestrahlungsintensität sowie vom Photoinitiatorgehalt ab. Ausgehend von kommerziell erhältlichem Reaktionsharz Plexit 55® auf MMA/PMMA-Basis (Fa. Röhm, Darmstadt) oder Styrol/UP-Basis (Fa. Neste Chemicals, Porvoo, Finnland) wurden geeignete Abformmischungen hergestellt. Im Absorptionsbereich des Photoinitiators optisch nicht transparente Komposit-Mischungen (z.B. Keramik-gefüllte Systeme) lassen sich durch die Zugabe geeigneter Mengen thermischen Starters beschleunigen, so dass die Polymerisation an der Grenzfläche zur Glasplatte

photochemisch startet und in der Formteiltiefe zusätzlich thermisch beschleunigt wird (zeitliche Verkürzung um 50 %).

## 2.3 Abformergebnisse

Die prinzipielle Abformbarkeit eines Formeinsatzes hängt weitestgehend von der Oberflächenrauheit ab. Durch die prozessbedingte Schräge der Seitenwände wird die Abformung von Mikrostrukturen mit Aspektverhältnissen >2 begünstigt. So lassen sich beispielsweise Stegstrukturen mit einem Aspektverhältnis von 10 und kleinstem strukturellen Detail von 40 µm auf einem mittels Excimer-Laser geglätteten Formeinsatz in guter Qualität mit ungesättigtem Polyesterharz abformen (Abb. 1).

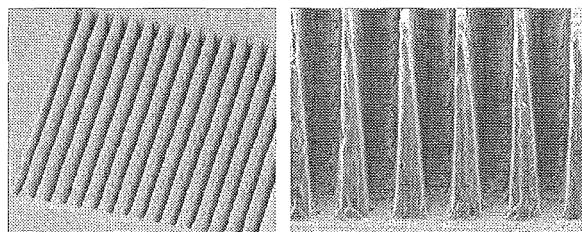


Abb. 1: REM-Aufnahmen eines über Laserablation hergestellten Hartmetallformeinsatzes (Tiefe 400 µm, -breite 40 µm) sowie abgeformtes Teil (UP)

Abb. 2 zeigt eine der ersten durch Laserformabtrag großflächig hergestellten Formeinsatzstrukturen und die dazugehörige abgeformte Komponente (UP). Diese Struktur stellt eine Ventilplatte mit zwei unterschiedlichen Vertiefungen mit den Durchmessern von 1 mm und 200 µm dar. Aufgrund der nach oben geöffneten Struktur ließ sich der Formeinsatz trotz der hohen Wandrauheiten gut entformen.

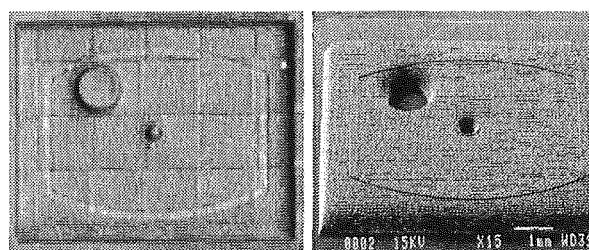


Abb. 2: Lichtmikroskopische und REM-Aufnahmen eines über Laserablation hergestellten Hartmetallformeinsatzes (links) und abgeformtes Bau teil (UP) mit einer Strukturhöhe von 500 µm (rechts)

Mikrostrukturierte, durch Laserstrahlformabtrag hergestellte Stahlformeinsätze sind zur Abformung mit dem UV-RIM-Verfahren ebenfalls gut geeignet. Abb. 3 zeigt eine einfache Teststruktur mit einer Stifthöhe von 55 µm, einer Stiftbreite von

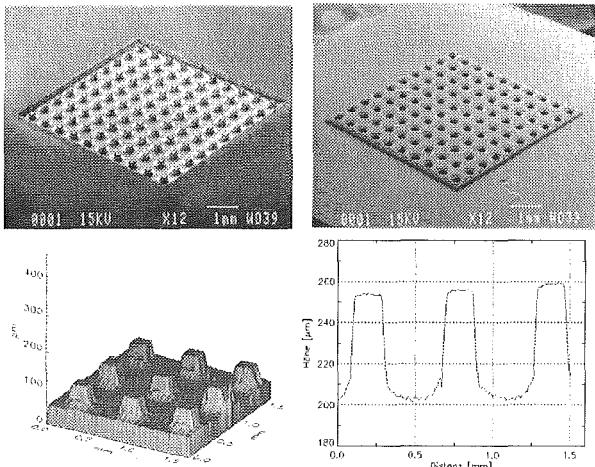


Abb. 3: REM-Aufnahmen eines über Laserablation hergestellten Stahlformeinsatzes (links oben), abgeformtes Bauteil (PMMA, rechts oben), sowie die Darstellung der Formeinsatzoberfläche mit Profil (unten)

190 µm und einem Pitch von 590 µm. Der in der Struktur gemessene Mittenrauhwert  $R_a$  beträgt 0.85 µm.

Im Hinblick auf die prototypische Fertigung von Mikrokomponenten für die **Bio-Analytik** und die medizinischen Diagnostik wurde ein einfaches Design eines miniaturisierten Kapillarelektrophorese (CE) Chips mittels Laserstrahlformabtrag in einen Stahl- bzw.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Formeinsatz übertragen (Abb. 4 und 5).

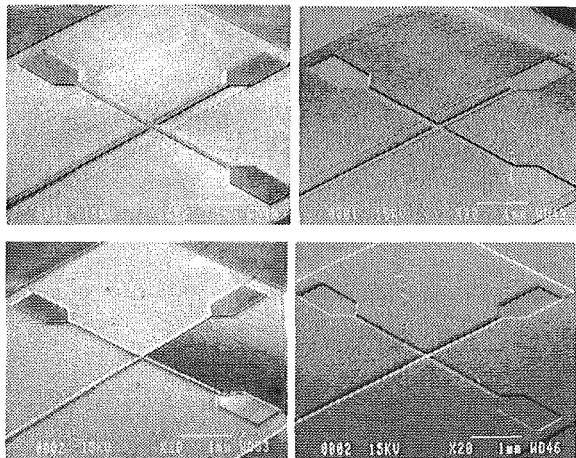


Abb. 4. Oben: REM-Aufnahmen eines Stahlformeinsatzes (Strukturierung durch Lasermikrospanen) und eines abgeformten PMMA-Teils. Unten: Nach Optimierung der Prozessstrategie und geeigneter Materialauswahl werden glatte Oberflächen ( $R_a=0.3-0.5 \mu\text{m}$ ) des Stahlformeinsatzes und des abgeformten CE-Chips erzielt

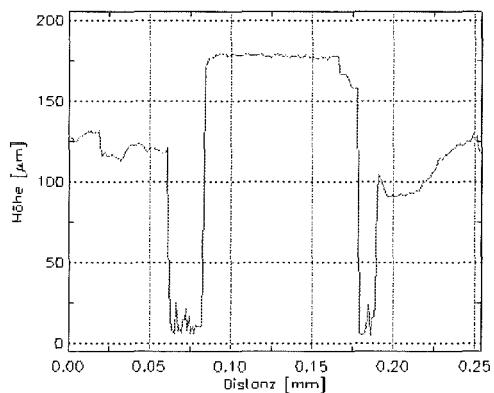


Abb. 5: Profil eines Steges eines  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Formeinsatzes. Strukturierung durch Lasersublimationsabtrag

Die Stege weisen eine Strukturbreite von 98 µm (Strukturgrund) bzw. 93 µm (Plateau) auf, die Höhe beträgt 62 µm. Die Oberflächenrauhigkeit des Keramikformeinsatzes ist mit einem  $R_a$ -Wert von 11.2 µm deutlich höher als der vergleichbare Stahlformeinsatz (Abb. 4 oben,  $R_a=0.8 \mu\text{m}$ ). In Abb. 5 sind deutlich die seitlichen Gräben neben der Stegstruktur zu erkennen; sie dienen als Klebewulst (Tiefe: ca. 107 µm, Breite ca. 24 µm) für das abgeformte Teil. Dadurch wird verhindert, dass beim Aufkleben des Deckels Klebstoff in die Kapillare fließt. Mit dem lasergefertigten Stahlformeinsatz wurde eine Kanaltiefe von 25 µm mit einer Höhe der Klebewulst von ca. 5 µm realisiert. Die technische erzielbaren Oberflächenqualitäten beim Laserspanen ohne Nachbearbeitung betragen derzeit  $R_a=0.3-0.8 \mu\text{m}$  und  $R_z=1-3 \mu\text{m}$ .

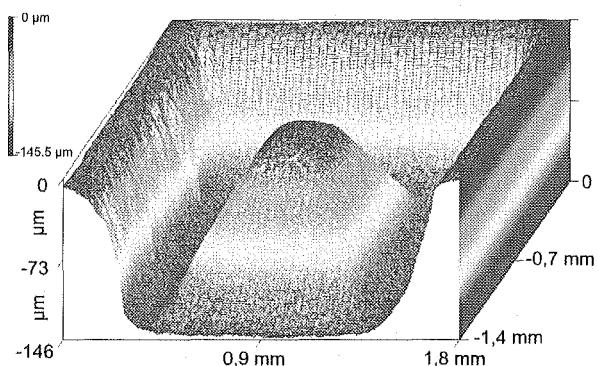


Abb. 6: Die Profilometrieaufnahme zeigt eine durch Lasermikrospanen gefertigte Pyramidenstruktur in Stahl

Durch eine auf das gewünschte Strukturierungs-ergebnis angepasste Prozessstrategie lassen sich sogar dreidimensionale Strukturen erzeugen (Abb. 6). Durch einen nachgeschalteten Elektropolierschritt können 3D-Oberflächen mit optischer Qualität erzeugt werden. Die Oberflächenkrümmung der in Abb. 6 dargestellten Pyramidenstruktur ist für alle Flanken gleich.

### 3. Hochpräzise Strukturierung von Kunststoffen

Der Formabtrag durch Laserstrahlung mit Strukturgenauigkeiten im Mikrometerbereich erfolgt durch Excimer-Laserstrahlung (Wellenlängen: 248 nm, 193 nm) als „kalter“ Materialabtrag, wodurch eine hohe Strukturgüte bei vielen Kunststoffen gewährleistet wird. Beispiele für Anwendungen dieses Verfahrens in der Medizintechnik sind die Strukturierung von Lumenkathetern oder Biocontainern. Die Biocontainer werden zum Anlegen von Zellkultursystemen verwendet (Abb. 7). Mit Hilfe der Excimer-Laserstrahlung werden Löcher mit einem Durchmesser von ca. 2-2.5 µm und einer Bohrlänge von ca. 100 µm in den Boden der spritzgegossenen Biocontainer eingebracht. Dies entspricht einem Aspektverhältnis von größer als 40. Die Bohrungen dienen als Kanäle für die Nährstoffzufuhr zu den Zellkulturen. Die Lochdurchmesser müssen kleiner als 3 µm sein, um ein Zuwachsen durch die Zellen zu vermeiden. Die Strukturierung durch Excimer-Laserstrahlung ermöglicht die Herstellung von mehr als  $10^4$  Löchern pro Minute. Die Strukturen müssen nicht mehr durch Reinigungsschritte nachbearbeitet werden. Durch die Verwendung von Helium als Prozessgas oder durch geeignete Wahl der Laserparameter können störende Debrisablagerungen deutlich verringert werden. Für die Strukturierung wurden Optiken mit kleiner numerischer Apertur eingesetzt.

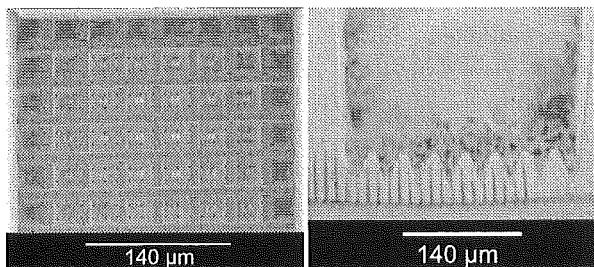


Abb. 7. Links: Aufsicht auf laserstrukturierten Biocontainer aus Polycarbonat. Rechts: Querschnitt durch Biocontainer mit angelegter Rattenleber-Zelllinie

Die direkte Strukturierung von Kunststoffen ermöglicht zudem die prototypische Herstellung von mikrofluidischen Komponenten (Abb. 8). Bei Abtragsraten von bis zu 1 µm/Laserpuls und typischen Laserpulsfrequenzen von 5-50 Hz (maximal möglich: 100 Hz) können z.B. großflächige Kanalstrukturen durch einen scannenden Abtrag hergestellt werden. Die Excimer-Laserstrahlung kann durch komplexe Masken geometrien bzw. variable motorisierte Masken über Makro- bzw. Mikroprojektionsoptiken großflächig auf die Kunststoffoberfläche abgebildet werden. Der Pulsversatz beim scannenden Abtrag beeinflusst hierbei maßgeblich die Oberflächengüte der hergestellten Kanäle. Ein großer Versatz

zwischen den Laserpulsen führt zu einer deutlichen Wellenstruktur auf dem Kanalboden. Ebenfalls können gekrümmte Oberflächen gezielt eingestellt werden. Durch die Verwendung motorisierter Masken werden auch für die Kanalendpunkte scharfe Kanten erzielt. Die Kanalbreiten können in einem Bereich von 1-300 µm kontinuierlich eingestellt werden. Die erreichbaren Aspektverhältnisse sind material- und strukturabhängig. Für die gut strukturierbaren Kunststoffe (z.B. PEEK, PC, PI, PSU, PMMA) werden Aspektverhältnisse von 3-10 erzielt [2,3].

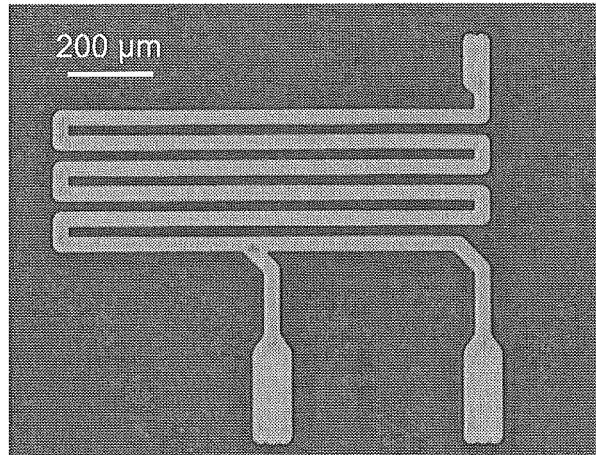


Abb. 8. Prototyp eines Mikromischers aus Polycarbonat durch direkte Strukturierung mit Excimer-laserstrahlung

Excimer-Laserstrukturierung von Kunststoffen ermöglicht die Herstellung von dreidimensionalen Strukturen: Beispiele dazu sind sphärische Strukturen oder Kanalstrukturen mit Hinterschnitten. Hierbei hat sich herausgestellt, dass die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf beliebige Kunststoffe übertragen werden können, sondern dass die Strukturierbarkeit, die erzielbare Formgenauigkeit und die Oberflächengüte eine Funktion der Laser- und Werkstoffparameter sind. PMMA zum Beispiel absorbiert Excimer-Laserstrahlung bei 248 nm nur mäßig ( $\alpha_{248}=102 \text{ cm}^{-1}$ ), jedoch wird ein Inkubationseffekt beobachtet, bei dem nach Bestrahlung des PMMA mit einer bestimmten Anzahl von Pulsen der Materialabtrag einsetzt. Die Oberfläche des PMMA zeigt bei den ersten Pulsen eine deutliche Aufrauhung mit einer blasenähnlichen Struktur. Nach der Inkubationszeit setzen der Abtrag und die Glättung der Oberfläche ein. PMMA kann mit Abtragsraten von ca. 3 µm/Puls bei 10 J/cm<sup>2</sup> strukturiert werden. Der thermische Eintrag ist jedoch so hoch, dass es infolge thermisch induzierter Spannungen zu Rissen in der Struktur kommen kann. Für geringere Energiedichten ist dagegen bei einer Abtragsrate von kleiner als 2.5 µm/Puls eine Bearbeitung möglich. Die Abtragsrate von PMMA ist für hohe Energiedichten (>6 J/cm<sup>2</sup>) nahezu kon-

stant. Die Querschnitte durch Kanalstrukturen in PMMA können in Abhängigkeit von der Laserstrahlenergiedichte unterschiedliche Struktur geometrien aufweisen: U-Gräben, V-Gräben, Hinterschneidungen. Für die Materialbearbeitung wurden *Ealing*-Objektive mit hoher numerische Apertur eingesetzt. Dadurch werden Strukturauf lösungen unterhalb von 1 µm und Hinterschneidungen bei großen Tiefen möglich.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Herstellung von hochbelastbaren Formein satzstrukturen durch Laserstrahlformabtrag ist ge eignet zur schnellen Herstellung von Mikro komponenten in hoher Stückzahl. Die derzeitige Laserprozeßstrategie ermöglicht minimale Strukturgrößen von 40 µm bei einem Aspektverhältnis von 10 und Oberflächenqualitäten mit Mittenrauh werten von 400 nm. Diese Mikrostrukturen lassen sich im lichtinduzierten Reaktionsgießen in guter Qualität abformen. Eine weitere Optimierung speziell des Laserspanens von Stählen führte zu einer deutlichen Reduzierung der Rauhwerte. Die prinzipielle Machbarkeit und das hohe Potential wurde bereits bei der Herstellung und Abformung von CE-Chips und weiteren Teststrukturen demonstriert und wird in weiteren Untersuchungen an die speziellen Anforderungen des Mikrospritz gießens weiter angepaßt. Die Verfahrenspara meter des lichtinduzierten Reaktionsgießens müssen hinsichtlich der Abformung von Mikrostruktu ren mit Aspektverhältnissen >10 weiter optimiert werden. Die Verwendung hochgefüllter Abform massen (Pulveranteil >50 Volumen%) soll die prototypische Herstellung von Keramik- und Metallmikrobauteilen ermöglichen.

Die direkte Strukturierung von Kunststoffen durch Excimer-Laserstrahlung wird zunehmend bei der Herstellung von Prototypen und als Prozeßschritt innerhalb einer Prozeßkette eingesetzt werden. Als Beispiele hierzu wurden die Erzeugung von Kanalstrukturen für mikrofluidische Anwendungen und die Strukturierung von Biocontainern vorge stellt.

#### Danksagung

Wir bedanken uns bei Herrn Meier und Herrn H. Besser für die Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der Laserablationsversuche sowie Frau U. Schanz für die REM-Aufnahmen.

#### Literatur

- [1] Michaeli, W.; Rogalla, A.; Spennemann, A.: *Mikrosystemtechnik: Neue Perspektiven durch Abformung polymerer Werkstoffe, Werkstoffe für die Informationstechnik/Mikrosystemtechnik*, Weinheim, WILEY-VCH GmbH, (1999) 285
- [2] Pfleging, W.: *Lasermaterialbearbeitung in der Medizintechnik und Mikrosystemtechnik*, LaserOpto, 31(5) (1999) 54
- [3] Ruprecht, R. et al.: *Miniaturisierung in der Medizintechnik*, Tagungsband 23. Jahresta gung Spritzgießtechnik des VDI-K, Baden Baden, (1999) 109
- [4] Pfleging, W. et al.: *Laser Micromachining for Applications in Thin Film Technology*, Proceeding of the E-MRS 1999 Spring Meeting, accepted for publication in Applied Surface Science
- [5] Rumsby, P. et al.: *Excimer laser patterning of thick and thin films for high density packaging*, SPIE 3184 (1997) 176
- [6] EP 0171069 A, DE 4305201 C1
- [7] SLA500 Datenblatt 8/96, 3D Systems, Darmstadt
- [8] Gebhardt, A.: *Aktuelle Trends bei RP und RT*, Kunststoffe, 87(1) (1997) 27
- [9] Ciupek, M.: *Vielfältige Verfahren, Kon struktionspraxis*, 10(2) (1999) 42
- [10] Tagagi, T.; Nakajima, N.: *Architecture Combination By Micro Photoforming Process*, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems, Oiso, Januar 98, Japan
- [11] Cord, T.; Schillen, V.: *Einsatz von Rapid Prototyping-Verfahren in der Mikrosystemtechnik*, Vortrag Symposium Micro Engineering -Fertigung miniaturisierter Bauteile, AMB 98, Messe Stuttgart, September 1998
- [12] <http://www.microTEC-D.com>
- [13] Pfleging, W.; Piotter, V.; Hanemann, T.: *European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT'98)*, Mordike, B.L. (Ed.), (1998) 443
- [14] Läßiger, B.: *Kontrollierter Formabtrag durch Sublimation mittels Laserstrahlung*, Aachen, Verlag Shaker, ISBN 3-8265-0453-4, 1995
- [15] Meiners, E.: *Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozess*, B.G. Teubner Stuttgart, ISBN 3-519-06222-4, Stuttgart, 1995
- [16] Hanemann, T.; Pfleging, W.: *Rapid Prototyping in der Mikrosystemtechnik*, Dötzl, W. (Hrsg.), 4. Chemnitzer Fachtagung Mikromechanik & Mikroelektronik (1999) 132
- [17] Pfleging, W., Hanemann, T., Meier, A., *Sur face Modifications of Metallic Mold Inserts during Laser Treatment*, Euromat 99, München 27-30.09.99, accepted for publication in Surface Engineering, Volume 11 (Ed.: H. Dimigen)

# Entwicklung ferromagnetischer Ein- und Viellagenschichten für Hochfrequenz - Mikroinduktoren

K. Seemann, I. Fergen

Institut für Materialforschung I

## Zusammenfassung

Viele weichmagnetische Werkstoffe zeichnen sich durch ihre hohe Sättigungsmagnetisierung sowie durch ihre Anisotropie als Schichtmaterialien mit guten Hochfrequenzeigenschaften bis in den GHz- Bereich aus. Diese Materialien sollen in Mikroinduktoren integriert werden, die gegenüber konventionellen Mikrospulen leistungsfähiger bezüglich ihrer Güte bei hohen Grenzfrequenzen sind. Gerade durch ferromagnetische Einlagenschichten mit hohen spezifischen Widerständen oder Viellagensysteme mit Isolatorzwischenschichten aus  $\text{SiO}_2$  können diese Anforderungen erreicht werden. Anhand hoher spezifischer Widerstände oder hinreichend dünner magnetischer Schichten in den Viellagensystemen werden Abschirmströme vermindert, die einen wesentlichen Beitrag für das frühzeitige Zusammenbrechen der Hochfrequenzeigenschaften liefern. Neben diesen elektrischen Eigenschaften sind aber in erster Linie die magnetischen Eigenschaften bestimend für das Erreichen hoher Grenzfrequenzen. So sind die o.g. Anisotropie und die Sättigungsmagnetisierung der Schichten zwei ausschlaggebende Parameter, die die maximalen Grenzfrequenzen überwiegend definieren.

## 1. Einleitung

Im Bereich der modernen Kommunikationstechnik werden hohe Anforderungen an elektronische Bauteile wie Mikroinduktoren bezüglich ihres Hochfrequenzverhaltens gestellt. Heute werden diese Mikroinduktoren als planare Luftspulen in Dünnschichttechnik mit relativ kleinen Güten hergestellt. Gerade für Mobiltelefone, die bei immer höheren Frequenzen arbeiten sollen (bis 4 GHz), müssen daher magnetische Materialien für die Verbesserung der induktiven Eigenschaften von Mikroinduktoren, d.h. Mikrospulen [1] oder Mikrotransformatoren [2] herangezogen und bezüglich ihrer Hochfrequenztauglichkeit optimiert werden. Vertreter dieser magnetischen Stoffe sind z.B. Fe-Co [3], Fe-Cr-Ta-N [4], Ni-Fe [5] sowie Co-Fe-Hf-O [6]. Um gute Hochfrequenzeigenschaften zu erzielen, sind die magnetischen Stoffe als Einlagenschichten mit hohen spezifischen Widerständen bzw. als Viellagenschichten zur Verminderung von Abschirmstromverlusten zu realisieren. Ferner sind diese Schichten in ihren magnetischen Eigenschaften bezüglich ihrer Permeabilität, Anisotropie, Sättigungsmagnetisierung und Koerzitivfeldstärke zu optimieren. Für die Integration der Dünnschichten in Induktorelemente ist zu beachten, dass die Herstellung und Strukturierung der Schichten mit

den Herstellungstechnologien der Halbleiterindustrie kompatibel sind.

Im folgenden Beitrag sollen die Grundlagen des Hochfrequenzverhaltens der Schichten, die Schichtherstellung, das HF- Messverfahren sowie Ergebnisse unterschiedlicher Materialien für verschiedene Induktordesigns vorgestellt und diskutiert werden.

## 2. Grundlagen des Hochfrequenzverhaltens dünner Schichten

Ferromagnetische Materialien zeigen aufgrund ihrer atomaren Elektronenkonfiguration unterhalb der Curietemperatur eine spontane Magnetisierung, die durch Austauschwechselwirkung zwischen den Atomen zu einer parallelen Kopplung der magnetischen 3d- Momente führt. Diese Ausrichtung ist an ein Anisotropiefeld gebunden, das die magnetischen Momente in eine bestimmte Kristallrichtung zwingt oder auch durch das Erzeugen einer bestimmten Richtungsordnung der Atome zustande kommt. Nach aussen ist das Material jedoch magnetisch feldfrei, da es aufgrund energetischer Bedingungen durch Weißsche Bezirke, genannt Domänen, aufgeteilt ist. Die Domänen sind durch sogenannte Blochwände getrennt.

Wird das magnetische Material einem Hochfrequenz- Wechselfeld ausgesetzt, so kommt es zu einer Präzessionsbewegung der magnetischen Momente in einem effektiven extern angelegten H- Feld bzw. im eigenen Anisotropiefeld  $H_A$ . Dieser Vorgang ist in Abbildung 1 vereinfacht dargestellt. Dabei ist  $M_0$  die Gleichgewichtslage des Magnetisierungsvektors, der durch das Hochfrequenzfeld um  $m$  geändert wird.

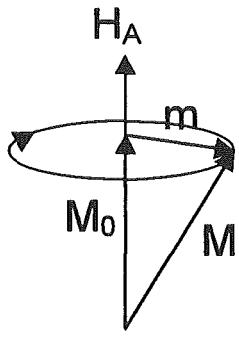


Abb. 1: Schematisches Modell der Präzessionsbewegung eines magnetischen Moments in seinem Anisotropiefeld.

Stimmt die Frequenz des Wechselfeldes mit der Präzessionsfrequenz des magnetischen Moments überein (natürliche ferromagnetische Resonanz), so findet eine Energieabsorption der eingeschalteten Hochfrequenzwelle statt. Hierdurch treten Verluste in der Permeabilität auf. Der Frequenzverlauf der dadurch entstehenden komplexen Permeabilität kann anhand der klassischen Landau- Lifschitz- Gleichung [7] unter Vernachlässigung von Abschirmströmen analytisch dargestellt werden. Das Zusammenbrechen der Permeabilität  $\mu_r$  ist abgesehen von Abschirmstromverlusten durch die ferromagnetische Resonanz bestimmt, die für Schichten mit uniaxialer Anisotropie (weiche Magnetisierungsrichtung in einer bestimmten Richtung in der Schichtebene) wie folgt ausgedrückt werden kann:

$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi} \cdot \sqrt{M_s \cdot H_A} \quad (1)$$

Die Einführung eines phänomenologischen Parameters  $\alpha$  in die Gleichung beschreibt das Mass einer Dämpfung des schwingenden Systems, die durch verschiedene Relaxationsmechanismen hervorgerufen wird. Ist der Dämpfungsparameter klein, so erhält man eine Resonanzkurve. Ist der Dämpfungsparameter groß, so spricht man von einer Relaxationskurve. Es kommt zu keiner Präzession und die Magnetisierung folgt der Feldänderung mit einer gewissen Verzögerung. Das Maximum der

auftretenden Verluste liegt bei der Relaxationsfrequenz

$$f_{rel} = \alpha \cdot \frac{\gamma}{2\pi} \cdot \sqrt{M_s \cdot H_A}, \quad (2)$$

die grösser ist als die der ferromagnetischen Resonanzfrequenz. Das magnetische Moment kann dabei aufgrund der hohen Dämpfung dem Wechselfeld nicht mehr folgen. Die Grösse  $\gamma$  stellt die aus der Quantenmechanik bekannte ferromagnetische Konstante dar, die das Verhältnis des atomaren mechanischen und magnetischen Moments angibt.

Ferner kann die maximale erreichbare Frequenz durch die bereits erwähnten Abschirmströme herabgesetzt werden. Diese Abschirmstrom-Grenzfrequenz

$$f_g = \frac{4 \cdot \rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_m \cdot t_m} \quad (3)$$

wird im wesentlichen durch den spezifischen Widerstand  $\rho$ , die Anfangspermeabilität  $\mu_m$  sowie durch die Dicke  $t_m$  der Schicht bestimmt.

### 3. Schichtherstellung und Charakterisierung

Die magnetischen Schichten wurden mit Hilfe des Magnetronputters in einer Beschichtungsanlage (LH Z550) auf oxidierten (100)- Siliziumsubstraten bei verschiedenen Ar- Drücken und HF- Beschichtungsleistungen abgeschieden. Das Prinzip dieser PVD- Beschichtungstechnik ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

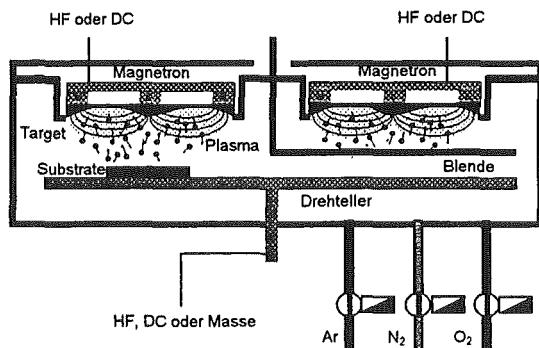


Abb. 2: Sputterprinzip und Aufbau des Rezipienten der PVD- Beschichtungsanlage.

Eine Drehstellersteuerung erlaubt die Herstellung von Viellagenschichten, die anhand eines „Stop-and-go-Modus“ in ihren Einzellagendicken beliebig variiert werden können. Dabei wird das Substrat im Uhrzeigersinn unter die jeweiligen Materialtargets gefahren, unter denen es entsprechend den angestrebten Lagendicken für einige Sekunden bis Minuten verweilt. Durch die Wahl der Beschichtungsparameter können die

magnetischen Schichteigenschaften gezielt beeinflusst werden. Zur Herstellung der magnetischen Schichten wurden  $\text{Co}_{79}\text{B}_{21}$ - sowie  $\text{Fe}_{95}\text{Ta}_{5}$ - 3- Zoll- Targets verwendet. Mit der Durchführung eines reaktiven Sputterprozesses mit Stickstoff wurden Fe-Ta-N- Schichten hergestellt. Ein statisches Magnetfeld mit einer Flussdichte von 15 mT diente während der Beschichtung zur Einstellung einer uniaxialen Anisotropie in der Schichtebene. Fe-Co- Schichten und  $\text{SiO}_2$ - Isolierschichten wurden mit einem 6- Zoll-  $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ - bzw. 6- Zoll-  $\text{SiO}_2$ - Target ohne statisches Magnetfeld hergestellt. Die magnetischen DC- Eigenschaften wurden mit einem Vibrationsmagnetometer (VSM) gemessen. Weitere Schichtcharakterisierungsverfahren wie die Röntgendiffraktometrie (XRD) und Mikrosondenanalyse (EPMA) standen zur Verfügung.

#### 4. Messung der frequenzabhängigen Permeabilität

Ein wichtiger Aspekt der Schichtcharakterisierung behandelt die Hochfrequenzeigenschaften, die mit einem eigens aufgebauten Permeameter [8] mittels Netzwerkanalysators (HP 8719D) gemessen werden. Die Messung der Permeabilität der Schichtsysteme ist zur Zeit bis etwa 3,5 GHz möglich. Abbildung 3 stellt den Netzwerkanalysator mit der in der Vergrößerung gezeigten Permeameter- Messzelle dar.

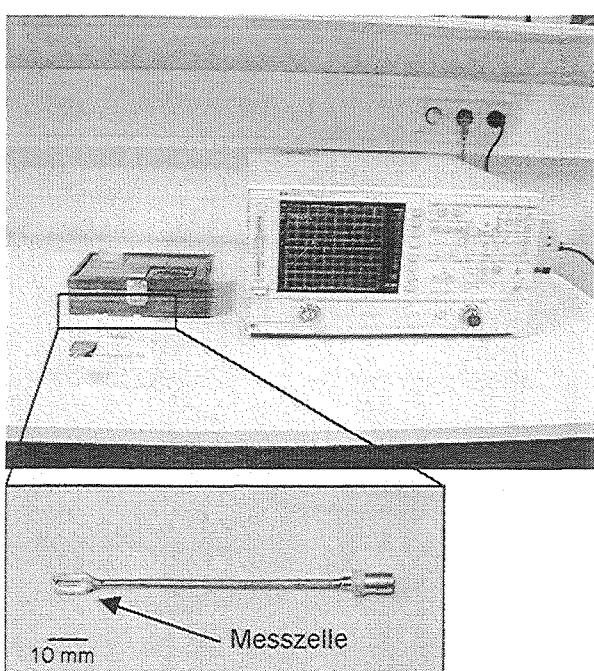


Abb 3: Netzwerkanalysator und Messzelle.

Die Permeameter- Messzelle steht in koaxialer Verbindung mit Port A des Netzwerkanalysators, an dessen Eingang im Reflexionsmodus ( $S_{11}$ -

Parameter) gemessen wird. Sie besteht aus HF- tauglichem mit Kupfer beschichteten Leiterbahnmaterial aus Epoxy und Keramik, das geringe dielektrische Verluste bei hohen Frequenzen aufweist. Der benötigte Wellenwiderstand  $Z_0 = 50 \Omega$  der Zelle wird durch das richtige Verhältnis Leiterbahnbreite / Leiterabstand zur äusseren Kupferabschirmung und der Dielektrizitätskonstante von  $\epsilon_r = 3,38$  des Leiterbahnmaterials festgelegt. Der Aufbau der Permeameter- Messzelle ist in Abbildung 4 als Explosionszeichnung dargestellt.

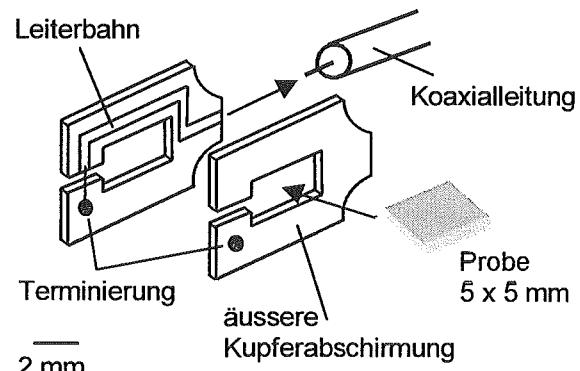


Abb. 4: Explosionszeichnung der Permeameter- Messzelle.

Ausgewertet werden die Messdaten anhand des Reflexionsparameters  $S_{11}$ , mit dessen Grösse die Impedanz

$$Z_r = Z_0 \cdot \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (4)$$

bestimmt wird. Eine qualitative Auftragung der Permeabilität über der Frequenz  $f$  erfolgte durch die komplexe Gleichung [9]

$$\mu_r = 1 + \frac{Z_r}{j \cdot \mu_0 \cdot t_m \cdot 2\pi \cdot f} \quad (5)$$

nach Trennung des Real- und Imaginärteils.

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Ferromagnetische Ein- und Viellagenschichten

Als hochfrequenztaugliche Schichten wurden bislang Einlagen- Co-B, Fe-Ta-N, Fe-Co und Fe-Co/ $\text{SiO}_2$ - Viellagen- Schichtsysteme untersucht.

Die Co-B- Schichten wurden überwiegend amorph abgeschieden. Dabei dient Bor nicht nur zur Bildung der amorphen Phase, sondern auch zur Erhöhung des spezifischen Schichtwiderstands. Dadurch ist es möglich, anhand geringerer Abschirmströme höhere Einzellagedicken zu wählen. Die Zugabe von

nichtmagnetischen Stoffen reduziert jedoch die Sättigungsmagnetisierung, liefert aber ein sehr weichmagnetisches Verhalten in der Schichtebene. Das Induzieren einer uniaxialen Anisotropie mit Hilfe eines statischen Bias-Magnetfeldes während des Beschichtungsprozesses und die Wahl der Beschichtungsparameter, die zu einer nahezu spannungsfreien Schichtabscheidung führt, ergeben eine Grenzfrequenz von etwa 2 GHz bei einer Schichtdicke von 1,45 µm (Abbildung 5).

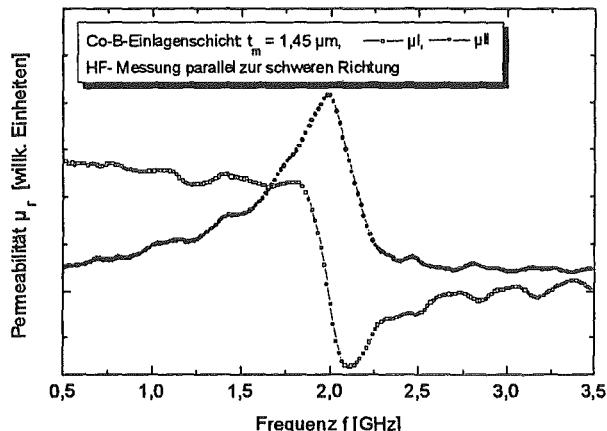


Abb. 5: Real- und Imaginärteil der Permeabilität  $\mu_r$  bzw.  $\mu^{\parallel}$  einer Co-B-Schicht.

Die uniaxiale Anisotropie kann, wie Abbildung 6 zeigt, anhand von Messungen der magnetischen Polarisation nachgewiesen werden. Dabei wurde je eine Messung in der schweren bzw. leichten Magnetisierungsrichtung mit dem VSM durchgeführt. Das Anisotropiefeld  $H_A$  errechnet sich dabei aus der Differenz der beiden Sättigungsfeldstärken.

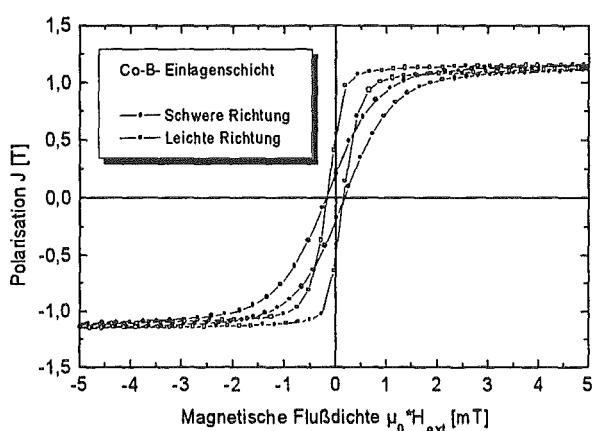


Abb. 6: Polarisation einer Co-B-Schicht in der schweren bzw. leichten Richtung.

Fe-Ta-N-Schichten weisen in der Regel eine nanokristalline Struktur aus Fe-Ta-Körnern mit Fe-Ta-N-Korngrenzen auf, die zur Isolation zwischen den einzelnen Körnern beitragen. Die gesamte Schicht erhält somit ebenfalls einen

höheren spezifischen Widerstand, der auch hier zur Reduzierung von Abschirmströmen führt. Aufgrund einer höheren Sättigungspolarisation von 1,7 T war es möglich, die Grenzfrequenz auf etwa 2,8 GHz zu erhöhen. In Abbildung 7 ist zu sehen, dass ein kleiner Dämpfungsparameter ein ausgeprägtes Resonanzverhalten ergibt. Die Schichtdicke beträgt 600 nm.

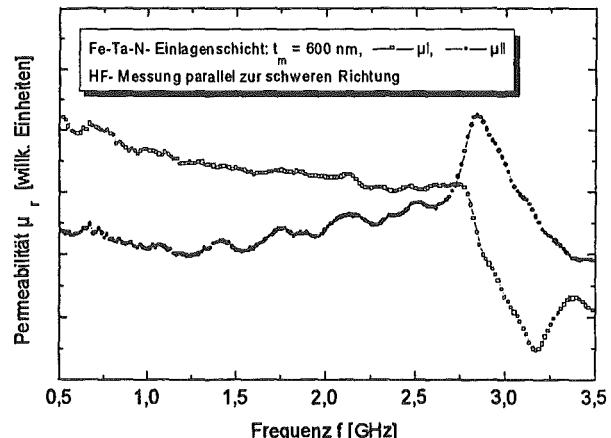


Abb. 7: Real- und Imaginärteil der Permeabilität  $\mu^{\parallel}$  bzw.  $\mu^{\perp}$  einer Fe-Ta-N-Schicht.

Fe-Co-Schichten sind polykristallin und wachsen in einer (110)-Orientierung auf. Abhängig von den Beschichtungsparametern -Beschichtungsleistung und Ar-Druck- erhält man ein unterschiedliches Magnetisierungsverhalten mit relativ hohen Koerzitivfeldern. Dieses Verhalten kann mit Druckeigenspannungen in den Schichten in Verbindung mit der hohen Magnetostriktion des magnetischen Materials in Zusammenhang gebracht werden. Der Vergleich der unterschiedlichen Feldverläufe ist in Abbildung 8 dargestellt.

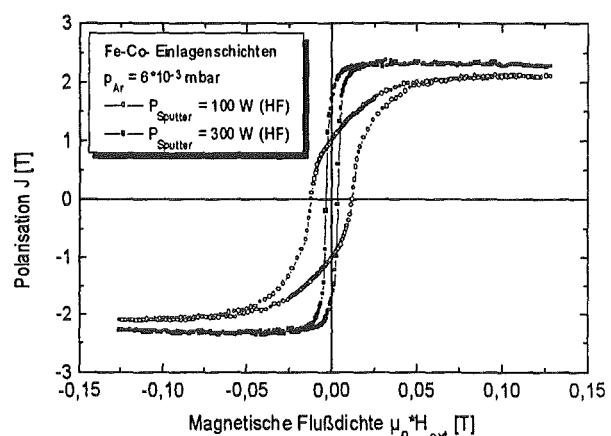


Abb. 8: Polarisation zweier Fe-Co-Schichten, hergestellt bei unterschiedlichen Beschichtungsleistungen.

Um zu hohen Grenzfrequenzen zu gelangen, sind hier aufgrund des Fehlens einer uniaxialen Anisotropie und eines damit verbundenen

isotropen Verhaltens in der Schichtebene hohe Druckeigenspannungen anzustreben. Diese Druckspannung liefert die für die Präzession benötigte Anisotropie in Kombination mit der positiven Sättigungsmagnetostriktion von etwa 70 ppm. Der geringe spezifische Widerstand der Fe-Co-Verbindungen lässt aber zusätzlich hohe Abschirmstromverluste erwarten, die unter Einbringen der Schichten in einen Viellagenverbund mit  $\text{SiO}_2$  weitgehend reduziert werden. Die Steigerung der Grenzfrequenz einer Fe-Co-Einlagenschicht (Abbildung 9) mit Hilfe eines Viellagenverbundes (Abbildung 10) ist dadurch deutlich zu erkennen.

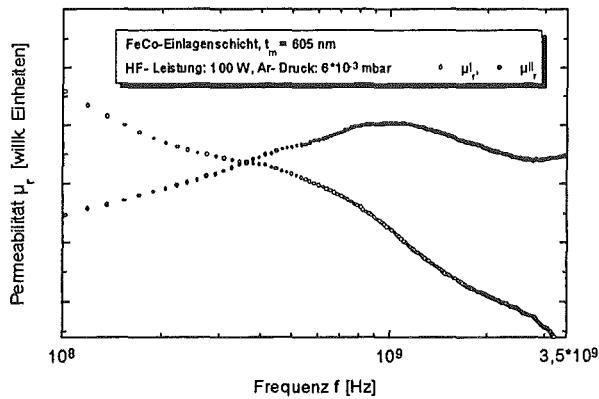


Abb. 9: Real- und Imaginärteil der Permeabilität  $\mu_r$  bzw.  $\mu_r''$  einer Fe-Co-Einlagenschicht.

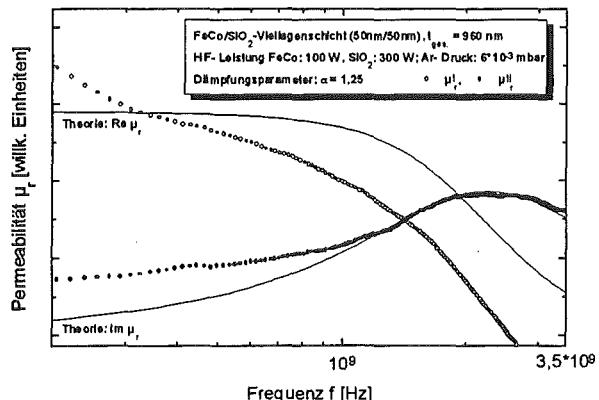


Abb. 10: Real- und Imaginärteil der Permeabilität  $\mu_r$  bzw.  $\mu_r''$  einer Fe-Co/SiO<sub>2</sub>-Viellagenschicht. Die durchgezogenen Kurven beschreiben die Landau-Lifschitz-Theorie.

Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, sind starke Dämpfungen zu verzeichnen, die auf starke Relaxationsmechanismen schliessen lassen.

## 5.2 Aufbau von Mikroinduktoren

Mikroinduktoren müssen auf eine Weise konzipiert sein, dass sie durch ihr Design bestmögliche Güten und Grenzfrequenzeigenschaften zeigen. In Kooperation mit der Firma TEMIC Semiconductors (Heilbronn) wurden

Konzepte entwickelt, mit denen unter Verwendung geeigneter Schichtsysteme erste Demonstratoren aufgebaut werden sollen. Abbildung 11 zeigt das Maskendesign von Toroid-Mikroinduktoren mit unterschiedlichen Wicklungszahlen und Abmessungen.

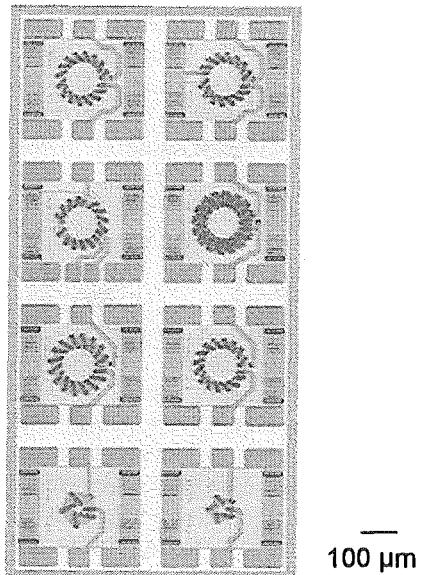


Abb. 11: Maskendesign von Toroid-Mikroinduktoren (Mit freundlicher Genehmigung der Firma TEMIC Semiconductors in Heilbronn).

Die Prozessschritte für den Aufbau solcher Mikroinduktoren sind in Abbildung 12 dargestellt.

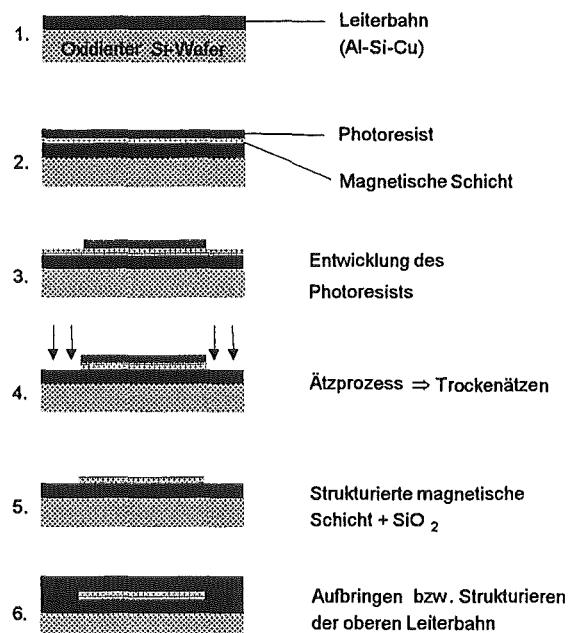


Abb. 12: Prozessschritte zum Aufbau von Dünnschicht-Mikroinduktoren.

Dabei stellen die Prozessschritte zur Strukturierung der magnetischen Schichten neue

Anforderungen, die die Eigenschaften des magnetischen Materials nicht beeinflussen dürfen.

## 6 Diskussion und Ausblick

In diesem Beitrag wurden ferromagnetische Dünnschichten als Einlagen- und Viellagensysteme für Hochfrequenzanwendungen vorgestellt. Durch die Betrachtung eines theoretischen Modells hat sich am Beispiel einer Fe-Co/SiO<sub>2</sub>-Viellagenschicht gezeigt, dass sich die magnetische Schicht entsprechend den physikalischen Gesetzmäßigkeiten einer Präzessionsbewegung des magnetischen Moments im Anisotropiefeld verhält. Diese Schichten können zur Entwicklung von Mikroinduktorkomponenten angewendet werden, wobei die Schichtkonzeption auf das jeweilige Induktordesign abgestimmt sein muss. So eignen sich die extrem weichmagnetischen Systeme Co-B und Fe-Ta-N für Mikroinduktoren, deren Flussführung senkrecht zu der durch ein externes Magnetfeld eingeprägten uniaxialen Schichtanisotropie verläuft (Solenoide). Fe-Co-Systeme finden aufgrund ihrer spannungsinduzierten Anisotropie ihre Anwendung in Induktordesigns, deren magnetischer Fluss eine Radialsymmetrie aufweist (Toroide). Ferner konnte gezeigt werden, dass Fe-Co/SiO<sub>2</sub>-Viellagenverbunde zur Reduzierung von Abschirmströmen gegenüber Fe-Co- Einlagen- schichten höhere Grenzfrequenzen aufweisen. Es lässt sich dennoch feststellen, dass durch Induzieren einer Anisotropie mit Hilfe eines extern angelegten Magnetfeldes weit höhere Grenzfrequenzen erreicht werden. Eine Verbesserung dieser HF- Eigenschaft erwartet man durch eine Wärmebehandlung der Schichten im Magnetfeld. Dabei muss dieser Prozess in den gesamten Herstellungsprozess der Mikroinduktoren integriert werden.

- [3] Senda, M., Ishii, O., „Permeability Measurement in the GHz Range for Soft-Magnetic Films using the M/C/M Inductance-Line“, IEEE Transactions on Magnetics, 31, No. 2, 1995, 960-965.
- [4] Jin, S., Zhu, W., van Dover, R. B., Tiefel, T. H., Korenivski, V., „High Frequency Properties of Fe-Cr-Ta-N Soft Magnetic Films“, Appl. Phys. Lett. 70, (23), 1997, 3161-3163.
- [5] Grimes, C. A., „Sputter Deposition of Thin Films onto Plastic: The Effect of Undercoat and Spacerlayer Composition on the Magnetic Properties of Multilayer Permalloy Thin Films“, IEEE Transactions on Magnetics, 31, No. 6, 1995, 4109-4111.
- [6] Hayakawa, Y., Makino, A., Fujimori, H., Inoue, A., „High Resistive Nanocrystalline Fe-M-O (M = Hf, Zr, Rare-Earth Metals) Soft Magnetic Films For High-Frequency Applications (Invited)“, J. Appl. Phys., 81 No.8, 1997, 3747-3752.
- [7] Krupicka, S., Physik der Ferrite und der verwandten magnetischen Oxide“, Friedr. Vieweg + Sohn Braunschweig, 1973, 448-451.
- [8] Yabukami S. et al., „Noise Analysis of a 1 MHz- 3 GHz Magnetic Thin Film Permeance Meter“, J. Appl. Phys., 85, No. 8, 1999, 5148-5150.
- [9] Pain, D., Ledieu, M., Acher, O., Adenot, A. L., Duverger, F., „An Improved Permeameter for Thin Film Measurements up to 6 GHz“, J. Appl. Phys., 85, No. 8, 1999, 5151-5153.

## Literatur

- [1] Yamaguchi M. et al., "Microfabrication and Characteristics of Magnetic Thin- Film Inductors in the Ultrahigh Frequency Region", J. of Appl. Phys. 1999, 85, No. 11, 7919-7922.
- [2] Kurata, H., Shirakawa, K., Nakazima, O., Murakami, K., „Solenoid- Type Thin- Film Micro- Transformer“, IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan, 9, No. 11, 1994, 90-94.

# **Einsatz numerischer Verfahren zur Modellbildung und Simulation von kapillarisch getriebenen Fluiden in Mikrostrukturen**

S. Halstenberg <sup>1)</sup>, A. Quinte <sup>1)</sup>, H. Eggert <sup>2)</sup>, C. Schön <sup>3)</sup>, R.-P. Peters <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Angewandte Informatik / Automatisierungstechnik, Universität Karlsruhe

<sup>2)</sup> Institut für Angewandte Informatik

<sup>3)</sup> STEAG microParts GmbH, Dortmund

## **Zusammenfassung**

Mit medizinischen Teststreifen lassen sich heutzutage sehr schnell und auch sehr preisgünstig eine Vielzahl wichtiger biomedizinischer Parameter, wie z.B. Blutzucker, bestimmen. In herkömmlichen Teststreifen wird meist ein saugfähiges Vlies aus Nitrocellulose oder Glasfaser als Transportmedium eingesetzt, wobei die zu untersuchende Flüssigkeit aufgrund der Kapillarwirkung in die Reaktionszone transportiert wird. Sie sind zwar sehr preisgünstig in der Herstellung, erlauben jedoch keine präzise und reproduzierbare Kontrolle des Fließverhaltens der Probe- flüssigkeit im Teststreifen.

Durch den technischen Fortschritt in der Mikrostrukturtechnik können mittlerweile fluidische Mikrostrukturen in einer großen Geometrievielfalt präzise hergestellt werden. So können durch ein entsprechendes Design der Strukturen in den Mikrokanälen ganz gezielt und vor allem auch reproduzierbar die gewünschten Fließeigenschaften eingestellt werden. Mit der Unterstützung durch rechnergestützte Werkzeuge im Entwurf der medizinischen Teststreifen ließe sich daher der Entwicklungsaufwand bedeutend reduzieren.

Der Beitrag diskutiert den Einsatz der beiden Werkzeuge FLOW-3D (Firma FlowScience) und CFX4 (Firma AEATechnology) hinsichtlich kapillarisch getriebener Strömungen anhand einfacher Modelle. Das Konzept, das zur Erstellung des Gesamtmodells für die medizinischen Teststreifen entwickelt wurde, wird ebenfalls vorgestellt.

## **1. Einleitung**

Die Entwicklung medizinischer Teststreifen beruht heute oft noch auf Erfahrungen und aufwendigen Trial-and-Error-Verfahren. Mit dem Einsatz von Simulatoren zur Berechnung der Flüssigkeitsausbreitung in der Mikrostruktur kann eine hohe Anzahl an Strukturen überprüft und das System verbessert werden, was zu kürzeren Entwicklungszeiten vom ersten Muster bis zum endgültigen Produkt führt.

Das Voranschreiten der Testflüssigkeit ist aufgrund der komplexen Geometrie analytisch nicht hinreichend erfaßbar. Zur Nachbildung der Fließfront müssen Simulationsmethoden eingesetzt werden, die eine hohe Diskretisierung des Strömungsraumes vornehmen, wie z.B. die Finite Volumen Methode (FVM).

Da es nur wenige Veröffentlichungen über numerische Simulationen von kapillarisch getriebenen Strömungen gibt und so gut wie keine profunden Aussagen über die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit entsprechender Simulationen existieren wurden die beiden Werkzeuge FLOW-3D und CFX4 zur Evaluierung anhand einfacher Strukturen ausgewählt.

## **2. Simulation des Fließverhaltens**

Die Simulationen der medizinischen Teststreifen sollen dahingehend eingesetzt werden, die Eigenschaften der Teststreifen durch eine Design- optimierung zu verbessern. Ein Optimierungsziel besteht beispielsweise darin, die für eine Analyse erforderliche Probemenge durch ein verbessertes Verhältnis zwischen Oberfläche zum Volumen der Probemenge zu reduzieren. Ebenfalls soll ein gezieltes Einstellen reproduzierbarer Strömungs- verhältnisse durch geeignete Geometrie und Anordnung der Mikrostrukturen erreicht werden, um z.B. Reaktionsketten zu ermöglichen bei denen es auf die genaue Einhaltung der Reaktionszeiten ankommt. Zudem ist die Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen wie Temperaturschwankungen erwünscht.

Nach einer phänomenologischen Charakterisierung des Problems wird die Modellierung und Simulation der Kapillarwirkung und anschließend ein Konzept zur Simulation des Gesamtsystems, der medizinischen Teststreifen, mit Hilfe einer Modellkopplung vorgestellt.

## 2.1 Phänomenologische Charakterisierung

Die medizinischen Teststreifen besitzen sehr komplexe Geometrien, wobei die Abmessungen der einzelnen Strukturen im Mikrometerbereich liegen. Eine Flüssigkeit (Testfluid) dringt aufgrund der Kapillarkraft in einen strukturierten Mikrokanal ein und verdrängt dadurch eine Flüssigkeit oder ein Gas (Initialisierungsfluid).

Es handelt sich somit um eine Zweiphasenströmung, d.h. eine Strömung, an der zwei unterschiedliche Fluide beteiligt sind, die sich jedoch nicht mischen. Zwischen ihnen besteht eine freie Grenzfläche, die Fließfront. Die aufgrund der antriebenden Kapillarkraft auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten sind relativ gering, weshalb die Strömung als laminar und inkompressibel betrachtet werden kann, wodurch sich das Strömungsproblem vereinfacht. Jedoch handelt es sich um ein transientes Problem (Voranschreiten der Fließfront), das auch mit Änderungen der Grenzflächenform verbunden ist.

Zudem muß für Blut bzw. Blutserum als strömende Flüssigkeit ein nichtnewtonsches Viskositätsmodell eingebracht werden. Auch thermische Einflüsse sollen untersucht werden.

## 2.2 Modellierung und Simulation der Kapillarwirkung

Das Voranschreiten der Fließfront, das mit einer Änderung der Grenzflächenform einhergeht, kann analytisch nicht hinreichend genau beschrieben werden. Mit Methoden, die eine hohe Diskretisierung des Strömungsraumes vornehmen wie z.B. der Finiten Volumen Methode (FVM), ist es jedoch möglich, dieses Verhalten nachzubilden.

Die vorliegende Problemstellung verlangt, daß das Werkzeug physikalische Modelle zur Betrachtung von Mehrphasenströmungen und zur Berücksichtigung von freien Oberflächen sowie der Kapillarkraft enthält. Bisher liegen jedoch nur wenige Erfahrungswerte über die Zuverlässigkeit der in den Werkzeugen vorliegenden Kapillarmodelle vor.

Eine Recherche der kommerziellen Software hat ergeben, daß beispielsweise die beiden Werkzeuge CFX (Firma AEA-Technology) und FLOW-3D (Firma FlowScience) die genannten Anforderungen erfüllen, weshalb eine Evaluierung dieser Werkzeuge vorgenommen wurde.

Zur Evaluierung wurden einfache Testmodelle erstellt, für die eine analytische Lösung oder experimentelle Daten existieren. Diese Modelle und der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den theoretischen Werten bzw. Messwerten führen einerseits zu einem tieferen Verständnis der vorliegenden Problematik und andererseits zur Aufdeckung möglicher Problemzonen, die bei der Simulation der konkreten Anwendung auftreten

könnten. So ist es notwendig, Erfahrungen über die Genauigkeit der Simulationsergebnisse und über die Abhängigkeit derselben von den numerischen Parametern zu gewinnen.

### 2.2.1 Der offene Plattenspalt

Als ein Testmodell diente der offene Plattenspalt. Dabei wird das kapillarische Aufsteigen einer Flüssigkeit zwischen zwei planparallelen Platten unter Gravitationseinfluß simuliert.

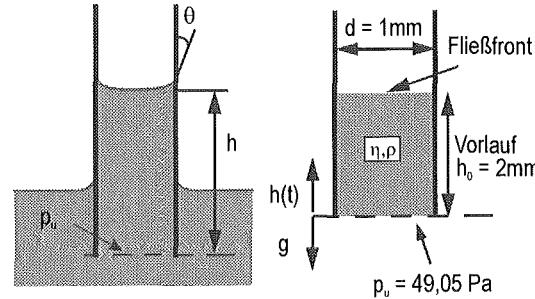


Abb. 1: Offener Plattenspalt

Die Ergebnisse wurden daraufhin überprüft, ob das von der Theorie vorgegebene transiente Verhalten der Fließfront nachgebildet werden kann und ob die stationäre Steighöhe  $h_s$  der Flüssigkeit dabei korrekt erreicht wird (Abb. 1).

Zu jedem Zeitpunkt des kapillarischen Aufsteigens der Flüssigkeit in dem Plattenspalt gilt folgendes Druckgleichgewicht (Gl. 1).

$$p_K + p_R + p_T + p_G - p_U = 0 \quad (1)$$

Kapillardruck:  $p_K = -\frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos(\theta)}{d}$

Druckabfall durch Reibung:  $p_R = \frac{12 \cdot \eta \cdot h \cdot \dot{h}}{d^2}$

Druckabfall durch Trägheit:  $p_T = \rho \cdot \ddot{h} \cdot h$

Schweredruck:  $p_G = \rho \cdot g \cdot h$

Druck am Spalteinlaß:  $p_U$

Aus (Gl. 1) kann der Verlauf des Voranschreitens der Fließfront abgeleitet werden (Gl. 2):

$$\ddot{h} + \frac{12 \cdot \eta}{d^2 \cdot \rho} \cdot \dot{h} + g - \frac{p_U}{\rho \cdot h} - \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos(\theta)}{d \cdot \rho \cdot h} = 0 \quad (2)$$

Hierbei ist  $\eta$  die Viskosität und  $\rho$  die Dichte der Flüssigkeit. Der Kontaktwinkel  $\theta$  ist dabei von der Geschwindigkeit der Fließfront  $v_F$  abhängig (dy-

namischer Kontaktwinkel  $\theta_d$ ). Bracke [1] stellte eine empirische Formel für die Abhängigkeit des Kontaktwinkels von der dimensionslosen Kapillaritätszahl  $Ca$  auf (Gl. 3).

$$\cos(\theta_d) = \cos(\theta_0) - 2 \cdot (1 + \cos(\theta_0)) \cdot \sqrt{Ca} \quad (3)$$

$\theta_d$  ist der dynamische Kontaktwinkel und  $\theta_0$  der statische Kontaktwinkel. Die Kapillaritätszahl  $Ca$  kennzeichnet das Verhältnis von Reibungskräften zu Oberflächenspannungskräften:

$$Ca = \frac{\eta \cdot v_F}{\sigma} \quad (4)$$

Mit der Viskosität  $\eta$ , der Oberflächenspannung  $\sigma$  und der Fließfrontgeschwindigkeit  $v_F$ . Bei Kapillaritätszahlen  $Ca < 1$  wird der Einfluß auf die freie Grenzfläche wesentlich durch die Kapillarkraft bestimmt.

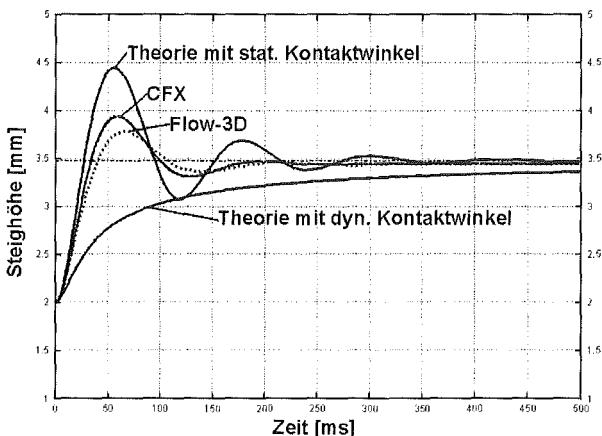


Abb. 2: Transienter Verlauf der Fließfront Vergleich von Theorie und Simulation

Für die beiden Simulatoren wurden die entsprechenden zweidimensionalen Modelle mit der in Abb. 1 rechts dargestellten Konfiguration erstellt und mit den Randbedingungen  $h(t=0)=0$  und  $h(t=0)=h_0$  das transiente Verhalten simuliert. Die Materialeigenschaften wurden dabei wie folgt gewählt: Der Abstand der Platten  $d$  wurde auf 1 mm festgelegt. Der statische Kontaktwinkel entspricht einem gemittelten Wert aus den Meßergebnissen des Benetzungsverhaltens schwarzer Tinte auf den bei der Herstellung einfacher Kanäle benutzten Substraten. Die Oberflächenspannung der Tinte jedoch ist nicht bekannt, weshalb der Wert von Wasser eingesetzt wurde.

Abb. 2 zeigt einen Vergleich des theoretischen zeitlichen Verlaufs der Fließfront mit statischem bzw. dynamischem Kontaktwinkel und Simulationsergebnisse der beiden Werkzeuge.

Während beide Simulatoren den theoretischen Endwert der Steighöhe ( $h_S = 3,48$  mm) mit einer Abweichung von < 1% sehr gut wiedergeben zeigen sich bei den transienten Verläufen deutliche Abweichungen gegenüber der Theorie.

Beide Simulatoren liefern ähnliche Ergebnisse wobei sie gegenüber dem asymptotischen Verhalten der Theorie mit dynamischem Kontaktwinkel noch ein deutliches Überschwingen aufweisen. Die beiden theoretischen Kurven mit statischem bzw. dynamischem Kontaktwinkel zeigen einen deutlichen Einfluß des dynamischen Kontaktwinkels auf das Fließverhalten.

## 2.2.2 Der scheinbare Kontaktwinkel

Der dynamische Kontaktwinkel wird von vielen Autoren oft auch als scheinbarer Kontaktwinkel  $\theta_s$  bezeichnet.

Als Parameter für die Kapillarmodelle in den beiden Simulatoren lassen sich jedoch lediglich der statische Kontaktwinkel und die Oberflächenspannung vorgeben. Mit einem weiteren Testmodell wurde daher untersucht wie der Einfluß der Kontaktliniengeschwindigkeit auf den Kontaktwinkel von diesen Kapillarmodellen wiedergegeben wird. Als Vorlage für das Modell und die verwendeten Modellparameter diente die von Hoffmann [2] durchgeführte experimentelle Untersuchung einer bewegten Fließfront in einer Glaskapillare. Auf diese Weise konnten die Simulationsergebnisse direkt mit den experimentellen Daten von Hoffmann verglichen werden.

Hoffmann führte Untersuchungen mit verschiedenen hochviskosen Silikonölen durch, von denen die Silikonöle SF-96 und Santicizer 405 für die Simulationen ausgewählt wurden (Tabelle 1).

Testflüssigkeit	SF-96	Santicizer 405
Viskosität $\eta$	0,958 Pa·s	11,2 Pa·s
Dichte $\rho$	974 kg/m <sup>3</sup>	1130 kg/m <sup>3</sup>
Oberflächenspannung $\sigma$	0,0213 N/m	0,0434 N/m
Statischer Kontaktwinkel $\theta_0$	0°	67°
Stat. Kontaktwinkel $\theta_0$ aus Simulation	7,9°	68°

Tabelle 1: Testfluide zur Bestimmung des scheinbaren Kontaktwinkels

Bei den Experimenten von Hoffmann wurden die Testflüssigkeiten mit einer konstanten Geschwindigkeit durch eine Glaskapillare mit einem Innen durchmesser von 1,955 mm hindurchgedrückt. Der sich dabei einstellende Meniskus der Fließfront wurde dabei optisch erfaßt und über seinen

Krümmungsradius bestimmte Hoffmann indirekt den scheinbaren Kontaktwinkel.

In Abb. 3 ist schematisch das entsprechende Modell dargestellt. Unter Ausnutzung der Rotationsymmetrie wurde das Modell ebenfalls zweidimensional erstellt.

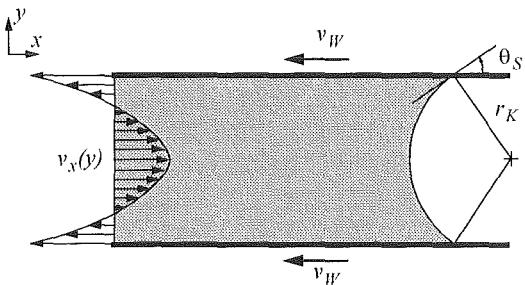


Abb. 3: Modell zur Bestimmung des scheinbaren Kontaktwinkels

Um die Modellgröße klein zu halten, wird das Rechengebiet mit der Fließfrontgeschwindigkeit  $v_F$  mitbewegt. Erreicht wird dies durch eine entsprechende Wandgeschwindigkeit  $v_W = -v_F$ , die den Wänden im Modell zugewiesen wird. Am Modelleinlaß (Abb. 3) wird eine parabelförmige Geschwindigkeitsverteilung als Randbedingung eingesetzt. Dies ist einerseits aus Stabilitätsgründen wegen der hohen Viskosität der Flüssigkeiten und andererseits für die korrekte Ausbildung einer HAGEN-POISEUILLE'schen Strömung erforderlich. Die Geschwindigkeitsverteilung wurde dabei so berechnet, daß der Gesamtvolumenstrom durch den Modelleinlaß verschwindet.

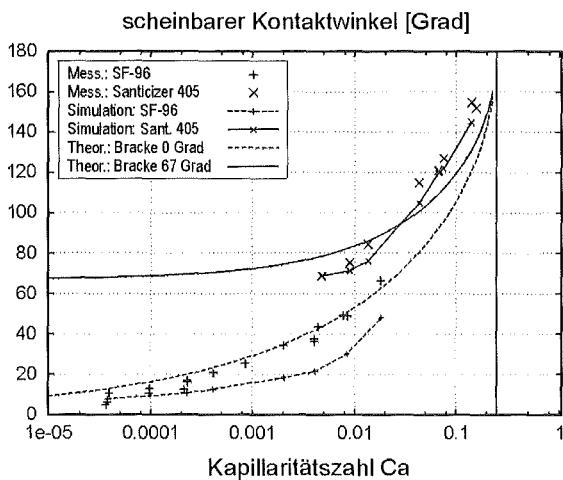


Abb. 4: Der scheinbare Kontaktwinkel Vergleich von Theorie, Simulation und Experiment

Die Bestimmung des scheinbaren Kontaktwinkels erfolgt wie bei Hoffmann indirekt über den Krümmungsradius des Meniskus. Der Krümmungsradius wird dabei aus einer Kreisfunktion bestimmt,

die an den Krümmungsverlauf des Meniskus gefittet wird. Aus dem Krümmungsradius  $r_K$  und dem Durchmesser der Kapillare  $d_K$  kann dann der scheinbare Kontaktwinkel  $\theta_s$  berechnet werden.

In Abb. 4 sind die mit CFX gewonnenen Simulationsergebnisse, die mit der Gleichung von Bracke ermittelten Kontaktwinkel und die experimentellen Daten von Hoffmann in Abhängigkeit von der dimensionslosen Kapillaritätszahl Ca aufgetragen.

Bei der Testflüssigkeit SF-96 mit seinem statischen Kontaktwinkel  $\theta_0 = 0^\circ$  macht sich deutlich bemerkbar, daß sehr kleine Kontaktwinkel im Wandbereich nur schlecht aufgelöst werden. Dies führt zu einem deutlich höheren simulierten Wert für den statischen Kontaktwinkel (Tabelle 1). Die Netzkonvergenz ist mit der vorliegenden Auflösung von 20 Elementen in radialer Richtung noch nicht erreicht, so daß mit einer höheren Netzauflösung bessere Resultate zu erwarten sind.

Bei nicht zu kleinen Kontaktwinkel wird der scheinbare Kontaktwinkel zwar etwas zu niedrig aber doch recht gut wiedergegeben.

## 2.2.3 Resümee

Solange nicht mit zu kleinen statischen Kontaktwinkel gearbeitet wird, liefern die Kapillarmodelle der beiden Simulationswerkzeuge brauchbare Ergebnisse. Einige kapillare Phänomene werden jedoch nicht berücksichtigt, z.B. wird nicht zwischen einer vorrückenden und einer sich zurückziehenden Kontaktlinie unterschieden.

Beiden Werkzeugen ist gemeinsam, daß aufgrund der verwendeten numerischen Verfahren, selbst bei derart einfachen Testmodellen (zweidimensional, Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften) die erforderlichen Simulationszeiten bereits im Stundenbereich liegen. Bei komplexeren Geometrien, wie sie bei den medizinischen Teststreifen zu erwarten sind, sind erheblich größere Modelle notwendig (dreidimensional) und damit verbunden ein erhöhter Simulationsaufwand, der bei der Systemoptimierung nicht mehr vertretbar ist.

Durch verschiedene Maßnahmen, wie z.B. die Implementierung einer Zeitschrittweitensteuerung, konnte zwar eine Reduzierung der notwendigen Simulationszeiten erreicht werden, die aber bei weitem noch nicht ausreichend sind. Daher wurde ein Konzept zur Erstellung eines geeigneten Gesamtmodells erarbeitet.

## 2.3 Modellkopplung

Um der Anforderung möglichst geringer Simulationszeiten gerecht zu werden ohne dabei unerwünschte Genauigkeitsverluste hinnehmen zu müssen, soll das Gesamtmodell aus mehreren Teilen zusammengesetzt werden.

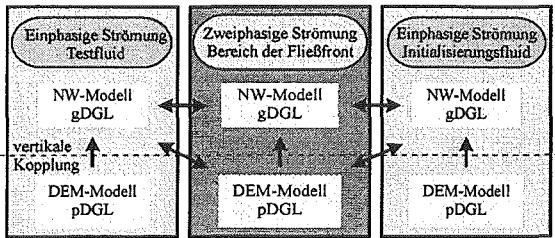


Abb. 5: Modellbildung des Gesamtsystems

Das Strömungsproblem der medizinischen Teststreifen lässt sich in die folgenden drei Bereiche (siehe Abb. 5) zerlegen:

- I. Einphasige Strömung hinter der Fließfront (Einströmendes Testfluid)
- II. Zweiphasige Strömung: Bereich der Fließfront
- III. Einphasige Strömung vor der Fließfront (Initialisierungsfluid, das aus dem Kanal verdrängt wird)

Durch diese Zerlegung kann die Beschreibung der einphasigen Strömung auf einer höheren Modellierungsebene (beispielsweise durch ein Netzwerkmodell (NW-Modell)) erfolgen, wobei dieses Modell mit Hilfe von Simulationsergebnissen mit physikalischen Modellen (z.B. Finite-Volumen-Modell) verbessert oder generiert wird. Solche höheren Modelle besitzen im Gegensatz zu den Modellen auf physikalischer Ebene einen deutlich geringeren Simulationsaufwand (offline-Simulatorkopplung [3,4]).

Der Bereich, der die momentane Fließfront und ihr Voranschreiten beschreibt, verlangt eine hohe räumliche Auflösung, gerade auch in den Bereichen, in denen eine starke Änderung der Form der Fließfront auftritt.

Kann für diesen Bereich ebenfalls ein höheres Modell erstellt werden, so kann das Gesamtsystem auf einer hohen Modellierungsebene beschrieben werden. Ist die Komplexität jedoch zu hoch, so ist eine Kopplung auf unterschiedlichen Modellierungsebenen notwendig (vertikale online-Simulatorkopplung).

Am Beispiel eines rechteckigen Mikrokanals wurde eine einfache Modellkopplung mit CFX realisiert (siehe Abb. 6). Das Gesamtmodell des Kanals besteht dabei aus zwei Teilmodellen. Der Bereich des Kanals, in dem sich im Verlaufe der Simulation die Fließfront befindet, wird durch ein entsprechendes zweidimensionales CFX-Modell repräsentiert (Abb. 6 rechts unten).

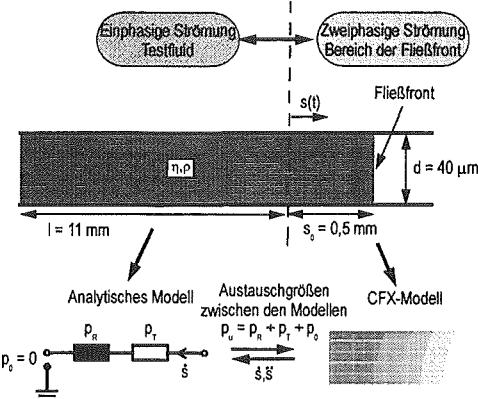


Abb. 6: Modellkopplung mit CFX am Beispiel des Mikrokanals

Der Bereich des Kanals hinter der Fließfront, in dem ausschließlich ein einphasiges Strömungsproblem vorliegt, wird durch ein analytisches eindimensionales Modell beschrieben (Abb. 6 links unten) bestehend aus zwei in Reihe geschalteten Impedanzen, die für den Reibungs- und Trägheitsverlust der Strömung im Kanal stehen.

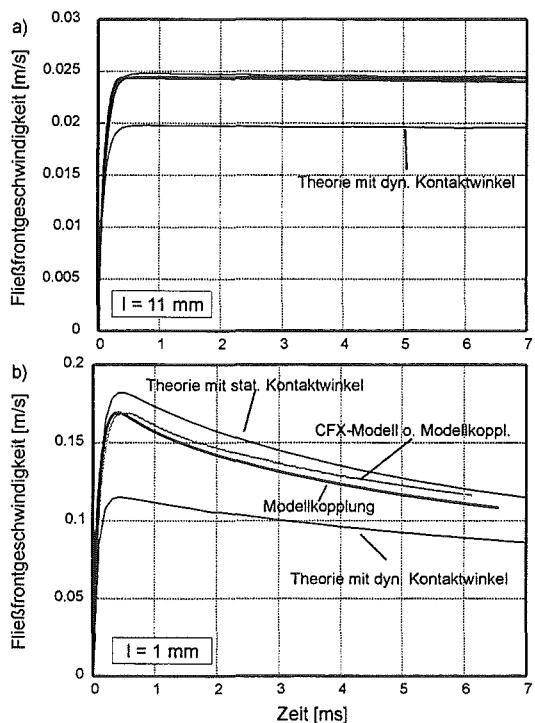


Abb. 7: Erste Ergebnisse der Modellkopplung

Beide Teilmodelle sind über ihre Austauschgrößen Druck und Fließfrontgeschwindigkeit miteinander gekoppelt. Mit einem Iterationsverfahren werden in jedem Zeitschritt diese Austauschgrößen neu bestimmt. Sowohl das analytische Teilmodell als auch die Ablaufsteuerung für die Modellkopplung wurden mit Fortran-Userroutinen

direkt in CFX realisiert. In Abb. 7 sind erste Ergebnisse der Modellkopplung bei unterschiedlichen Kanallängen des analytischen Modells ( $l = 1 \text{ mm}$  und  $l = 11 \text{ mm}$ ) aufgetragen. Zum Vergleich sind die entsprechenden theoretischen Kurven und die Ergebnisse eines CFX-Modells ohne Modellkopplung mit aufgetragen. Die gute Übereinstimmung der Ergebnisse der Modelle mit bzw. ohne Modellkopplung zeigt die Funktionsfähigkeit der Modellkopplung.

Kanallänge	CFX-Modell mit Modellkopplung	CFX-Modell ohne Modellkopplung
3,5 mm ( $l = 1 \text{ mm}$ )	12,4 min (1550 Elemente)	6,2 min (2150 Elemente)
13,5 mm ( $l = 11 \text{ mm}$ )	11,4 min (1550 Elemente)	24,4 min (8150 Elemente)

Tabelle 2: Vergleich der Rechenzeiten, die für 1 ms Simulationszeit benötigt wurden.

In Tabelle 2 sind die Rechenzeiten enthalten, die für 1 ms Simulationszeit benötigt wurden. Bei der Kanallänge 3,5 mm benötigt das CFX-Modell ohne Modellkopplung nur die Hälfte der Rechenzeit des CFX-Modells mit Modellkopplung. Hier macht sich bemerkbar, daß die Modellkopplung pro Zeitschritt deutlich mehr Iterationsschritte benötigt als das Modell ohne Modellkopplung.

Anders sieht es bei der Kanallänge 13,5 mm aus, bei der das CFX-Modell mit Modellkopplung nur noch die Hälfte der Rechenzeit gegenüber dem CFX-Modell ohne Modellkopplung benötigt. Bei diesen Ergebnissen ist die Modellkopplung noch nicht hinsichtlich der notwendigen Iterationen optimiert worden, so daß hier noch eine deutliche Reduzierung der Rechenzeit erwartet werden kann.

Die Fließfrontgeschwindigkeit liegt mit dem kurzen Vorlauf (Abb. 7 b) bei ca. 175 mm/s, wobei sie aufgrund des höheren Strömungswiderstandes mit dem langen Vorlauf (Abb. 7 a) bei ca. 25 mm/s liegt. Experimentelle Daten lieferten eine mittlere Fließfrontgeschwindigkeit von 17,35 mm/s, die somit deutlich unter den simulierten Werten liegt. Die Abweichungen lassen sich damit begründen, daß mit der Oberflächenspannung von Wasser simuliert wurde. Hinweise aus der Literatur deuten darauf hin, daß die Oberflächenspannung der Tinte um 30% - 50% niedriger als die vom Wasser sein dürfte und daß damit eine dementsprechend geringere Kapillarkraft zu erwarten ist. Zudem wurden im Modell die Strömungsverluste im Eingangsbereich des Tintenkanals noch nicht berücksichtigt, wodurch sich in der Simulation ebenfalls höhere Fließfrontgeschwindigkeiten ergeben.

### 3. Zusammenfassung / Ausblick

Erste Erfahrungen mit den beiden kommerziellen Simulationswerkzeugen CFX und Flow-3D konnten gesammelt werden. Anhand einfacher Testmodelle wurde eine erste Evaluierung der beiden Werkzeuge durchgeführt. Beide Simulatoren lieferten sehr ähnliche Ergebnisse. Die Abweichungen voneinander dürften in erster Linie in den jeweiligen Simulatoreinstellungen begründet sein. Als ein deutlich offeneres und auch besser dokumentiertes System für die Implementierung eigener Fortran-Routinen erwies sich CFX, so daß die Entscheidung, welches Simulationswerkzeug weiterverwendet werden soll, zugunsten von CFX ausfällt.

Aufgrund der zu hohen erforderlichen Simulationszeiten wurde ein Konzept zur Erstellung eines Gesamtmodells der medizinischen Teststreifen entwickelt, welches einen deutlich geringeren Simulationsaufwand erwarten läßt.

Die Validierung mittels Meßergebnissen der Teststrukturen konnte noch nicht ganz abgeschlossen werden, da die hierfür erforderliche Oberflächenspannung der Tinte noch nicht vorlag. Dennoch deuten die Ergebnisse darauf hin, daß die Simulationswerkzeuge, insbesondere CFX, für die Simulation medizinischer Teststreifen sinnvoll eingesetzt werden können [5].

### Literatur

- [1] Bracke, de Voeght, Joos: *The Kinetics of Wetting, The Dynamic Contact Angle*; Progr. Colloid Polym. Sci. Bd. 79, S. 142-149, 1989
- [2] Hoffmann, R.L.: *A Study of the Advancing Interface- I. Interface Shape in Liquid-Gas Systems*, J. Colloid Interf. Sci., Vol. 50, No.2, p. 228-241, 1975
- [3] Quinte, A.: *Entwicklung von Verfahren für den Einsatz der Finite-Elemente-Methode in der Systemoptimierung von Mikrosystemkomponenten*; Dissertation an der Universität Bremen, 1998
- [4] Meinzer, S.: *Entwicklung von Verfahren zur Erstellung adaptierter Makromodelle für den Einsatz bei der Designoptimierung von Mikrosystemen*; Dissertation an der Universität Bremen, 1998
- [5] Quinte, A., Halstenberg, S., Eggert, H., Peters, R.-P., Schön, C.: *Mikrosystemtechnische Realisierung von medizinischen Teststreifen*, 8. GMM-Workshop Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen, 2.-3. Dez. 1999, Berlin, S. 13-22

## Anwendungen



# Funktionsschichten für mikroverfahrenstechnische Bauteile

Maximilian Fichtner, Walther Benzinger, Katja Haas-Santo, Peter Pfeifer, Rolf Wunsch

Hauptabteilung Versuchstechnik

## Zusammenfassung

Mit geeigneten Funktionsschichten lassen sich neue Anwendungsgebiete für mikroverfahrenstechnische Bauteile erschließen. Im vorliegenden Beitrag werden Passivschichten zur Verminderung von Verschmutzungen der Kanäle sowie katalytische Aktivschichten vorgestellt. Besonderes Augenmerk wird auf Verfahren gerichtet, mit denen bereits gefügte Mikrostrukturbauteile nachträglich beschichtet werden können.

## 1. Einleitung

Mikrostrukturbauten wie Mikrowärmeübertrager, Mikrovermischer und Mikrostrukturreaktoren, die in Abb. 1 dargestellt sind, können in der Thermischen und Chemischen Verfahrenstechnik überall dort mit Vorteil eingesetzt werden, wo hohe Wärme- und/oder Stoffübertragungsraten erforderlich sind und geringe Baugrößen von Vorteil sind [1].

Die Transportraten an der Phasengrenze zwischen Fluid und Kanalwand sind durch die Kanaldimensionen im Vergleich zu makroskopischen Systemen deutlich erhöht. Dadurch können in kleinen Volumina sehr hohe Wärmemengen übertragen werden, wodurch beispielsweise die Prozesstemperatur bei chemischen Produktionsprozessen konstant gehalten und die Bildung unerwünschter Nebenprodukte zurückgedängt werden kann [2].

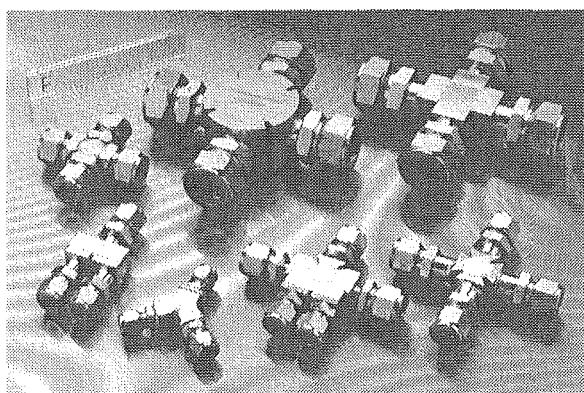


Abb. 1: Im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte Mikrowärmeübertrager, Mikrovermischer und kombinierte Bauteile für industrielle Anwendungen.

Die Kompaktheit der Bauteile kann zudem vorteilhaft sein bei mobilen Anwendungen wie z.B. im PKW-Bereich, der Luft- und Raumfahrt und in einigen Anwendungsfällen der Chemischen Industrie.

Als weitere Besonderheit und Vorteil sind die sicherheitstechnischen Eigenschaften der Bauteile zu nennen. Ihre Vakuumdichtheit, die hohe Druckfestigkeit von mehreren hundert Bar und die flammensperrenden Eigenschaften der feinen Mikrokanäle erlauben beispielsweise, chemische Reaktoren mit hohen Konzentrationen der Edukte auch im Explosionsbereich zu betreiben [3].

## 2. Funktionsschichten

Bei einigen dieser Anwendungen reicht es nicht aus, die reinen Metallkörper als Mikrostrukturbauten einzusetzen. Oftmals müssen Vorkehrungen getroffen werden, um dem Bauteil durch geeignete Beschichtungen der Mikrokanäle besondere Eigenschaften zu verleihen. Diese Funktionsschichten lassen sich in passivierende und aktivierende Schichten unterteilen.

Passivschichten haben die Aufgabe, das Mikrokanalsystem des Bauteils zu schützen vor

- Korrosion und
- Feststoffablagerung in den Kanälen (sogenanntes „fouling“).

Als Aktivschichten werden hier Katalysatorschichten bezeichnet, die es ermöglichen, im Mikrostrukturbau teil eine heterogen katalysierte Wandreaktion ablaufen zu lassen.

### 2.1 Passivschichten

#### 2.1.1 Korrosionsschutz

Dem Korrosionsschutz kommt in Mikrokanalsystemen besondere Bedeutung zu, da durch den erhöhten Stoffübergang zwischen dem korrosiven Medium und der Kanalwand erhöhte Korrosionsraten auftreten können. Weiter weisen die Wände der Mikrostruktur nur geringe Dicken um 100 µm auf, so dass ein korrosiver Angriff schnell zum Versagen des Bauteils führt. Da es schwierig ist,

in dem Mikrokanalsystem vollkommene und dauerhaft deckende Schutzschichten zu erzeugen, können Schichten mit korrosionsschützenden Eigenschaften nur einen zusätzlichen Schutz eines ohnehin gut korrosionsbeständigen Strukturmaterials darstellen. Das Strukturmaterial muß dagegen in der Lage sein, selbstätig undurchlässige Schutzschichten aufzubauen, wenn es mit den entsprechenden Medien in Berührung kommt.

Im Falle korrosiver Flüssigkeiten kommen deshalb hauptsächlich Materialien wie Nickelbasislegierungen (z.B. Hastelloy C 276), Tantal sowie Edelmetalle in Frage. Bei Hochtemperaturanwendungen mit sauerstoffhaltigen Gasen kann auch ein aluminiumhaltiger Stahl (72.6% Fe, 22% Cr, 4.8% Al, 0.3% Si und 0.3% Y) verwendet werden. Beim Tempern des Stahls kommt es dann zu einer Segregation des Aluminiums in der oberflächennahen Zone und zu einer Reaktion des Aluminiums mit Sauerstoff. So bildet sich beispielsweise bei einer Temperaturbehandlung um 1000°C während 15 Stunden eine 2 – 3 µm dicke, geschlossene, selbstheilende Schicht aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aus, die eine weitere Eindiffusion des Sauerstoffs verhindert und das Basismaterial vor weiterer Verzunderung schützt.

### 2.1.2 Antihäftsichten

Verschmutzungen von fluiddurchströmten verfahrenstechnischen Bauteilen treten immer dann auf, wenn die Haftkraft des verschmutzenden Festkörpers die ablösenden Scherkräfte des strömenden Mediums übersteigt. Dabei ist zu beachten, dass bei einem System parallel angeordneter Mikrokanäle keine Zwangsdurchströmung eines einzelnen Kanals erfolgt. Vielmehr wird sich das Fluid im Falle eines Kanalverschlusses einen Weg durch die anderen, noch freien Kanäle suchen, wobei der dadurch resultierende Anstieg des Druckverlustes zunächst nur gering ist. Es ist deshalb nicht zu erwarten, dass in der frühen Phase des Verschmutzungsprozesses die entstandenen Ablagerungen durch vergrößerte Scherkräfte wieder abgelöst werden.

Deshalb kommt einer Oberflächenbehandlung, die die Haftkräfte möglicher Ablagerungen verringert, besondere Bedeutung zu. Glatte Mikrokanalwände, die Antihäftsichten mit reduzierten Oberflächenenergien aufweisen können deshalb der Verschmutzung eines Bauteils entgegenwirken.

Fluorhaltige Materialien sind für ihre schmutzabweisenden Oberflächeneigenschaften bekannt. Auf der Basis zweier unterschiedlicher Verfahren wurden deshalb dünne fluorhaltige und gut haftende Schichten auf mikrostrukturierten Metallfolien hergestellt und ihre Oberflächeneigenschaften durch Bestimmung des Kontaktwinkels mit Wasser und Propanol untersucht.

### PTFE-Ablationsschichten

Teflon ist ein im Chemiebereich gerne verwendetes Material, das sich einerseits durch seine hohe chemische Resistenz, seine Temperaturbeständigkeit bis 270 °C und seine geringe Benetzbarkeit auszeichnet.

Um dünne Schichten mit einer ähnlichen Zusammensetzung wie Teflon zu erhalten, wurden Mikrokanalstrukturen mittels der Kanalfunkenablation beschichtet. Als Target wurde dabei eine Teflonscheibe verwendet. Dieser sogenannte ELBA-Prozess wurde im Forschungszentrum am Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik entwickelt [4]. Das Verfahren zeichnet sich durch seine Einfachheit, die geringen Kosten und die gute Haftfähigkeit des ablatierten Materials aus.

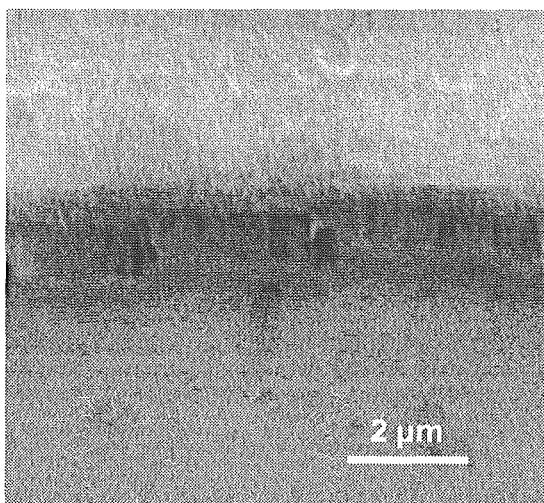


Abb. 2: REM-Aufnahme der Kante eines PTFE-Films, der auf einer Edelstahlfolie abgeschieden und in der unteren Hälfte des Bildes teilweise entfernt wurde.

Folienproben, die auf diese Weise beschichtet waren, wurden elektronenmikroskopisch untersucht und Schichtdicken von 700 – 800 nm gemessen. Abb. 2 zeigt einen Blick auf die Kante einer solchen Schicht, die teilweise durch ein Klebeband entfernt worden ist.

Das Benetzungsverhalten dieser Schichten ist weiter unten in Tabelle 1 dargestellt. Wie zu erkennen ist, werden mit der durch Ablation erzeugten Schicht annähernd gleiche Benetzungsinkel wie bei reinem Teflon erreicht.

### Fluorhaltige Sol/Gel-Schichten

Sol/Gel-Beschichtungen besitzen den Vorteil, dass sich auch feine Strukturen mit komplexen Geometrien nachträglich beschichten lassen da es keine Abschattungen gibt, wie sie bei Vakuumverfahren auftreten können.

Wegen der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von keramischer Schicht und metallischer Unterlage muss bei der Beschichtung metallischer Träger besonders darauf geachtet werden, dass die Schichten gut haften und Dicken von wenigen Mikrometern nicht überschritten werden. Um gute Antihafteigenschaften der späteren Schicht zu erreichen, wurde ein Ansatz gewählt, bei dem eine hochfluorierte organische Verbindung zugesetzt werden konnte.

Auf der Grundlage einer Herstellungsmethode für Nanokompositsschichten [5] wurde eine Mischung von 80 mol% Methyltriethoxysilan (MTEOS) und 20 mol% Tetraethoxysilan (TEOS) mit Salzsäure und Kieselgel versetzt. Die Mischung wurde unter Röhren bei Raumtemperatur zwei Stunden hydrolysiert und danach mit 2 – 3 mol % eines langketigen Fluoralkylsilans versetzt. Nach einer Stunde weiteren Röhrens wurde die Tauchbeschichtung durchgeführt. Die beschichteten Edelstahlfolien wurden bei 50°C getrocknet und danach weitere zehn Stunden bei 150°C wärmebehandelt.

	Wasser	n-Propanol
reine Metallfolie	74°	(0°)*
reines PTFE	110°	31.3°
Ablationsschicht	109.7°	28.7°
F-haltige Sol/Gel-Schicht	108°	28.5°

Tabelle 1: Benetzungswinkel bei verschiedenen Proben, gemessen mit Wasser und n-Propanol.

Die so erzeugten Schichten wiesen Dicken von 2 – 3 µm auf und waren außerordentlich haftfest und flexibel. Selbst starkes Biegen der beschichteten Metallfolie führte nicht zum Reißen oder Abplatzen der Schicht. Wie die Daten in Tabelle 1 zeigen, wurden auch an dieser Schicht hohe Benetzungswinkel gemessen, die mit denen reinen Teflons vergleichbar sind.

## 2.2 Aktivschichten

Bei der Frage, welche Katalysatorschichten in einem Mikrostrukturreaktor eingesetzt werden sollen, muß zunächst geklärt werden, wie hoch die Umsatzraten der Reaktion an den aktiven Zentren des Katalysators sind. Handelt es sich um eine schnelle Reaktion mit hohen Umsatzraten, reichen in der Regel vergleichsweise „wenige“ aktive Zentren aus, um hohe Umsätze zu erzielen. Bei langsameren Reaktionen muß die Anzahl der aktiven Zentren dagegen erhöht werden, was nur durch höhere Dispersion des Katalysatormaterials und Vergrößerung der inneren Oberfläche der Trägerschicht erreicht werden kann.

Für schnelle Reaktionen können somit glatte Oberfläche ausreichend sein. Solche Oberflächen lassen sich erzielen durch

- Mikrostrukturierung von katalytisch aktivem Folienmaterial [6]
- galvanische Beschichtung
- Sputtern, Bedampfen

Für eine Vielzahl von Anwendungen kommen solche Systeme allerdings nicht in Betracht. Vielmehr müssen die Mikrokanäle mit oberflächenvergrößernden Trägerschichten versehen werden, die es erlauben, eine größere Anzahl aktiver Zentren bereitzustellen.

Dabei ist es aus herstellungstechnischer Sicht von Vorteil, wenn das Verfahren eine nachträgliche Beschichtung bereits gefertigter Bauteile erlaubt. Grund dafür sind Hochtemperatur-Fügeschritte bei der Bauteilherstellung wie z.B. das Diffusionsschweißen die notwendig sind, um dem Bauteil eine hohe Stabilität und Dichtigkeit zu verleihen.

Beim Diffusionsschweißen werden zum einen saubere, keramikfreie Metallocberflächen verlangt, die die Verbindung der Metallocberflächen nicht behindern. Weiter wird das Bauteil hohen Temperaturen ausgesetzt, die eine Schädigung des Katalysators bewirken können.

In der Hauptabteilung Versuchstechnik wurden deshalb folgende Verfahren für die nachträgliche Beschichtung von Mikrostrukturbau Teilen entwickelt:

## Anodische Oxidation von Mikrostrukturbau Teilen aus Aluminium

Die anodische Oxidation von Aluminiumwerkstücken ist ein bekanntes Verfahren, um festhaftende  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – Schichten variabler Dicke zu erzeugen, die mit einem regelmäßigen Mesoporen system ausgestattet sind. Durch die Wahl geeigneter Badparameter lassen sich Porenweiten zwischen 10 und 100 nm mit engen Radienverteilungen erzeugen, die Porenänge entspricht etwa der Oxidschichtdicke. Bei der Verwendung von Schwefelsäure als Elektrolyt lässt sich die geometrische Oberfläche eines Mikrokanals um Faktoren bis zu etwa 100 pro Mikrometer Schichtdicke vergrößern. Dabei lassen sich problemlos Schichtdicken von mehreren zehn Mikrometern erzeugen, ohne dass ein Ablösen der Schicht befürchtet werden muß.

Die anodische Oxidation in den feinen Kanalstrukturen von Mikrostrukturreaktoren wurde bisher als nicht machbar erachtet, da ein Eindringen der elektrischen Feldlinien in die Tiefen der Struktur unmöglich erschien [7]. Eigene Experimente haben jedoch gezeigt, dass mit einer geeigneten Kombination aus Elektrodenanordnung

und Durchflußmenge des Elektrolyten Mikrostrukturkörper aus Aluminium durchgehend beschichtet werden können [8].

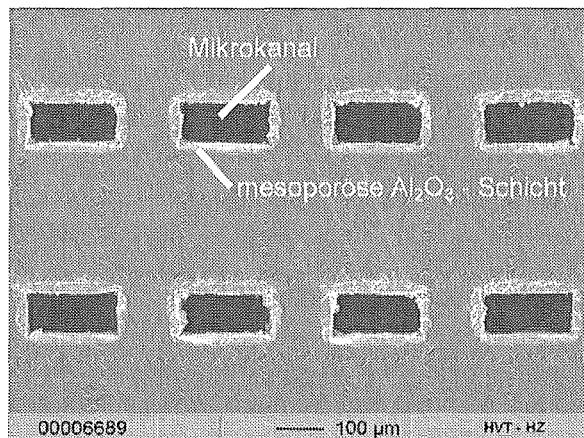


Abb. 3: REM-Aufnahme des Querschnitts eines diffusionsgeschweißten und danach anodisch oxidierten Mikrostrukturreaktors (Kreuzströmer). Zwischen den beiden Mikrokanalreihen befinden sich nicht sichtbare, querlaufende Kanäle der zweiten Passage.

Abb. 3 zeigt einen Querschnitt eines Kreuzströmers mit 1 cm<sup>3</sup> Bauvolumen, der aus einem Stapel diffusionsgeschweißter Mikrostrukturfolien aus Aluminium hergestellt wurde. Der Durchmesser der Mikrokanäle beträgt 200 x 100 µm. Der Körper wurde nach der Fertigung anodisch beschichtet in einem Oxalsäurebad (1,5 Gewichts %) mit einer Erzeugungsspannung von 50 V, bei einer Anodisierungsdauer von 6 Stunden, einer Badtemperatur von 12 °C, einem Elektrodenabstand zum Al-Körper von 10 mm und bei einem Elektrolytdurchsatz von 30 l/h.

Querschnitte an verschiedenen Positionen entlang einer Mikrokanalpassage zeigten, dass die Beschichtung homogen über die Kanallänge erfolgte. Die Schichtdicke stieg wie bei der Beschichtung offener Oberflächen linear mit der Anodisierungsdauer an. Dabei betrug das Schichtdickenwachstum in den ersten 4 Stunden etwa 4 µm / h für die oben angegebenen Bedingungen. Danach verringert sich die Wachstumsgeschwindigkeit.

Im Bereich zwischen 5 und 30 mm übt der Abstand der beiden Kathoden zum Mikrostrukturkörper nur einen geringen Einfluß auf die Schichtbildung aus. Größeren Einfluß besitzen dagegen Geometrieparameter der Mikrostruktur wie Länge und Querschnitt der Mikrokanäle. So scheinen kleinere Mikrokanäle den Anodisierungsvorgang zu erschweren: Bei Kanallängen von 15 mm und Kanaldurchmessern von 200 µm werden nach sechs Stunden Anodisierungsdauer in Oxalsäure Schichtdicken von 7 µm erreicht, bei Kanalbreiten von 50 µm dagegen nur 4 µm.

Größere Kanallängen rufen den gleichen Effekt hervor. Bei Kanalbreiten von 200 µm und den oben angegebenen Anodisierbedingungen wird in einem 15 mm langen Mikrokanal eine 7 µm dicke Oxidschicht erzeugt, bei einer Kanallänge von 40 mm dagegen nur eine 3 µm dicke Schicht.

Mit diesem Verfahren ist es nun möglich, vakuumbdichte Mikrostrukturbauten aus Aluminium zu erzeugen, die mit einer großen inneren Oberfläche ausgestattet sind und mit denen ein isothermer Betrieb bei heterogen katalysierten chemischen Reaktionen möglich ist, auch wenn sie eine starke Wärmetönung aufweisen. Durch die besonders reguläre Porenstruktur der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schicht können Verweilzeiten an den aktiven Zentren des Katalysatorsystems gut kontrolliert werden, so dass hohe Ausbeuten von Zwischenprodukten bei Folgereaktionen erzielt werden können [9].

### Sol/Gel-Schichten

Wie bereits unter 2.1.2 erwähnt, bieten Sol/Gel-Schichten eine weitere Möglichkeit, um an bereits gefügten Mikrostrukturbauten nachträgliche Beschichtungen durchzuführen. Der Sol/Gel-Prozess bietet zudem den Vorteil einer hohen Materialvielfalt, so dass poröse keramische Trägerschichten mit unterschiedlichen Zusammensetzungen erhalten werden können.

Aus der Literatur sind eine Reihe von Rezepturen bekannt, mit denen hochporöse Gele erzeugt werden können. Herstellungsanweisungen für auf Metallunterlagen gut haftende Schichten sind ebenfalls bekannt. Problematisch ist jedoch, dass die erwähnten hochporösen Gele auf Metalloberflächen sehr schlecht haften und mechanisch instabil sind.

Unsere Arbeiten auf diesem Gebiet hatten deshalb zum Ziel, poröse Schichten unterschiedlicher Zusammensetzung mit guten Hafteigenschaften auf Metallunterlagen zu entwickeln. Dies ist für eine Reihe von Oxiden gelungen.

Ausgehend von Alkoxiden wie Tetraethylorthosilan (TEOS), Aluminium-sek.-butylat (AISB), Aluminiumtriisopropylat (AITIP) und Titanetetraisopropylat (TTIP) wurden Schichten aus SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> und von binären Mischungen der Oxide hergestellt.

Es zeigte sich, dass die Bedingungen bei der Solreifung so gewählt werden müssen, dass die Kondensationsgeschwindigkeit niedrig ist. Dadurch wird die Bildung einer Polymerstruktur des Oxidfilms gefördert, was seine mechanische Stabilität und Hafteigenschaften verbessert. Bei schnellen Kondensationsraten werden eher partikuläre Sole erhalten, die zu mechanisch instabilen Gelen führen. Gele dieser Art schrumpfen stark und lassen

sich nach dem Trocknen durch einfaches Abwischen wieder von der Metallocberfläche entfernen.

Die niedrigen Kondensationsraten wurden im Falle der Al- und Ti-Sole durch Zusatz von Acetylaceton, eines Chelatbildners, erreicht. Bei den Si-Solen wurde die Reaktion durch basisch katalysierte Hydrolyse und gleichzeitiges Einstellen eines verhältnismäßig niedrigen pH-Wertes verzögert.

Mit gealterten Solen wurden dann sowohl Tauchbeschichtungen an einzelnen glatten und mikro-

strukturierten Metallfolien durchgeführt als auch komplett Mikrokanalstrukturen nachträglich beschichtet. Die beschichteten Proben wurden bei 60 °C 12 Stunden getrocknet, danach mit 4 K/min auf die Kalzinierungstemperatur von 500 °C erwärmt und dort 5 Stunden belassen.

Zur einfachen Bestimmung der Haftfestigkeit der Schichten wurde eine Klebefolie auf glatte, beschichtete Folien aufgebracht und danach wieder abgezogen. Blieb die Schicht auf der Metallunterlage haften, galt sie als ausreichend haftfest.

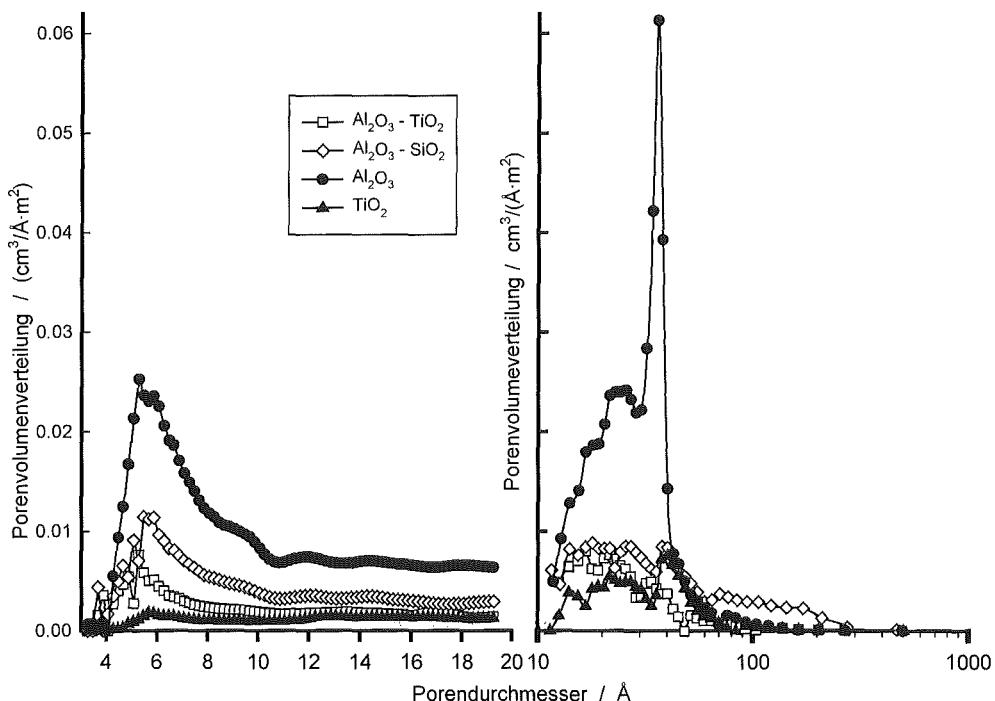


Abb. 4: Differentielle Porenvolumina verschiedener Sol/Gel-Schichten auf Edelstahlfolien, bestimmt nach der HK-Methode für den Mikroporen- (linkes Diagramm) und der BJH-Methode für den Mesoporenbereich (rechtes Diagramm).

BET-Oberfläche und Porenstruktur der Gelschichten wurden auf kleingeschnittenem Folienmaterial durch Physisorption mit N<sub>2</sub> oder Kr als Adsorbat bestimmt. Für die Bestimmung der Porenradienverteilung wurden die Adsorptionsisothermen nach der Methode von Barrett, Joyner und Halenda (BJH) für den Mesoporenbereich und der Methode von Horvath-Kavazoe (HK) für den Mikroporenbereich ausgewertet. Die so ermittelten Porenradienverteilungen für verschiedene Proben sind in Abb. 4 dargestellt.

Abb. 4 lässt erkennen, dass die Porosität der erzeugten Oxidschichten unterschiedlich war. So wiesen die TiO<sub>2</sub>-Schichten die geringste Porosität und innere Oberfläche auf. Die höchsten BET-Oberflächen wurden an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Schichten gemes-

sen, die mit AISB als Vorläufersubstanz hergestellt waren. Mit einer solchen Schicht konnte die geometrische Oberfläche der Metallunterlage um den Faktor 430, bezogen auf 1 µm Schichtdicke, erhöht werden.

### Nanopartikelschichten

Als weitere Möglichkeit, mikrostrukturverträgliche, poröse Trägerschichten zu erzeugen und darauf katalytisch aktives Material zu verteilen, kann die Immobilisierung von Nanopartikeln aus einer wässrigen oder alkoholischen Suspension dienen. Es wurde gezeigt, dass damit hochporöse und gut haftende Katalysatorschichten in Mikrokanalstrukturen erzeugt werden können [10].

Dieses Verfahren besitzt verschiedene Vorteile, da z.B. kommerziell erhältliche Nanopartikel verwendet werden können und die katalytische Aktivkomponente – auch in Form von Nanopartikeln – beigemischt werden kann. In diesem Fall entfällt der normalerweise notwendige Nassimprägnierungsschritt für das Einbringen der Aktivkomponente. Die der Immobilisierung folgende Sinterung verhilft der Schicht zu größerer mechanischer Stabilität und entfernt organische Komponenten wie z.B. Hydroxyethylcellulose (HEC), die als Immobilisierungshilfen der Suspension beigemischt waren. Die optimale Sintertemperatur hängt dabei von den verwendeten Nanopartikeln ab. Das CuO/ZnO-System in Abb. 5 wurde beispielsweise bei 550°C fünf Stunden lang an Luft gesintert.

Die Porenstruktur der Schicht kann durch Variation der Partikelsorte bzw. – Größe und durch die Sinterbedingungen beeinflusst werden. Abb. 5 zeigt eine REM-Aufnahme einer solchen Schicht, die aus einem CuO/ZnO-Gemisch (Massenverhältnis 1 : 1) hergestellt wurde.

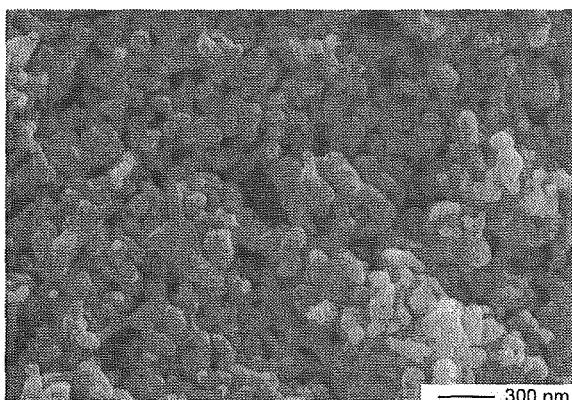


Abb. 5: REM-Aufnahme einer katalytisch aktiven Schicht aus einem immobilisierten ZnO/CuO-Nanopartikelgemisch.

An Schichten dieses Typs wurden spezifische BET-Oberflächen von 9,3 m<sup>2</sup>/g gemessen. Eine 20 ± 10 µm dicke CuO/ZnO-Schicht vergrößerte die geometrische Fläche der Unterlage um den Faktor 240. Die Schichten weisen, abhängig von Partikelgröße und Sinterbedingungen, Makro- und Mesoporosität auf, so dass von einem guten Katalysatornutzungsgrad ausgegangen werden kann.

Untersuchungen haben gezeigt, daß die Schichten katalytisch aktiv sind für die Methanol/Dampfreformierung, bei der aus einem Me-

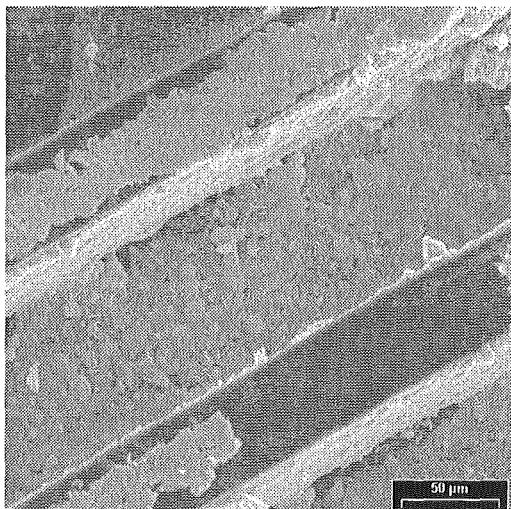


Abb. 6: REM-Aufnahme einer mit katalytischen Nanopartikeln beschichteten Mikrokanalstruktur. Ein Folienstapel wurde im Innern beschichtet. Die Aufnahme zeigt eine Ansicht einer einzelnen Folie nach dem Auseinandernehmen des Stapsels.

thanol/Wasser dampfgemisch bei Temperaturen um 250 °C CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> erzeugt wird.

Neben dem Aufbringen dünner Schichten auf offenen Mikrostrukturen bietet das Verfahren auch die Möglichkeit, geschlossene Kanalstrukturen – und damit auch bereits gefertigte Mikrostrukturbauteile – zu beschichten. Die feindispersen Nanopartikelsuspension können mit einer geeigneten Preßvorrichtung so in die Bauteile eingebracht werden, dass Schichten variabler Dicke an den Mikrokanalwänden erzeugt werden.

In ersten Untersuchungen wurden gehaltene Stapel mikrostrukturierter Metallplättchen verwendet, die nach dem Beschichtungsvorgang wieder auseinander genommen wurden, um das Ergebnis zu begutachten. Abb. 6 zeigt das Ergebnis eines solchen Beschichtungsversuchs mit reinen ZnO – Nanopartikeln auf einer Kupferunterlage. Deutlich ist die ca. 5 µm dicke Partikelschicht zu erkennen, die den Kanalwänden anliegt.

## Ausblick

Die hier vorgestellten Funktionsschichten bieten eine gute Ausgangsbasis, um neue Anwendungen in der thermischen und chemischen Mikroverfahrenstechnik zu entwickeln. Die derzeitigen Arbeiten konzentrieren sich deshalb auf die anwendungsspezifische Optimierung der Schichten.

## Literatur:

- [1] K. Schubert, W. Bier, J. Brandner, M. Fichtner, C. Franz, G. Linder, *Realization and Testing of Microstructure Reactors, Micro Heat Exchangers and Micromixers for Industrial Applications in Chemical Engineering*, Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Microreaction Technology, AIChE Spring Meeting, New Orleans (1998) 88 - 95
- [2] O. Wörz, K.P. Jäckel, Th. Richter, A. Wolf, *Microreactors, a New Efficient Tool for Optimum Reactor Design*, Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Microreaction Technology, AIChE Spring Meeting, New Orleans (1998) 183 - 185
- [3] U. Hagendorf, M. Janicke, F. Schueth, K. Schubert, M. Fichtner, A Pt / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coated Microstructured Reactor / Heat Exchanger for the Controlled H<sub>2</sub> / O<sub>2</sub> -Reaction in the Explosion Regime, Proc. 2nd Int. Conf. on Microreaction Technology, AIChE Spring Meeting, New Orleans (1998) 81 - 87
- [4] G. Müller, M. Kronjnenberg, G. Krafft, C. Schultheiss, *Thin Film Deposition by Means of Pulsed Electron Ablation*, in: *Science and Technology of Thin Films*, F.C. Matacotta, G. Ottaviani (ed.), World Scientific Publ. Co. Pte. Ltd. Singapore (1995) 89 - 119
- [5] M. Menning, G. Jonschker, H. Schmidt, *Sol-Gel derived thick coatings and their thermo-mechanical and optical properties*, SPIE Vol. 1758, Sol-Gel Optics II (1992) 125 - 134
- [6] J. Mayer, M. Fichtner, K. Schubert, *Entwicklung und Charakterisierung mikrostrukturierter Rhodiumvollkatalysatoren für die partielle Oxidation von Methan zu Synthesegas bei Betriebsdrücken bis 20 bar*, Proc. MicroEngineering 99 Stuttgart, (1999) 312 – 322
- [7] W. Hübner, C.-Th. Speiser, *Die Praxis in der anodischen Oxidation des Aluminiums*, Düsseldorf, Aluminium Verlag (1988)
- [8] R. Wunsch, M. Fichtner, K. Schubert, *Anodic Oxidation Inside Completely Manufactured Microchannnel Reactors Made of Aluminum*; Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Microreaction Technology, AIChE Spring Meeting, Atlanta (2000)
- [9] G. Wießmeier, K. Schubert, D. Hönicke, *Monolithic Microreactors Possessing Regular Pore Systems for the Successful Performance of Heterogeneously Catalysed Reactions*, Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Microreaction Technology, Springer (1997), 20 – 26
- [10] P. Pfeifer, M. Fichtner, M. Liauw, G. Emig, K. Schubert, *Microstructured Catalysts for Methanol-Steam Reforming*, Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Microreaction Technology, Frankfurt/Main, Germany (1999)



# Fertigung marktgerechter mikrofluidischer Systeme mit dem AMANDA-Verfahren

W.K. Schomburg, S. Kaiser

Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Beim AMANDA-Verfahren werden Abformung, Oberflächenmikromechanik und Membranübertragung zu einem Prozess zusammengefasst, der sich auszeichnet durch eine besonders wirtschaftliche Fertigung von Mikrokomponenten aus Kunststoffen. Die Vorteile und Grenzen des Verfahrens werden anhand der einzelnen Fertigungsschritte diskutiert. Das Institut für Mikrostrukturtechnik bietet umfangreiche Hilfestellung bei der Markteinführung des AMANDA-Verfahrens an.

## 1. Einleitung

Spielen Sie gerne Halma? Wer Halma spielt, weiß: Es gibt viele Wege ans Ziel! Oft ist es besser einen bewährten Weg weiter zu beschreiten, weil schon alles dafür vorbereitet ist. Aber manchmal kann man nur gewinnen, wenn man einen neuen Weg findet, oder ein neuer Weg eröffnet langfristig bessere Chancen.

Was ist der beste Weg, ein industrielles Produkt herzustellen? Die Antwort auf diese Frage wird oft gefunden, wenn die im Haus verfügbaren Konzepte und Verfahren verfeinert werden. Wenn dies aber nicht mehr ausreicht, lohnt sich ein Gespräch mit uns. Im Forschungszentrum Karlsruhe werden neue Fertigungsverfahren entwickelt, die es erlauben, mit einem Riesensatz deutlich weiter zu kommen als bisher.

Lange Zeit war der größte Teil der Experten davon überzeugt, dass die Produkte der Mikrosystemtechnik nur aus Silizium gemacht werden könnten. Das lag daran, dass sich die Mikromechanik aus der Mikroelektronik entwickelt hat. Wenn die Frage nach dem besten Fertigungsverfahren aber neu gestellt wird, zeigt sich schnell, dass Mikrostrukturen aus Kunststoffen preiswerter in großen Stückzahlen produziert werden können, weil sie sich durch thermoplastische Abformung aus sehr preiswerten Grundstoffen fertigen lassen. Darüber hinaus steht eine ganze Palette von polymeren Werkstoffen zur Auswahl, so dass ein an die jeweilige Anwendung angepasstes Material eingesetzt werden kann.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass sich insbesondere mikrofluidische Komponenten dadurch fertigen lassen, dass eine strukturierte Membran auf abgeformte, mikrostrukturierte Gehäuse übertragen wird, wie es beim AMANDA-Verfahren der Fall ist [1, 2]. Der vorliegende Artikel beschreibt das AMANDA-Verfahren und geht anhand einiger Anwendungsbeispiele auf die Besonderheiten ein,

die sich durch die Verwendung von Kunststoffen in der Mikrotechnik ergeben.

## 2. AMANDA-Verfahren

AMANDA ist ein Akronym, das sich aus den Verfahrensschritten Abformung, Oberflächenmikromechanik und Membranübertragung zusammen-

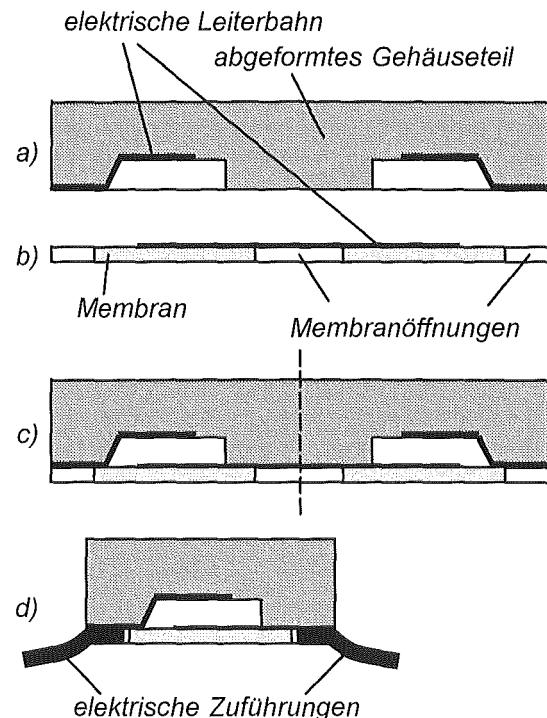


Abb. 1: Schematische Darstellung des AMANDA-Verfahrens am Beispiel der Herstellung eines elektrischen Schalters. a) durch Mikroabformung wird ein Gehäuse hergestellt, b) durch Oberflächenmikromechanik wird eine Membran hergestellt und/oder strukturiert, c) die Membran wird auf das Gehäuse übertragen, d) nach dem Vereinzeln, der im Nutzen gefertigten Teile können die elektrischen Anschlüsse angebracht werden.

setzt [1, 2]. Wie in Abb. 1 am Beispiel von elektrischen Mikroschaltern dargestellt, wird in der Regel auf ein Gehäuse, das durch Mikroabformung hergestellt wurde, eine mit den Methoden der Oberflächenmikromechanik erzeugte und/oder strukturierte Membran übertragen.

Das AMANDA-Verfahren nutzt die Vorteile der Parallelfertigung im Nutzen und der Mikroabformung von thermoplastischen Kunststoffen. So entstehen besonders preisgünstige Mikrokomponenten, die in erster Linie im Bereich der Mikrofluidik ihre Anwendung finden. Beispiele sind die Mikropumpe, die das erste Produkt war, das mit dem AMANDA-Verfahren hergestellt wurde [3], Mikroventile [4, 6], Drucksensoren [7], Flusssensoren und Mikroentgaser. Der Mikroentgaser ist das erste Produkt, das in großer Stückzahl auf den Markt kommt. Ein anderer Artikel in diesem Band beschreibt ausführlich Entwicklung und Funktionsweise des Mikroentgasers [8]. Nachdem die prinzipielle Machbarkeit am Beispiel der Mikropumpe demonstriert worden war [3], wandten sich auch andere Arbeitsgruppen dem AMANDA-Verfahren zu und erzeugten so oder durch leichte Variationen mikrofluidische Komponenten [9-10].

### 3. Markteinführung

Die Eignung des AMANDA-Verfahrens für eine industrielle Produktion wurde schon vor einigen Jahren durch die Kleinserienfertigung einer Mikropumpe nachgewiesen. Dabei wurde in den Labors des Institutes für Mikrostrukturtechnik eine Ausbeute der Fertigung von 70 % erreicht. Dauertests haben gezeigt, dass Mikropumpen mehr als 7600 Betriebsstunden laufen können ohne auszufallen (vgl. Abb. 2).

Wenn ein Industriepartner ein neues Produkt auf den Markt bringen will, das mit dem AMANDA-Verfahren gefertigt werden soll, wird ihm die Möglichkeit geboten, Prototypen im Institut entwickeln und in einer Kleinserie gemäß den Regeln der DIN ISO 9001 fertigen zu lassen, bis der Pro-

zess seine Fertigungsreife erreicht hat. Dabei können Mitarbeiter des Industriepartners selbst bei der Kleinserienfertigung mitwirken, um später mit dem so erhaltenen Wissen im eigenen Hause eine größere Produktion aufzubauen.

Dieses Konzept ist Teil des langfristigen Ziels, das AMANDA-Verfahren in die Industrie zu überführen. Es ist damit zu rechnen, dass sich eine Arbeitsteilung zwischen verschiedenen Unternehmen herausbilden wird, weil sich Abformmaschinen nur dann rentabel betreiben lassen, wenn große Stückzahlen benötigt werden. Nur für Unternehmen, die einen Absatzmarkt von mehr als einigen Hunderttausend Mikrokomponenten pro Jahr haben, dürfte sich die Investition in eine eigene Mikroabformung lohnen, wenn nicht andere Argumente wie z.B. die Unabhängigkeit von Zulieferern eine wesentliche Rolle spielen.

Es sind aber auch Anwendungen möglich, bei denen sich der Aufbau von AMANDA-Komponenten rentieren würde, auch wenn nur weniger als 1000 Komponenten pro Jahr benötigt werden. Für solche Anwendungen müsste es OEM-Fabrikanten geben, die Mikroabformung im Auftrag anbieten.

Eine ähnliche Situation ergibt sich, bei der Oberflächenmikromechanik, bei der noch höhere Investitionen nötig sind, bevor mit einer Produktion begonnen werden kann. OEM-Lieferanten werden ihre Dienste aber erst anbieten, wenn es genügend Firmen gibt, die strukturierte Membranen und abgeformte Teile nachfragen. Es ergibt sich eine Situation, die in gewisser Weise mit dem Beginn einer Party Halma vergleichbar ist. Wenn sich die Wege ergänzen, die verschiedene Mitspieler aufbauen, kommt das Spiel richtig in Fluss, aber bis es soweit ist, muss die erste Straße durch mühevollenes Voranschieben der Figuren gebaut werden. Hier setzt das Forschungszentrum an, indem es einerseits die Fertigung von Halbzeugen und Produkten in kleineren Stückzahlen und andererseits Lizenzen für die Fertigung anbietet.

### 4. Mikroabformung

Ein wesentlicher Grund für den Erfolg des AMANDA-Verfahrens ist der Einsatz der Mikroabformung, die es erlaubt das Material für die Gehäuse der Produkte aus einer Vielzahl von Kunststoffen auszuwählen und selbst sehr komplexe Mikrostrukturen mit einem einfachen Arbeitsgang herzustellen. Im Forschungszentrum liegen z.B. Erfahrungen mit der Abformung von Mikrostrukturen aus den folgenden Polymeren vor: PMMA, PC, PSU, PA, PEEK, PVDF, POM. Viele andere thermoplastische Kunststoffe können ebenfalls verwendet werden, so dass je nach der jeweiligen Anwendung ein passendes Polymer ausgewählt

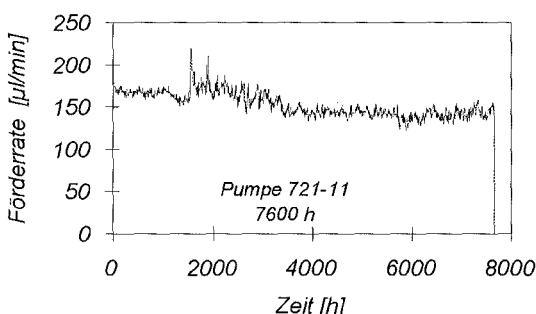


Abb. 2: Flussrate einer Mikropumpe in einem Dauertest über mehr als 7600 Stunden

werden kann. So sind z.B. fluorierte Kunststoffe wie PEEK (Polyetheretherketon) besonders dann geeignet, wenn ein chemisch inertes Material benötigt wird, das kurzzeitig Temperaturen von bis zu 300 °C aushält, PSU (Polysulfon) ist dagegen transparent und immerhin bis zu Temperaturen von 170 °C beständig und PMMA (Polymethylmethacrylat) und PC (Polycarbonat) erweisen sich in vielen Anwendungen als biokompatibel.

Polymere sind im allgemeinen elektrisch isolierend, sie können aber auch mit Ruß oder Metallpulver gefüllt werden, um leitfähige Mikrokomponenten zu fertigen [5]. In den meisten Fällen wird jedoch ein isolierendes Gehäuse mit daran oder darin angebrachten Leiterbahnen benötigt. Dies wird auf einfache Weise dadurch erreicht, dass auf einer einige hundert Mikrometer dicken Polymerfolie ein dünner Metallfilm z.B. aus Gold aufgesputtert oder aufgedampft wird (vgl. Abb. 3). Dieser Goldfilm wird dann z.B. durch Fotolithografie und Naßätzen strukturiert, so dass Leiterbahnen auf der Folie entstehen (Abb. 3a). Anschließend wird die Folie justiert zu den Leiterbahnen durch Heißprägen umgeformt (Abb. 3b). Auf diese Weise bildet sich ein stufenloser Übergang zwischen den Leiterbahnen und den umgebenden Wänden aus (Abb. 3c), was für viele Anwendungen ein Vorteil ist. So kann z.B. besser eine dichtende Verbindung zu einem Deckel hergestellt werden (vgl. Kapitel 6 weiter unten). Wände in den Mikrostrukturen, über die Leiterbahnen auf ein anderes Niveau geführt werden, sollten keinen zu großen Winkel zur Horizontalen aufweisen, damit die Leiterbahn beim Heißprägen nicht beschädigt werden. Es ist auch ein Vorteil, wenn die Kante am Übergang zwischen zwei Wandschrägen abgerundet ist.

Für viele Anwendungen werden durchgehende

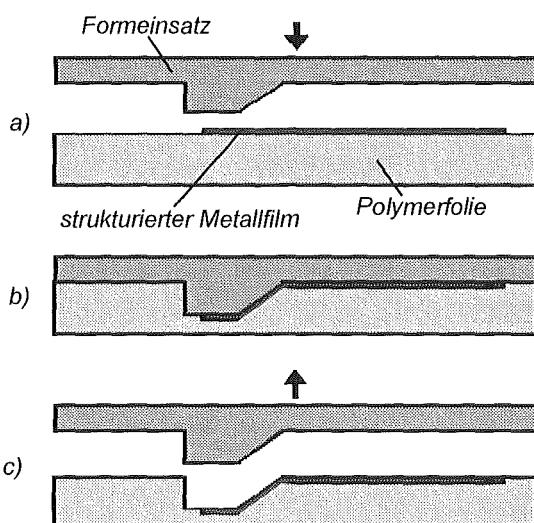


Abb. 3: Fertigung von Mikrostrukturen mit darin angebrachten Leiterbahnen

Öffnungen in abgeformten Teilen benötigt, wenn z.B. ein fluidischer Zugang in das Innere der Mikrostruktur hergestellt werden soll. Anders als im Spritzguss makroskopischer Teile gelingt es nicht ohne weiteres, durchgehende Öffnungen direkt bei der Abformung herzustellen. Statt dessen können Sacklöcher im Formteil erzeugt werden, die später dadurch geöffnet werden, dass das Formteil entweder feinwerktechnisch, mit einer Stanze oder mit einem Laser nachbearbeitet wird. Z.B. für Ventile kann eine besonders kleine Öffnung erforderlich sein, die aus technischen Gründen gar nicht durch das ganze Bauteil hindurch geführt werden kann. Dann ist es notwendig, zwei Sacklöcher mit unterschiedlichem Querschnitt aufeinander zu zuführen und das verbleibende dünne Häutchen nach der Abformung zu entfernen. Ein Beispiel für eine solche Anwendung ist in Abb. 4 zu sehen, in der der äußere Teil der fluidischen Zuführungen breiter ist als der innere, der die Kräfteverhältnisse im Ventil bestimmt.

Für solche zu einander justierte Sacklöcher auf verschiedenen Seiten des Formteiles ist eine positionierte Abformung nötig, wie sie die Heißprägemaschine HEX03 ermöglicht, die in Zusammenarbeit des Forschungszentrums mit Jenoptik Mikrotechnik entwickelt wurde.

## 5. Membranstrukturierung

Die Membranen, die beim AMANDA-Verfahren eingesetzt werden, werden je nach Anwendung entweder als Folie gekauft oder eigens hergestellt. Wenn es die Anwendung erlaubt, ist es in der Regel preiswerter eine Folie von der Rolle zu verwenden, die es in großer Auswahl aus verschiedenen Materialien und in verschiedenen Stärken zu kaufen gibt.

Wenn eine Folie dünner wird als etwa 20 µm ist sie allerdings nur noch schwer handhabbar. Dann ist es besser, die Folie z.B. durch Aufschleudern einer Emulsion und anschließendes Aushärten herzustellen. Die Materialauswahl für Emulsionen, aus denen Membranen durch Aufschleudern hergestellt werden können, ist schon deutlich geringer. Es gibt aber noch zahlreiche Möglichkeiten. Im Forschungszentrum erprobt wurden z.B. PMMA, PI, PTFE, Epoxid und Silicon. Membranen aus Metallen und Gläsern lassen sich durch Aufsputtern und Aufdampfen erzeugen, dabei muss allerdings bedacht werden, dass insbesondere dicke Schichten teurer sind als aufgeschleuderte Filme.

Die Membranen selbst und darauf aufgebrachte Schichten müssen oft strukturiert werden, um die gewünschte Funktionalität zu erreichen. Aufgeschleuderte Filme aus fotostrukturierbaren Materialien erhalten in der Regel direkt bei ihrer Herstellung ihre Form, indem z.B. nur belichtete Be-

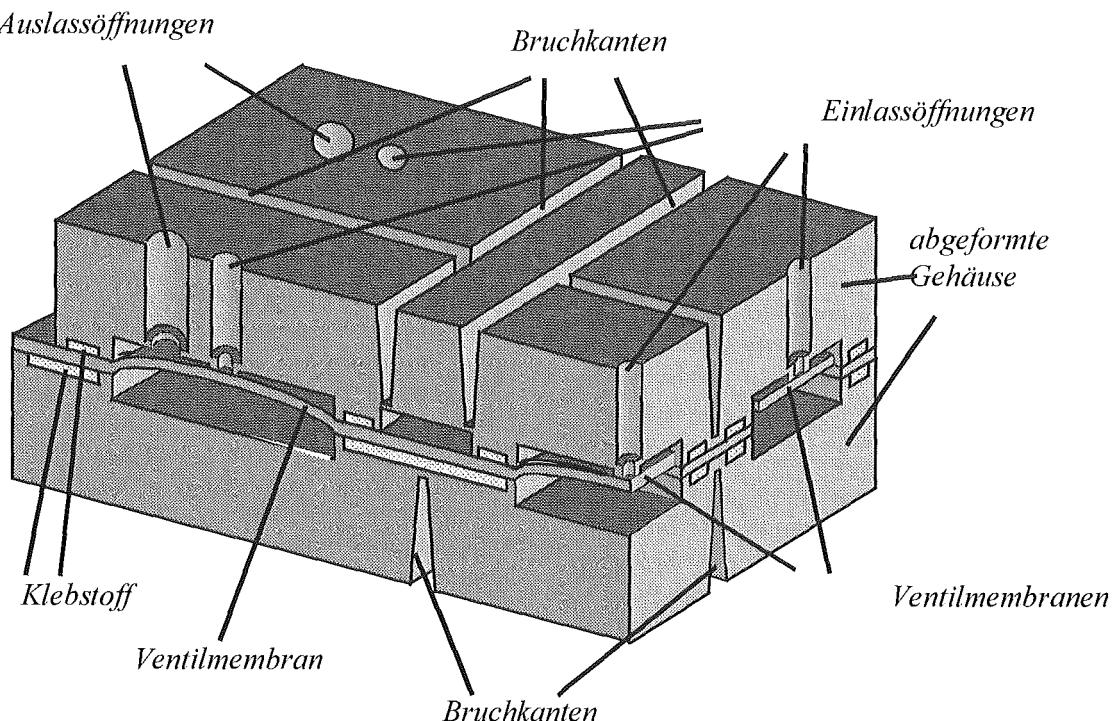


Abb. 4: Innerer Aufbau eines Nutzens von Mikroventilen

reiche ausgehärtet werden. Nicht fotostrukturierbare, organische Schichten lassen sich durch reaktives Ionenätzen formen und Metall wird in der Regel naßchemisch geätzt.

Eine sehr preiswerte Alternative zu den Methoden der Mikromechanik ist das Stanzen von Membranen. Es bietet sich aber nur dann an, wenn relativ große Strukturen hergestellt werden sollen, deren kleinste Abmessungen einige zehntel Millimeter nicht unterschreiten. Abb. 5 zeigt eine gestanzte und eine fotolithografisch erzeugte Struktur in einer Polyimidmembran im gleichen Maßstab. Während die Breite der gestanzten Struktur mit 400 µm an der untersten Grenze des Machbaren liegt, hätte die fotolithografisch erzeugte Öffnung ohne weiteres noch einen Faktor 10 kleiner sein können.

## 6. Verbindungsverfahren

Da die Übertragung einer Membran ein wesentlicher Schritt beim AMANDA-Verfahren ist, kommt der Verbindungstechnik einen zentralen Bedeutung zu. Bei mikrofluidischen Komponenten kommt es oft nicht so sehr auf eine besonders akkurate Verbindung an, wichtiger ist in der Regel, dass die Verbindung überall dichtend ist. Eine größere Herausforderung ist es oft, die Verbindung der Fügepartner auf der gesamten Kontaktfläche mit hoher Zuverlässigkeit reproduzierbar zu erreichen.

Geeignete Verbindungsverfahren sollten möglichst bei geringen Temperaturen ablaufen, weil

Polymere eine große thermische Dehnung aufweisen und bei der Fertigung keine mechanischen Spannungen in den Bauteilen entstehen sollen. Anderseits ermöglichen Polymere Verbindungsmethoden, die auf andere Werkstoffe nicht so einfach angewandt werden können.

So können Polymere z.B. relativ einfach mit einem Laser oder durch lokale Erwärmung mit einer Thermode verschweißt werden. Der Laser kann dabei die Wärme an der Berührungsfläche der zu verbindenden Teile erzeugen, wenn eines der Teile transparent und das andere opak ist. Die Verbindung kann auch über Ultraschall eingeleitet

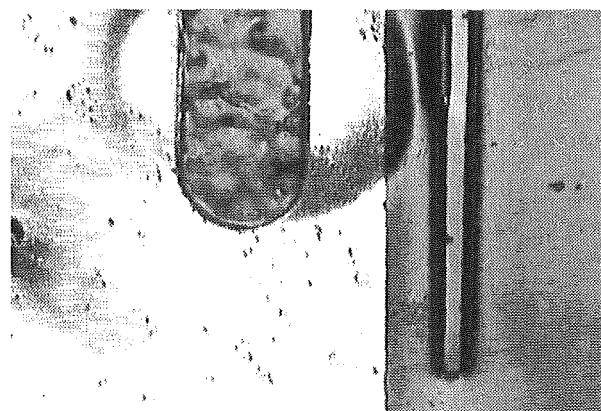


Abb. 5: Größenvergleich zwischen einem gestanzten, 400 µm breiten (links) und einem fotolithografisch erzeugten, 50 µm breiten (rechts) Schlitz in einer Polyimidmembran.

werden, der über sogenannte Energiedirektoren, die Teil des Designs sind, zu einer lokalen Erwärmung führt.

Im Modellbau ist es üblich, Kunststoffe mit einem Lösungsmittel anzulösen und in innigen Kontakt zueinander zu bringen. Sie gehen dann eine feste Verbindung miteinander ein, wenn das Lösungsmittel verfliegt.

Alle bisher genannten Verbindungsverfahren erfordern eine sehr gute Ebenheit der Fügepartner, weil nur dann eine dichtende Verbindung erzielt werden kann, wenn es zu einer innigen Verbindung kommt. Deshalb sind für die Fertigung der Fügepartner kleine Toleranzen erforderlich und vom Design her müssen auch kleine Stufen wie z.B. aufgebrachte Leiterbahnen vermieden werden. Größere Toleranzen in den Werkstücken erlaubt dagegen das Kleben, weil der Klebstoff Unebenheiten ausfüllt und damit für die benötigte Abdichtung sorgt. Deshalb kann für manchen Anwendungsfall eine Klebeverbindung in Hinblick auf die Fertigungsausbeute und den Aufwand besser geeignet sein als eines der oben genannten Verfahren. Eher nachteilig beim Kleben ist die benötigte Zeit für das Aushärten.

Im Institut für Mikrostrukturtechnik wurden die Kammerkle 技术 and das Kapillarkleben für die Verbindung von Mikrostrukturen entwickelt [11]. Bei der Kammerkle 技术 wird in den Mikrostrukturen der Fügepartner ein Hohlraumsystem vorgesehen, das mit einem Klebstoff gefüllt wird. Dadurch braucht der Klebstoff nur an einer geeigneten Stelle injiziert zu werden und wird durch den Hohlraum an die gewünschten Positionen transportiert. In Abb. 5 ist ein Schnitt durch einen Nutzen von Mikroventilen zu sehen, bei dem eine Membran auf diese Weise mit dem Gehäuse verbunden wurde.

Beim Kapillarkleben wird der Klebstoff ausschließlich durch Kapillarkräfte transportiert. Am Rande oder in dafür vorgesehenen Öffnungen wird eine gewisse Menge Klebstoff appliziert, die dann zwischen die Fügepartner wandert. Das mikrostrukturierte Design der Berührungsflächen sorgt dabei für den Transport des Klebstoffes an die gewünschten Positionen. Überall dort, wo kein Klebstoff eindringen soll, erweitert sich der Hohlraum in Form einer Stufe, sodass die Kapillarkräfte unterbrochen werden.

## 7. Test im Nutzen

Ein oft unterschätzter Kostenfaktor ist der Test von Mikrokomponenten vor der Auslieferung an den Kunden. Der Test erfordert oft Handarbeit, weil jedes einzelne Teil überprüft werden muss. Eine allumfassende Kontrolle der einzelnen Mikrostrukturen ist in der Regel viel zu aufwändig, als dass sie bei einer wirtschaftlichen Anwendung in

Frage käme. Statt dessen sollte die Funktion der Mikrokomponenten überprüft werden und nur bei Ausschussteilen wird dann nach der Ursache des Versagens gesucht, indem unter Umständen die Mikrostrukturen mit dem Mikroskop kontrolliert werden.

Der Funktionstest sollte, wenn dies möglich ist, wie die Fertigung im Nutzen erfolgen. Im Institut für Mikrostrukturtechnik werden z.B. immer 12 Mikropumpen im Nutzen parallel getestet. Dazu wurde eigens eine Testapparatur entwickelt, in die ein ganzer Nutzen eingelegt und halbautomatisch von einem PC-Programm getestet wird. Der Bediener braucht nur noch die Nutzen einzulegen und die Losnummer einzugeben.

## 8. Vereinzelung

Da AMANDA-Komponenten in der Regel im Nutzen gefertigt werden, müssen diese Nutzen am Ende der Fertigungsprozesses aufgeteilt werden. Dies geschieht üblicherweise mit einer Säge. Bei der Kleinserienfertigung von Mikropumpen werden die Nutzen mit einer automatischen Säge entlang vorbestimmter Linien zerteilt. Dies ist ein Verfahrensschritt, der zuverlässig funktioniert. Allerdings ist eine gewisse Investition für die Anschaffung der automatischen Säge erforderlich und der Sägeschritt selbst ohne Rüstzeit dauert ca. eine halbe Stunde.

Deshalb wurde auch ein anderes Konzept für die Vereinzelung von AMANDA-Komponenten untersucht. Abb. 4 stellt eine schematische, dreidimensionale Ansicht eines Schnitts durch einen Nutzen von Mikroventilen dar. Um jedes einzelne Ventil herum sind Bruchkanten vorgesehen, entlang derer der Nutzen wie eine Tafel Schokolade zerbrochen werden kann. Je nach Größe der einzelnen Komponenten kann die Vereinzelung durch Brechen mit der Hand oder mit Hilfe einer Stanze erfolgen. Auf diese Weise wird für diesen Bearbeitungsschritt nur noch ca. eine Minute benötigt und die Investitionskosten sind denkbar gering.

Es sind aber auch Anwendungen denkbar, bei denen die Vereinzelung mit einer Säge die bessere Lösung ist: Wenn Bruchkanten vorgesehen werden, müssen, wie in Abb. 5 zu erkennen ist, beide Seiten der abgeformten Gehäuseteile mikrostrukturiert werden. Dazu ist ein zusätzlicher Formeinsatz erforderlich und der Abformprozess wird zumindest in seiner Planung und von den apparativen Anforderungen her aufwendiger. Wenn Mikrokomponenten mit lateral sehr kleinen Gesamtabmessungen gefertigt werden sollen, spielt auch der Platzbedarf eine Rolle, der für die Bruchkanten auf dem Nutzen vorgesehen werden muss. Ein Sägeschnitt ist nur ca. 200 µm breit, während eine Bruchkante ca. 500 µm in Anspruch nimmt. Wenn z.B. Drucksensoren hergestellt werden

sollen, die nur etwas mehr als einen Millimeter breit sind, macht sich dies in der Anzahl der Komponenten bemerkbar, die nebeneinander hergestellt werden können, und wirkt sich damit auch auf den Herstellungsaufwand aus.

## 9. Design

Beim Design von AMANDA-Komponenten ergeben sich weitgehende Freiräume, weil durch die Mikroabformung eine große Formenvielfalt möglich ist. Berücksichtigt werden muss, dass Polymere eine größere thermische Dehnung erfahren als andere Werkstoffe. Deshalb müssen für die Fertigung an entsprechender Stelle genügende Toleranzen vorgesehen werden und sensitive Tei-

le müssen mechanisch vom Gehäuse entkoppelt werden. So ist es z.B. vorteilhaft, die Messplatte eines Drucksensors nicht an einer Membran im Gehäuse aufzuhängen, sondern am Gehäuse aufliegen zu lassen und für die Abdichtung nur eine schlaffe Membran zu verwenden, die keine Kräfte aufnehmen kann [12].

## 10. Schluss

Nun, wie steht es mit Ihnen? Dürfen wir Ihnen ein paar gute Tipps geben für Ihre nächste Partie Halma? Vielleicht können wir Ihnen einen neuen Weg bauen, über den auch Ihr Unternehmen einen Riesensatz in die Zukunft macht.

## Literatur

- [1] Schomburg, W.K.; Ahrens, R.; Bacher, W.; Goll, C.; Martin, J.; Rummler, Z., "AMANDA - Produktion mikrofluidischer Komponenten durch Abformung und Membranübertragung", Vortrag auf dem 3. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, Karlsruhe, 2. - 3. April 1998 und FZKA-Bericht **6080**, 1998, 173 - 178
- [2] Schomburg, W.K.; Ahrens, R.; Bacher, W.; Martin, J.; Saile V., "AMANDA - Surface Micromachining, Molding, and Diaphragm Transfer", Sensors and Actuators A **76** (1999) 343 - 348
- [3] Büstgens, B.; Bacher, W.; Bier, W.; Ehnes, R.; Maas, D.; Ruprecht, R.; Schomburg, W.K.; Keydel, L., "Micromembrane Pump Manufactured by Molding", Proceedings der 4th International Conference on New Actuators, Actuator'94, Bremen, 1994, 86 - 90
- [4] Fahrenberg, J.; Bier, W.; Maas, D.; Menz, W.; Ruprecht, R.; Schomburg W.K., "Microvalve System Fabricated by Thermoplastic Molding", J. Micromech. Microeng. **5**, 1995, 169 - 171
- [5] C. Goll, W. Bacher, B. Büstgens, D. Maas, R. Ruprecht, W.K. Schomburg, "Electrostatically Actuated Polymer Microvalve Equipped with a Movable Membrane Electrode", J. Micromech. Microeng. **7** (1997) 224 - 226
- [6] Goll, C.; Bacher, W.; Büstgens, B.; Maas, D.; Menz, W.; Schomburg, W.K., "Microvalves with Bistable Buckled Polymer Diaphragms", J. Micromech. Microeng. **6**, 1996, 77 - 79
- [7] Martin, J.; Bacher, W.; Hagen, O.F.; Schomburg, W.K., "Strain Gauge Pressure and Volume-Flow Transducers Made by Thermoplastic Molding and Membrane Transfer", Proceedings des International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS, Heidelberg, 1998, 361 - 366
- [8] Maute, A.; Schomburg, W.K., "Mikrofluidische Komponenten für die chemische Analysenmesstechnik", in diesem Band
- [9] Döpper, J.; Clemens, M.; Ehrfeld, W.; Kämper, K.-P.; Lehr, H.; "Development of Low-Cost Injection Molded Micropumps", Proceedings, 5<sup>th</sup> Int. Conf. on New Actuators (Actuator'96), Bremen, Germany, 26. -28. Juni, 1996, 37 - 40
- [10] Larsson, O.; Öhman, O.; Billman, Å.; Lundbladh, L.; Lindell, C.; Palmskog, G.; "Silicon Based Replication Technology of 3D-Microstructures by Conventional CD-Injection Molding Techniques", Proc. der Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'97), Chicago, USA, 16. - 19. Sept., 1997, 1415 - 1418
- [11] Maas, D.; Büstgens, B.; Fahrenberg, J.; Keller, W.; Ruther, P.; Schomburg, W.K.; Seidel, D.; "Fabrication of Microcomponents using Adhesive Bonding Techniques", Proceedings des International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '96, 11. - 15.2.96 San Diego, USA (1996) 331 - 336
- [12] Ahrens, R.; Rummler, Z.; Schomburg, W.K.; Stingl, C.; Wulff, K., "Einfluss der Luftfeuchtigkeit und anderer Umgebungsparameter auf AMANDA-Komponenten für die Mikrofluidik", in diesem Band

# Dreistufige Mikrostrukturen am Beispiel eines Zyklogetriebes

H. Hein <sup>1)</sup>, S.J. Chung <sup>1)</sup>, J. Mohr <sup>1)</sup>, T. Akashi <sup>2)</sup>, T. Hirata <sup>2</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik, <sup>2)</sup> Sumitomo Heavy Industries Ltd, Japan

## Zusammenfassung

Für ein Mikro-Zyklogetriebe mit einem Untersetzungsverhältnis von 1:17 und den Aussenmassen von 2 mm Durchmesser und 1,15 mm Höhe werden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie dreistufige Komponenten mit einer Gesamthöhe von 485  $\mu\text{m}$  aus galvanisch abgeschiedenem Ni benötigt. Die einzelnen Komponenten werden nach dem LIGA-Verfahren hergestellt, bei dem die primären Resiststrukturen durch eine Kombination von UVL und zweimaliger RTL erzeugt werden. Die 1. Ebene wird mit dem Negativresist EPON SU-8 und UVL strukturiert. Hierauf wird die 2. Ebene aus PMMA mit RTL justiert belichtet, entwickelt und danach werden beide Ebenen gleichzeitig galvanisiert. Die erzeugte 2. Ebene wird feinmechanisch auf Höhe bearbeitet und hierauf die 3. Ebene aus PMMA mit justierter RTL belichtet. Nach der Galvanisation der 3. Ebene wird durch feinmechanische Bearbeitung die Höhe eingestellt und die Komponenten werden vereinzelt. Unter einem Stereomikroskop werden mit Hilfe eines Vakuumgreifers die Komponenten montiert, wobei in Montageöffnungen am Gehäuseumfang Glasfasern eingeführt werden. Die Gehäuseteile werden abschließend mit UV-härtendem Kleber verbunden.

Durchgeführte Funktionstest zeigen die volle Funktionsfähigkeit des Mikro-Zyklogetriebes. So wird im getesteten Eingangs-Drehzahlbereich von 50 bis 500  $\text{min}^{-1}$  stets der Sollwert des Untersetzungsverhältnisses von 1:17 erreicht.

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen eines Zusammenarbeitsvertrages zwischen dem Forschungszentrum Karlsruhe und Sumitomo Heavy Industries Ltd, Japan, erarbeitet.

## 1. Einleitung

Zyklogetriebe sind in ihrem Funktionsaufbau vertikal zur Drehebene angeordnet, während z.B. Planetengetriebe in diesem Sinn eine ebene Anordnung aufweisen.

Für ein Mikro-Zyklogetriebe mit einem Untersetzungsverhältnis von 1:17 und den Aussenmassen von 2 mm Durchmesser und 1,15 mm Höhe werden dreistufige Komponenten mit einer Gesamthöhe von 485  $\mu\text{m}$  aus galvanisch abgeschiedenem Ni benötigt. Der vertikale Aufbau erfordert eine sehr genaue Einhaltung der Bauhöhe bei gleichzeitig engen Toleranzen der lateralen Abmessungen. Einzelkomponenten bestehen aus bis zu drei Ebenen, deren Höhentoleranzen 5  $\mu\text{m}$  betragen. Die Einhaltung dieser Toleranzen soll durch eine feinmechanische Bearbeitung der galvanisierten Ebenen erreicht werden.

## 2. Entwurf, Funktion und Bauteile

Für den Entwurf des Mikro-Zyklogetriebes wurde ein Makro-Zyklogetriebe um den Faktor 1:100 skaliert. Bild 1 zeigt die vormontierten Komponenten des Makromodells. Es sind dies:

- die Antriebsscheibe mit Zahnteilung und einer exzentrisch gelagerten Welle, auf deren Vorderseite kreisförmig Mitnehmerstifte sitzen.
- die Ausgangsscheibe mit Lochkreis zur Aufnahme der Mitnehmerstifte und das Ritzel.
- Unter- und Oberteil des Gehäuses.

In Bild 2 ist eine schematische Querschnittsansicht des Mikro-Zyklogetriebes gezeigt, dessen Komponenten kurz beschrieben werden.

Im unteren Gehäusedeckel sind die Ein- und Auslassöffnungen für den geplanten Turbinenantrieb integriert. Die Antriebsscheibe ist eine dreistufige Komponente bei einer Gesamthöhe von 485  $\mu\text{m}$ . Sie besteht aus radial angeordneten Turbinenblättern mit 40  $\mu\text{m}$  Höhe, einer 195  $\mu\text{m}$  dicken Scheibe mit einer um 32  $\mu\text{m}$  exzentrisch angeordneten Welle von 250  $\mu\text{m}$  Höhe. Der eigentliche Getriebe-

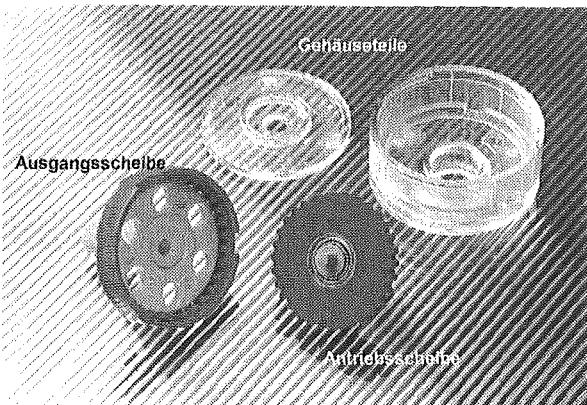


Abb. 1: Foto der vormontierten Komponenten des Makromodelles.

teil ist aufgebaut aus einem Innenrad und einem in das Gehäuse integrierten Ritzel. Das Innenrad ist eine dreistufige Komponente bestehend aus einem 17-Zahnrad mit einer Höhe von 195 µm und hierauf monolithisch hergestellten 250 µm hohen Mitnehmerstiften, wobei in das Innenrad ein 40 µm hoher Abstandsring integriert ist. Das Ritzel ist als Gehäuseteil ausgebildet und besteht aus einem 235 µm dicken Ring mit innenliegender 18-Zahnteilung.

Die 485 µm hohe dreistufige Ausgangsscheibe ist mit einem Lochkreis zur Aufnahme der Mitnehmerstifte versehen, trägt an der Unterseite einen integrierten Distanzring und auf der Oberseite eine Ausgangsachse.

### 3. Herstellung der Getriebeteile

Die einzelnen Komponenten werden nach dem LIGA-Verfahren hergestellt, bei dem die primären Resiststrukturen durch eine Kombination von UVL und zweimaliger RTL erzeugt werden. Für den gesamten Lithographieprozess wurden für die beiden RTL-Ebenen (2. und 3. Ebene) jeweils ein Satz von Röntgenmasken und für die UVL-Ebene (1. Ebene) eine konventionelle Chrommaske gefertigt.

Nachfolgend wird der Herstellungsprozess entsprechend der Prozessfolge nach Bild 3 geschildert. Für die Herstellung werden 4 Zoll Substrate aus Silizium bzw. Keramik verwendet, die mit einer nasschemisch oxidierten Ti-Schicht versehen sind.

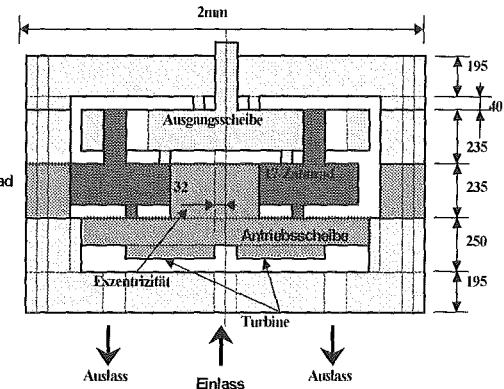


Abb. 2: Schematischer Aufbau des Mikro-Zyklogetriebes (Zahlenangabe in µm).

Die Strukturierung der 1. Ebene erfolgt mit konventioneller UVL unter Verwendung des negativ-arbeitenden Resistsystems EPON SU-8, der durch Resistenschleudern in einer Höhe von 40 µm aufgebracht wird. In dieser Ebene werden zunächst alle 40 µm hohen Komponenten (Turbineblätter und Abstandsringe) strukturiert. Anschließend wird ganzflächig mit einer dünnen Cr/Au metallisiert und so die Kontaktierungsebene für die Galvanisation der 1. und 2. Ebene mit Ni erzeugt. Auf diese Kontaktierungsebene wird eine 250 µm dicke PMMA-Folie für die Strukturierung der 2. Ebene geklebt und die justierte RTL durchgeführt. Anschließend erfolgt die Ni-Galvanisation der beiden Ebenen über eine Geamthöhe von ca. 300 µm in einem Schritt.

Inhomogenes Schichtwachstum bei der Ni-Galvanisation führt bei den erforderlichen Höhen zu Abweichungen über der gesamten Fläche, die deutlich grösser als die Höhentoleranz von  $\pm 5$  µm sind. Die Einhaltung der Höhe der Komponenten muss daher durch eine feinmechanische Bearbeitung erreicht werden, wofür ein ausreichender Vorhalt in der Höhe notwendig ist. Nach der Galvanisation wird die Höhe in mehreren Läppschritten und einem abschließenden Polierschritt eingestellt.

Vor der Strukturierung der 3. Ebene wird noch mal metallisiert, da im Layout einige Strukturen direkt auf die 2. Ebene aufsetzen. Auf den Metallisierungslayer wird eine 300 µm dicke PMMA-Folie geklebt. Danach erfolgt die Strukturierung der 3. Ebene wie beschrieben.

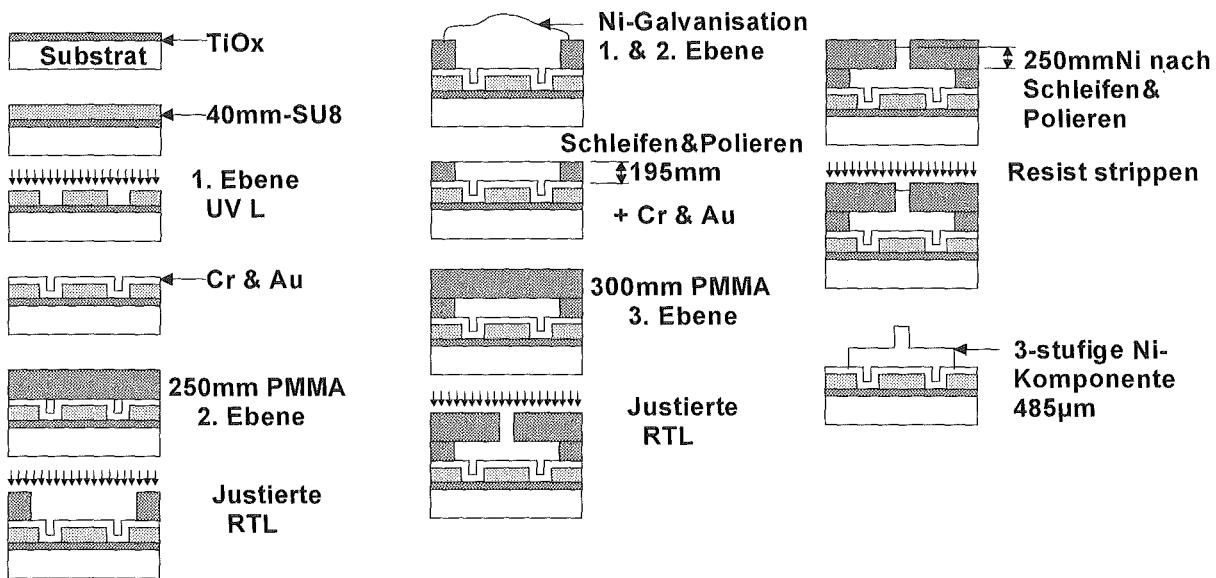


Abb. 3: Prozessfolge zur Herstellung 3-stufiger Strukturen durch Kombination von UVL und RTL.

Bild 4a zeigt als zweistufige Komponente (2. und 3. Ebene) den unteren Teil des Gehäuses mit Ein- und Auslassöffnungen. Am Umfang der Gehäusewand sind 4 Montageöffnungen eingebracht. An der Gehäusewand selbst ist kein Versatz zwischen der 2. und 3. Ebene zu erkennen, d.h. die Justierung dieser beiden Ebenen ist ausreichend gut.

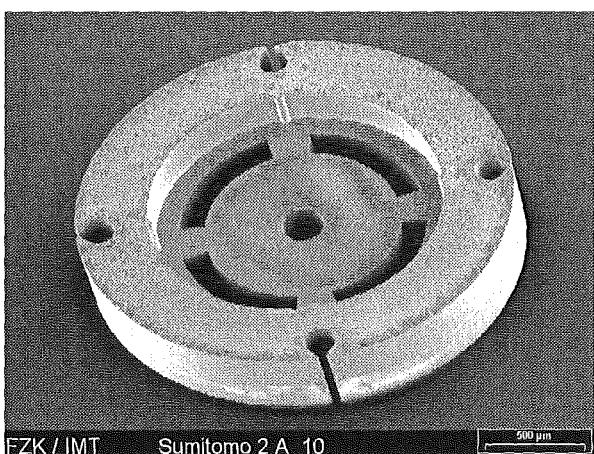


Abb. 4a: Unterteil des Gehäuses als 2-stufige Komponente der 2. und 3. Ebene, Ni ca. 445 µm hoch.

Das Bild 4b zeigt das innenliegende 17-Zahnrad mit den 8 Mitnehmerstiften, das in das 18-zahnige Ritzel eingelegt ist.

Das Detail des Bildes 4c zeigt einen Ausschnitt von Innenrad und Ritzel und belegt die Qualität der Strukturen bezüglich der Oberflächenbeschaffenheit.

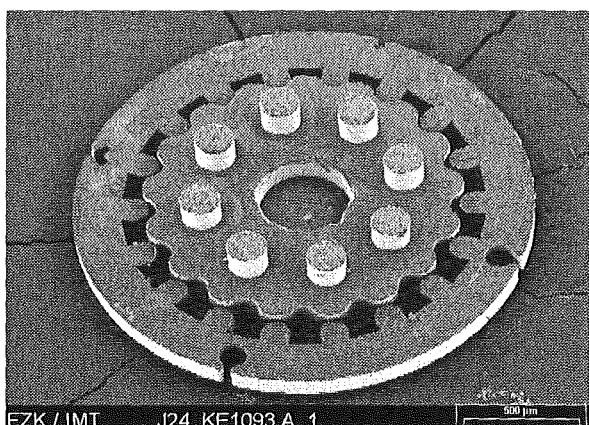


Abb. 4b: Innenliegendes Zahnrad in das Ritzel eingelegt.

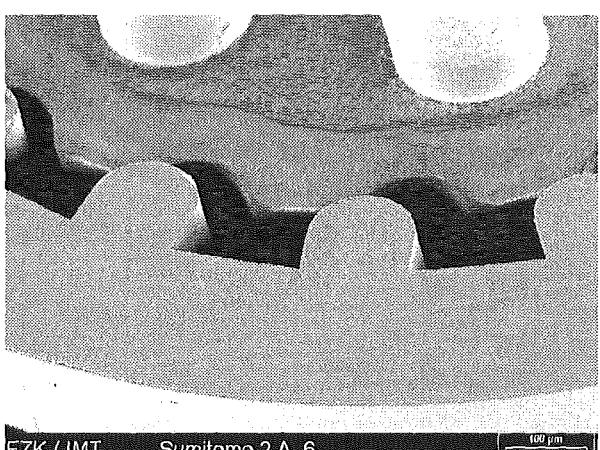


Abb. 4c: Detail des inneren Zahnrades mit Ritzel.

#### 4. Qualitätskontrolle und Ausbeute

Für den hier erstmals verwendeten dreistufigen LIGA-Prozess werden für laterale Abmessungen, Strukturhöhen und Lagefehler Abweichungen von bis zu 5  $\mu\text{m}$  zugelassen. Eine sorgfältige Vermessung der Komponenten ist daher Voraussetzung, um bereits in der Machbarkeitsstudie durch Selektion der Bauteile funktionierende Mikro-Zyklogetriebe montieren zu können. Die Ergebnisse werden am Beispiel der gemessenen Exzentrizität, und der Bauhöhe einiger Komponenten gezeigt.

Für die Einhaltung der Exzentrizität (Sollwert 32  $\mu\text{m}$ ) auf der Antriebsscheibe ist die Justiergenauigkeit zwischen 2. und 3. Ebene entscheidend. Im Bild 5a sind die Messwerte zusammengefasst. Die Abweichungen betragen zwar bis  $\pm 10 \mu\text{m}$ , dennoch liegen die Werte für die meisten Antriebs scheiben innerhalb der Toleranz von  $\pm 5 \mu\text{m}$ .

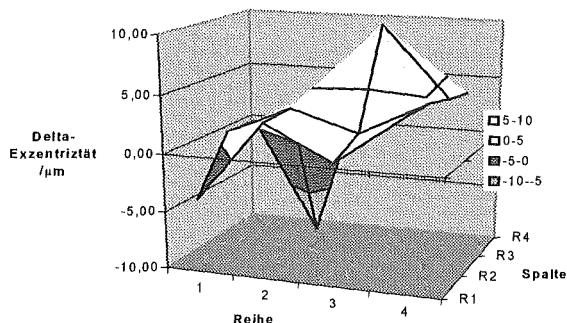


Abb. 5a: Abweichung vom Sollwert der Exzentrizität der Antriebsscheibe

Nach dem Vereinzeln werden die Strukturhöhen der Komponenten vermessen. Für jede Ebene werden ca. 120 bis 180 Messungen durchgeführt, wobei eine Komponente im Mittel durch 6 Messungen qualifiziert wird. Für die mit UVL strukturierte 1. Ebene ist die Höhe dieser Komponenten durch die Resistorschicht SU-8 vorgegeben. Erwartungsgemäß ist die Höhenverteilung dieser Ebene wesentlich enger als die Verteilungen für die 2. und 3. Ebene.

Ebene Nr.	Soll	MW	$\sigma$
1	40	41	2
2	195	210	10
3	250	251	7

Tab. 1: Daten zur Höhenverteilung in den 3 Ebenen (Zahlen in  $\mu\text{m}$ ).

Bei der Strukturierung der 2. und 3. Ebenen führen potenzielle Fehlerquellen wie Keilfehler der Substrate, Spannungen in den Ni-Schichten, unzureichende Haftung und Messfehler vor und nach der feinmechanischen Bearbeitung zu einer deutlich breiteren Verteilung. Im Bild 5b sind für die 3. Ebene einige Messergebnisse dargestellt, wobei ein Datenpunkt in der Grafik die Messwerte im Intervall von 2  $\mu\text{m}$  zusammenfasst.

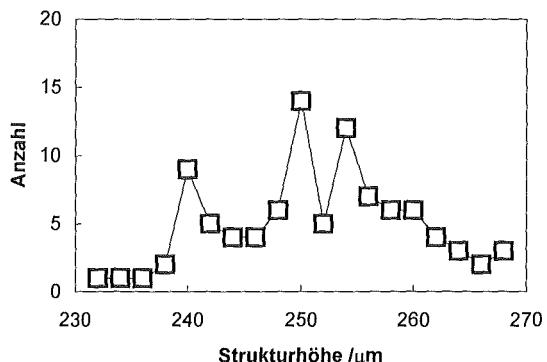


Abb. 5b: Gemessene Höhenverteilung der Komponenten der 3. Ebene: Sollwert 250  $\mu\text{m}$ .

Die Messergebnisse zeigen, dass im Toleranzbereich von  $\pm 5 \mu\text{m}$  eine ausreichende Anzahl von Komponenten vorhanden ist. Die Ausbeute an Komponenten innerhalb der Spezifikation nimmt allerdings mit jeder Ebene ab.

#### 5. Montage und dynamischer Test des Mikro-Zyklogetriebes

Der Zusammenbau der Komponenten erfolgt unter einem Stereomikroskop, wobei für die Handhabung der Komponenten ein Die-Bonder mit Vakuumgreifer verwendet wird. Das Bild 6a zeigt den Montagezustand mit eingelegtem Innenrad.

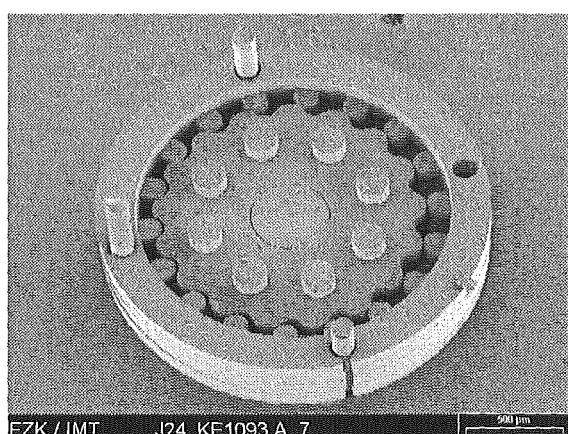


Abb. 6a: In das Ritzel eingelegtes Innenrad.

Von der Antriebsscheibe ist die Achse sichtbar, die bezüglich der Drehachse exzentrisch sitzt (Sollwert der Exzentrizität 32  $\mu\text{m}$ ). Als Fixierungsstifte am Gehäuseumfang werden Glasfasern verwendet, die nach dem Zusammenbau mit UV-härtendem Kleber formfest mit dem Gehäuse verbunden werden. Das fertig montierte Mikro-Zyklogetriebe ist im Abb. 6b gezeigt.

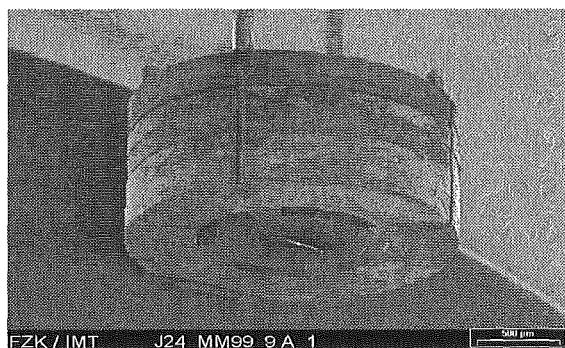


Abb. 6b: Ansicht eines montierten Mikro-Zyklogetriebes. Die Außenmasse betragen: Höhe 1,15 mm, Durchmesser 2 mm

Erste dynamische Tests belegen die Funktionsfähigkeit des Mikro-Zyklogetriebes. Diese Tests werden noch mit einem mechanisch angekoppelten Elektromotor in einem Eingangsdrehzahlbereich von 3 bis 1500  $\text{min}^{-1}$  durchgeführt. Die Messung der Ausgangsdrehzahl ist im Bild 7 dargestellt und belegt die Einhaltung des rechnerischen Untersetzungsverhältnisses von 1:17.

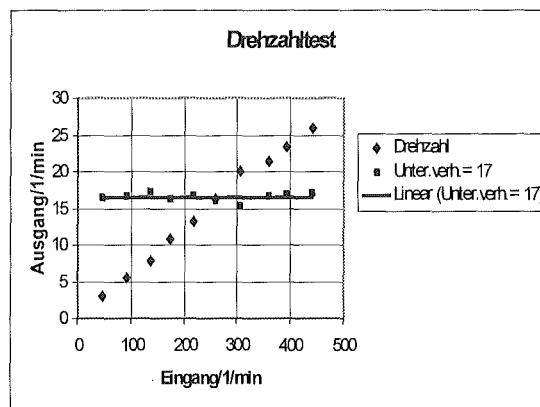


Abb. 7: Gemessene Ausgangsdrehzahl in Abhängigkeit der Eingangsdrehzahl und berechnetes Untersetzungsverhältnis.

## 6. Schlussbemerkung

In diesem Beitrag wurde die Herstellung eines Mikro-Zyklogetriebes beschrieben, dessen mehrstufige Komponenten mit einem dreifachen LIGA-Prozess erzeugt wurden. Für die Justierung der Ebenen zueinander wurde eine ausreichende Genauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  erreicht. Eine Qualitätskontrolle der Komponente zeigte große Schwankungen in der Bauhöhe, die z.T. deutlich grösser als die Toleranz von  $\pm 5 \mu\text{m}$  waren. Der dynamische Test des Mikro-Zyklogetriebes demonstrierte die volle Funktionsfähigkeit.

Die Autoren bedanken sich bei allen Mitarbeitern, die tatkräftig mit geholfen haben das Mikro-Zyklogetriebe entstehen zu lassen und die so zum erfolgreichen Abschluss des Projektes beigetragen haben.

## Literatur

- [1] A. Müller, J. Göttert, J. Mohr and A. Rogner, „Fabrication of Stepped Microoptical Benches for Fiber and Free Space Applications“, Microsystem Technologies, Vol. 2, pp. 40-45, 1996.
- [2] G. Calderon, K. Morris, O. Vladimirske and Y. Vladimirske, „Multi-level 3-D Patterning of Stacked PMMA Sheets for X-ray Microlithography“, Proc. of SPIE Conference, Vol. 2880, pp 231-236, 1996.
- [3] F. J. Pantenburg, S. Achenbach and M. Sesterhenn, „LIGA Strukturen mit Strukturhöhen von mehreren Millimetern durch Ultratiefen Röntgenlithographie (UDXRL)“, 3. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, Bericht KA 6080, Seite 77 ff., 1998
- [4] T. Hirata, S.J. Chung, H. Hein, T. Akashi and J. Mohr, „Micro cycloid-gear system fabricated by multi-exposure LIGA technique“, Proc. of SPIE Conference, Vol. 3875, pp 164-171, 1999.



# Die Anwendung der Mikrooptik in der Tele- und Datakommunikation

J. Mohr, P. Krippner, U. Wallrabe

Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Im Rahmen des strategischen Anwendungsfeldes „Mikrooptik“ werden zwei Konzepte verfolgt, um mikrooptische Komponenten zu realisieren. Basierend auf diesen Konzepten wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl von Demonstratoren realisiert. Diese verdeutlichen die Anwendbarkeit der Konzepte auch für die Herstellung von mikrooptischen Modulen und Systemen für die Tele- und Datenkommunikation. Da die Arbeiten des Forschungszentrums auf diesem Gebiet bisher im Wesentlichen von der Technologie bestimmt waren, wird es für eine höhere Markt- und Industrieakzeptanz in der Zukunft notwendig sein, die Anwendungskompetenz zu stärken. Hierzu ist die Einrichtung eines Forschungsverbundes mit anderen Forschungseinrichtungen sowie die Begleitung der vorwettbewerblichen Arbeiten durch einen Industriekreis zu prüfen.

## 1. Einleitung

Die heutige Gesellschaft in den Industrieländern befindet sich in einem Informationsrausch. Dies zeigt sich in der rapiden Zunahme der Telekommunikationsdienste, wie dem Internet und anderer multimedialer Dienste. Während bis vor kurzem noch Datenraten von einigen 10 kbit/sec (Modem), wie sie mit Kupferkabeln an den Teilnehmer gebracht werden können, ausreichend waren, erfordern die Multimediaanwendungen in den Fernnetzen bereits einige 10 Gigabit/sec. Auch bei den privaten Anschlüssen sind einige Mbit/sec (ISDN) heute bereits notwendig, um die Datenflut quasi on-line bereitstellen zu können. Die Forderung nach 100 Mbit in den nächsten 10 Jahren erscheint nicht unrealistisch, wenn man die Bestrebungen sieht, die Teilnehmer individuell mit Fernsehprogrammen zu versorgen. Diese Datenraten lassen sich mit Kupfertechnologie nicht mehr handhaben. In diesem Fall muss das Glasfaser bis zum Endgerät geführt werden, unabhängig davon, ob es sich um einen Fernseher oder das Telefon oder andere Kommunikationseinrichtungen im Haus handelt. Neben der Erweiterung der Kommunikationsnetze erfordert die Datenverarbeitung ebenfalls neue Ansätze, um den Engpass der elektrischen I/O-Schnittstellen zu beseitigen. Dies bedeutet, dass mittelfristig Interboard-Verbindungen in Rechnern auf optischem Wege realisiert werden müssen. Über kurz oder lang wird auch die Intraboard-Verbindung optisch ausgeführt werden.

Diese Zukunftsperspektiven spiegeln sich in den Aussagen der Delphi Studie aus dem Jahre 98 der FhG, die im Auftrag des BMBF durchgeführt wurde, wieder:

- Im Jahre 2006 wird das Internet der nächsten Generation realisiert sein, das Informationen in Echtzeit übertragen kann. Telefonservice und die Übertragung bewegter Bilder werden zum Standard
- Im Jahre 2009 findet die Identifikation an Automaten oder Eingangskontrollen biometrisch statt (Fingerprint, Irisanalyse)
- Zwischen 2006 und 2013 wird die Infrastruktur multimedialer Systeme auf optische Systeme umgestellt sein
- Im Jahre 2007 bis 2013 werden optische Speicher mit Aufzeichnungsdichten von mehr als 100 Gbit/cm<sup>2</sup> eingesetzt.

Die Umsetzung dieser Perspektiven erfordert nicht nur den Aufbau entsprechender Glasfasernetze sondern vor allem die Bereitstellung geeigneter Eingabe- und Ausgabegeräte sowie entsprechender Schnittstellenkomponenten. Hierzu gehören auch Einrichtungen, die die Bereitstellung der Information erst ermöglichen (Sensoren). Die Herstellung solcher Komponenten erfordert eine Fertigungstechnik, die eine kostengünstige Massenproduktion erlaubt. Dies schließt auch eine Gehäusetechnik mit innovativer Aufbau- und Verbindungsstechnik mit ein. Diese Forderungen können durch die Mikrosystemtechnik und u.a. auch durch die in PMT verfügbaren Technologien (LIGA, Abformtechnik, keramische Abformung, Handhabungstechnik) erfüllt werden.

## 2. Konzept der Mikrooptik am IMT

In der Vergangenheit wurde durch die Arbeiten des IMT im Rahmen des strategischen Anwendungsfeldes Mikrooptik mit der Realisierung unterschiedlicher Demonstratoren der mögliche Bei-

trag der in PMT verfügbaren Technologien in diesem stark wachsenden Markt aufgezeigt.

Dabei wurden unter Ausnutzung der spezifischen Eigenschaften des LIGA-Verfahrens

- Positionsgenauigkeit von Mikrostrukturen mit Toleranzen < 1  $\mu\text{m}$
- Hohes Aspektverhältnis > 50 bei Strukturhöhen bis in den Millimeterbereich
- Vertikalität der Seitenwände < 0,5 mrad
- Rauhigkeit der Seitenwände < 30 nm

zwei strategische Richtungen verfolgt.

**Aufbau von mikrooptischen Bänken mit bei Bedarf integrierten Mikroaktoren mit Halte- und Fügestrukturen zur hybriden Integration von optischen Elementen wie z.B. Kugellinsen, Glasfasern, Strahlteilerplättchen.**

Auf der Basis dieser mikrooptischen Bänke werden komplexe optische Systeme realisiert. Dabei können die optischen Bänke auch gestuft sein, um die unterschiedliche Höhe der optischen Elemente (z.B. Durchmesser Faser und Kugellinse) auszugleichen [1]

Demonstratoren für dieses strategische Entwicklungsziel aus der Vergangenheit und Gegenwart sind:

**Bidirektionales Sende- und Empfangsmodul [2]**

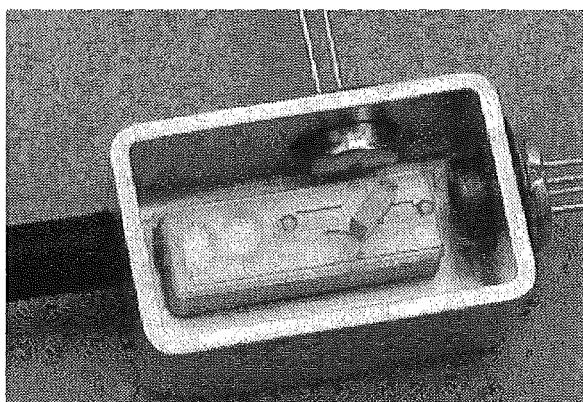


Abb. 1: Bidirektionales Sende- und Empfangsmodul mit abbildender mikrooptischer Bank und am Gehäuse angeschweißter Laser- und Photodiode

Abb. 1 zeigt ein nach obigem Konzept aufgebautes Bidirektionales Sende- und Empfangsmodul. Bei diesem Element dient die optische Bank dazu, Kugellinse und Strahlteilerplättchen positionsgenau gegenüber der Stirnfläche einer Faser zu positionieren, um eine Abbildung des Strahles des in der Abbildung 1 rechts sitzenden Sendelasers auf die Faser und eine Abbildung der Faser auf die oben sitzende Detektionsdiode zu realisieren.

**Bändchenstecker für Multimode-Fasern [3]**

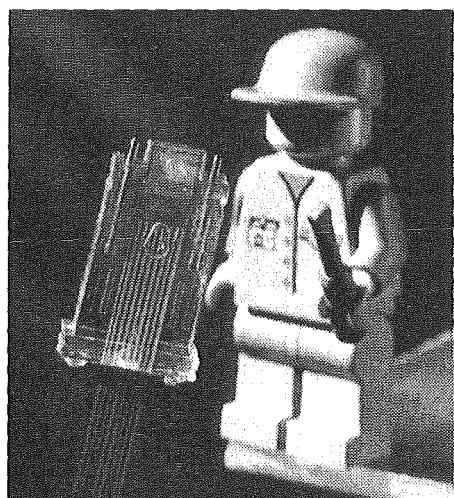


Abb. 2: Bändchenstecker für 16 Multimodefasern bestehend aus 2 abgeformten Steckerkomponenten, die mit einem gestuften Abformwerkzeug hergestellt wurden und bei denen über Führungsstrukturen die Position der Fasern exakt vorgegeben werden.

Wie bei dem Bidirektionalen Sende- und Empfangsmodul ist es auch bei dem Bändchenstecker (Abb. 2) notwendig in der mikrooptischen Bank unterschiedliche Niveaus zu strukturieren, um die Mitte der 700  $\mu\text{m}$  dicken Führungsstrukturen des Steckers auf die Mitte der 125  $\mu\text{m}$  dicken Glasfasern zu positionieren. Dies erfolgt durch Einsatz eines gestuften Formeinsatzes, wobei das Plateau im Formeinsatz durch mechanische Bearbeitung realisiert wird und die Fügestrukturen durch den LIGA-Prozess hergestellt werden. Durch die Trennung der Strukturierung in vertikaler und horizontaler Richtung (im Gegensatz zum Siliziumätzprozess) sind Genauigkeiten im Bereich von 1  $\mu\text{m}$  problemlos erzielbar.

**Laser/Faser – Koppelement**

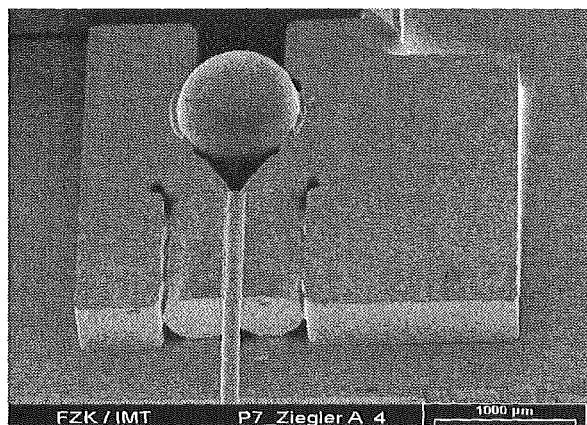


Abb. 3 Teil eines Laser/Faser-Koppelementes mit Kugellinse und Faser auf einem LIGA-Fasermount

Im Gegensatz zu den beiden gerade erläuterten Elementen wird beim Aufbau eines Laser/Faser-Koppelementes die Faser Mitte durch einen sogenannten Fasermount auf die Höhe des Laserspots gebracht. Dabei sitzt die Laserdiode zur besseren Wärmeableitung ebenfalls auf einem durch Galvanik hergestellten Metalmount. Durch die Herstellung der Mounts nach dem LIGA-Verfahren haben diese die für die Laser/Faserkopplung notwendige Präzision. Das Konzept bietet den Vorteil, dass die Faserhöhe durch Austausch des Fasermounts einfach auf unterschiedliche Mount- und Laserhöhen angepasst werden kann.

#### **Heterodyn-Empfänger [4]**

Das Mountkonzept wurde auch bei der Realisierung eines Heterodyn-Empfängers verfolgt, um die Eingangfasern (Netzwerk, lokaler Oszillator) auf die Höhe der photoempfindlichen Fläche der in die optische Bank integrierten Photodiode zu bringen.

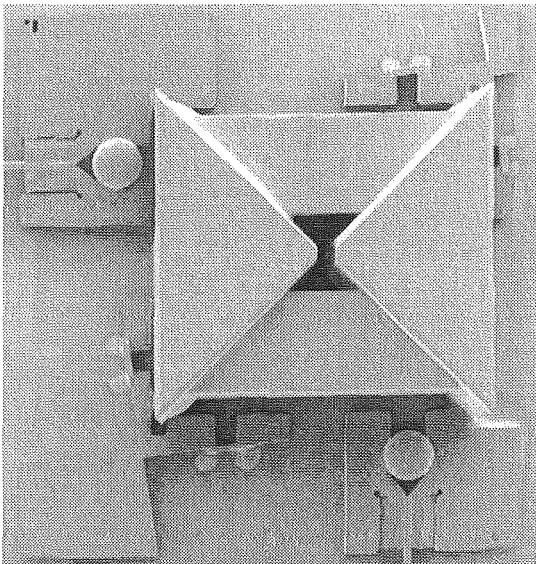


Abb. 4: mikrooptische Bank des Heterodyn-Empfängers mit Fasern, Kugellinsen, Photodioden und Strahlteilerplättchen

Abb. 4 zeigt die hybrid montierte optische Bank des Heterodyn-Empfängers. Licht aus dem Netzwerk und Licht der lokalen Laserdiode, das über Fasern in die optische Bank eingekoppelt wird, wird über die Kugellinsen kollimiert und durch die über Fügestrukturen exakt positionierten Prismen auf die jeweils 2 Photodioden an der oberen und unteren Ecke der Prismen umgelenkt. Dabei sind die Prismen zum Teil als Strahlteiler bzw. als Polarisationssteiler beschichtet so dass in einer II-Anordnung die beiden Polarisationsrichtungen unabhängig detektiert werden können. Die Untersuchungen ergaben, dass die beiden Signale auf der Photodiode jeweils besser als 95% überlagert sind. Daraus kann rückwärts der Schluss gezogen

werden, dass die Genauigkeit der Positionierung der optischen Elemente über die Halte- und Fügestrukturen besser als 1  $\mu\text{m}$  sein muss, was die Einsatzmöglichkeit des LIGA-Verfahrens zur Herstellung solcher optischer Bänke untermauert.

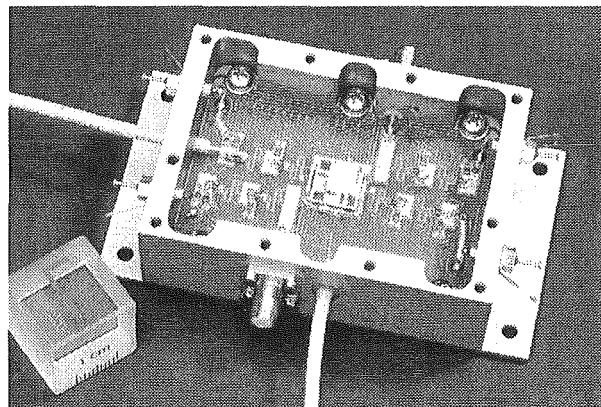


Abb. 5: Elektro-optische Platine mit optischer Bank des Heterodyn-Empfängers sowie Faseranschlüssen und elektrischen Kontakten

Wie Abb. 5 zeigt, stellt der Heterodyn-Empfänger das erste Element dar, das den Aufbau elektro-optischer Platinen demonstriert. Die mikrooptische Bank ist Bestandteil der elektrischen Platine und in diese in der Art eines SMD-Bauteils eingefügt. Schnittstellen zur Platine sind die elektrischen Kontakte der Photodiode, Schnittstelle nach außen sind die Fasern.

#### **Mikrooptischer Schalter [5]**

In dem in Abb. 6 dargestellten mikrooptischen Bypass-Schalter (oder 2x2-Schalter) handelt es sich um eine mikrooptische Bank mit integrierter Aktor, der zur wahlweisen Änderung der Richtung eines Lichtstrahles eingesetzt wird. Die Seitenwand der LIGA-Struktur fungiert als Spiegel.

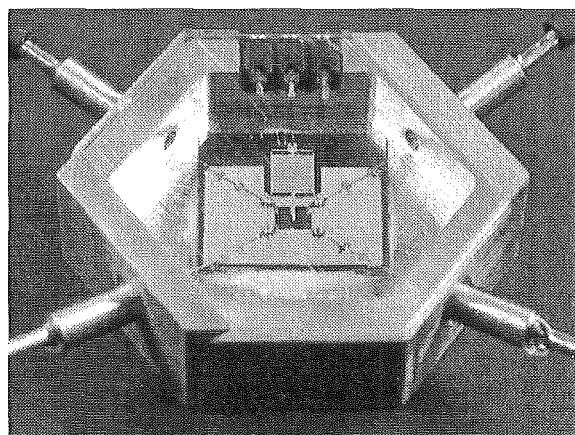


Abb. 6: Opto.-mechanischer Bypass-Schalter aufgebaut auf einer mikrooptischen Bank mit integriertem Linearaktor

Im Falle des dargestellten Bypass-Schalters sind 4 Fasern in Form eines Andreaskreuzes angeord-

net. Die jeweiligen Stirnflächen zweier gegenüberliegenden Fasern werden aufeinander abgebildet. In den Kreuzungspunkt der Lichtstrahlen zwischen den Kugellinsen taucht eine Balkenstruktur ein, deren Seitenfläche als Spiegel wirkt. Dabei wird das Licht von der linken unteren Faser direkt in die rechte untere Faser eingekoppelt. Befindet sich die Balkenstruktur ausserhalb, so kann das Licht ungestört in die gegenüberliegende Faser propagieren.

### Schaltmatrix [6]

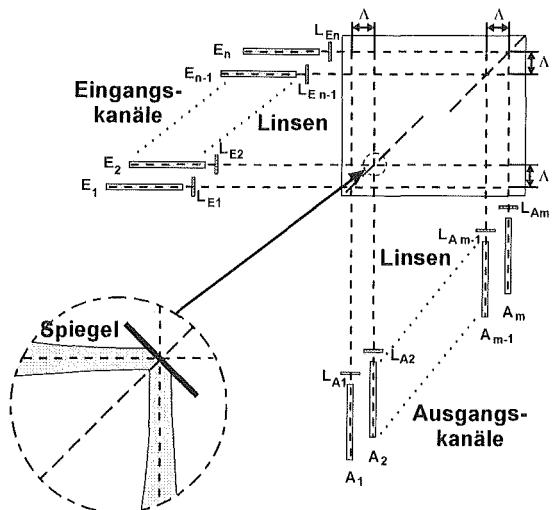


Abb. 7: Prinzip der opto-mechanischen Schaltmatrix aufgebaut auf einer mikrooptischen Bank.

Durch die integrierte Herstellung von elektrostatischen Rotationsmotoren wird derzeit im IMT eine Schaltmatrix realisiert. Der Aufbau ist vergleichbar zum Bypass-Schalter, d.h. in den Kreuzungspunkten der optischen Wege von Einkoppel und Auskoppelfaser wird ein LIGA-Spiegelelement wahlweise eingefahren, mit dem die Strahlrichtung geändert wird (Abb. 7) Abb. 8 zeigt die optische Bank mit den Motorenstrukturen.

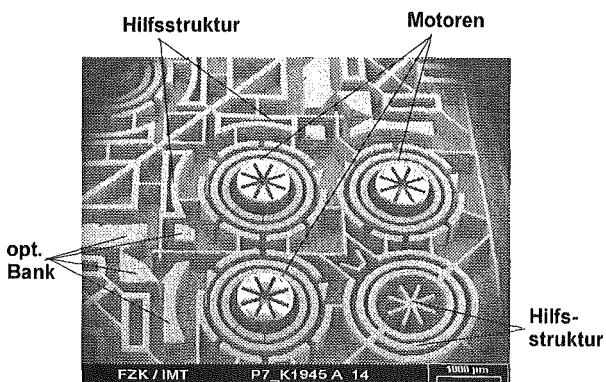


Abb. 8: mikrooptische Bank der opto-mechanischen Schaltmatrix mit Rotorstrukturen und Galvanik.-Hilfsstrukturen.

### Elektromagnetischer Chopper [7]

Durch den Aufbau von mikromechanischen Strukturen aus Permalloy lassen sich elektromagnetische Aktoren realisieren. Auch diese können Bestandteil einer mikrooptischen Bank sein. Abb. 9 zeigt ein einfaches Beispiel einer solchen Bank. Optische Elemente sind dabei Fasern, die in die Gräben zwischen die Klötzenstrukturen eingelegt und dadurch exakt zueinander gefügt werden. In den Freiraum zwischen den Fasern dringt ein Shutter-Element ein, das schwingend aufgehängt ist und durch den magnetischen Kreis in Bewegung versetzt wird. Durch eine oszillierende Bewegung kann das zwischen den beiden Fasern propagierende Licht gehoppt werden.

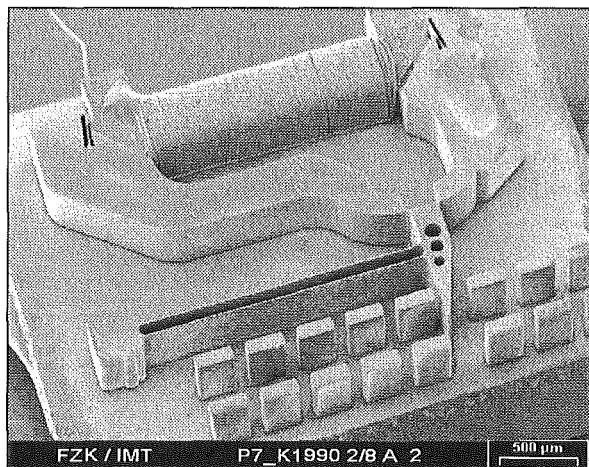


Abb. 9: elektromagnetischer Chopper zum Einsatz in Verbindung mit Lichtleitfasern

Das in Abb. 9 dargestellte Element arbeitet in Resonanz bei ca. 1 kHz bei einer Leistungsaufnahme von 14 mWatt

### Piezoelektrischer Chopper [8]

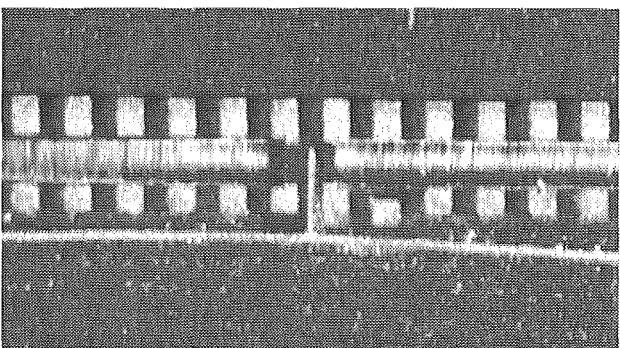


Abb. 10: Chopper für den Einsatz in Verbindung mit Lichtleitfasern aufgebaut auf einem Piezosubstrat.

Eine andere Möglichkeit opto-mechanische Komponenten zu realisieren besteht darin, die mikrooptische Bank auf einem gestaltsändernden Substrat z.B. einem piezo-elektrischen Substrat aufzubauen. Im Beispiel des in Abb 10 dargestell-

ten Choppers oder Abschwächers ändert der Biegebalken, der an zwei möglichst weit voneinander entfernten Stellen über Halteblöcke mit dem Substrat verankert ist, sich ansonsten aber frei über dem Substrat bewegen kann, seine Biegung. Dadurch dringt die Zunge in den Freiraum zwischen zwei Faserenden ein und blockiert somit den Lichtübertritt von einer auf die andere Faser, die in den Faserführungsstrukturen fixiert werden.

### **Fabry-Perot Resonator [9]**

Aufbauend auf dem gerade beschriebenen Prinzip wird derzeit am IMT ein Fabry-Perot Resonator realisiert. Dabei werden zwei entsprechend beschichtete Glasplättchen von frei beweglichen Fingerstrukturen positioniert und bilden so die Resonator-Kavität (Abb. 11)

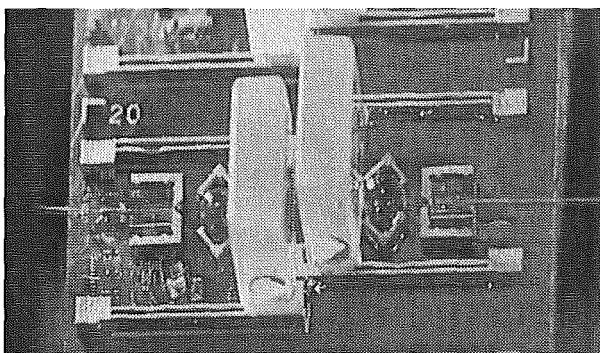


Abb. 11: Mikrooptische Bank eines Fabry-Perot Resonators. Die Haltestrukturen für die die Kavität bildenden Glasplättchen sind auf einem Piezosubstrat aufgebaut, so dass sich durch Längenänderung desselben die Kavität ändert.

In diesem Fall wird der Abstand der beiden Glasplättchen durch die Längenänderung des Piezostabes realisiert. Das Licht wird über Fasern in den Aufbau ein- und ausgekoppelt und über Kugellinsen zwischen den Fasern kollimiert.

Die zweite strategische Richtung verfolgt den

### **Aufbau von multimodigen planaren Wellenleitern mit optisch funktionalen Seitenwänden.**

Der bekannteste Demonstrator dieses Konzepts ist das

### **LIGA-Mikrospektrometer [10]**

Bei diesem Element wird mit Hilfe des LIGA-Verfahrens neben Faserführungsgrube und Auskoppelkante auf dem Substrat ein Reflexionsgitter strukturiert, wobei die Gitterkonstante im Bereich von Mikrometern liegt und die Stufenhöhe wenige 100 nm betragen kann. Zwischen Gitter und Einkoppelfaser bzw. Auskoppelkante wird das Licht im Falle eines Folienwellenleiters durch Totalreflexion oder im Falle eines „Hohlwellenleiter“ durch Fresnel-Reflexion geführt. In den vergangenen Jahren hat das IMT eine ganze Familie von

Spektrometern für verschiedene Wellenlängenbereiche vom Sichtbaren bis zum Infraroten entwickelt. Neuestes Mitglied dieser Familie ist das in Abb. 12 dargestellte NIR-Spektrometer, das mit einer InGaAs-Zeile arbeitet und mit seiner Größe einer Streichholzschachtel das Potential hat in transportablen Geräten eingesetzt zu werden.

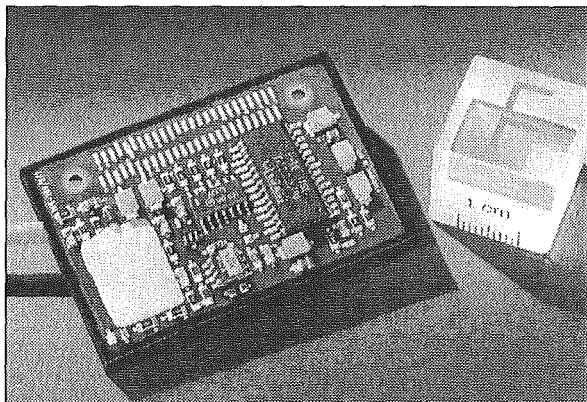


Abb. 12: NIR-Spektrometersystem für den Einsatz in Handgeräten

### **Abstandssensor [11]**

Das Konzept des multimodigen Wellenleiters wird ebenfalls zur Realisierung eines Abstandssensors, der nach dem Triangulationsprinzip arbeitet, eingesetzt (Abb. 13)

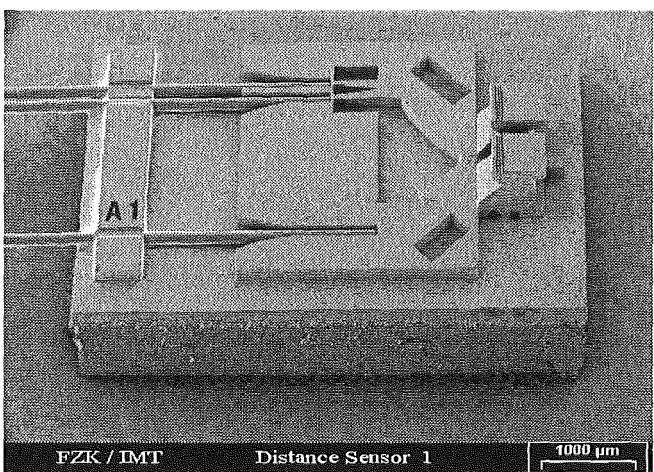


Abb. 13: Wellenleiterstruktur des Abstandssensor mit umlenkenden Elementen, Einkoppel- und Detektionsfasern sowie hybrid eingefügten Linsen zum Versatz der Strahlebene

Der Sensor arbeitet nach dem Triangulationsprinzip. Das durch die Einkoppelfaser in den Wellenleiter eingekoppelte Licht wird durch die Parabolspiegelstruktur in der Horizontalen auf das Objekt fokussiert. Die Fokusierung in der Vertikalen erfolgt über die gestuften Linsen vor dem Wellenleiter. Diffus am Objekt gestreutes Licht wird über den oberen Lichtweg den beiden Auskoppelfasern zugeführt. Je nach Position des Objektes ist das

Intensitätsverhältnis in den beiden Fasern unterschiedlich und stellt somit ein Mass für den Abstand des Objektes zum Sensor dar.

### 3. Weitere Planungen

Mit den oben beschriebenen Demonstratoren hat das FZK bewiesen, dass mit den in PMT verfügbaren Technologien und den darauf aufbauenden Konzepten ein Beitrag zu dem grossen boomenden Themengebiet der „Tele- und Datenkommunikation“ geleistet werden kann. Dabei hat es sich als spezifischer Vorteil erwiesen, wenn das in verschiedenen Gebieten in den Instituten vorhandene Know-how in die Entwicklungen einbezogen werden kann. Dies sind Aktivitäten im Bereich der Simulation (IAI, IMT), im Bereich der Konzepterarbeitung (IMT, HPE, IMF), im Bereich der mikrotechnischen Fertigung (IMT, HVT, IMF), im Bereich der Materialforschung (IMF), im Bereich der Elektronikentwicklung (HPE) und im Bereich der Handhabung und Montagetechnik (IAI, IMT). Durch die Orientierung des IMT in Richtung Systementwicklung und –aufbau sowie Fertigung [12] schliessen die Entwicklungen nicht mit der Prototyprealisierung ab, sondern es wird der Nachweis der Fertigbarkeit geführt und zu deren Demonstration auch Vorserien gefertigt.

Trotzdem ist zu beachten, dass derzeit die Stärke des Forschungszentrums in diesem Themengebiet überwiegend im Bereich der Technologie liegt. Die notwendige Kompetenz in Bezug auf Anwendungen ist nicht ausreichend vorhanden. Dies ist um so kritischer als Firmen überwiegend an einem Erzeugnis interessiert sind und die Technologie für die Herstellung desselben eine untergeordnete Rolle spielt. Sicher muss um zukünftig effiziente Beiträge leisten zu können, das Forschungszentrum seine Kompetenz in Richtung Anwendungen verstärken. Da das Themengebiet

allerdings sehr breit ist, ist es darüberhinaus anzustreben, ein Netzwerk von Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen zu bilden, die mit ihrer spezifischen Kompetenz gemeinsam an der Erreichung der zu definierenden Meilensteine arbeiten.

Aufgrund der großen volkswirtschaftlichen Bedeutung und der Notwendigkeit einer relativ schnellen Umsetzung darf die Definition der Zielrichtung und Meilensteine nicht allein von diesem Konsortium erfolgen. Dazu ist die Industrie unbedingt einzubeziehen. Am Besten erscheint dies realisierbar durch die Bildung eines industriellen Beraterkreises. Dabei hat dieser Beraterkreis die Chance die vorwettbewerblichen Entwicklungen mit einer Zeitperspektive von 3 bis 5 Jahre zu definieren. Er hat aber gleichzeitig auch die Verpflichtung diese Entwicklungen von der Anwendungsseite her zu begleiten sowie die strategische Ausrichtung an den Erfordernissen zu spiegeln und nach Aussen zu verteidigen.

Von der Gruppe Mikrooptik des Projektes Mikrosystemtechnik wird versucht, diese Planungen in den nächsten Monaten umzusetzen, um die Arbeiten auf ein festeres Fundament zu stellen.

### Danksagung

Die hier beschriebenen Arbeiten sind durch die Mithilfe vieler Personen entstanden. Besonders bedanken möchten sich die Autoren bei den derzeitigen Mitgliedern der Gruppe Mikrooptik des IMT Herrn Last, Herrn Oppermann, Herrn Kaboth, Herrn Stierl und Herrn Ruzzu sowie bei den inzwischen ausgeschiedenen Kollegen Herrn Wengenlink und Herrn Ziegler. Unser Dank gilt ebenfalls den Kollegen in den anderen Instituten (HPE, IAI, IMF, HVT), die zu dem Erfolg der Entwicklungen beigetragen haben: Herr Kühner, Herr Guth, Herr Sieber, Herr Schaller, Herr Müller, Herr Piötter und Herr Ruprecht.

## Literatur

- [1] A. Müller, J. Göttert, J. Mohr: „Aufbau hybrider mikrooptischer Funktionsmodule für die optische Nachrichtentechnik mit dem LIGA-Verfahren“, FZKA Bericht 5786, 1996
- [2] A. Müller, J. Hehmann, A. Rogner, J. Göttert, J. Mohr: „Bidirektionales Sende-/Empfangsmodul für die optische Datenübertragung“, FZKA Bericht 5670 (1995) S. 190
- [3] H. Dittrich et al.: „RibCon – Steckverbinder für 16 Multimode-Fasern“, dieser Band
- [4] S. Albatal et. al.: „Aufbau und Montage von mikrooptischen Bänken am Beispiel eines Heterodynempfängers“, dieser Band
- [5] A. Müllet et al.: Optomechanische Bypass-Schaltung für die optische Informationstechnik“, FZKA-Bericht 5670 (1995) S. 81
- [6] A. Ruzzu, J. Mohr, U. Wallrabe: „Optische 2x2 – Schaltmatrix mit elektromechanischen Stellelementen“, dieser Band
- [7] P. Krippner, J. Mohr: „Elektromagnetisch angetriebener Mikrochopper“, dieser Band
- [8] T. v. Freyhold, H. Debeda, P. Krippner, J. Mohr, J. Wengelink: „Miniaturized Piezo Electric Chopper for Fiber Optical Multimode Applications Realized Using LIGA-Technology“, Proc. Optical MEMS (1998) S. 75
- [9] J. Wengelink, J. Mohr: „Micro Optical Wavelength Filter Realized Using LIGA Technology“, Proc. MOEMS '99 (1999) S. 136
- [10] R. Wechsung, J. Mohr: „Wachstumsmarkt Mikrosystemtechnik am Beispiel des LIGA-Mikrospektrometers“, dieser Band
- [11] P. Ruther, H. Nakajima, J. Mohr, S. Saenger: „Miniaturisierter Abstandssensor hergestellt nach dem LIGA-Verfahren“ tm-Technisches Messen 66 (1999) S. 176
- [12] D. Maas et al.: „Fertigung von Mikrokomponenten nach DIN EN ISO 9001 an einem Forschungsinstitut“, dieser Band



## RibCon – Steckverbinder für 16 Multimode-Fasern

H. Dittrich <sup>1)</sup>, U. Wallrabe <sup>1)</sup>, J. Mohr <sup>1)</sup>, P. Ruther <sup>1)</sup>, Th. Hanemann <sup>2)</sup>, O. Jacobi <sup>2)</sup>,  
K. Müller <sup>2)</sup>, V. Piotter <sup>2)</sup>, R. Ruprecht <sup>2)</sup>, Th. Schaller <sup>3)</sup>, W. Zißler <sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik

<sup>2)</sup> Institut für Materialforschung III

<sup>3)</sup> Hauptabteilung Versuchstechnik

<sup>4)</sup> Spinner GmbH, München

### Zusammenfassung

Am Forschungszentrum Karlsruhe wird in Zusammenarbeit mit der Firma Spinner ein Steckverbinder für 16 Multimodefasern entwickelt, dessen Steckereinsatz als Präzisions- element aus Kunststoff im Mikrospritzgießverfahren hergestellt wird. Das hierzu eingesetzte Spritzgießwerkzeug enthält mikrostrukturierte Formeinsätze, die in einer Verfahrenskombination aus Mikrozerspanung durch Fingerfräser, Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung und Erodierbearbeitung gefertigt wurden. Der Beitrag schildert die wesentlichen Merkmale des Steckereinsatzes aus fertigungstechnischer Sicht und beschreibt das Fertigungsverfahren von der Werkzeugherstellung über die Abformung bis hin zur Qualitätskontrolle an den abgeformten und konfektionierten Steckern.

### 1. Einleitung

Die optische Datenübertragung via Glasfaser dringt zunehmend aus der weiträumigen Verkabelung in die Bereiche lokaler Netzwerke vor, die heute noch überwiegend dem Kupferkabel vorbehalten sind. Hiermit verbunden ist die Entwicklung einer optischen Verbindungstechnik, die den Forderungen nach einer leicht lösbarer und zugleich robusten Verbindung, hoher Anschlussdichte und geringen Kosten gerecht wird. Unterschiedliche Verkabelungskonzepte führen dabei zu einer ähnlichen Produktdifferenzierung wie in der Verbindungstechnik für Kupferkabel-basierte Systeme.

In Zusammenarbeit mit der Firma Spinner, München, wird derzeit ein Steckverbinder speziell für Bändchenkabel entwickelt, die aus maximal 16 Multimodefasern bestehen. Mit diesen Steckern können die Kabel bereits im Werk vor- konfektioniert werden, so dass die Montage vor Ort mit Steckverbindern denkbar einfach, schnell und kostengünstig ist.

Eine grundsätzliche Forderung bei der Entwicklung ist die Minimierung der in der Steckverbindung auftretenden Koppelverluste, da sie maßgeblich die Leistungsfähigkeit der Übertragungs- strecke beeinflussen. Für den Mehrfach- Steckverbinder bedeutet dies, dass jede der 16 Fasern eines Steckers mit einer Genauigkeit von wenigen Mikrometern zur jeweils gegen- überliegenden ausgerichtet sein muss. Entsprechend anspruchsvoll ist die Realisierung der hierzu erforderlichen Führungsstrukturen in einem notwendigerweise preiswerten Massenprodukt.

Diese Ansprüche erfüllt der in Abb. 1 gezeigte Steckereinsatz des RibCon-Steckverbinder, der die Glasfasern und Führungsstifte zueinander fixiert. Dieser Steckereinsatz und sein Herstellungsverfahren werden im folgenden vorgestellt.

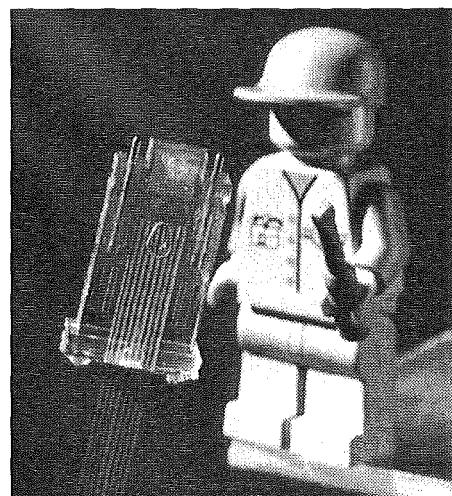


Abb. 1: Der Steckereinsatz ist das Präzisions- element des RibCon-Steckverbinder. Seine Außenmaße betragen ca.  $20 \times 12 \times 4 \text{ mm}^3$ .

### 2. Aufbau des Steckereinsatzes

Der Steckereinsatz besteht aus zwei Spritzguss- komponenten, die in Abb. 2 schematisch dargestellt sind. Bei der Konfektionierung werden zunächst das Faserbändchen und zwei Führungs- stifte in das Unterteil eingelegt und dabei in Führungsgräben lateral ausgerichtet; Durchmes- sertoleranzen werden durch die Nachgiebigkeit wellenförmiger Führungsstrukturen ausgeglichen.

Die vertikale Ausrichtung erfolgt beim Aufsetzen des Oberteils durch einen Passsitz. Über eine Öffnung werden die zwei Steckerhälften anschließend mit Klebstoff fixiert. Im montierten Zustand werden die Fasern an der Stirnfläche des Steckers schräggeschliffen und poliert.

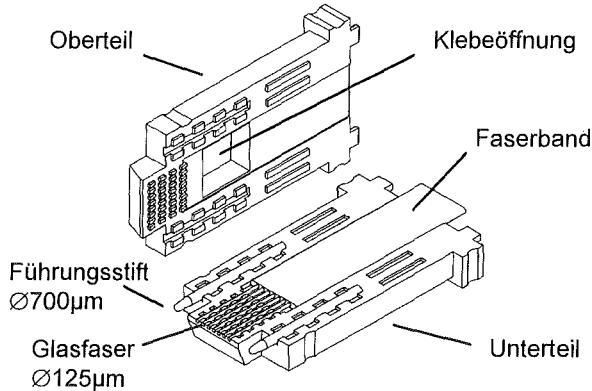


Abb. 2: Schema des Steckereinsatzes; vereinfachend sind hier nur 7 der insgesamt 16 Faserführungsgräben dargestellt.

Konzeptionell – und in Anlehnung an bestehende Normen [1,2] – liegen die Zentren der Stifte und Fasern in Höhe der Steckerstirnfläche auf einer Geraden. Das Rastermaß zwischen den Fasern beträgt 250 µm. Die angestrebte Lagegenauigkeit liegt hier bei  $\pm 1,5 \mu\text{m}$ .

Aufgrund der unterschiedlichen Stift- und Faserdurchmesser ergibt sich ein Aufbaukonzept mit zwei Strukturebenen (siehe Abb. 3): Auf einem Grundkörper befindet sich eine erste Strukturebene, die die Durchmesserdifferenz zwischen Fasern und Stiften ausgleicht. Eine darüber liegende zweite Strukturebene bildet im Unterteil die lateralen Führungsstrukturen für Fasern und Stifte. Im Oberteil bildet sie Haltestrukturen, durch die die beiden Steckerhälften bei der Montage zueinander ausgerichtet werden.

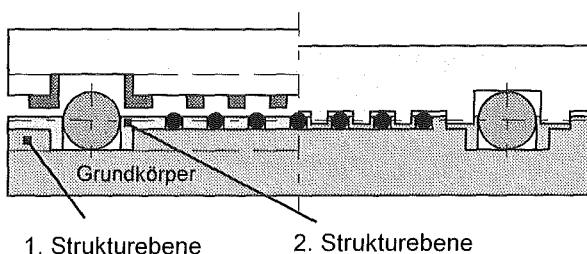


Abb. 3: Querschnitt des Fasersteckers

### 3. Herstellung der Formeinsätze

Das Spritzgießwerkzeug besteht aus zwei Werkzeughälften und besitzt insgesamt vier Formnester, so dass in einem Zyklus jeweils zwei Steckeroberteile und -unterteile abgeformt werden können.

Jedes Formnest wird durch einen mikrostrukturierten Formeinsatz und eine feinwerktechnisch mittels Senkerodieren bearbeitete Gegenhälfte gebildet. Ersterer enthält die filigranen Führungsstrukturen (in Abb. 3 die 1. und 2. Strukturebene). Letztere bildet die makroskopische Außenkontur des Steckereinsatzes (in Abb. 3 der Grundkörper). Die Werkzeugtrennebene liegt somit zwischen dem Grundkörper und der 1. Strukturebene.

Die Verfahrenskombination zur Herstellung der insgesamt vier mikrostrukturierten Formeinsätze ist in Abb. 4 dargestellt: Durch Mikrofräsen wird die erste Strukturebene in ein Cu-Substrat eingebracht. Hierauf wird die zweite Strukturebene in einem LIGA-Prozess erzeugt. Abschließend werden die Formeinsätze durch Erodieren vereinzelt. Die jeweiligen Fertigungsschritte werden im folgenden beschrieben.

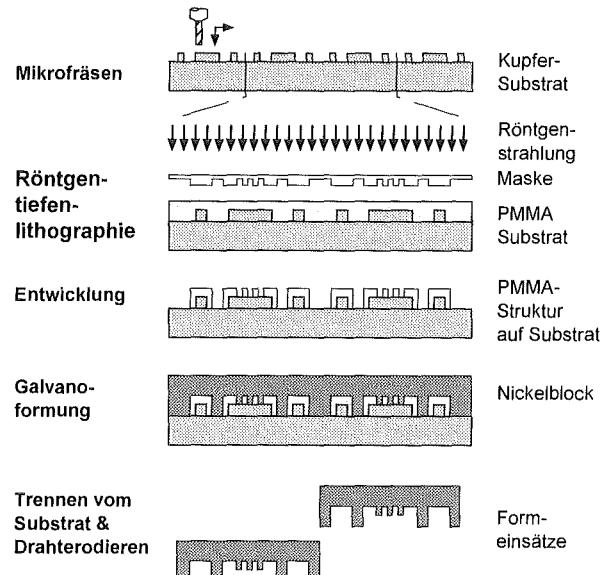


Abb. 4: Verfahrenskombination zur Herstellung der Formeinsätze

### 3.1 Mechanische Mikrostrukturierung der Substratplatte

Der Werkstoff Kupfer der Substratplatte (Abb. 5) eignet sich vorzüglich für die Bearbeitung mit Diamantwerkzeugen. Solche Werkzeuge mit Durchmessern bis minimal 200 µm sind als Einschneiden-Fräser – auf Wunsch mit schräger Schneide zur Erzielung geneigter Strukturwände – im Forschungszentrum verfügbar. Der Einsatz von Hochpräzisions-CNC-Bearbeitungsmaschinen (hier: Fräszentrum KERN 22/16) erlaubt bei geeigneten Randbedingungen die Strukturierung mit etwa 2 Mikrometern Genauigkeit.

Die mechanische Bearbeitungsaufgabe umfasst die Erzeugung der ersten Strukturebene, respektive der Auflageflächen für Stifte und Glasfasern,

eine Absenkung für das dickere Faserband sowie die Strukturierung von Justierkreuzen und Messkanten. Während die lateralen Abmessungen der Strukturebene nicht enger als  $\pm 5 \mu\text{m}$  toleriert sind, ist ihre Höhe mit  $\pm 1,5 \mu\text{m}$  Toleranz funktionsbedingt sehr eng festgelegt. Die geforderten Innenradien und Wandneigungen verlangen die Verwendung eines Diamantfräzers mit 200  $\mu\text{m}$  Durchmesser und 1,5° angeschrägter Schneide bei einer maximalen Bearbeitungstiefe von knapp 300  $\mu\text{m}$ . Die Geometrie der für den nachfolgenden Röntgentiefenlithographieprozess erforderlichen Justierkreuzstrukturen entspricht denen, wie sie standardmäßig zur Maskenjustierung verwendet werden: Kleinste Stegbreiten von 40  $\mu\text{m}$  und Nutbreiten von 60  $\mu\text{m}$  werden unter Verwendung von Mikrofräsern aus Hartmetall realisiert [3].

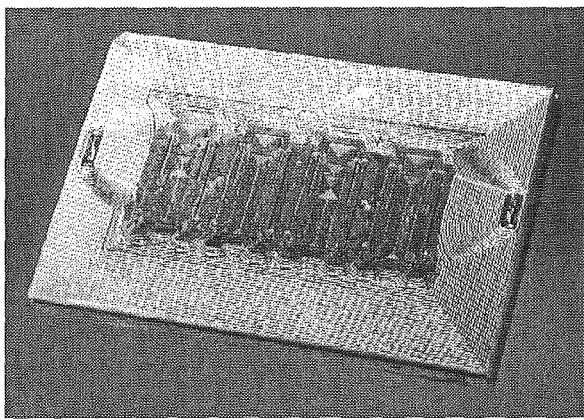


Abb. 5: Mechanisch mikrostrukturierte Substratplatte aus Kupfer.

Die unkritischen Strukturierungstoleranzen der lateralen Abmessungen sind mit der hohen Arbeitsgenauigkeit der CNC-Maschine leicht einzuhalten; die absoluten Abmessungen sind gesichert durch die automatische Übernahme der geprüften CAD-Zeichnungsdaten in NC-Maschinendaten und die Durchführung einer Werkzeugkorrektur. Eine Werkzeugkorrektur ist notwendig, da von Werkzeug zu Werkzeug fertigungstechnisch bedingte Durchmesserschwankungen auftreten; zusätzlich tritt mit dem Einbau in die Spindel ein Rundlaufehler auf. Zur Korrektur dieser Fehler wird für jedes eingesetzte Werkzeug sein aktueller Durchmesser durch die optische Vermessung eines Testschnittes mikrometertgenau bestimmt und im Maschinenprogramm korrigiert.

Zur Sicherstellung der engen Höhentoleranzen ist einerseits eine sorgfältige mechanische Vorbehandlung der Kupfer-Substratplatte notwendig; sie weist nach der Bearbeitung durch ultrapräzises Stirnplanfräsen über die gesamte Fläche von 84 mm  $\times$  54 mm eine Ebenheit  $< 5 \mu\text{m}$  auf. Andererseits muss eine hohe thermische Stabilität der CNC-Maschine gewährleistet sein, was durch Klimatisierung der Laborräume und Warmlaufen

der Maschine erreicht wird. Außerdem wird die Zeit zur Bearbeitung der kritischen Flächen (insbesondere der Stift- und der Faserauflageflächen) durch eine günstige Frästrategie so weit wie möglich minimiert; die Verwendung einer Hochfrequenzspindel ermöglicht zusätzlich große Vorschübe und damit kurze Gesamtbearbeitungszeiten. Die komplette Bearbeitung einer Substratplatte mit vier Steckerstrukturen ist innerhalb von 4 bis 8 Stunden zu bewerkstelligen. Optische Messungen an den strukturierten Substratplatten bestätigten die Erfüllung sämtlicher Genauigkeitsanforderungen.

### 3.2 Röntgentiefenlithographie, Entwicklung, Galvanoformung und Erodierbearbeitung

Auf der vorstrukturierten Substratplatte wird die zweite Strukturebene in einem Röntgentiefenlithographieprozess erzeugt. Dazu wird auf die erste Strukturebene eine Resistsschicht aus PMMA aufgegossen, plangefräst und durch eine Maske zur zerspanend strukturierten Ebene justiert bestrahlt. Kritisch bei diesem Prozessschritt ist die Spannungsrissempfindlichkeit des Resists, da dieser beim Aushärten auf die Kupferstrukturen aufschrumpft. Die Höhe der Resistsschicht wird dadurch – trotz Temper-Behandlung – auf etwa 400  $\mu\text{m}$  begrenzt.

Nach der standardmäßig durchgeführten Entwicklung repräsentieren die erste und zweite Strukturebene zusammen die vollständige Geometrie der Steckerinnenflächen. Sie werden im nächsten Prozessschritt galvanisch in Nickel umkopiert. Der dabei entstehende Nickelblock besitzt Außenabmessungen von ca. 68  $\times$  32  $\times$  5 mm<sup>3</sup> (L  $\times$  B  $\times$  H) und wird in mehreren Schritten in vier Formeinsätze zerteilt. Abb. 6 zeigt einen der vereinzelten Formeinsätze für ein Steckeroberteil.

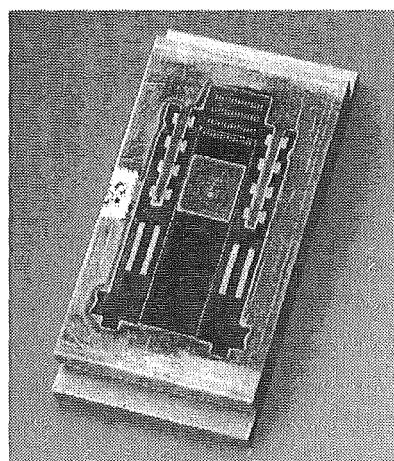


Abb. 6: Formeinsatz für ein Steckeroberteil. Links sind noch Teile der Justierkreuzstrukturen zu erkennen, die im Röntgentiefenlithographieprozess zum Ausrichten der Maske dienten.

Um die für das Spritzgießen erforderliche Dichtigkeit der Formnester zum restlichen Spritzgießwerkzeug zu erreichen, müssen die Außenabmessungen der Formeinsätze mit einer Genauigkeit von  $10 \mu\text{m}$  und die seitlichen Absätze, deren Höhe das Spaltmaß zwischen Formeinsatzstirnfläche und gegenüberliegender Werkzeughälfte bestimmt, auf  $5 \mu\text{m}$  genau bearbeitet werden. Unter Berücksichtigung dessen, dass hierbei mehrere Umspann- und Antastvorgänge unvermeidlich sind und dass galvanisch abgeschiedenes Nickel ein mit inneren Spannungen behaftetes Material ist, stellt diese Genauigkeit das derzeit maximal Erreichbare dar.

#### 4. Mikrospritzgießen der Steckereinsätze

Die beabsichtigte Vermarktung des Steckverbinder als Massenprodukt verlangt ein großserientaugliches Produktionsverfahren mit kurzen Zykluszeiten. Hier bietet sich das Mikrospritzgießen an, das seine Serientauglichkeit bereits bei der Herstellung verschiedenster mikrotechnischer Formteile gezeigt hat. Die wichtigsten Charakteristika des Mikrospritzgießens sind in [4] dargestellt.

Die werkzeugtechnische Herausforderung bei der Abformung von Steckereinsätzen besteht darin, dass die Komponenten nahezu nachbearbeitungsfrei, d.h. ohne sonst übliche Hilfsstrukturen, spritzgegossen werden sollen. Hierzu ist es notwendig, beide Werkzeughälften durch die Schließbewegung des Werkzeuges auf ihren Stirnflächen dicht schließend zu positionieren. Der laterale Versatz der Werkzeughälften darf maximal  $50 \mu\text{m}$  betragen. In Vorversuchen zeigte sich, dass mit Stammwerkzeugen, die zwar geringfügig modifiziert aber prinzipiell nicht für das Spritzgießen vereinzelter Formteile ausgelegt sind, keine ausreichende Prozessstabilität gewährleistet werden kann. Es wurde daher eine Neukonstruktion des Werkzeugs vorgenommen, die speziell auf diese Aufgabe hin optimiert werden konnte. Unterstützt wurde dies durch die Simulation der Formfüllung des Werkzeuges mit Hilfe des Software-Paketes MOLDFLOW. Durch Simulation verschiedener Anguss- und Verteilersysteme wurde beispielsweise eine fließtechnisch ausbalancierte Schmelzeführung sowie eine optimale Positionierung des Anschnittpunktes gefunden. In Abb. 7 ist der für eine Füllzeit von  $0,42 \text{ s}$  optimierte Fließfrontverlauf im Spritzgießteil dargestellt: Ausgehend vom Anspritzpunkt sind nach  $0,275 \text{ s}$  das Angussystem und nach weiteren  $0,145 \text{ s}$  die Formnester vollständig mit Kunststoff gefüllt.

Hilfsstrukturen, die für eine fehlerfreie Entformung erforderlich sind, wurden bei dem neuen Werkzeugdesign an funktional unkritischen Stellen in das Bauteil integriert. Das Werkzeug mit seinen insgesamt vier Formnestern zeigt Abb. 8. Dabei

sind in der rechten Hälfte die vier mikrostrukturierten Formeinsätze eingebaut (zwei durch Strichelung gekennzeichnet), während in der linken Hälfte die feinwerktechnisch strukturierten Kavitäten für die Steckergrundkörper und die Angrusskanäle in die Werkzeugplatte eingearbeitet sind.

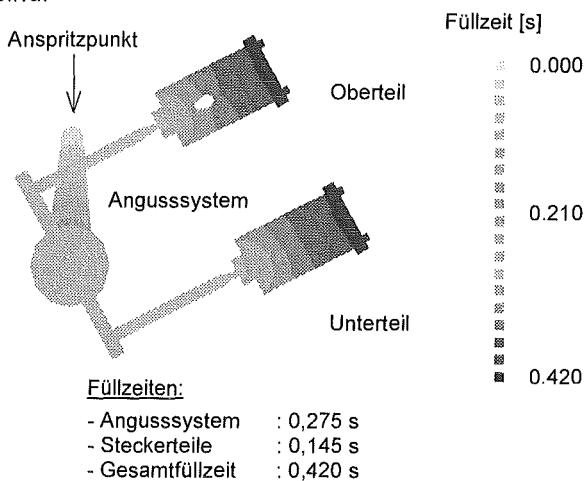


Abb. 7: Fließfrontverlauf im Spritzgießteil

Die Fertigung des Werkzeugs erfolgte bei Fa. Spinner, da diese über einen eigenen Werkzeugbau verfügt. Die Beteiligung des Forschungszentrums galt dabei der für die Mikroabformung spezifischen Zusatzausrüstung. Hierzu gehören insbesondere Detailkenntnisse zur Evakuierung der Formnester und der Realisierung des Variotherm-Prozesses. Gemeinsam wurde ein Konzept für eine Wasserkühlung zur Reduzierung der Zykluszeiten entwickelt.

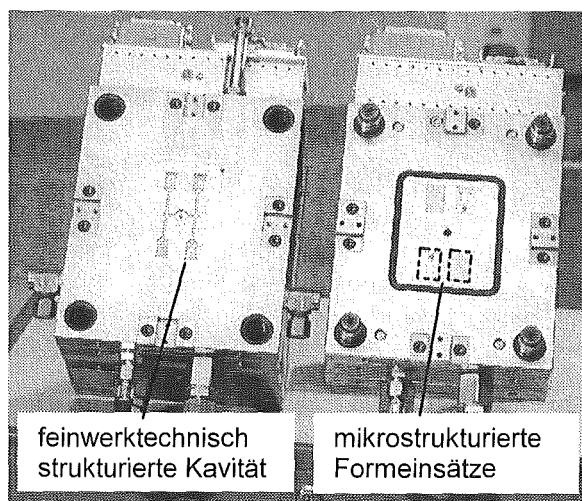


Abb. 8: Spritzgießwerkzeug

Die wesentlichen Auslegungsmerkmale des neuen Werkzeuges bestehen somit in der

- Realisierung von vier Formnestern in einem Werkzeug, mit dem Ziel, eine hohe Dichtheit der Formnester zu erreichen

- Verwendung von Punkt- statt Filmanschnitten für mikrostrukturierte Bauteile
- Integration von Hilfsstrukturen in das eigentliche Abformteil
- Einsatz einer zusätzlichen Wasserkühlung zur Reduzierung der Zykluszeit

In den bisher erfolgten Spritzgießreihen wurde ein vielfach bewährter PMMA-Typ, Lucryl G 77 der Fa. BASF AG, eingesetzt. Dabei zeigte sich, dass die konstruktiven Verbesserungen des Werkzeugs zu einer ca. 30 % geringeren Zykluszeit und einer deutlich höheren Prozessstabilität gegenüber dem modifizierten Stammwerkzeug beitragen. Die angestrebte vollautomatische Abformung erscheint damit realistisch. Abb. 9 zeigt die Faserführungsstrukturen eines Steckerunterteils.

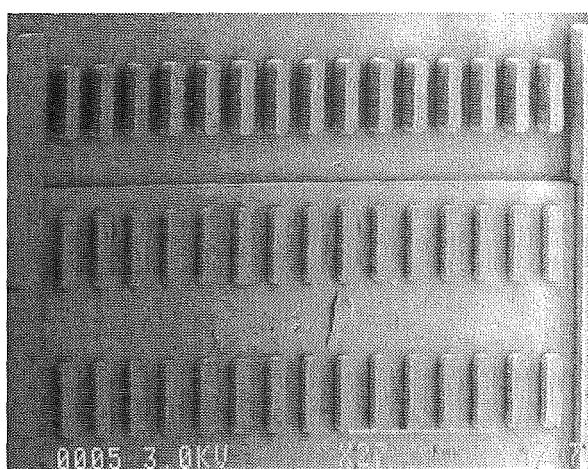


Abb. 9: Führungsstrukturen für Multimodefasern an einem spritzgegossenen Steckerunterteil

#### 4.1 Messtechnik zur Qualitätskontrolle an den spritzgegossenen Steckereinsätzen

Die Qualitätskontrolle an den abgeformten Steckereinsätzen umfasst einerseits die eher qualitativ zu beurteilende Formbefüllung der filigranen Führungsstrukturen und die Oberflächenqualität sowie andererseits die quantitativ nachzuweisende Maßhaltigkeit der Führungsstrukturen.

Insbesondere die Prüfung der Maßhaltigkeit der Faser- und Stiftführungsstrukturen stellt eine hohe Herausforderung für die heute verfügbare Messtechnik dar: Die Abmessungen erlauben nur eine optische Meßmethode, die aber gerade an optisch transparenten Kunststoffen mit hoher Oberflächenqualität an Grenzen stößt. Es sind dabei sowohl vertikal die Strukturhöhen und Durchbiegungen der Auflageflächen als auch lateral die Lage der Führungsstrukturen, wie z.B. das Rastermaß, zu bestimmen.

Um die Messaufgabe zu vereinfachen, werden an jedem Steckerteil zwei Prüfdurchläufe durchge-

führt: Im ersten Durchlauf wird mit Hilfe eines vollautomatischen Messmikroskops (Olympus AX70 Provis, Messtischauflösung in x- und y-Richtung  $\leq 1 \mu\text{m}$ , Auflösung in z-Richtung:  $0,1 \mu\text{m}$ ) neben der qualitativen Beurteilung der Formbefüllung im Bereich der Stift- und Fasergräben das Rastermaß der Faserführungsstrukturen gemessen. An nahezu allen der ca. 50 untersuchten Steckerunterteile wurde ein Rastermaß von  $249 - 250 \mu\text{m}$  gemessen, womit die gewünschte Spezifikation von  $250 \pm 1,5 \mu\text{m}$  bestätigt werden konnte.

Im zweiten Prüfdurchlauf werden die Oberflächen beider Steckerhälften mit Hilfe eines topographischen Messgerätes (FRT-Microglider mit optochromatischem Sensor zur Höhenbestimmung) berührungslos dreidimensional aufgenommen und ausgewertet. In Kombination mit einem Präzisions-x,y-Scantisch beträgt die Auflösung in x,y-Richtung  $< 1 \mu\text{m}$  und in z-Richtung  $< 5 \text{ nm}$ . Abb. 10 zeigt ein mit dem FRT aufgenommenes Höhenprofil, das quer zu den Faserführungen verläuft. Die Prüfergebnisse zeigen auch hier, dass die spezifizierten Sollwerte erreicht wurden (Tab. 1).

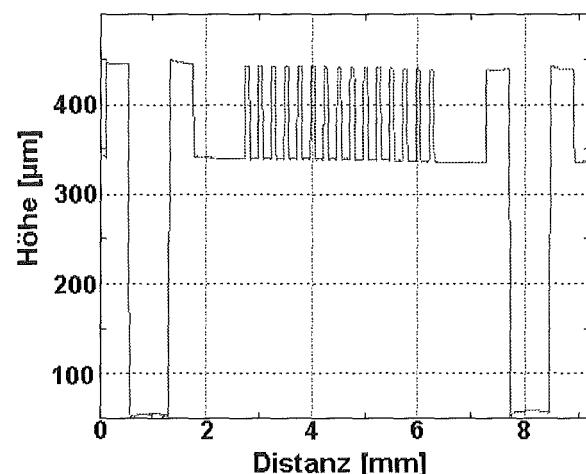


Abb. 10: Höhenprofil eines abgeformten Steckeroberteils quer zu Faser- und Stiftgräben.

	Soll [ $\mu\text{m}$ ]	Ist [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Höhe der 1. Strukturebene</b>	$287,5 \pm 1,5$	$287,3 \pm 1$
<b>Höhe der 2. Strukturebene</b>	$100 \pm 10$	$103 \pm 5$
<b>Durchbiegung in den Stiftgräben</b>	$\leq 5$	2
<b>Durchbiegung der Faserauflagefläche (// bzw. <math>\perp</math> zu den Gräben)</b>	$\leq 5$	< 1 bzw. 1,7

Tab. 1: Soll-/Istwert-Vergleich der Prüfmaße; beispielhaft für ein Steckerunterteil (Nr. 1129S23N1)

## 5. Optische Charakterisierung des RibCon-Steckverbinders

Da zum heutigen Zeitpunkt noch keine 16fach-Multimode-Faserbändchen verfügbar sind, wurden erste Stecker mit einem 12fach-Multimode-Faserbändchen bestückt und optisch vermessen.

Die Prüfung erfolgte nach einem standardisierten Verfahren der Norm CECC 86 000. Dabei wird ein mit zwei Steckern konfektioniertes Kabel in eine optische Messstrecke eingefügt und die daraus resultierende Einfügedämpfung als Maß für die Koppelverluste bestimmt. Abb. 11 zeigt die Dämpfungswerte für die 12 Fasern an den Positionen 3-14 für beide möglichen Steckeranordnungen; die Werte sind gemittelt über eine Messreihe, in der insgesamt 13 Steckverbindungen untersucht wurden.

Die mittlere Dämpfung beträgt weniger als 0,5 dB. Dies entspricht üblichen Werten von gängigen Multimode-Einzelsteckverbindern.

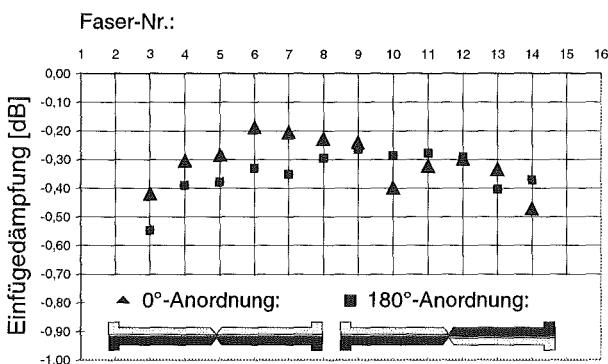


Abb. 11: mittlere Einfügedämpfungen der Einzelfasern einer Steckverbindung. Der Durchmesser des lichtführenden Kerns der 12 Fasern beträgt 62,5 µm.

## 6. Ausblick

Die Arbeiten haben derzeit den Stand erreicht, dass erste Muster des Steckverbinders abgeformt und optisch charakterisiert worden sind. Das Konzept des Steckverbinders und seine Herstellbarkeit konnten damit erfolgreich demonstriert werden.

Im nächsten Projektabschnitt soll eine erste Kleinserie von 300 Steckverbindern hergestellt werden, um insbesondere die Prozessstabilität im Spritzgießverfahren nachzuweisen.

Weitere Arbeiten sind mit der Verfahrensentwicklung zur Herstellung der Formeinsätze verbunden. Die Verfahrenskombination aus mechanischer Mikrofertigung und LIGA-Technik zur Herstellung von Formeinsätzen mit mehreren Strukturebenen soll dabei bis zum Status eines freigegebenen Fertigungsverfahrens nach Maßgabe des IMT-QM-Systems (siehe hierzu auch [5]) weiterentwickelt werden. Damit soll neben einer erhöhten Prozessstabilität auch eine gleichmäßig geringe Dämpfung sichergestellt werden.

Ein längerfristiges Ziel ist die Herstellung von Mehrfach-Steckverbindern für Monomode-Faserbändchen, die noch höhere Anforderungen an die Genauigkeit der Führungsstrukturen stellen.

## Danksagung

Die hier beschriebenen Arbeiten sind durch die Mithilfe vieler Personen entstanden. Besonders bedanken möchten wir uns bei Herrn Schuardt im IMT für die Zeichnungserstellung, bei Herrn Stierl im IMT für die Messungen, bei Herrn Eichhorn und Herrn Scherhauser von HVT für die Mikrofräsbearbeitung, bei Herrn Holzer im IMF III für die Abformung, bei Herrn Gretschmann von BTI-F für die Drahterodierbearbeitung sowie Herrn Loibl und Herrn Holzmeier von der Fa. Spinner für den Werkzeugbau und die optische Prüfung der Steckverbinder.

## Literatur

- [1] prEN 186310, „Sectional Specification: Connector sets for optical fibres and cables – Typ MF“, Europäische Norm, CENELEC, Oktober 1996
- [2] IEC 874-16, „Connectors for optical fibres and cables – Part 16: Sectional specification for fibre optic connector – Typ MT“, Internationale Norm, IEC, September 1994
- [3] Schaller, Th., Bohn, L., Mayer, J., Schubert, K., „Microstructure grooves with a width of less than 50 µm cut with ground hard metal micro end mills“, Prec. Eng. 4/1999, **23**, 229-235
- [4] Ruprecht, R. et al.: „Abformverfahren für mikrostrukturierte Bauteile aus Kunststoff und Metall“, dieser Band
- [5] Maas, D. et al.: „Fertigung von Mikrokomponenten nach DIN EN ISO 9001 an einem Forschungsinstitut“, dieser Band

## **Exponate des PMT \***

\* Im Rahmen des 4. PMT Statuskolloquiums fand eine Ausstellung mit 29 Exponaten des Programms Mikrosystemtechnik statt. Für die Exponate, die nicht in Vorträgen behandelt werden konnten, wird hier eine Beschreibung gegeben.



# Herstellung von Formeinsätzen aus Nickel bis 120 mm Durchmesser mit Hilfe konventioneller Optischer Lithografie

Song-Jo Chung, Herbert Hein

Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Formeinsätze aus Nickel zur Herstellung von Mikrostrukturen durch Heißprägen und Spritzgießen können mit Hilfe der konventionellen optischen Lithografie und Galvanik hergestellt werden. Bei diesem Verfahren wird ein negativarbeitender Fotoresist EPON SU-8 eingesetzt. Vorteil dieses Verfahrens für den Anwender ist die große zu strukturierende Nutzfläche (auf 6 Zoll Basis) bis zu 120 mm Durchmesser bzw. 85x85 mm<sup>2</sup> Kantenlänge, sowie schnelle Prozesslaufzeiten für die Formeinsatzherstellung. Beispiele von Anwendungsgebieten sind Kapillar-Fluidik, Lab-on-Chip und optische Wellenleiter.

## 1. Einleitung

Die optische Lithografie stellt eine kostengünstige Methode dar, mit der sich in wenigen Prozessschritten Mikrostrukturen herstellen lassen. Mit dem negativarbeitenden Fotoresist EPON SU-8 lassen sich hohe Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis erzeugen, die nahezu senkrechte Profile haben (Abb.1). Dieser Resist basiert auf Epoxidharz und zeichnet sich durch hohe Lichtempfindlichkeit, hohe Transparenz und chemische Beständigkeit aus.

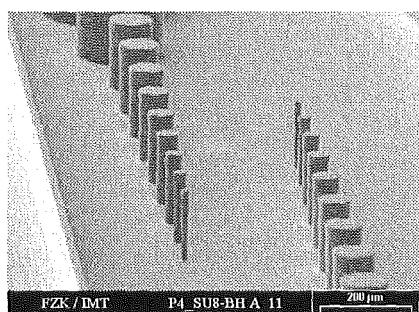


Abb. 1: Mit optischer Lithografie hergestellte Mikrostrukturen aus EPON SU-8. Strukturhöhe 120  $\mu\text{m}$ , Aspektverhältnis bis 10.

## 2. UV-Lithografie

Bei der UV-Lithographie werden lichtempfindliche Kunststoffe – sogenannte Fotoresists – verwendet. Nach der Belichtung mit UV-Licht wird die Löslichkeit des Resist in einer speziellen Entwicklerflüssigkeit so verändert, dass die belichteten Bereiche selektiv entfernt werden bzw. übrig bleiben. Bei dem Resist EPON SU-8 werden die unbelichtete Bereiche bei der Entwicklung entfernt. Die Belichtung erfolgt durch Schattenwurf von ebenen Geometrien einer Chrommaske auf die zu strukturierende fotoempfindliche Resistenschicht. Bei diesem Kopievorgang entsteht

nur ein geringer Maßverlust, d.h. die Strukturen werden nahezu 1:1 übertragen.

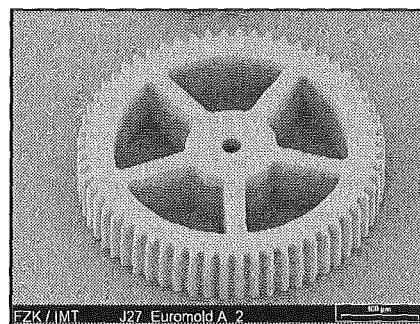


Abb. 2: Mikrozahnrad aus EPON SU-8 mit dem Durchmesser von 380  $\mu\text{m}$  und 100  $\mu\text{m}$  Höhe. Der Achsendurchmesser beträgt 25  $\mu\text{m}$ .

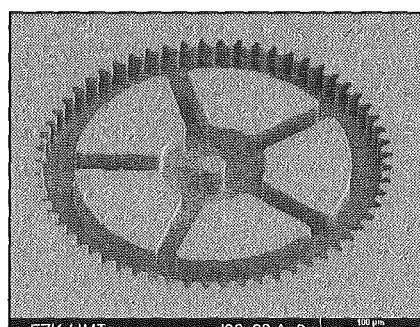


Abb. 3: Mikrozahnrad auf dem Formeinsatz aus Nickel, 380  $\mu\text{m}$  Durchmesser, 50  $\mu\text{m}$  tief, 25  $\mu\text{m}$  Achsendurchmesser.

## 3. Herstellung von Formeinsätzen aus galvanisiertem Nickel auf der Basis von SU-8 Resist

Die durch UV-Lithographie hergestellten Mikrostrukturen werden mit Nickel galvanisch aufgefüllt.

Nach dem Galvanisieren bis auf eine Höhe von einigen Millimetern wird der Resist entfernt und es verbleiben metallische Mikrostrukturen auf einem massiven Träger aus Nickel. Der so hergestellte Formeinsatz dient als Werkzeug für die Abformung.

Die Form des Formeinsatzes kann rechteckig (maximal 85 mm Kantenlänge) oder kreisförmig (max. Durchmesser 120 mm) sein. Die Oberflächenrauhigkeit der Prägeseite beträgt  $Ra < 20 \text{ nm}$ . Die Strukturdimensionen zur Herstellung von Formeinsätzen aus galvanisch abgeschiedenen

Nickel sind aufgrund des Herstellungsprozesses begrenzt. Das Aspektverhältnis der Strukturen beträgt maximal 3,5 und die kleinste Strukturbreite 10  $\mu\text{m}$ .

Die Herstellungszeiten solcher Formeinsätzen liegen bei einigen Wochen. Die möglichen Strukturdimensionen für die Formeinsatzherstellung sind in der Tab. 1 zusammengefasst. Abb. 4 und 5 zeigen Beispiele solcher Formeinsätze, die durch diese beschriebene Fertigungstechnik hergestellt wurden.

<b>Größe des Formeinsatzes</b>		<i>max. 85 mm Kantenlänge bzw. 120 mm Durchmesser</i>									
<b>Dicke des Formeinsatzes</b>		<i>Ohne Strukturen bis 3 mm</i>									
<b>Aspektverhältnis</b>		<i>bis 3,5 abhängig von der Strukturbreite</i>									
<b>Strukturhöhe</b>		<i>10 bis 100 <math>\mu\text{m}</math></i>									
<b>Strukturbreite</b>		<i><math>\geq 5 \mu\text{m}</math></i>									
<b>Strukturhöhe in <math>\mu\text{m}</math></b>	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
<b>kleinste Strukturbreite in <math>\mu\text{m}</math></b>	5	8	12	13	15	17	20	23	25	29	
<b>max. Aspektverhältnis</b>	2	2,5	2,5	3	3,3	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	
<b>Rauigkeit</b>		<i>Prägeseite: <math>\leq 20 \mu\text{m}</math>, Rückseite: <math>\leq 0,1 \text{ mm}</math></i>									

Tab. 1: Mögliche Strukturdimensionen bei Formeinsätzen aus Nickel, hergestellt durch optische Lithografie und EPON SU-8.

#### 4. Herstellung von Mikrobauteilen durch Heißprägen

Beim Heißprägen wird ein mikrostrukturiertes Werkzeug (Formeinsatz) in einer evakuierten Kammer mit hoher Kraft in eine thermoplastische Kunststofffolie hineingedrückt. Das Heißprägen erfolgt oberhalb der Erweichungstemperatur. Der Kunststoff füllt den Formeinsatz aus und bildet die Mikrostrukturen detailgenau ab. Anschließend wird der Aufbau abgekühlt und der Formeinsatz aus dem Kunststoff gezogen.

Dabei einsetzbare Kunststoffe sind vor allem PMMA, POM, PC, PVDF und PSU. Ein Beispiel eines abgeformten Kunststoffes aus PMMA zeigt Abb. 6, die der Struktur des Formeinsatzes der Abb. 4 entspricht.

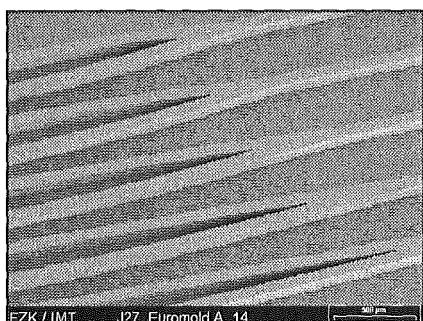


Abb. 4: Mikrofluidkanäle auf dem Formeinsatz. Strukturhöhe und -breite jeweils 50  $\mu\text{m}$ .

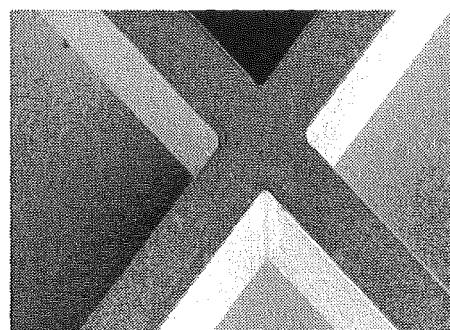


Abb. 5: Detailaufnahme einer Mikrofluidstruktur auf einem Nickel-Formeinsatz. Strukturbreite 20  $\mu\text{m}$ , Strukturhöhe 40  $\mu\text{m}$ .

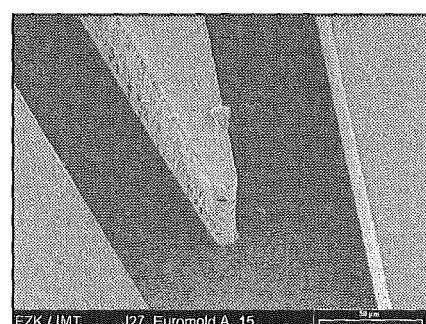


Abb. 6: Detailaufnahme eines abgeformten Mikrofluidkanals in der Kunststofffolie aus PMMA.

# Fertigung von Mikrostrukturen durch Röntgentiefenlithographie an der Karlsruher Synchrotronstrahlungsquelle ANKA

F.J. Pantenburg <sup>1)</sup>, J. Mohr <sup>1)</sup>, H.O. Moser <sup>2)</sup>, K.-H. Häfele <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik

<sup>2)</sup> Forschungsgruppe Synchrotronstrahlung

<sup>3)</sup> Institut für angewandte Informatik

## Zusammenfassung

An der Karlsruher Synchrotronstrahlungsquelle ANKA werden im ersten Ausbau drei Strahlrohre für die Röntgentiefenlithographie (RTL) innerhalb eines Reinraumes für das LIGA-Verfahren zur Verfügung stehen. Um alle Aufgaben der RTL umsetzen zu können, sind die Strahlführungssysteme mit Röntgenspiegeln, die im streifenden Einfall arbeiten, ausgestattet. Diese erlauben eine Adaptierung des Synchrotronstrahlungsspektrums von ANKA bezüglich der spektralen Verteilung und der Röntgenleistung an das Mikrostrukturprodukt. Bei den Belichtungsstationen handelt es sich um moderne Röntgenscanneranlagen, die in Zusammenarbeit mit der Fa. Jenoptik/Mikrotechnik entwickelt wurden und bereits an den Beschleunigern ELSA der Universität Bonn und BESSY I in Berlin erfolgreich im Einsatz sind bzw. waren. Die derzeitige Zeitplanung sieht eine abgeschlossene Charakterisierung und einen fertigungsgerechten Betrieb zum März 2001 vor.

## 1. Einleitung

In der Röntgentiefenlithographie wird eine Röntgenmaske durch Schattenprojektion in einen röntgenempfindlichen Kunststoff abgebildet. Aufgrund der hohen Intensität und kleinen Divergenz im Röntgenbereich wird Synchrotronstrahlung verwendet. Strukturhöhen zwischen 30  $\mu\text{m}$  und 3000  $\mu\text{m}$  werden am IMT für interne und externe Kunden hergestellt. Die Strukturen haben optische Seitenwandqualität mit einer Rauigkeit unter 35 nm und können Strukturdetails im sub- $\mu\text{m}$  besitzen. Diese Vorteile kommen zum Beispiel bei den am IMT entwickelten Mikrospektrometersystemen für die Spektralbereiche vom UV-VIS bis IR voll zum Tragen.

## 2. Stand der Technik

Die hohe Strukturgenauigkeit der RTL wird im Bereich der Bestrahlung durch eine adaptierte spektrale Verteilung der Synchrotronstrahlung und Leistungsanpassung ermöglicht. Dies bewirkt eine verbesserte Haftung der Kunststoffstruktur auf dem Substrat [1], bzw. eine verbesserte Strukturgenauigkeit [2].

Seit der Abschaltung von BESSY I im November 1999 werden alle Belichtungen des Instituts für Mikrostrukturtechnik an der Elektronen Stretcher Anlage (ELSA) des Physikalischen Instituts der Universität Bonn durchgeführt. Hier erfolgt die Anpassung an die Erfordernisse der RTL durch eine Variation der Elektronenenergie. So wird ELSA für die Arbeitsmaskenherstellung bei einer

Elektronenenergie von 1.6 GeV ( $\varepsilon_c=0.83 \text{ keV}$ ), für die Standard-RTL bei einer Energie von 2.3 GeV ( $\varepsilon_c=2.48 \text{ keV}$ ) und für die Ultratiefenröntgenlithographie bei 2.7 GeV ( $\varepsilon_c=4.01 \text{ keV}$ ) betrieben. Durch die kontinuierlichen Verbesserungen und das Verständnis der Bonner Anlage in den vergangenen Jahren ist ein Wechsel der Elektronenenergie, während einer Synchrotronlichtstrahlzeit, innerhalb von 1-2 Stunden möglich.

## 3. Betriebsbedingungen an ANKA

Die dedizierte Synchrotronlichtquelle ANKA ist für einen Betrieb bei 2.5 GeV ( $\varepsilon_c=6 \text{ keV}$ ) ausgelegt. Um eine möglichst effiziente Nutzung dieser Quelle zu ermöglichen und gleichzeitig alle Strukturierungsaufgaben des Instituts für Mikrostrukturtechnik zu erlauben, sind in den 3 Strahlrohren zur RTL Röntgenspiegel zur Adaptierung der spektralen Verteilung vorgesehen. Diese Röntgenspiegel reflektieren in Abhängigkeit des Einfallswinkels nur den niederenergetischen Anteil im Synchrotronlichtspektrum. In Experimenten an der Synchrotronlichtquelle DCI/LURE ( $\varepsilon_c=3.88 \text{ keV}$ ) in Frankreich konnte gezeigt werden, daß eine ausreichende Haftung von 50  $\mu\text{m}$  hohen Kuriststoff-Strukturen auf einer  $\text{TiO}_x$ -Schicht bei einer Au-Absorberdicke von 1  $\mu\text{m}$  unter Verwendung eines Doppelspiegelsystems erzielt wird [3].

Die LIGA-Strahlrohre an ANKA werden zukünftig mit state-of-the-art Röntgenscannern ausgerüstet sein. Dabei handelt es sich um die IMT-eigenen

Anlagen die bereits an den Synchrotronstrahlungsquellen ELSA bzw. BESSY I eingesetzt sind bzw. waren. Entsprechend der technischen Ausrüstung werden die Strahlrohre für unterschiedliche Aufgaben im Bereich der RTL eingesetzt werden:

Das Lithographiestrahlrohr 1 wird vornehmlich für die Arbeitsmaskenproduktion verwendet werden und erlaubt die Strukturierung von bis zu 100  $\mu\text{m}$  dicken Resistenschichten. Durch die Verwendung eines Chrom beschichteten Si-Spiegels steht ein Photonenspektrum im Bereich von 1.5 bis 4 keV an, dazu beträgt der Einfallswinkel 13-17.5 mrad.

Das Lithographiestrahlrohr 2 (siehe Abb. 1) ist für die Standardlithographie vorgesehen. Es können Resiststrukturen bis zu einer Höhe von 700  $\mu\text{m}$

hergestellt werden. Hinter dem Nickel beschichteten Siliziumspiegel stehen Photonen im Bereich von 2 bis 8 keV zur Verfügung, dies entspricht einem Einfallswinkel von 6.5 bis 8.5 mrad.

Das dritte Lithographiestrahlrohr ist als Strahlrohr für die Prozessweiterentwicklung gedacht und steht aufgrund der Auslegung gleichzeitig als Backup-Lösung für die Strahlrohre 1 und 2 zur Verfügung. Dazu wird es mit einem Doppelspiegelsystem ausgestattet sein, der es erlaubt die cut-off Energie im Bereich zwischen 4 und 15 keV frei zu wählen ohne den Einfallswinkel am Röntgen-scanner zu ändern. Für die Ultratiefenröntgen-lithographie [4] kann der Doppelspiegel auch gänzlich aus dem Strahlengang herausgefahren werden.

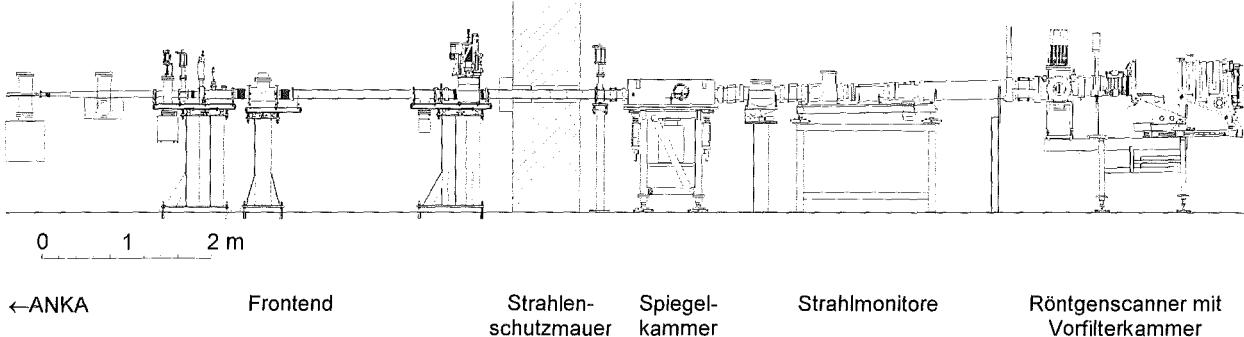


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Lithographiestrahlrohres 2 an der Karlsruher Synchrotronlichtquelle ANKA. Ausgehend vom Quellpunkt (links) erkennt man den Frontend-Bereich der mit der Strahlenschutzmauer abschließt. Nach der Spiegelkammer und den Strahlmonitoren befindet sich die eigentliche Belichtungsstation, die in einer Strahlenschutzhütte im Reinraumbereich an ANKA untergebracht ist.

#### 4. Installationsphase

Nach dem Reinraumaufbau in der ANKA-Halle werden die Strahlrohre unter der Randbedingung eines kontinuierlichen Produktionsprozesses in Betrieb genommen. Aus diesem Grunde wird das IMT während der Inbetriebnahme und Charakterisierung der Strahlrohre zunächst einmal mit nur zwei Scanneranlagen an ANKA operieren. Parallel dazu werden am Beschleuniger ELSA die Bestrahlungen für die internen wie externen Kunden durchgeführt. Nachdem gezeigt wurde,

dass die Mikrostrukturqualität an ANKA den hohen Anforderungen der Kunden entspricht und alle Bestrahlungsaufgaben an ANKA wahrgenommen werden können, werden die beiden Scanneranlagen am Beschleuniger ELSA abgebaut und an den Strahlrohren an ANKA installiert werden. Der derzeitige Terminplan sieht eine abgeschlossene Installation und Charakterisierung im März 2001 vor.

#### Literatur

- [1] F.J. Pantenburg, J. Chlebek, A. El-Kholi, H. L. Huber, J. Mohr, H. K. Oertel, J. Schulz: "Adhesion problems in deep-etch lithography caused by fluorescence radiation from the plating base", *Microsystem engineering* 23, (1994) 226-226
- [2] F. J. Pantenburg, J. Mohr: „Influence of secondary effects on the structure quality in deep X-ray lithography“, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B*, 97(1995) 551-556

- [3] S. Megert, F.J. Pantenburg, S. Achenbach, R. Kupka, J. Mohr, M. Roulliay: „Preliminary results on the use of a mirror-system for LiGA-process“, *SPIE*, Volume 3680 (March/April 1999), 917-923
- [4] F.J. Pantenburg, S. Achenbach, M. Sesterhenn: „LiGA-Strukturen mit Strukturhöhen von mehreren Millimetern durch Ultratiefen Röntgenlithographie (UDXRL)“ in „3. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik“, *Wissenschaftliche Berichte FZKA* 6080 (1998), 77-82

# Galvanische und aussenstromlose Methoden zur Herstellung metallischer Mikrostrukturen

Klaus Bade <sup>1)</sup>, Andreas Fath <sup>1)</sup>, Markus Guttmann <sup>2)</sup>, Eric Walch <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik  
<sup>2)</sup> Institut für Materialforschung III

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die im PMT verwendeten Verfahren der Galvanoformung zur Herstellung von metallischen Mikrostrukturen ausgehend von der Metallabscheidung in verlorene Formen vorgestellt. Es werden aktuelle Entwicklungsarbeiten erläutert und die Einsatzmöglichkeiten der Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen anhand von Beispielen aufgezeigt.

## 1. Einleitung

Durch Kombination von lithographischen Verfahren und galvanischen Prozessen (LIGA-Technik) werden metallische Mikrobauteile mit Abmessungen im Mikrometerbereich auf direktem Wege gefertigt. Darüber hinaus werden auch Werkzeuge (Formeinsätze) für das Mikrospritzgießen und Heißprägen von isolierenden und leitfähigen Kunststoffen über diese Verfahrenskombination hergestellt [1,2].

Für die Fertigung von Mikrobauteilen aus Metall in größeren Stückzahlen bietet sich zudem die Möglichkeit der Herstellung über die galvanische oder außenstromlose Abformung von verlorenen isolierenden oder leitfähigen mikrostrukturierten Kunststoffsubstraten an [3].

Abb. 1 zeigt einen schematischen Überblick über die am Forschungszentrum entwickelten und verfügbaren Prozesse. In Tab. 1 werden hierzu ausgewählte Material- und Prozessdaten vorgestellt.

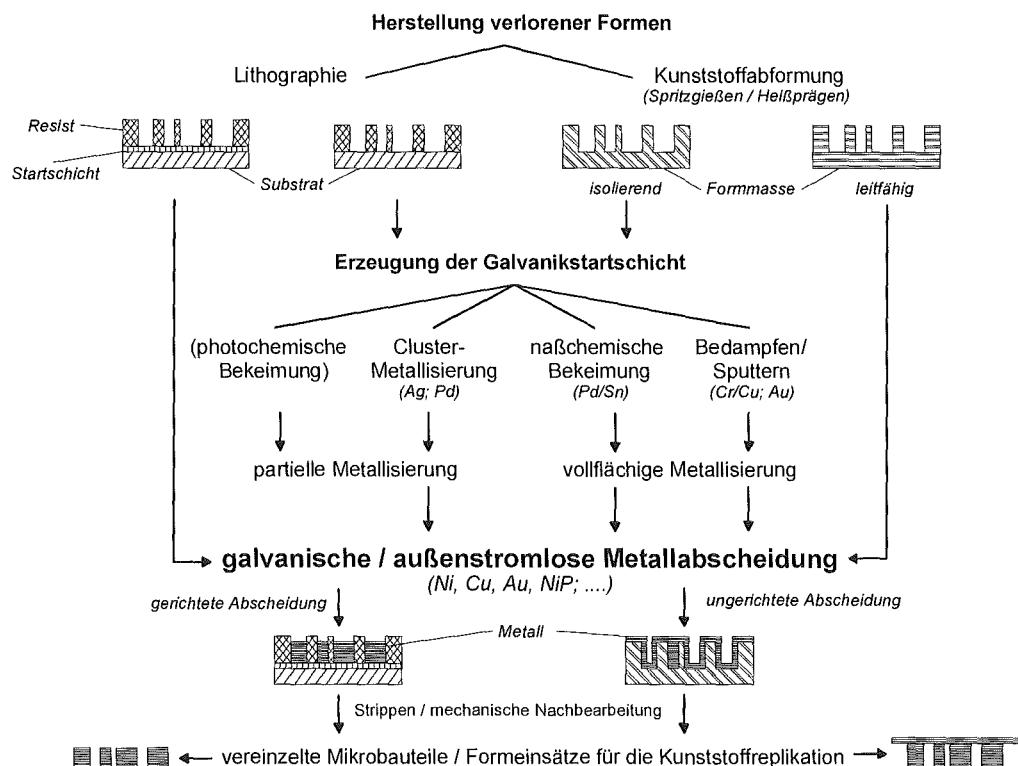


Abb. 1: Schema über mögliche Verfahrenskombinationen zur Herstellung von Formeinsätzen bzw. von vereinzelten Mikrobauteilen aus Metall, die im Forschungszentrum entwickelt wurden und die für die Anwendung zur Verfügung stehen

Material	Maximale Höhe	Aspekt-verhältnis	Beschichtbare Fläche	E-Modul [GPa]	Härte [HV <sub>x</sub> ]	Zugfestigkeit [MPa]	Oberfläche
Nickel (Ni)	2 mm	50	6"-Wafer (150 cm <sup>2</sup> )	171	198-300	750	Matt
Kupfer (Cu)	200 µm	20	6"-Wafer (150 cm <sup>2</sup> )	78	110	250	Uneben
Gold (Au)	50 µm	20	4"-Wafer (100 cm <sup>2</sup> )	-	90-100	-	Glänzend
Permalloy (Ni/Fe 20/80)	200 µm	20	4"-Wafer (100 cm <sup>2</sup> )	169	520	1865	Glänzend
Chem. Nickel (NiP)	300 µm	20	4"-Wafer (100 cm <sup>2</sup> )	150	500-700	> 750	Glänzend

Tab. 1: Ausgewählte Material- und Prozessdaten für die am Forschungszentrum verfügbaren Verfahren der Mikrogalvanoformung

## 2. Aktuelle Entwicklungsarbeiten für die Mikrogalvanoformung

Die Forschungsarbeiten beschäftigen sich einerseits mit der Verfahrensentwicklung und -optimierung der galvanischen Abscheidung insbesondere von binären Legierungen (Ni/Fe; Ni/W) einschließlich der erforderlichen Prozesskontrolle und -standardisierung [4]. Andererseits wird ein industrietaugliches Verfahren zur Herstellung von Mikrobauteilen aus Metall über die Galvanoformung in verlorene Kunststoffformen mit Aspektverhältnissen  $\leq 4$  erarbeitet und es werden Untersuchungen zur partiellen Cluster-Metallisierung der verlorenen Kunststoffsubstrate vorgenommen [5].

## 3. Beispiele für die Anwendung der Mikrogalvanoformung

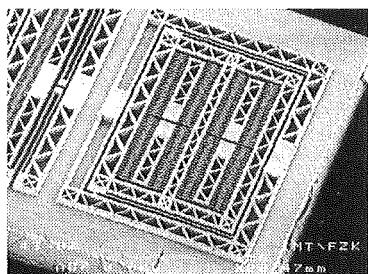


Abb. 2: Ni-Mikrostruktur (Gyrometerelement)

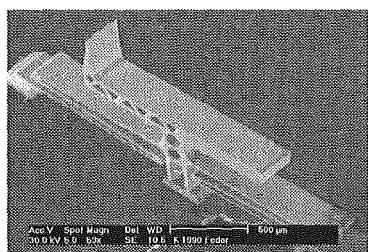


Abb. 3: NiFe-Mikrostruktur (Teilelement des Choppersystems). Nachbearbeitet, vom Substrat abgelöst und auf eine Seitenwand gestellt.

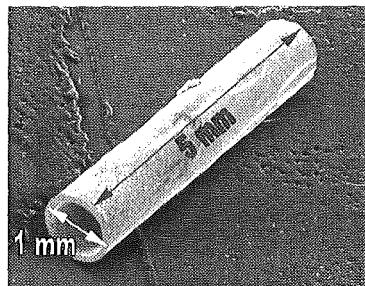


Abb. 4: NiP-Mikrostruktur (Prototyp eines Mikroröhrchens; Wandstärke 230 µm)

Die potentiellen Anwendungsmöglichkeiten der Mikrogalvanoformung für die Herstellung von Mikrobauteilen aus Metall werden beispielhaft durch die Abb. 2-4 verdeutlicht. Bezüglich der Formeinsatzherstellung sei auf den Beitrag von W. Bacher et al. in diesem Band verwiesen.

## Literatur

- [1] Bade, K., „Herstellung von Formeinsätzen für die Mikrotechnik durch Galvanoformung“, Galvanotechnik, 90 (1999), 801-807.
- [2] Bade, K., Fath, A., Leskopf, W., „Galvanische Prozesse in der Mikrosystemtechnik“, Metalloberfläche, 53 (1999), 34-38.
- [3] Bacher, W., Bade, K., Konys, J., Schanz, G., „Galvanische und chemische Abformung von Kunststoff-Mikrostrukturen“, NACHRICHTEN-Forschungszentrum Karlsruhe, 30 (1998), 251-260.
- [4] Fath, A., Leskopf, W., Bade, K., Bacher, W., „Der Einfluß von Zusätzen auf die Nickel-Eisen-Legierungsabscheidung an mikrostrukturierten Elektroden“, GDCh-Monographien, (2000) (im Druck).
- [5] Rattunde, O., Guttman, M., Veröffentlichung in Vorbereitung

# Mikrostrukturierung von Stahl mit Hartmetallfräsern

Th. Schaller

Hauptabteilung Versuchstechnik

## Zusammenfassung

Fräser aus Hartmetall mit Durchmessern bis unter 100 µm eignen sich zur Strukturierung von Stahl. Mikrostruktur-Prototypen und widerstandsfähige Formeinsätze zur Kunststoffabformung von Mikrokomponenten können grätfrei und mit hoher Oberflächenqualität gefertigt werden.

## 1. Einleitung

Die spanende Mikrobearbeitung wird häufig mit Diamantdrehen oder -fräsen gleichgesetzt. Dabei müssen aufgrund der Affinität von Diamant (Kohlenstoff) zu Eisen Beschränkungen der Werkstoffauswahl (meist auf Nichteisenwerkstoffe) hingenommen werden. Auch die Strukturvielfalt ist durch die Abmessungen der zur Verfügung stehenden Werkzeuge (minimaler Durchmesser von Diamantfräsern 0,2 mm) eingeschränkt. Dem Wunsch nach kleineren Nutbreiten bei gleichzeitiger Forderung widerstandsfähiger Werkstoffe, beispielsweise Stahl für Formeinsätze zur Kunststoffabformung, kann mit Mikrofräsern aus Hartmetall entsprochen werden, die sich für die Bearbeitung von Kunststoffen, Nichteisenwerkstoffen und Stählen gleichermaßen eignen.

## 2. Mikro-Fingerfräser aus Hartmetall

Aus Hartmetall (Wolframkarbid) konnten Einschneiden-Fingerfräser für Nutbreiten bis unter 50 µm geschliffen werden (Abb. 1).

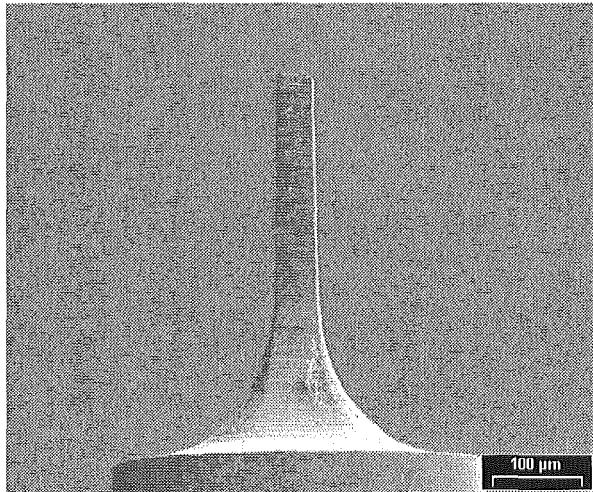


Abb. 1: Blick auf die Schneidfläche eines 50 µm-Mikrofräzers aus Hartmetall. Die Schneide ist links; der Fräser ist radial und axial freigeschliffen.

Die Mikro-Fingerfräser eignen sich zur Strukturierung von Messing und anderen Nichteisenwerkstoffen (Abb. 2). Bei der Strukturierung des Stahles 1.2709 konnten Nuten mit einer Breite von minimal ca. 80 µm gefräst werden [1].

## 3. Formeinsätze aus Stahl 1.2709

Ein typisches Anwendungsbeispiel für die mechanische Mikrofertigung ist die Herstellung von Formeinsätzen, von denen beispielsweise Trägerstrukturen für Zellkultursysteme, Mikroventil-, Mikropumpen- und Drucksensorkomponenten [2] in größeren Stückzahlen durch Spritzgießen oder Heißprägen abgeformt werden können. Die mikrometergenaue Strukturierung erfolgt auf CNC-Hochpräzisions-Bearbeitungsmaschinen, vor allem bei kleinsten Fräserdurchmessern bevorzugt unter Verwendung einer Hochfrequenzspindel, wodurch die Bearbeitungszeit für Werkstückformate bis ca. 20 cm<sup>2</sup> bei wenigen Stunden liegt.

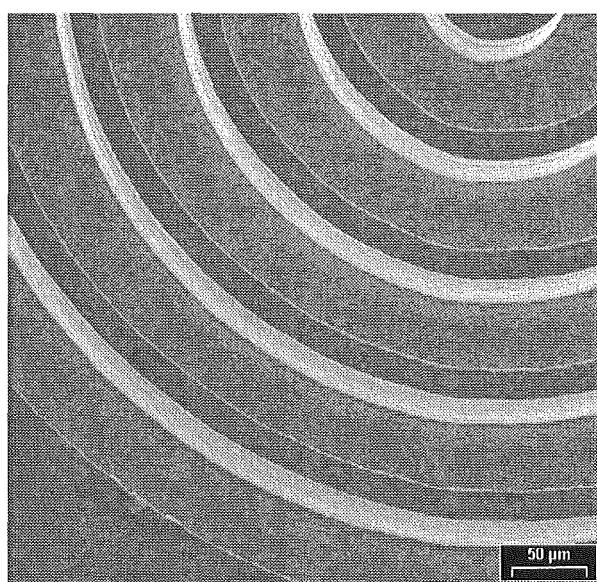


Abb. 2: Kreisnuten in Messing als Beispiel für die Strukturierung mit einem 50 µm-Fräser. Die Nuttiefe beträgt ca. 50 µm.

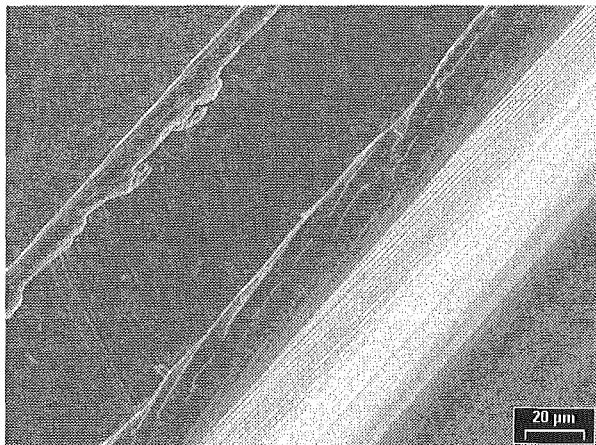


Abb. 3: Oberseite eines Steges, gefräst in Stahl 1.2709. An den Strukturkanten ist eine deutliche Gratbildung erkennbar. Die helle Fläche ist die Seitenwand des Steges.

Der martensitische Stahl 1.2709 ist gut bearbeitbar und erreicht durch Warmauslagern eine Härte über 55 HRC. Der thermisch induzierte Verzug beim Härteten ist minimal.

Bei der Strukturierung ist die Entstehung von Graten an den Strukturkanten (Abb. 3) unvermeidlich. Häufig ist es wünschenswert, diese Grate zu entfernen. Dies kann gezielt durch Elektropolieren geschehen; bei geeigneter Wahl der Parameter werden die Grate vollständig entfernt, ohne die Strukturkanten nennenswert zu verrunden (Abb. 4). Die Oberflächenqualität wird durch das Elektropolieren ebenfalls verbessert. Die Rauheitswerte liegen bei 150 nm ( $R_a$ ).

Gratfreiheit und glatte Oberflächen sind wichtige Voraussetzungen für die leichte Abformbarkeit der Formeinsätze. Die gute Tauglichkeit der Formeinsätze wurde in Abformversuchen durch Heißprägen nachgewiesen (Abb. 5).

#### 4. Diskussion und Ausblick

Mit der Bearbeitung unter Verwendung von Hartmetall-Mikrofräsern bietet die Mechanische Mikrofertigung ein leistungsfähiges Verfahren zur Herstellung einer großen Vielfalt von Mikrostrukturen. Diese Strukturen können als prototypische Bauteile direkt verwendet werden, oder sie dienen als Formeinsätze zur Kunststoffabformung.

Durch die Miniaturisierung der Hartmetallfräser besteht die Möglichkeit der spanenden Mikrobearbeitung von (härtbarem) Stahl mit Struktur-

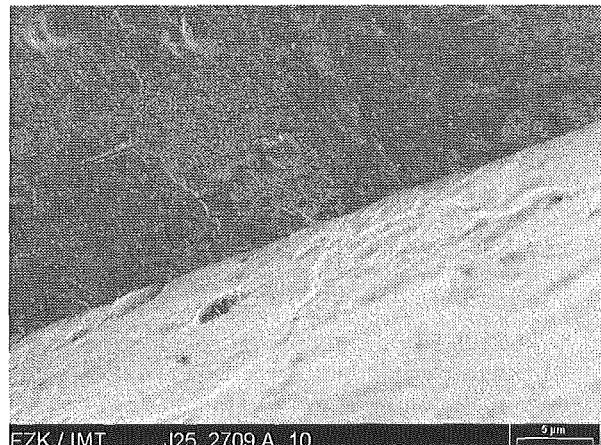


Abb. 4: Detail einer Strukturkante in Stahl 1.2709, entgratet durch Elektropolieren. Man beachte die geringe Kantenverrundung!

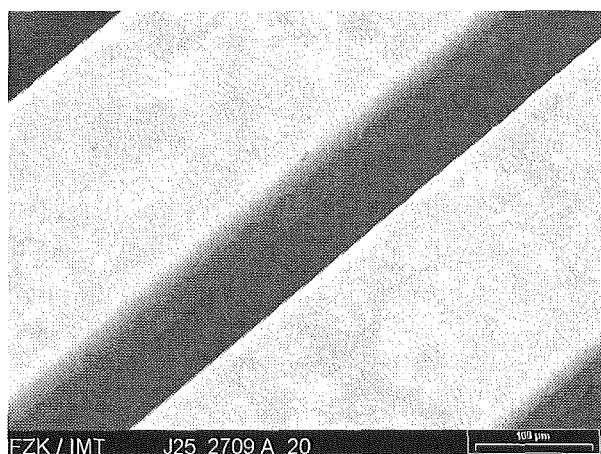


Abb. 5: Abformung eines Stahl-Formeinsatzes in PMMA. Die in der Abformung hell erscheinenden Stege entsprechen dem Nutgrund im Formeinsatz und umgekehrt.

details, wie sie bisher der Diamantbearbeitung von Nichteisenmetallen vorbehalten war. Durch Elektropolieren können Grate vollständig entfernt werden; gleichzeitig wird die gegenüber diamantbearbeiteten Oberflächen höhere Rauheit der hartmetallgefrästen Strukturoberflächen reduziert.

Nach den erfolgreichen Abformungen von Teststrukturen werden weitere Prototypen und Formeinsätze für mikrosystemtechnische Anwendungen gefertigt werden. Eine Erweiterung der Strukturpalette durch Freiformfräsen mit Radiuswerkzeugen ist vorgesehen.

#### Literatur

- [1] Schaller Th., Bohn L., Mayer J., Schubert K., „Microstructure grooves with a width of less than 50 μm cut with ground hard metal micro end mills“, Prec. Eng. 4/1999, **23**, 229-235
- [2] Schaller Th., Heckele M., Ruprecht R., „Mechanical Micromachining for Mold Insert Fabrication and Replication“, ASPE 1999 Spring Topical Meeting, Proceedings Volume **19**, 3-8

# Prägen von Mikrobauteilen ohne Restschicht

M. Hecke, H. Dittrich

Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Vereinzelte Mikrostrukturen können durch Vakuumheißprägen hergestellt werden indem die beim Heißprägeprozess übliche Restschicht durch eine Trägerschicht ersetzt wird. Erreicht wird dies dadurch, dass beim Heißprägeprozess eine Verbundfolie aus unterschiedlichen Kunststoffen verwendet wird. Beim Prägeprozess durchdringt das mikrostrukturierte Werkzeug (Formeinsatz) vollständig die obere Kunststoffschicht, während es in die untere Kunststoffschicht nur wenige Mikrometer eindringt. Auf diese Weise bildet die untere Kunststoffschicht eine Trägerschicht für die Mikrostrukturen. Durch entsprechende Wahl der Kunststoffe bleibt der Folienverbund bestehen und die gesamte Verbundschicht kann entformt werden. Anschließend ist eine Trennung der Mikrostrukturen von der Trägerschicht aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften möglich. Die auf diese Weise vereinzelten, restschichtfreien Mikrostrukturen können mit für die Mikrotechnik geeigneten Pick- und Place-Techniken weiterverarbeitet werden. Der Gesamtprozess wird am Beispiel eines gestuften Mikrozahnrad aus POM beschrieben.

## 1. Einleitung

Neben Bauteilen, die nur an ihrer Oberseite mikrostrukturiert sind wie Reflektorfolien oder Hologramme, sind Mikrokomponenten interessant, die an der gesamten Oberfläche, also auch an den Seitenwänden oder gar der Rückseite mikrostrukturierte Details oder Funktionsflächen aufweisen. Dies können z.B. fluidische Strukturen sein, die neben den Kanalstrukturen an der Oberfläche auch noch Kontaktierungen an der Rückseite besitzen oder Zahnräder deren Stirnflächen eben und grätfrei sein müssen.

Bisher war es üblich mehrere Mikrostrukturen auf einer unstrukturierten Trägerschicht aus dem selben Material abzuformen und in aufwendigen Einbettungs- und Nachbearbeitungsschritten die Trägerschichten zu entfernen [1]. Bis heute ist es noch nicht gelungen vereinzelte Kunststoffmikrostrukturen kleiner als 1 mm ohne Nachbearbeitung über Heißprägen oder Spritzgießen herzustellen. Entformung und Handhabung der Komponenten stellen die Hauptprobleme dar.

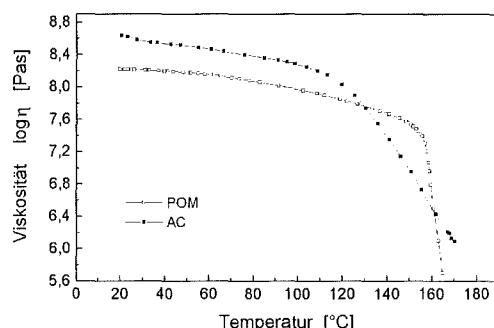
Neue Anlagenentwicklungen mit dem Trend zu kleineren Schussgewichten und Präzisionswerkzeugen ermöglichen zwar schon Teile im mm-Maßstab. Aber auf Hilfsstrukturen an denen die Auswerfer ansetzen können, kann auch dabei nicht verzichtet werden [2].

Da beim Heißprägeprozess in der Regel verfahrensbedingt eine Restschicht unvermeidlich ist, wurde der am IMT entwickelte Prozess so ausgelegt, dass diese Restschicht aus einem anderen Material ist, als das Mikro-

bauteil. Auf diese Weise wird die Restschicht umfunktioniert zu einer Trägerschicht, welche als Entformhilfe und Magazinierung dient. Da mit zwei unterschiedlichen Kunststoffen gearbeitet wird, ist es möglich, die abschließende Trennung ohne Fräsen zu bewerkstelligen.

## 2. Kunststoffverbundschichten

Voraussetzung für den späteren Vereinzelungsprozess sind chemisch nicht verträgliche Kunststoffe, deren Haftung aneinander jedoch so groß ist, dass die beim Entformprozess auftretenden Kräfte sich damit übertragen lassen.



**Abb. 1:** Unterschiedliche Viskositäten der Materialien in der Verbundschicht beeinflussen das Eindringverhalten des Formeinsatzes in die Verbundschicht.

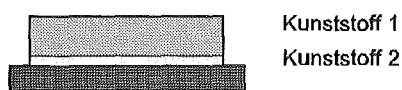
Die untere Schicht muss zusätzlich eine gute Haftung gegenüber der Entformplatte aufweisen, während die obere Schicht, aus deren Material später die Mikrostruktur sein wird, eine

möglichst geringe Haftung gegenüber dem Formeinsatz aufweisen sollte, um eine gute Trennung zu erreichen [4].

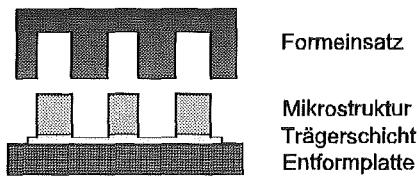
Damit beim Prägevorgang die Kunststoffe nicht ineinanderfließen, muss die Viskosität der beiden Materialien unterschiedlich sein. Die Viskosität des Trägermaterials (Kunststoff 2) liegt dabei über der Viskosität des Funktionsmaterials. Auf diese Weise kann das Prägewerkzeug leicht durch das obere Material dringen, um dann nur noch wenig in die untere Schicht einzudringen.

### 3. Prozessablauf

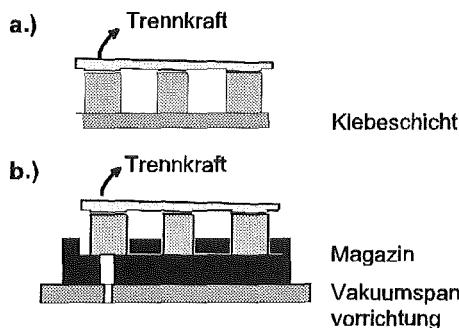
#### 1. Beschichten



#### 2. Heißprägen und Entformen



#### 3. Vereinzen und Magazinieren

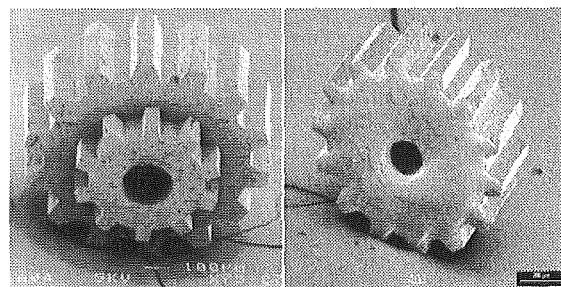


**Abb. 2:** Beim Prägen in eine Verbundschicht wird die Restschicht zur Trägerschicht, die erst nach der Umhordung in ein Magazin entfernt wird.

Wie schon oben beschrieben wird der Prägestempel nach dem Aufheizen unter Vakuum in die Verbundschicht gedrückt. Dabei ist eine sehr genaue Temperaturbestimmung notwendig, da die Viskositäten stark temperaturabhängig sind. Nach dem Abkühlen kann die Verbundschicht entformt werden. Jetzt ist es möglich mit einem Greifer die Mikrostrukturen einzeln von der Trägerschicht abzuheben oder aber das gesamte geprägte Teil kopfüber in eine Aufnahme zu legen, die Teile zu klemmen oder pneumatisch anzusaugen und dann die Trägerfolie abzuziehen (vgl. Abb. 2). Aus diesem Magazin können die vereinzelten Mikrobauteile dann mit Pick und Place-Techniken weiterverarbeitet werden [3].

### 4. Anwendungsbeispiel Mikrozahnrad

Als Beispielstruktur wurde ein gestuftes Zahnrad gewählt, das von einem LIGA-Formeinsatz abgeformt wurde. Als Materialkombination für die Verbundfolie wurde Polyoxymethylen (POM) als Funktionsmaterial und Cellulose Acetat (AC) als Trägermaterial gewählt. Die Gesamthöhe beträgt 500µm (350µm+150µm), der Durchmesser 700µm. Die Trennung des POM-Bauteils von der AC-Trägerschicht erfolgte durch einfaches mechanisches Abscheren. Zusätzliche Lösungsmittel oder Ätzschritte wurden nicht benötigt. Die Oberfläche und die Seitenflächen haben die vom Formeinsatz gegebene LIGA-Qualität. Die Unterseite weist eine leicht konvexe, aber glatte Oberfläche auf, was durch das leichte Fliessen der Trägerschicht bedingt ist [5].



**Abb. 3:** POM-Zahnrad nach dem Abheben von der Trägerschicht. Oberseite (gestuft) und Unterseite weisen glatte Flächen auf.

### Literatur

- [1] Begemann, M., Ehrfeld, W. Michel, F., Weber, L., Berg, U., "Preadjusted Assembly Magazines", in "Proc. Microsystem Technologies", Potsdam, 1998, 676-678
- [2] Kukla, C.G., Hannenheim, W., Loibl H., "Manufacturing of Micro Parts by Micro Injection Moulding", in "Proc. Microsystem Technologies", Potsdam, 1998, 337-342
- [3] Müller, K.D., Bacher, W., Heckele, M., "Flexible Integration of Nonsilicon Microstructure on Microelectronic Circuits, in "Proceedings MEMS 98", Heidelberg, 263-267
- [4] Heckele, M., Müller, K.D., Bacher, W., "Microstructured Plastic Foils Produced by Hot Embossing", in "Proc. HARMST 99", Kisarazu, 1999, 84-85
- [5] Müller, K.D., Bacher, W., Heckele, M., "3D-Diced Microcomponents Fabricated by Multi-Layer Hot-Embossing", in "Proc. MME", Orsay, 1999, 25-27

# Werkstoffe und Abformverfahren für polymere, metallische und keramische Mikrobauteile

W. Bauer, D. Göhring, R. Knitter, V. Piotter

Institut für Materialforschung III

## Zusammenfassung

Unter den zahlreichen Abformverfahren in der Mikrofertigung nimmt die Spritzgießtechnologie eine sehr wichtige Stellung ein. Dies gilt nicht nur bezüglich der ausgesprochen guten Serientauglichkeit, sondern auch aufgrund einer hohen Anzahl von Sondervarianten und einer beachtlichen Materialpalette. Letzteres zeigt sich u.a. in der Entwicklung des Mikro-Pulverspritzgießens, mit dem metallische und keramische Mikrokomponenten hergestellt werden können.

## 1. Mikrospritzgießen

Eines der vielseitigsten Abformverfahren für die Mikrotechnik stellt das Mikrospritzgießen als Variante der industriell weitverbreiteten Spritzgießtechnologie dar. Dies gilt nicht nur im Hinblick auf die außerordentlich gute Eignung für die Großserienproduktion, welche dem angestrebten breiten Marktzugang mikrotechnischer Produkte zugute kommt. Vielmehr lassen sich aus der Basistechnologie eine Reihe von Sonderformen ableiten,

die in der makroskopischen Fertigung meist schon eingeführt sind, in der Mikroabformung aber erst am Anfang ihrer Entwicklung stehen. Den speziellen Anforderungen der Mikrotechnik wird durch Werkzeuganpassungen, wie z. B. Evakuierbarkeit und variotherme Prozessführung, Rechnung getragen. Nicht weniger bedeutend ist die umfangreiche Materialpalette, die ausgehend von Thermoplasten über Reaktionsharze, Composites bis hin zu Metallen und Keramiken reicht. Die prozesstechnische wie materialseitige Vielfäl-

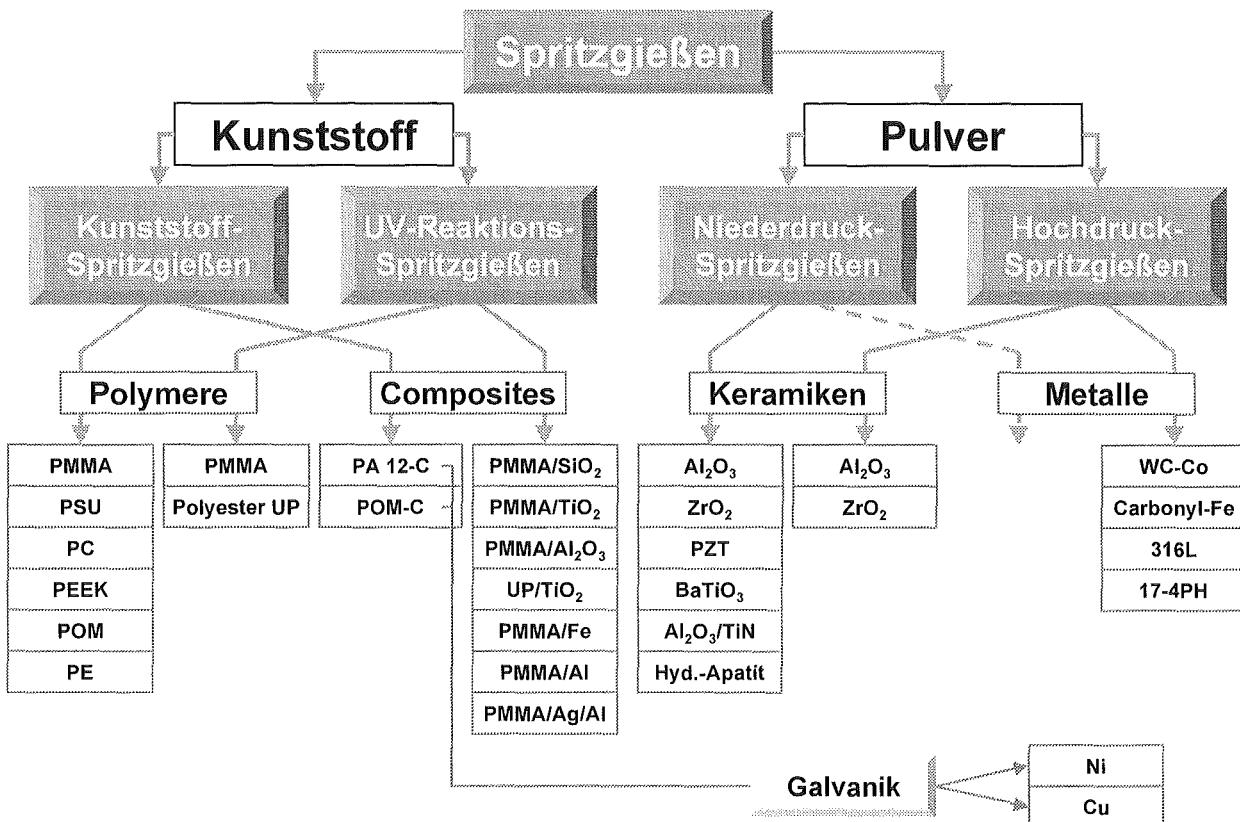


Abb. 1: „Stammbaum“ der Mikrospritzgießtechnik mit den im Forschungszentrum Karlsruhe etablierten Materialien.

tigkeit der im Forschungszentrum Karlsruhe etablierten Spritzgießtechnologie ist in Abb. 1 dargestellt.

### 1.1 Kunststoff-Spritzgießen

Das Kunststoff-Spritzgießen von Mikrobauteilen stellt eine Variante des klassischen thermoplastischen Spritzgießens dar, bei der kommerziell erhältliche Polymere verarbeitet werden. Eine Besonderheit sind dabei rußgefüllte, elektrisch leitfähige Kunststoffe, die als verlorene Ausgangsformen für eine galvanische Replikation dienen [1]. Eine andere Entwicklung des Forschungszentrums Karlsruhe stellt das UV-Reaktionsspritzgießen dar, welches mit lichthärtenden Harzen arbeitet. Dieses Verfahren eignet sich besonders zur Verarbeitung von Composites, bei denen eine Anpassung der optischen und thermomechanischen Eigenschaften durch die Beimengung von anorganischen Füllmaterialien erzielt wird [2].

Weitere Beispiele für das Spritzgießen von polymeren Materialien stellen das Einlegespritzgießen sowie das Mehrkomponenten-Spritzgießen dar. Diese Verfahren befinden sich aber noch in einem frühen Entwicklungsstadium, so dass ihr Anwendungspotential für die Mikrotechnik noch nicht definitiv angegeben werden kann.

### 1.2 Pulver-Spritzgießen

Für viele Anwendungsfälle werden Materialien mit einem Eigenschaftsprofil benötigt, das von polymeren Werkstoffen nicht bereitgestellt werden kann. Dies gilt insbesondere dann, wenn hohe mechanische Festigkeit, thermische Bestän-

digkeit, elektrische Leitfähigkeit oder auch sensorische und aktorische Eigenschaften gefordert werden. Abhilfe bietet hier das Mikro-Pulverspritzgießen, welches aus der konventionellen pulvermetallurgischen Formgebung übernommen wurde und prinzipiell in zwei Varianten unterschieden werden kann: das Niederdruck- bzw. Hochdruck-Pulverspritzgießen. Beide Varianten beruhen auf der Formgebung eines Pulver/Binder Gemisches durch Spritzgießen mit anschließender Entbinderung und Sinterung. Die Unterschiede der beiden Varianten liegen vor allem in den verwendeten Bindersystemen: während beim Niederdruck-Spritzgießen in der Regel Wachse verwendet werden, so handelt es sich beim Hochdruck-Pulverspritzgießen um polymere Bindersysteme. Die Einarbeitung des Pulvers in den Binder erfordert beim Niederdruck-Spritzgießen einen deutlich geringeren Aufwand als beim Hochdruck-Spritzgießen, weshalb beim Niederdruck-Spritzgießen von keramischen Bauteilen bereits auf eine umfangreichere Materialpalette zurückgegriffen werden kann [3]. Diesem Vorteil steht allerdings eine geringere Festigkeit des Feedstocks gegenüber, die hier zu Einschränkungen bei der Entformbarkeit führen kann. Beim Hochdruck-Spritzgießen werden z.Z. sowohl bei den Keramiken als auch bei den Metallen kommerzielle Feedstocks (z.B. Catamold® der Fa. BASF) verarbeitet. Da die Abformung von Mikrobauteilen jedoch die Verwendung von feinskaligen Pulvern erfordert, die in kommerziellen Metall-Feedstocks zumeist nicht verfügbar sind, besteht außerdem die Möglichkeit, eigene Feedstocks mittels eines Doppelschneckenextruders herzustellen.

### Literatur

- [1] Ruprecht, R. et al., "Abformverfahren für mikrostrukturierte Bauteile aus Kunststoff und Metall", dieser Tagungsband.
- [2] Pfleging, W.; Hanemann, T.; Hoffmann, W., "Lasergestützte Entwicklung von mikrostrukturierten Komponenten und Abformwerkzeugen", dieser Tagungsband.
- [3] Ritzhaupt-Kleissl, H.-J. et al., "Fertigung keramischer Mikrokomponenten", dieser Tagungsband.

# KomPas: Thermophysikalisches Prüfsystem für Mikrokomponenten

Magnus Rohde

Institut für Materialforschung I

## Zusammenfassung

KomPas ( Kompakte Photothermische / Photoakustische Apparatur ) ist ein Meßsystem, das mit Hilfe von thermischen Wellen thermophysikalische Eigenschaften - wie die Wärmeleitfähigkeit oder thermische Übergangswiderstände - in Dünnschichtsystemen und Mikrokomponenten bestimmen kann. Es kann auch eingesetzt werden zur zerstörungsfreien Prüfung sowie zur Bestimmung der Haftung von dünnen Schichten. Durch seinen kompakten Aufbau ist dieses Messgerät nahezu überall einsatzfähig und kann daher auch vor Ort zur Qualitätsprüfung eingesetzt werden.

## 1. Einleitung

Meß- und Prüfverfahren zur Kennwertermittlung und zerstörungsfreien Prüfung nehmen in der Dünnschicht- und Mikrosystemtechnik unter dem besonderen Aspekt der Qualitätsprüfung und – Sicherung einen immer bedeutender werdenden Stellenwert ein. Photothermische Verfahren können ergänzend zu optischen Inspektionstechniken zusätzliche Informationen liefern, ohne die oft empfindlichen Strukturen oder Schichtsysteme zu beeinträchtigen oder in ihrer Funktion zu stören.

## 2. Das Messprinzip

Photothermische Verfahren erzeugen durch Einstrahlung von intensitätsmoduliertem Licht auf die Probenoberfläche in der zu prüfenden Probe thermische Wellen, deren Laufzeitverhalten nachfolgend detektiert wird ( Abb. 1). Thermische Wellen sind räumlich und zeitlich periodische Temperaturosillationen. Sie unterliegen einer starken Dämpfung, die ihre Reichweite begrenzt. Die Eindringtiefe wird dabei von der Modulationsfrequenz des eingestrahlten Lichtes und der Wärmeleitfähigkeit des Materials bestimmt [1].

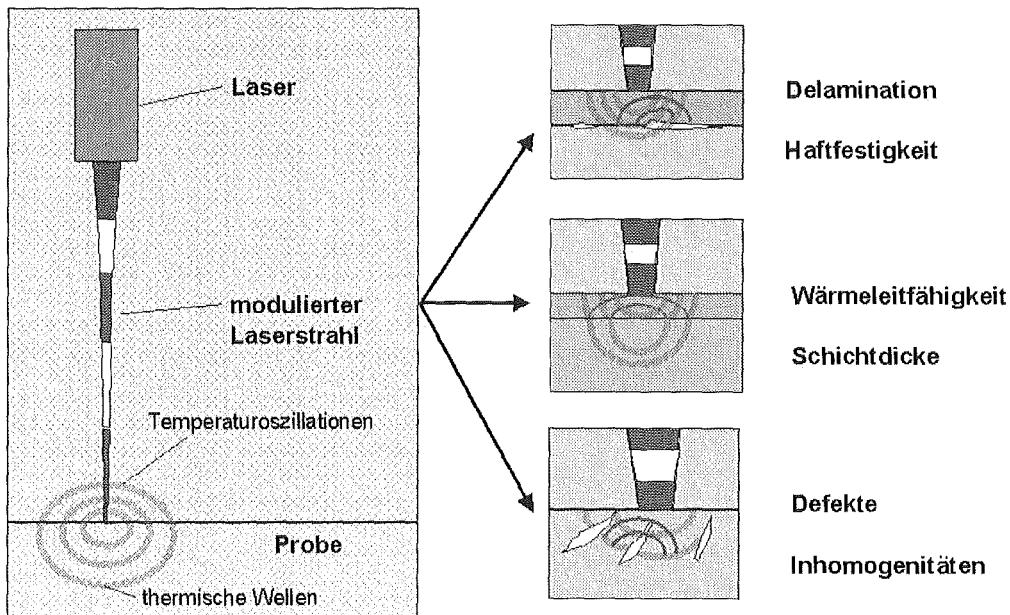


Abb. 1: Das photothermische Messprinzip und seine Anwendungen

In Werkstoffen mit hoher Wärmeleitfähigkeit, wie Diamant, Kupfer oder Aluminium, kann die Eindringtiefe bei niedrigen Modulationsfrequenzen bis zu einigen Millimetern betragen, während sie bei gleicher Frequenz in Gläsern oder Polymerwerkstoffen auf Millimeterbruchteile begrenzt ist.

Wird die Modulationsfrequenz erhöht, so nimmt die Eindringtiefe ab. Auf diese Weise können durch das Durchstimmen der Frequenz mit der Meßsonde „thermische Welle“ Tiefenprofile erstellt werden. Da thermische Wellen an Defekten oder Grenzflächen gestreut werden, wobei sich deren Amplitude und Laufzeitverhalten (Phasenlage) verändern, ist es möglich, mit der entsprechenden Einstellung der Modulationsfrequenz unter die Oberfläche zu sehen und Schichtfehler und Delaminationen (s. Abb. 1), Poren oder Einschlüsse zu erkennen, die sich einer optischen Inspektion entziehen würden.

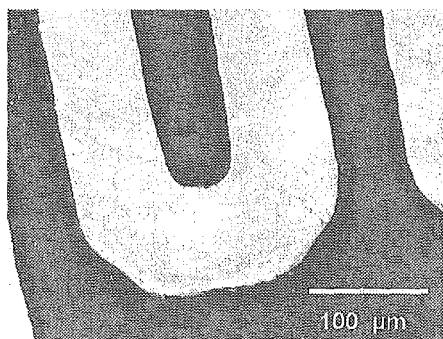
Durch Fokussierung des eingestrahlten Lichtes sind Messungen mit flexibler Ortsauflösung bis in den Mikrometerbereich möglich, da nur der beheizte Bereich zum photothermischen Meßsignal beiträgt [2].

### 3. Anwendungen und Einsatzgebiete

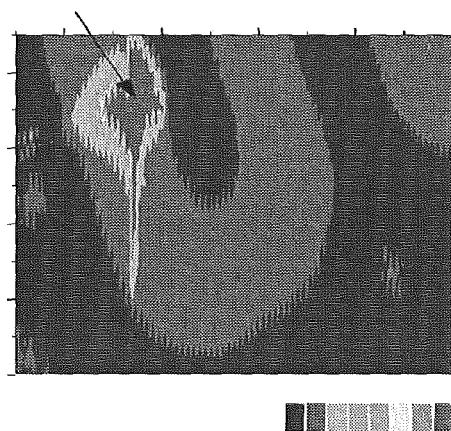
Photothermische Methoden arbeiten zerstörungsfrei und bei geeigneter Wahl der Detektionsmethode auch berührungslos [2]. Ein Anwendungsbereich ist daher die zerstörungsfreie Materialprüfung an dünnen Schichten oder Folien, Mehrlagensystemen und kleinen Strukturen der Mikrosystemtechnik. Schichtfehler wie Risse, Poren oder auch Ablösungen der Schicht vom Substrat oder auch Unterschiede in der Haftfestigkeit können detektiert werden (Abb. 2) [3].

Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Messung der Wärmeleitfähigkeit in dünnen Filmen oder auch Folien, wo herkömmliche Methoden zur Bestimmung der Wärmetransporteigenschaften versagen. Thermische Kontaktwiderstände von Schichten auf Substraten oder auch zwischen einzelnen Lagen in Mehrlagensystemen lassen sich durch die Aufnahme von thermischen Tiefenprofilen quantitativ ermitteln [4].

Das Meßsystem KomPas erleichtert durch seinen kompakten Aufbau photothermische Messungen vor Ort und kann auch innerhalb einer Prozeßlinie zur Qualitätsprüfung und eingesetzt werden.



REM-Bild



Photothermische Abbildung

Abb. 2: Rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahme einer Leiterbahn (links) und entsprechende photothermische Abbildung (rechts), die einen Haftungsfehler (Pfeil) sichtbar macht.

### Literatur

- [1] Rohde M. "Photoacoustic characterization of thermal transport properties in thin films and microstructures", *Thin Solid Films* 238 (1994) 199 - 206
- [2] Rohde M. "Mikrostrukturen und Schichtsysteme prüfen", *Materialprüfung* 38 (1996) 241 - 245
- [3] Rohde M. "Nondestructive testing of materials on the micron scale with photothermal methods", *NEXUS Research News* 2 (1999) 13 - 14
- [4] Rohde M. "Measuring and modelling thermal conductivity in thin films and microstructures", *High Temperatures – High Pressures* 29 (1997) 171 - 176

# Fortschritte in der Mikrozugprüfung

Herbert Schneider, Marco Klotz und Jarir Aktaa

Institut für Materialforschung II

## Zusammenfassung

An der bereits entwickelten Mikrozugprüfmaschine wurden Optimierungsarbeiten vorgenommen, mit denen die Probeneinspannung, die Kraftmessung sowie die Dehnungsmessung verbessert worden sind. Mit der neuen Probeneinspannung ist die Prüfung von Proben mit runden Einspannköpfen wie Drähten oder Fasern möglich. Die Sensitivität der Kraftmessung wurde soweit gesteigert, daß die Festigkeit von Proben mit einem kleinen Querschnitt (ca.  $100 \mu\text{m}^2$ ) hinreichend genau ermittelt werden kann. Schließlich konnten mit der verbesserten Dehnungsmessung dehnungsgesteuerte Zugversuche an Mikroproben erstmals realisiert und wichtige Eigenschaften wie der E-Modul mit geringerer Streuung ermittelt werden.

## 1. Einleitung

Werkstoffe der Mikrotechnik besitzen prinzipiell andere Eigenschaften als die im Makrobereich eingesetzten gleicher chemischer Zusammensetzung. Dies liegt hauptsächlich daran, daß aufgrund des Herstellungsprozesses (z.B. LIGA) ein anderes Gefüge als bei den meist schmelzmetallurgisch hergestellten Materialien sich einstellt. Hinzu kommt, daß mit der Miniaturisierung gestiegenem Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis die Volumeneigenschaften von Oberflächeneigenschaften beeinflußt werden können. Da der zuverlässige und somit qualitätssichere Einsatz von Werkstoffen der Mikrotechnik die hinreichend genaue Kenntnis ihrer Eigenschaften voraussetzt, ist die Mikrowerkstoffprüfung für eine langfristig erfolgreiche Mikrotechnik eine unabdenkbare Technologie. Die Entwicklung dieser Technologie ist daher ein wichtiger Bestandteil der Materialforschung am Forschungszentrum Karlsruhe.

Mit der Mikrozugprüfvorrichtung, die an unserem Institut bis zur Markteinführung<sup>1</sup> entwickelt worden ist, war der Zugang zu wichtigen Eigenschaften der Steifigkeit, der Festigkeit und der Duktilität mikrostrukturierter Materialien erstmals geschaffen worden [1]. Um den Einsatz Bereich dieser Vorrichtung zu erweitern, wurden im letzten Jahr einige Verbesserungen realisiert, auf die im folgenden näher eingegangen wird.

## 2. Verbesserung der Probeneinspannung

Die Probeneinspannung war ursprünglich für die Prüfung von flachen Mikroproben konzipiert. Dabei wird die Probe mit Hilfe einer Lippenkonstruk-

tion - durch Drücken der Lippen gegen die Probenköpfe - auf einer Seite mechanisch und anschließend auf der anderen Seite hydraulisch eingespannt [2]. In der bisherigen Ausführung war eine der zwei Lippen konstruktiv in der Kraftmeßdose fest integriert (s. Abb. 1-a). Mit einem in der Kraftmeßdose sich befindlichen Hydraulikkolben wurde die Lippe gegen den Probenkopf gebogen und somit festgehalten. Dies hat bei flachen Proben sehr gut funktioniert. Bei runden Proben wie Drähten, Fasern ...etc. war ein festes Drücken der Lippe notwendig, um eine zum Festhalten hinreichend große Kontaktfläche zwischen Lippe und Probe zu erzeugen. Durch diese Pressung hinterließen Proben aus harten Materialien Eindrücke in dem relativ weichen Material<sup>2</sup> der Lippe, wodurch die Lippe beschädigt wurde. Mit der Zeit wurde die Lippe unbrauchbar, was das Austauschen der Kraftmeßdose bedingte.

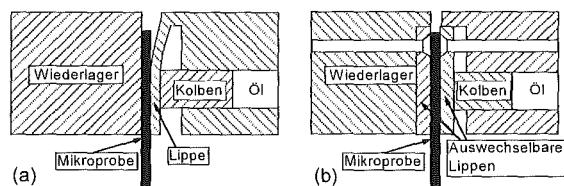


Abb. 1: Vergleich zwischen alter (a) und neuer (b) Probeneinspannung in der Kraftmeßdose.

Aus diesem Grund wurde eine neue Konstruktion entwickelt, bei der zwei auswechselbare in der Kraftmeßdose montierte Lippen vorgesehen sind (s. Abb. 1-b). Der Vorteil dabei, je nachdem wie hart das zu untersuchende Material ist, können die passenden verschleissarmen Lippen eingesetzt werden. Durch die neue Führung der Ein-

<sup>1</sup> Die Maschine wird seit 1999 von unserem Lizenznehmer Firma WAZAU in Berlin vermarktet.

<sup>2</sup> eine spezielle Aluminiumlegierung, die für die Herstellung von Kraftmeßdosen eingesetzt wird.

spannlippe ist darüber hinaus eine große Kontaktfläche zwischen Lippe und Probenkopf mit kleinen Preßkräften der Kolben möglich. Durch die Trennung dieser Lippe von der Kraftmeßdose lässt sich die Führungsbohrung für den Andrückkolben durchgehend präziser herstellen und somit ein besseres Abdichten des Spalts zwischen Kolben und Bohrung erzielen.

### 3. Verbesserung der Kraftmessung

Um in der Mik zugprüfvorrichtung die Festigkeit von Proben mit sehr kleinen Querschnitten (ca.  $100 \mu\text{m}^2$ ) hinreichend genau messen zu können, wurde eine neue Kraftmeßdose mit der oben beschriebenen Modifikation der Probeneinspannung sowie einem Meßbereich von max. 10 N konzipiert. Die neue Kraftmeßdose ist der gleichen Bauart wie die bisherige 100 N-Kraftmeßdose. Sie wird bei umfangreichen Untersuchungen an unbeschichteten sowie beschichteten Kohlefasern eingesetzt, die im Rahmen eines Sonderforschungsbereichs der Universität Karlsruhe entwickelt werden.

### 4. Verbesserung der Dehnungsmessung

Zur Messung der Dehnung wird ein Wegmeßsystem eingesetzt, welches außerhalb des Lastrahmens angebracht ist. Mit dem System wird die Verlängerung und somit der Dehnung im Gleichmaßbereich der zu untersuchenden Proben erfaßt. Das bisherige System (UDM-5000 der Firma Zimmermann) benutzt ein digitales Linienabtastverfahren auf Infrarotbasis mit einer Auflösung von  $0,5 \mu\text{m}$  bei einer 5000 Pixelmatrix. Die mittels FE-Rechnungen optimierten Markierungen an der Mikroprobe sind die Bezugskanten, die das Linienabtastsystem zur Detektion der während des Experiments auftretenden Dehnungen benutzt (s. Abb. 2).

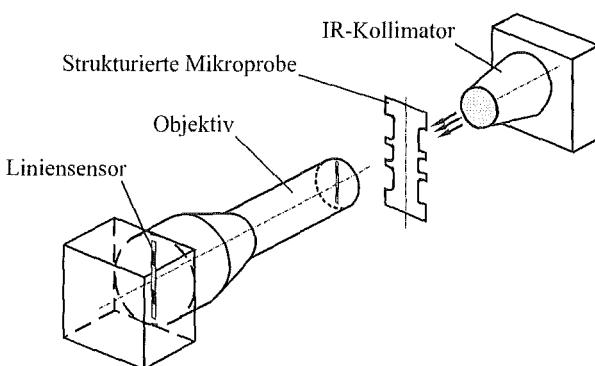


Abb. 2: Das berührungslose optische Meßsystem zur Erfassung der Probenverlängerung im Gleichmaßbereich

Der Nachteil des UDM-5000 ist die relativ niedrige Meßfrequenz, mit der das Meßsignal ohne weiteres ungeeignet zum Steuern der Prüfmaschine ist. D.h. es können damit keine Dehnungsgesteuerte Versuche durchgeführt werden. Um diesen Nachteil zu beheben und weiterhin die Meßgenauigkeit zu erhöhen, wurde das Nachfolgermodell (UDM-7000 der Firma ITS) angeschafft. Das neue System wurde vom Hersteller mit entsprechender Optik und Software im Auftrag soweit modifiziert, daß die Steuerung der Prüfmaschine, sowie eine Auflösung von  $0,1 \mu\text{m}$  damit möglich sind. Auch die Justierung und die Bedienung sind dank der mitgelieferten Software erheblich einfacher geworden.

Mit der verbesserten Dehnungsmessung konnten dehnungsgesteuerte Versuche an Mikroproben erstmals realisiert werden (s. Abb. 3). Darüber hinaus werden damit kleine Änderungen in der Dehnung mit wesentlich kleinerer Streuung erfaßt. Solche Änderungen treten bei Entlastungen auf, die im Zugversuch zur Ermittlung des E-Moduls eingeführt werden. Somit konnte die Genauigkeit der E-Modul-Bestimmung mit dem UDM-7000 entsprechend verbessert werden.

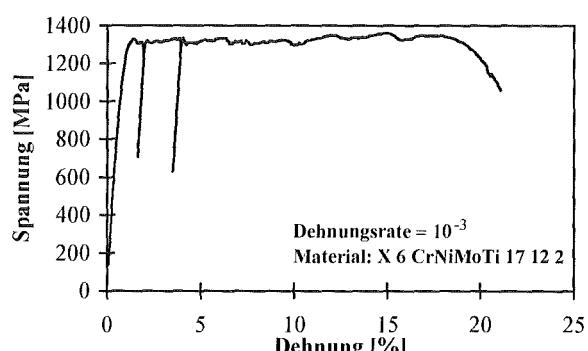


Abb. 3: Mit dem UDM-7000 durchgeföhrter Dehnungsgesteuerter Zugkurven mit Entlastungen zur Bestimmung des E-Moduls.

### Literatur

- [1] A. Ilzhöfer: "Zugvorrichtung zur Untersuchung mikrostrukturierter Proben", Dissertation, Universität Karlsruhe, 1998
- [2] H. Schneider, A. Ilzhöfer & J. Aktaa, "Mik zugprüfung an Werkstoffen der Mikrosystemtechnik," in Proc. des 12. Symposiums der Mikrosystemtechnik (eds. K. Kempfer & J. Hauselt), Band 1, Werkstoffwoche in München, 1999

# Komponenten zum Aufbau modularer Mikrofertigungssysteme

Ulrich Gengenbach <sup>1)</sup>, Andreas Hofmann <sup>1)</sup>, Bernd Köhler <sup>1)</sup>, Elmar Just <sup>2)</sup>, Manfred Kohl <sup>2)</sup>,  
Franz Eberle <sup>1)</sup>, Friedhelm Engelhardt <sup>1)</sup>, Rudolf Scharnowell <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Angewandte Informatik  
<sup>2)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Das Forschungszentrum Karlsruhe beschäftigt sich mit der Entwicklung von Mikromontage-technologien für hybride Mikrosysteme. Die Arbeiten orientieren sich dabei an industriellen Fra-gestellungen und an der Montage der hauseigenen Prototypen. Aufbauend auf den bis-herigen Erfahrungen bei der Entwicklung und Realisierung eines flexiblen Montagesystems (MIMOSE) wird die Strategie verfolgt, modulare Systeme zu schaffen. Schwerpunkte der Arbeit sind dabei Teilezuführ- und Materialflusssysteme, Greifer- und Greiferwechselsysteme sowie digitale Bildverarbeitungstechniken für Mikrofertigungssysteme.

## 1. Einleitung

In Klein- und Mittelbetrieben werden Mikrosysteme oft bei kleinen und mittleren Stückzahlen manuell montiert, da sich auf Grund der geringen Produktionsmenge automatisierte Montagesysteme nicht amortisieren. Ein modularer Aufbau von Montagemaschinen senkt hier die Hürde für Investitionen in automatisierte Montagesysteme, da damit eine Wiederverwendbarkeit der Geräte für andere Mikroprodukte gewährleistet ist. Neben dem Handhabungsgerät und der Zellensteuerung sind wesentliche Module eines Mikromontage-systems: Greifersysteme, Teilezuführungs-, Magazinersysteme und digitale Bildverarbeitungs-systeme. Wesentliche Hardwareschnittstellen für einen modularen Maschinenaufbau sind Material-flussschnittstellen und die Schnittstelle Greifer-/Handhabungsgerät. Im Idealfall steht ein Bau-kasten von Modulen mit standardisierten Schnitt-stellen zur Verfügung, aus dem die Module zum Aufbau eines Montagesystems entnommen werden können. Im Sinne eines verallgemeinerten „Plug and Play“-Konzepts können diese Module einfach zusammengesteckt werden und ergeben mit geringem Konfigurationsaufwand ein funktions-fähiges Montagesystem. Im Folgenden wer-den exemplarisch die Module Greifersystem und Digitale Bildverarbeitung näher betrachtet.

## 2. Greifersysteme

Überwiegend kommen bei der Montage von Mikrosystemen mechanische Greifer und Sauggreifer zum Einsatz. Sie sind einerseits in der SMD-Bestückungstechnik andererseits in der fein-werktechnischen Montage etabliert. Es ist davon auszugehen, dass auch in der Montage hybrider Mikrosysteme ein Großteil der Montageaufgaben mit diesen beiden Greifertypen gelöst werden

kann. Daher konzentrieren sich die Arbeiten auf die Weiterentwicklung dieser beiden Greifertypen. Daneben werden Greifer, welche auf unkonven-tionellen Greifprinzipien wie z.B. Adhäsion beruhen, untersucht. Diese Greifer sind insbesondere für die Handhabung von fragilen Mikrokomponenten (Folien- bzw. Membranstrukturen, optische Kom-ponenten, etc.) geeignet.

### 2.1 Sauggreifer

Bei den gängigen Sauggreifern handelt es sich i.A. um einfache Saugpipetten. Zur Montage emp-findlicher Mikrokomponenten (z.B. optische Linsen in Polymerstrukturen) ist eine Überwachung der Montagekraft erforderlich. Dazu wurde ein Proto-typ eines Sauggreifers mit integrierter dreiachsiger Kraftsensorik entwickelt. Diese Kraftsensorik er-möglicht die Erfassung der im Fügeprozess auf das Bauteil wirkenden Kräfte. Die Maschinенsteuerung berechnet aus diesen Signalen Betrag und Richtung der auf den Greifer wirkenden Kraft. Es können somit während des Montagevorgangs Korrekturbefehle für das Handhabungssystem generiert werden.

### 2.2 Zweifingergreifer mit Formgedächtnis-aktor

Neben klassischen pneumatischen Aktoren wer-den für Zweifingergreifer auch Formgedächtnis-Aktoren betrachtet, die sich durch Reinraum- und Vakuumtauglichkeit auszeichnen. Als weitere Vor-teile ergeben sich reibungsfreie Bewegungen mit hoher maximaler Kraft und großem Hub bei gerin-ger Baugröße. Abb. 1 zeigt einen Prototyp eines Greifers aus einer Nickel-Titan-Legierung (NiTi) mit den Abmessungen 2x3,9x0,1 mm<sup>3</sup>. Er besteht aus einer mäanderförmigen Zugfeder (Antrieb 1) zum Schließen des Greifers und bogenförmigen

Festkörpergelenken an den Greiferfingern (Antrieb 2), die den Greifer öffnen. Beide Antriebe werden durch elektrisches Beheizen angesteuert und arbeiten als antagonistisches Paar gegeneinander.

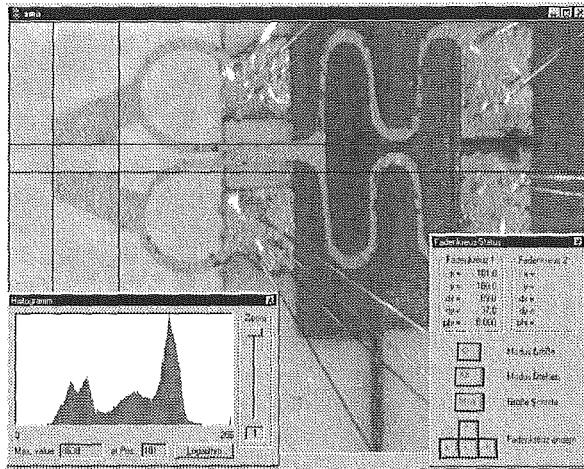


Abb. 1: Überwachung der Backenbewegung eines Mikrogreifers mit Bildverarbeitung.

Der einfache Aufbau des Greifers ermöglicht eine Herstellung in nur zwei Arbeitsschritten: 1. Mikrostrukturierung der NiTi-Folie, z.B. durch Laserschneiden. 2. Montage dieses Aktors in vorausgelenktem Zustand auf einen Träger, z.B. durch ein Klebeverfahren. Der in Abb. 1 gezeigte Greifer erreicht eine maximale Greifkraft von 17 mN und einen maximalen Hub der Greiferfinger von 180 µm. Die Reaktionszeit beträgt ca. 30 ms bei 25 mW Ansteuerleistung.

### 2.3 Adhäsionsgreifer

Für empfindliche Bauteile mit ebenen Oberflächen, die durch mechanische oder Sauggreifer beschädigt werden würden, eignet sich das Adhäsionsgreifprinzip zum "schonenden, gefühlvollen" Greifen. Das Adhäsionsgreifprinzip basiert auf der präzisen Dosierung eines Adhäsivs auf der Greiferfläche. Zwischen Greiferfläche und Teileoberfläche bildet sich eine Flüssigkeitskapillare, die einerseits zum Aufbringen der Greifkraft dient, andererseits über die Minimierung der freien Oberfläche zu einer Zentrierung des Bauteils an der Greiferfläche führt. Zum Ablegen muss das Adhäsiv um die Greifkraft herabzusetzen mit geeigneten Verfahren wieder entfernt werden. Es wurde ein Prototyp aufgebaut bei dem das Adhäsiv mit der AMANDA-Mikropumpe des IMT dosiert wird. Die Entfernung des Adhäsivs erfolgt durch Verdampfen. Durch Einsatz der elektrisch leitenden Keramik des IMF III wurde es möglich die Greiferfläche als Heizelement auszubilden und damit den Wärmetübergang in das Adhäsiv zu optimieren. Untersuchungen des Greif- und Selbstzentrierungseffekts ergaben eine Wiederholgenauigkeit <5 µm.

### 3. Digitale Bildverarbeitungstechniken

Das Bildverarbeitungssystem DIPLOM (Digital Image Processing Library for Microstructures) ist ein System, das die speziellen Bedingungen bei der optischen Vermessung von Mikrostrukturen (Schärfentiefe, Beleuchtung, Fokussierung, etc.) berücksichtigt. Die Vermessung von Strukturmerkmalen (s. Abb. 1) oder die Suche nach vorgegebenen Mustern sind nur zwei von zahlreichen implementierten DIPLOM-Funktionen. Autofokus, die Bestimmung von speziellen Markenzentren, die Optimierung des Bildkontrasts und die Bildrekonstruktion (s. Abb. 2) sind Funktionen, die speziell auf die Anforderungen bei Mikrostrukturen angepasst sind.

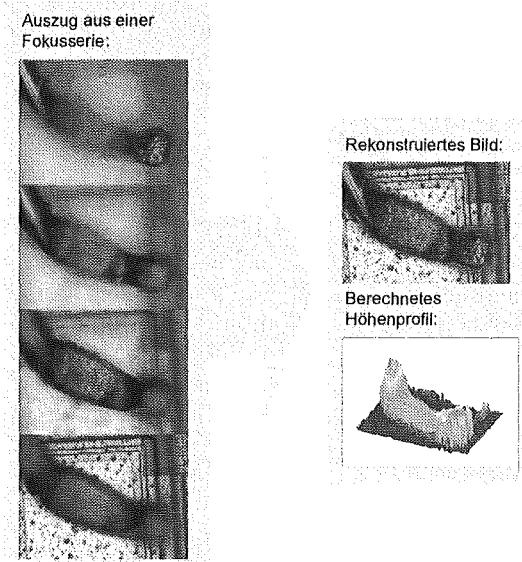


Abb. 2: Bildrekonstruktion aus einer Fokusserie.

Detaillierte Informationen über das DIPLOM-System sind im WWW unter <http://www.iai.fzk.de/BV-Demo/> verfügbar. Die implementierten Bildverarbeitungsfunktionen sind auch als C++-Klassenbibliothek verfügbar. Somit kann das DIPLOM-System als Modul direkt in die Steuerprogramme von Montage- und Fertigungssystemen integriert werden. Bei der Heißprägeanlage HEX03 der Jenoptik Mikrotechnik GmbH (<http://www.jo-mikrotechnik.com>) ist diese Integration bereits realisiert.

### Danksagung

Wir wollen uns bei folgenden Kolleginnen und Kollegen für Ihre Unterstützung bedanken: Heino Besser, Ernst Fischer, Richard Fodor, Edgar Hansjosten, Dr. Wilhelm Pfleging, Silke Pschibl, Dr. Zeno Rummler, Thomas Schaller mit Team, Dr. Volker Winter und bei den Werkstattmannschaften des IMB und IMT.

# Inertialnavigation mit Komponenten der Mikrosystemtechnik

Oliver Krömer

Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik

## Zusammenfassung

Im Zuge des steigenden Bedarfs einer genauen Standortbestimmung bzw. Positionierung mobiler Systeme werden in hohem Maße Sensormodule für die Ortung und Navigation benötigt. Sie erfassen den Bewegungsablauf und geben den Ort relativ oder (gestützt durch globale bzw. lokale Referenzsysteme) absolut an.

Heute geschieht eine zuverlässige und exakte Positions- und Lagebestimmung durch präzise Inertialnavigationseinheiten aus teuren, feinwerktechnischen oder optischen Bewegungssensoren, die einige 1.000 bis mehrere 100.000 DM kosten und/oder einem Satellitenortungssystem (z.B. GPS). Eine solche Technik ist gegenwärtig ausschließlich in teuren High-Tech-Großgeräten rentabel einsetzbar.

Die Mikrosystemtechnik ist heute in der Lage, äußerst kompakte Bewegungssensoren mikromechanisch mit guten Eigenschaften preiswert zu fertigen, und bietet damit die Möglichkeit, neuartige, kostengünstige und kompakte Inertialnavigationssysteme zu realisieren. Im Rahmen des BMBF-Projektes KOMET (Kompakte Meßmodule für die Inertialtechnik) wird dieses Ziel verfolgt. Die Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (HPE) wird als Projekt-partner ihr Know-How in der präzisen, elektronischen Auswertung mikromechanischer Sensor-elemente beisteuern.

## 1. Einleitung

Ein Inertialnavigationssystem erfaßt den Bewegungsverlauf über die Messung der auf Probemassen wirkenden Trägheitskräfte, also über die Messung von Beschleunigung und Drehrate.

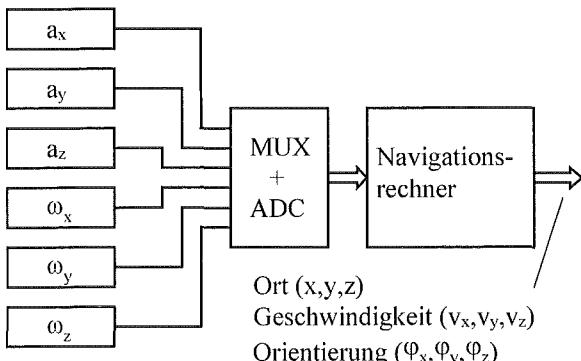


Abb. 1: Inertialnavigationssystem

Um alle möglichen Bewegungsformen erfassen zu können, besitzt ein Inertialnavigationssystem je drei orthogonal angeordnete Beschleunigungs- und Drehratensensoren ( $a_x, a_y, a_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ ) (Abb.1). Ein Navigationsrechner berechnet über die zeitliche Integration der Beschleunigungs- und Drehratensignale die Geschwindigkeit, den Ort und die Orientierung des Systems. Die erreichbare Offsetstabilität und Auflösung der eingesetzten Sensoren ist bei Navigationsanwendungen von

entscheidender Bedeutung. Da die Bewegungssensoren oft örtlich getrennt vom Navigationsrechner vorliegen, erfolgt die Übertragung der Sensordaten in digitalisierter, gemultiplexer Form über eine genormte schnelle serielle Schnittstelle. Dies erhöht die Störsicherheit und minimiert den Aufwand bei der Vernetzung der Systemkomponenten.

## 2. Beschleunigungssensoren

Ein mikromechanisches Sensorelement für Beschleunigungsmessungen enthält eine zwischen zwei Gegenelektroden beweglich aufgehängte Probemasse. Die Probemasse bildet zusammen mit den Gegenelektroden einen Differentialkondensator. Eine Beschleunigung des Elementes führt zu einer Auslenkung der Probemasse und so zu einer Änderung der Sensorkapazitäten.

Die Auslenkung der Probemasse wird von der Sensorelektronik kapazitiv erfaßt und über elektrostatische Kräfte kompensiert. Die Höhe der Spannungen, die dazu auf die Sensorelektroden gegeben werden müssen, sind ein Maß für die Beschleunigung. Dieses Kraftrückkopplungsverfahren gestattet die Auswertung des Sensorelementes mit hoher Linearität, großer Auflösung und guter Offsetstabilität [3].

Im Forschungszentrum Karlsruhe gefertigte Beschleunigungssensorsysteme erreichen derzeit folgende charakteristische Daten:

- Meßbereich:  $\pm 5$  g
- Auflösung:  $1\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Bandbreite: 0...1200 Hz (3dB)
- Linearität: 0,5 % ( $\pm 1$ g)
- Offsetdrift:  $2 \cdot 10^{-4}$  g/K

### 3. Drehratensensoren

Mikromechanische Drehratensensoren messen die Corioliskraft. Die Corioliskraft wirkt in einem rotierenden System auf translatorisch bewegte Massen [1], [2]:

$$\vec{F}_{\text{Coriolis}} = 2 \cdot m \cdot \vec{\omega} \times \vec{v}$$

Dazu wird eine Probemasse beweglich an einer Federstruktur aufgehängt und über Antriebselektroden elektrostatisch zur Oszillation angeregt (Abb. 2). Die Anregung erfolgt auf der Eigenresonanz des Masse-Feder-Systems, um möglichst große Auslenkungen zu erzielen. Die Sensorelektronik synchronisiert die Anregungsfrequenz mit der Eigenresonanz der Mikromechanik und stabilisiert die Amplitude der Oszillation.

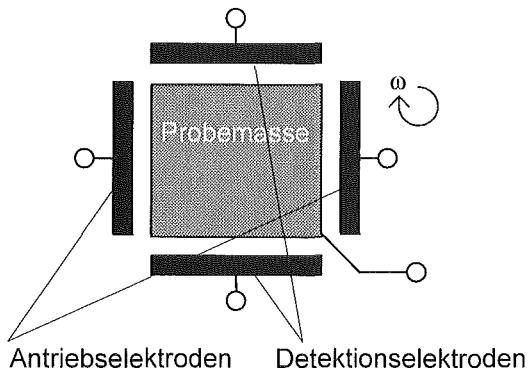


Abb. 2: Prinzipskizze eines Sensorelementes zur Drehratemessung

Die Probemasse wird von der Corioliskraft senkrecht zur Oszillationsrichtung ausgelenkt. Über Detektionselektroden wird die Auslenkung von der Sensorelektronik kapazitiv erfaßt und in eine zur Drehrate proportionale Spannung gewandelt.

### 4. Ausblick

Im Rahmen des BMBF-Projektes KOMET wird die Inertialnavigation mit Komponenten der Mikrosystemtechnik evaluiert. Da bei der Trägheitsna-

vigation die Sensordaten über die Zeit integriert werden müssen, akkumulieren auch die Meßfehler. Abhängig von den Randbedingungen steigt der Ortsfehler quadratisch oder sogar kubisch mit der Navigationszeit an. Vernünftige Ortsgenauigkeiten sind nur bei Navigationszeiten von einigen Sekunden, bestenfalls Minuten zu erwarten.

Das Forschungszentrum Karlsruhe wird als Partner des BMBF-Projektes KOMET seine Sensoren an die speziellen Erfordernisse der Inertialnavigation anpassen und weiter optimieren. Die Projektpartner werden ihren Beitrag im Bereich der Navigationsalgorithmen, der Fertigungstechnik, der Überführung in marktreife Produkte und der Vermarktung leisten.

Anwendungsbereiche einer inertialen Meßeinheit können z.B. sein: medizinische Bewegungsanalyse in der Rehabilitation, Personenüberwachung in der Sicherheitstechnik, Maschinenüberwachung und Handhabungstechnik, Kipp- und Neigungssensorik, Linearantriebe, Transportsysteme und Serviceroboter

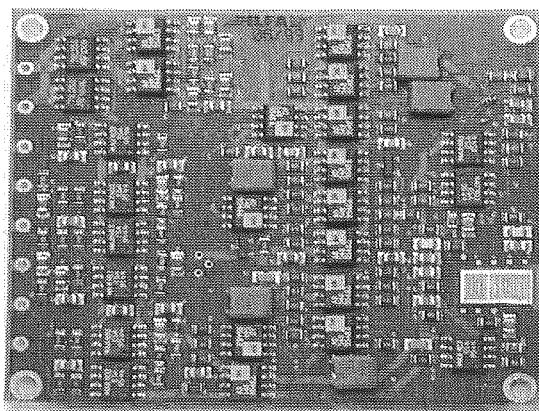


Abb. 3: Inertialsensor zur gleichzeitigen Erfassung von Beschleunigung und Drehrate

### Literatur

- [1] W. Geiger et al., „DAVED - A Micromachined Sensor for Angular Rate“, Symposium Gyro Technology, Stuttgart, 1999, S. 2.1...2.9
- [2] O. Krömer, K. Schumacher, „Mikromechanische Drehratensensoren und ihre elektronische Auswertung“, Frühjahrstagung der Studiengruppe für elektronische Instrumentierung, Bochum, 1999, S. 56...63
- [3] O. Krömer et al., „Intelligentes triaxiales Beschleunigungssensorsystem“, 2. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, Karlsruhe, 1995, S. 75...80

# Analog-digitale ASIC-Realisierung für Mikrosysteme

Sascha Wüstling

Hauptabteilung Prozessdatenverarbeitung und Elektronik

## Zusammenfassung

Um Elektronik für Mikrosysteme optimal zu realisieren, sind sog. *Anwendungsspezifische Integrierte Schaltungen (ASICs)* das Mittel der Wahl. In der *Hauptabteilung Prozessdatenverarbeitung und Elektronik (HPE)* können neuerdings *analog-digitale ASICs* „vor Ort“ entwickelt werden. In diesem Artikel wollen wir zeigen, warum eine solche Möglichkeit für die Mikrosystemtechnik sinnvoll und wichtig ist und welche Besonderheiten diese Form der Elektronikentwicklung aufweist. Abschließend wird ein Beispiel für einen in der HPE entwickelten analog-digitalen ASIC gegeben.

## 1. Wozu analog-digitale ASICs?

Die meisten Mikrosysteme enthalten elektronische Schaltungen, z.B. um Mikrosensoren auszulesen, Mikroaktoren anzusteuern, Regelsysteme zu realisieren, usw.. Mit kommerziell erhältlichen Bauelementen aufgebaut sind die notwendigen elektronischen Baugruppen um ein Vielfaches größer und teurer als z.B. das Sensorelement einer Mikro-„nase“ oder eines Mikrobeschleunigungssensors. Um die Stärken der Mikrosystemtechnik voll nutzen zu können, muss daher auch die Elektronik „mikro“ sein, und *Mikroelektronik* meint heute im Wesentlichen *Integrierte Schaltungen (ICs, „Mikrochips“)* auf Halbleiterbasis. Optimalen Miniaturisierungsgrad erhält man durch den Einsatz *Anwendungsspezifischer Integrierter Schaltungen (ASICs)*. Trotz des Trends zur Digitalisierung sind dabei gerade in Sensorik, Aktorik und Telekommunikation auch Schaltungsteile in Analogtechnik erforderlich. Gemischt analog-digitale ASICs (*mixed-signal ASICs*) werden überwiegend als sogenannte *full-custom-ASICs* realisiert, bei denen im Gegensatz zu anderen ASIC-Arten vollkommen individuelle elektronische Schaltungskonzepte realisiert werden können. Auf diese Weise kann auch ein *System-on-chip (SoC)* verwirklicht werden, bei dem z.B. eine analoge Sensorauswertung mit anschließender Analog/Digital-Wandlung, ein Mikroprozessor, Energie-Management und eine Schnittstelle zur Außenwelt komplett auf einem einzigen Siliziumchip untergebracht sind.

## 2. Wie werden diese ASICs entwickelt?

Die Bezeichnung *full-custom-ASIC* deutet an, dass sämtliche Strukturen auf dem Halbleiterchip kunden- bzw. anwendungsspezifisch entworfen werden. Dies geschieht heutzutage mit komplexen EDA-Computerprogrammen (*Electronic Design Automation*).

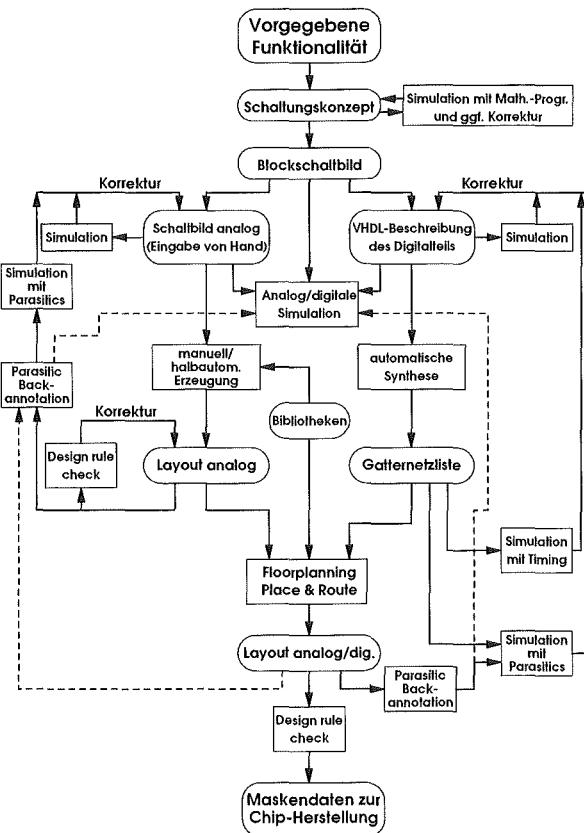


Abb. 1: Schritte bei der Entwicklung eines analog-digitalen ASICs.

Für Integrierte Schaltungen existiert eine Vielzahl von Herstellungsprozessen, die sich in der Integrationsdichte unterscheiden, aber auch in ihrer bevorzugten Eignung für Digital-, Analog-, Hochfrequenzanwendungen, Anwendungen mit geringem Energieverbrauch oder mit höherer Spannungen. Aufgrund der hohen Kosten einer Halbleiter-Fertigungslinie findet die eigentliche Herstellung

der Integrierten Schaltungen bei hochspezialisierten Firmen statt.

Der Entwurf eines full-custom-ASICs erfolgt stets für einen ganz bestimmten solchen Herstellungsprozess. Die Herstellerfirmen stellen dem Entwickler für jeden Prozess besondere Ergänzungen zu der eigentlichen Entwicklungssoftware zur Verfügung. Dies sind vor allem Simulationsmodelle und Daten für die Überprüfung eines Entwurfs auf die Einhaltung bestimmter Entwurfsregeln. Weitere Hilfsmittel sind Bibliotheken mit bereits fertig entwickelten Schaltungsblöcken, die der Entwickler beim Entwurf seines Chips einsetzen kann. Diese Blöcke haben neben der gesparten Entwicklungsarbeiten den Vorzug, dass sie bereits getestet und bewährt sind. Auch für die weitgehend automatisierte Synthese digitaler Schaltungsteile sind solche Bibliotheken vorbereiteter Funktionsblöcke die Grundlage.

Abb. 1 zeigt vereinfacht die Schritte beim Entwurf eines analog-digitalen ASICs. Wegen der hohen Komplexität Integrierter Schaltungen, der hohen Einmalkosten bei der Fertigung (v.a. Kosten der lithographischen Masken) und der fehlenden Möglichkeit, Entwurfsfehler im Nachhinein zu korrigieren, kommt der automatisierten *Verifikation* eines Entwurfs besondere Bedeutung zu. Ihre wichtigsten Bestandteile sind die *Simulation* und der sog. *Design Rule Check*, also die Überprüfung des Entwurfs auf Einhaltung bestimmter Entwurfsregeln.

Es bleibt jedoch trotz dieser Hilfsmittel das Risiko, dass ein analog-digitaler ASIC nach der Herstellung nicht in der gewünschten Weise arbeitet und ein *Redesign* (Korrektur von Fehlern und erneute Fertigung von Labormustern) erforderlich wird. Hier unterscheidet sich die Entwicklung von analog-digitalen ASICs von der stärker schematisierten, aber auch erfolgssichereren Entwicklung rein digitaler ASICs.

### 3. Warum „vor Ort“ entwickeln?

Standardisierte Herstellungsprozesse und die computerbasierten Entwicklungshilfsmittel gestatten es heute auch kleineren Firmen und Einrichtungen, eigene full-custom-ASICs zu entwickeln, was bis vor wenigen Jahren den großen Halbleiterfirmen vorbehalten war. Zwar ist auch gegenwärtig Entwicklungssoftware für full-custom ASICs noch relativ teuer (Größenordnung einige 100TDM), jedoch verfügt die HPE seit Ende 1997 dank einer entsprechenden EU-Initiative für Forschungseinrichtungen über diese Werkzeuge. Nach der Installation der prozessspezifischen Software-Ergänzungen und einer Einarbeitungsphase konnten bereits die ersten Chips erfolgreich entworfen, gefertigt und getestet werden.

Dies schafft im Forschungszentrum Karlsruhe die Möglichkeit, hochintegrierte analog-digitale Mikro-

elektronik für Mikrosysteme in direktem Kontakt zu den Entwicklern der anderen mikrosystemtechnischen Disziplinen zu entwickeln. Erst in einer solchen interdisziplinären Vernetzung liegt der Schlüssel zur Schaffung leistungsfähiger und innovativer Systeme.

Allerdings ist die Entwicklung von full-custom-ASICs, nicht zuletzt wegen der Vielfalt ihrer Möglichkeiten, auch heute noch so aufwendig, dass eine Entwicklergruppe bestimmter Größe und einige Zeit für ihren Aufbau nötig ist, um reaktionsschnell und effizient arbeiten zu können. Auch muss stets der vergleichsweise hohe Aufwand für System- und Softwarepflege einkalkuliert werden, der unabhängig von der Zahl der entwickelten Chips anfällt. Speziell ausgestattete Testlabora gehören ebenfalls zur notwendigen Ausrüstung.

### 4. Beispiel eines in der HPE entwickelten full-custom-ASICs

Name:	HPE604V1B
Funktionalität:	Präzisions-Mikrobeschleunigungssensor-Auswertung [1]
Chipgröße:	3,7 x 3,4 mm <sup>2</sup> (Abb. 2)
Komplexität:	digital: ca. 2000 Gatter, analog: ca. 300 Transistoren
Besonderheiten:	Spannungen bis zu 20V, Digitalausgang
Prozess:	AMS CBZ 2µm CMOS (analog/digital, bis 50V)

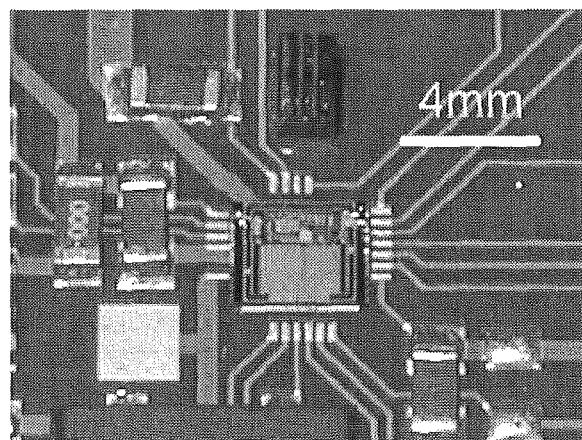


Abb. 2: Analog-digitaler ASIC (Bildmitte) für einen Mikro-Beschleunigungssensor (Mitte oben), entwickelt in der HPE.

### Literatur

- [1] Wüstling, S.: Hochintegriertes triaxiales Beschleunigungssensorsystem, Wissenschaftliche Berichte, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-6003, September 1997

# Gekoppelte Simulation für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik

Berthold Krevet und Manfred Kohl

Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Zur Optimierung der Gesamtfunktion von Mikrosystemen müssen die Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen physikalischen Größen (mechanisch, elektrisch, thermisch, etc.) berücksichtigt werden. Dazu wird im Forschungszentrum ein Programm Paket entwickelt, das verschiedene Programme (z.B. finite Elemente Programme) je nach Anwendung in beliebiger Reihenfolge ansteuert und den Datenaustausch zwischen diesen ermöglicht. Als Beispiele werden die elektrisch erzeugte Temperaturverteilung in Ventilen mit Formgedächtnis-Antrieb und das elektrochemische Wachstum metallischer Mikrostrukturen vorgestellt.

## 1. Einleitung

Physikalische Größen, wie Temperatur, elektrische und magnetische Felder oder mechanische Spannungen und Dehnungen können auch bei komplexer Geometrie der Bauteile mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) berechnet werden. Wegen den geringen Abständen in Mikrosystemen sind die gesuchten Variablen oft von einander abhängig, und ihre Berechnung erfordert den Einsatz verschiedener FEM-Programme mit Austausch der Daten untereinander. Dazu wurde ein Programm Paket entwickelt aus zum Teil kommerziellen FEM-Programmen, Koppelprogrammen und einem übergeordneten Programm zur Steuerung des Simulationsablaufes (Regieprogramm). Dieser Beitrag stellt die Berechnung der Temperatur in Ventilen mit Formgedächtnis-Antrieb [1] und die Simulation von galvanischem Wachstum vor. Weitere Anwendungen wurden bereits demonstriert [2].

## 2. Schema einer gekoppelten Simulation

Abb. 1 zeigt das Schema einer gekoppelten Simulation für eine Anwendung mit gekoppelten elektrischen, thermischen und mechanischen Größen. Dazu werden Programme zur Lösung dreidimensionaler elektrischer und thermischer (Tosca) und mechanischer Feldprobleme (Brick28) eingesetzt. Ein weiteres Programm (Script\_tosca) wird zur Kopplung und Transformation der FEM-Daten benötigt. Ein Regieprogramm ruft alle Programme gemäß einer Liste auf, die in seinem Eingabefile enthalten ist. Das Regieprogramm gibt bei jedem Aufruf des Koppelprogrammes eine Befehlsliste (Script) weiter, anhand derer die Materialdaten, Geometrie, Randbedingungen und Aufgaben der FEM Pro-

gramme neu festgelegt werden. Alle Befehlslisten sind im Eingabefile enthalten.

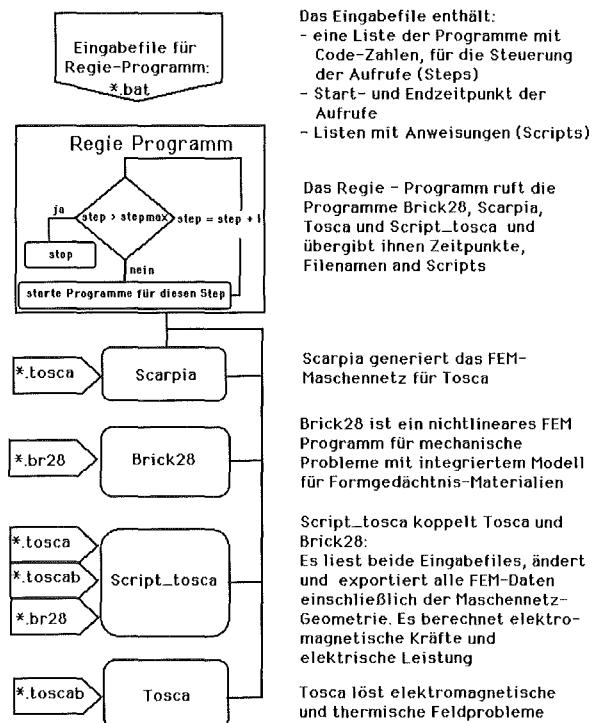


Abb. 1: Simulationsschema für 2 FEM-Programme und ein Koppelprogramm

## 3. Temperaturverteilung in einem Formgedächtnis-Ventil

Das im Forschungszentrum entwickelte Formgedächtnis-Ventil besteht aus einem elektrisch betriebenen Formgedächtnis-Antrieb zur Verstellung einer Membran, die einen Ventilsitz abdichten oder freigeben kann [1]. In diesem Beispiel wird die Simulation in drei Stufen durchgeführt:

(a) Berechnung der mechanischen Vorauslenkung des Formgedächtnis-Antriebs. Mit der daraus resultierenden Geometrie, siehe Abb. 2, wird mit Hilfe von Script\_tosca das FEM-Modell für die nachfolgende Analyse aktualisiert.



Abb. 2: Geometrie des vorausgelenkten Formgedächtnis-Antriebs

(b) Berechnung der elektrischen Stromverteilung zum Beheizen des Antriebs. Abb. 3 zeigt eine von Tosca berechnete Verteilung des elektrischen Potentials im Antrieb und im Cu - Gehäuseteil bei einem Stromfluß durch zwei von drei Antriebsstegen. Eine dünne Isolationsschicht zwischen Gehäuse und Antrieb ist in der Simulation berücksichtigt.

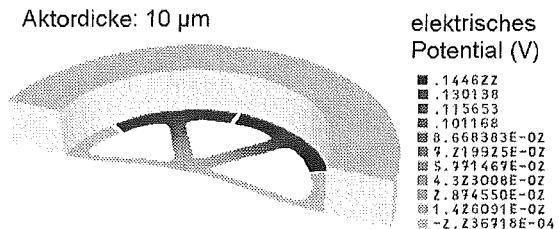


Abb. 3: Elektrische Potentialverteilung

(c) Berechnung der Temperaturverteilung. Aus der Stromverteilung wird von Script\_tosca die elektrische Leistung bestimmt und das FEM-Modell für die thermische Analyse durch Änderungen von Randbedingungen und Materialdaten aufbereitet. Abb. 4 zeigt eine von Tosca berechnete Temperaturverteilung.

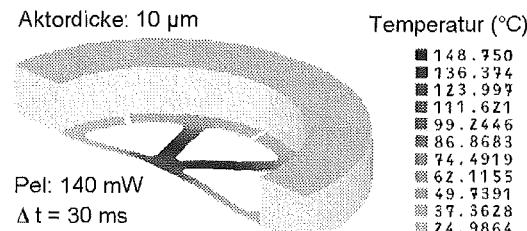


Abb. 4: Temperaturverteilung

Abb. 5 zeigt den zeitlichen Temperaturverlauf am heißesten Punkt in der Antriebsmitte mit und ohne Berücksichtigung der beim Formgedächtnis-Effekt freiwerdenden Umwandlungswärme.

### 3. Simulation von galvanischem Schichtwachstum

Die galvanische Abscheidung metallischer Mikrostrukturen ist ein zentraler Prozeß bei dem im

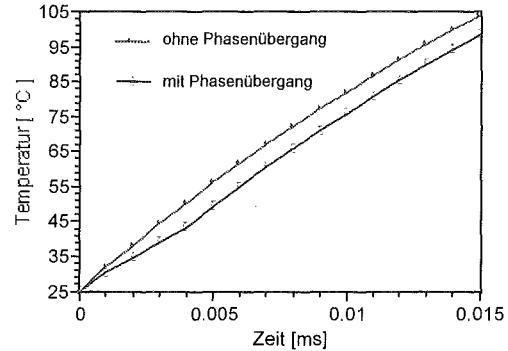


Abb. 5: Temperaturverlauf am heißesten Punkt des Aktors

Forschungszentrum entwickelten LIGA-Verfahren. Hier erfolgt die Simulation iterativ in zwei Schritten: (a) Berechnung der Stromdichteverteilung im Galvanikbad mit Tosca. Aus der Stromdichteverteilung ergibt sich die Abscheiderate auf der unteren Elektrode in mikrosukturierten Kanälen. (b) Aktualisierung der Elektrodengeometrie mit Script\_tosca. Um eine homogene Deformation des FEM-Maschennetzes zu erzeugen wird die aktualisierte Elektrodenform in einem Makromodell berechnet. Anschließend wird mit Scarpia ein neues Maschennetz erstellt.

Da die Abscheidung die Geometrie der unteren Elektrode verändert, wirkt sie auf die Stromdichteverteilung zurück. Die Schritte (a) und (b) müssen daher iterativ durchlaufen werden. Abb. 6 zeigt die Elektrodengeometrie für fünf aufeinander folgende Durchläufe.

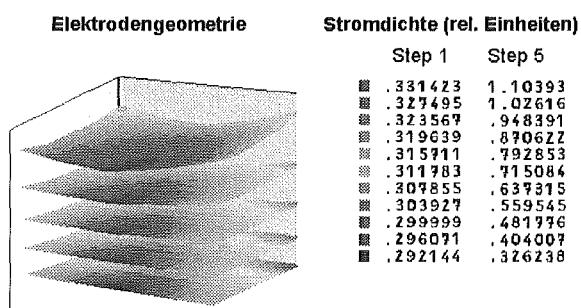


Abb. 6: Geometrie der unteren Elektrode bei galvanischer Abscheidung

### Literatur

- [1] M. Kohl, T. Rogge und W.K. Schomburg, Mikroventile für ein fluidisches Baukastensystem, dieser Tagungsband.
- [2] Krevet, B., Kaboth, W., Coupling of FEM Programs for Simulation of Complex Systems, Technical Proceedings of MSM, Santa Clara 1998, Seite 320 – 324.

# Entwurfssimulation mikrooptischer Systeme in Anwendung auf einen Heterodynempfänger

I. Sieber <sup>1)</sup>, H. Eggert <sup>1)</sup>, H. Guth <sup>1)</sup>, W. Jakob <sup>1)</sup>, K.-P. Scherer <sup>1)</sup>, P. Ziegler <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Angewandte Informatik

<sup>2)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Die Fertigung von Teststrukturen von Mikrosystemen ist sehr zeit- und kostenintensiv. Aus diesem Grund erlangen rechnergestützte Entwurfstechniken, welche eine kontinuierliche Unterstützung in allen Entwurfsphasen und damit auch Konsistenz sichern, in der Mikrosystemtechnik immer größere Bedeutung. Das vorgestellte Konzept ist die rechnergestützte Erstellung eines für die Massenfertigung robusten, modularen, mikrooptischen Systementwurfs.

## 1. Einleitung

Das Fehlen eines einheitlichen Materialsystems für mikrooptische Systeme macht einen monolithischen Aufbau im allgemeinen unmöglich. Daher werden komplexe mikrooptische Systeme in modularer Bauweise realisiert. Dafür muß in Kauf genommen werden, daß das Einfügen der einzelnen Komponenten zum Gesamtsystem gewissen Toleranzen unterliegt. Weiterhin können sich auch Umgebungseinflüsse wie z.B. Temperaturschwankungen am Einsatzort negativ auf die Leistung des mikrooptischen Funktionsmoduls auswirken. Daher müssen zur Realisierung dieses Konzepts schon in einem ersten Schritt die leistungsmindernden Einflüsse bestimmt werden. Danach muß ein Formalismus erarbeitet werden, der das Mikrosystem in Abhängigkeit dieser Faktoren beschreibt und anhand dessen das Leistungsverhalten des Mikrosystems nachgebildet werden kann. Diese Beschreibung ermöglicht im weiteren Vorgehen die Simulation des Mikrosystems in Abhängigkeit der Störeinflüsse und die Optimierung des Systementwurfs hinsichtlich einer Minimierung dieser Einflüsse. Das Ergebnis stellt dann einen robusten, stabilen Funktionsaufbau dar.

Diese Vorgehensweise wird am Beispiel eines mikrooptischen Empfangsmoduls, dem Heterodynempfänger, umgesetzt. Dieser mikrooptische Empfänger wird am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) im Forschungszentrum Karlsruhe unter Einsatz der LIGA-Technik als Demonstrator gefertigt.

## 2. Der LIGA-Heterodynempfänger

Ein am IMT verfolgtes Konzept zur Herstellung mikrooptischer Funktionsmodule ist der hybride Aufbau auf Basis mikrooptischer Bänke [1]. Zum Zweck der justierten Integration passiver und aktiver optischer Komponenten in die

mikrooptische Bank werden Haltestrukturen und Anschlagkanten geformt, die mit hoher Präzision an den für den optischen Strahlengang erforderlichen Positionen strukturiert werden. Dieses Konzept findet beim Heterodynempfänger Anwendung um die kommerziellen optischen Komponenten justiert in den Strahlengang einzubringen. Die Abbildung 1 zeigt eine REM-Aufnahme eines vollständig bestückten LIGA-Heterodynempfängers.

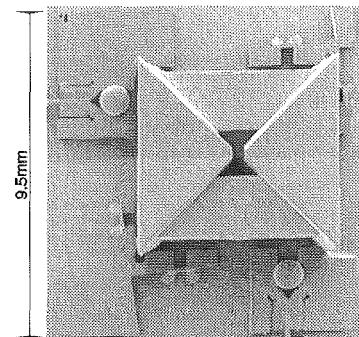


Abb. 1: REM-Aufnahme eines vollständig bestückten LIGA-Heterodyn-empfängers [2].

## 3. Simulation des optischen Systems des LIGA-Heterodynempfängers

Die Simulation des mikrooptischen Systems des Heterodynempfängers fand in Abhängigkeit von den Positionstoleranzen der einzelnen aktiven und passiven optischen Komponenten statt. Untersuchungen zeigten, daß sich die wesentlichen Positionsunsicherheiten zusammensetzen aus den Toleranzen der LIGA-Halte- und Positionierstrukturen, den Herstellungstoleranzen der kommerziellen optischen Komponenten und den temperaturabhängigen Strukturverzügen der mikrooptischen Bank [3]. Aufgrund dieser Untersuchungen wurden Toleranzbereiche für die

Position der einzelnen optischen Komponenten erstellt. Dies beinhaltet sowohl <sup>1)</sup>laterale und axiale Verschiebungen als auch Verkippungen. Dadurch wurde die Simulation der Auswirkungen von Delokationen der einzelnen Komponenten untereinander und die Auswirkungen dieser Positionsunsicherheiten auf die Performance des mikrooptischen Systems ermöglicht. In der Abbildung 2 ist die Auswirkung einer lateralen Verschiebung der Kugellinse auf die Bestrahlungsstärkeverteilung am Ort der Photodiode dargestellt. Die Darstellung zeigt die

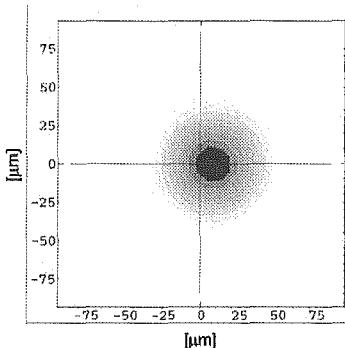


Abb. 2: Bestrahlungsstärkeverteilung am Ort der Photodiode nach einer Verschiebung der Linse.

flächenhafte Verteilung für die Maximalauslenkung der Kugellinse in den Toleranzgrenzen. Deutlich zu sehen ist eine Auslenkung der Verteilung vom Ursprung. Diese Auslenkung resultiert in einer Verringerung der Koppeleffizienz der zu überlagernden Strahlengänge und somit in einer Reduzierung der Systemperformance (vergl. Abb. 3). Eine Anordnung der optischen Komponenten zu einer *worst-case*-Konfiguration innerhalb der Toleranzgrenzen reduziert die Koppeleffizienz auf 4,1% [4].

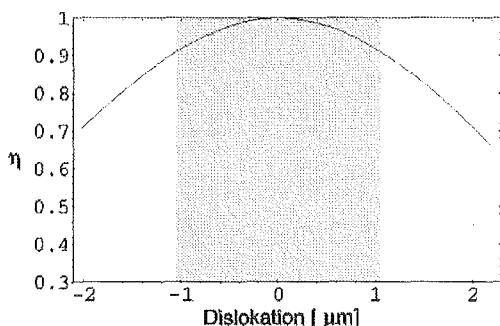


Abb. 3: Verlauf der Koppeleffizienz in Abhängigkeit von einer lateralen Verschiebung der Kugellinse. Grau unterlegt ist der Toleranzbereich.

#### 4. Optimierung

Die Systemoptimierung wurde mit dem Ziel durchgeführt bei den gegebenen Positionstoleranzen eine Konfiguration zu finden, so daß die

Performance der *worst-case*-Konfiguration maximiert wird. Als Optimierungswerzeuge wurden ein traditionelles deterministisches Suchverfahren, das auf dem Gauß-Seidel-Verfahren beruht und ein am Institut für Angewandte Informatik (IAI) entwickeltes evolutionäres Verfahren angewandt. Die Charakterisierung des Suchraumes wurde mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode vorgenommen und hatten als Ergebnis einen hochgradig multimodalen Suchraum fraktaler Natur. Die Optimierungsparameter sind in der Abbildung 4 dargestellt und beinhalten sowohl die Distanzen zwischen den optischen Komponenten als auch ihre Abmessungen und optischen Eigenschaften.

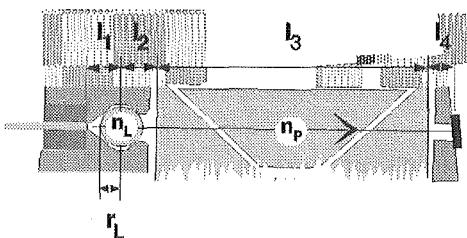


Abb. 4: Schemaskizze eines beispielhaften Strahlengangs. Eingezeichnet sind die Optimierungsparameter.

#### 5. Ergebnis

Eine Optimierung dieses Modells resultiert in einer Verbesserung der Koppeleffizienz der *worst case*-Konfiguration um 73%.

Der beschriebene Ansatz der Entwurfsentwicklung führt zu einer modifizierten, optimierten Designvariante, die, verglichen mit dem Ausgangsentwurf, zu deutlichen Steigerungen der Leistungsmerkmale führt.

#### Literatur

- [1] Mohr, J., "Mikrooptik für Anwendungen in der Telekommunikation und Prozessanalytik", Wissenschaftliche Berichte FZKA 6080, Forschungszentrum Karlsruhe, 1998.
- [2] Ziegler, P., "Aufbau von optisch-elektrischen Funktionsmodulen mit Hilfe des LIGA-Verfahrens für die optische Übertragungstechnik", Dissertation an der Universität Karlsruhe, 1999.
- [3] Sieber, I., Eggert, H., Guth, H., Jakob, W., "Design Simulation and Optimization of Microoptical Components", Proc. of SPIE, San Diego, 1998, S. 138-149.
- [4] Sieber, I., "Entwicklung einer rechnergestützten Entwurfsmethode für optische Mikrosysteme und deren Anwendung auf einen Heterodynempfänger", Dissertation an der Universität Bremen, 1999.

# Aufbau und Montage von mikrooptischen Bänken am Beispiel eines Heterodynempfängers

S. Albatal <sup>1)</sup>, L. Berger <sup>2)</sup>, F. Königer <sup>3)</sup>, O. Krömer <sup>2)</sup>, J. Mohr <sup>1)</sup>, U. Wallrabe <sup>1)</sup>, P. Ziegler <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik, <sup>2)</sup> Hauptabteilung für Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik,  
<sup>3)</sup> Prometh GmbH, Frankfurt am Main

## Zusammenfassung

In Rahmen dieser Arbeit wurde ein Fertigungskonzept für mit dem LIGA-Verfahren hergestellte mikrooptische Bänke verwirklicht. Als Beispiel dient ein optischer Überlagerungs- oder Heterodynempfänger. Die optischen Bänke werden mit Zukaufteilen mittels passiver Montage bestückt. Das LIGA-Verfahren ermöglicht die dazu notwendigen hochpräzisen Justagehilfen für die einzelnen mikrooptischen Elemente. Ein Nachweis der erfolgreichen passiven Montage erfolgte über die hohe optische Überlagerungsqualität zweier durch den Heterodynempfänger überlagerten Infrarot-Signale. Darüber hinaus beinhaltet das optische Design Möglichkeiten zur Rauschunterdrückung und zur Einflußminimierung von Polarisationsschwankungen.

## 1. Einleitung

Die Verbreitung optischer Technologien wird dadurch bestimmt werden, dass kostengünstiges Herstellungsverfahren gefunden werden. Eine Kostensenkung kann durch passive Montage der mikrooptischen Bauelemente erreicht werden. Unter *passiver Montage* versteht man die Ausrichtung einzelner Elemente mit Hilfe mechanischer und optischer Justierhilfen. Mittels der LIGA-Technologie können kleine hochpräzise Justierhilfen und Haltestrukturen mit einer geringen Seitenwandrauhigkeit hergestellt werden. Damit eignet sich das LIGA-Verfahren hervorragend für die Herstellung von mikrooptischen Bänken und damit von hybrid aufgebauten mikrooptischen Funktionsmodulen. Im vorliegenden Bericht wurde ein Heterodynempfänger als Beispiel für solch eine optische Bank realisiert. Mit ihm können optische Signale, die in einem infraroten Wellenlängenband übertragen werden, ausgelesen und voneinander getrennt werden. Der Heterodynempfänger ist in [1] ausführlich beschrieben.

## 2. Design für einen Heterodyn-Empfänger

In einem Heterodynempfänger wird das eingehende IR-Signal mit dem Licht eines lokalen Oszillators überlagert. Dadurch wird das i.d.R. schwache Signal verstärkt und in Form eines Interferenzsignals mit einer Zwischenfrequenz  $\omega_{ZF}$  ( $\omega_{ZF} = \omega_S - \omega_{LO}$ ) weiterverarbeitet. Idealerweise stehen die Polarisationsvektoren der zu überlagernden Signale parallel zueinander. Der Polarisationszustand des Signals ist jedoch i.a. unbekannt und kann zudem schwanken. Darum werden sowohl Signal als auch Lokaloszillator in ihren senkrechten und parallelen Polarisationsanteil aufgespaltet („Polarisations-Diversitätsanordnung“, [2]), dann überla-

gert und zuletzt wieder addiert. Zur Rauschunterdrückung wird das Überlagerungssignal weiterhin im Verhältnis 50:50 geteilt. Es wird auf zwei Photodioden gegeben und die Signale voneinander abgezogen („Gegentaktanordnung“, [3]). Der entsprechende Aufbau ist in Abb. 1 gezeigt.

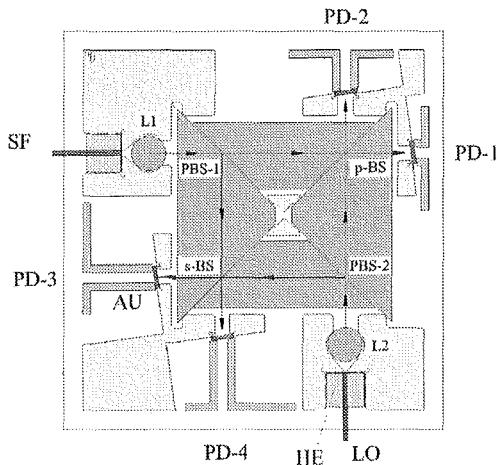


Abb. 1: Design des Heterodynempfängers

Das mit der Signalfaser SF und Lokaloszillatofaser LO in den mikrooptischen Aufbau eingeckoppelte Licht wird jeweils mit den Kugellinsen L<sub>1</sub> und L<sub>2</sub> kollimiert. Es trifft im weiteren auf eine Grenzfläche zwischen Prismen mit aufgedampften Multilayerschichten. Sie dienen als Polarisationsstrahlteiler (PBS-1& PBS-2) für den senkrechten und parallelen Anteil. Die nächsten Grenzflächen mit anderer Beschichtung dienen als 50:50-Strahlteiler (s-BS & p-BS), an denen die Überlagerung der jeweiligen Anteile von Signal und Lokaloszillator stattfindet. Der Strahlteiler p-BS samt Photodioden PD-1 und PD-2 stellt damit die Gegentaktanordnung für den parallelen Anteil

dar, der Strahlteiler s-BS samt Photodioden PD-3 und PD-4 die für den senkrechten Anteil.

### 3. Herstellung und Montage einer mikrooptischen LIGA-Bank

Auf einem Keramiksubstrat werden zunächst mittels optischer Lithografie Leiterbahnen aus Gold (in Abb. 1 AU) strukturiert. Sie werden für die Kontaktierung der Photodioden benötigt.

Weiterhin wird eine Titanschicht aufgesputtert, strukturiert und oxidiert. Sie dient zu Haftung der anschließend aufzuklebenden 500  $\mu\text{m}$  dicken PMMA-Platte. In diese werden dann mit Röntgentiefenlithographie die Justierhilfen und Anschlüsse für die optischen Komponenten strukturiert.

Für die Bestrahlung der mikrooptischen Bank und der Halteelemente wurde eine Wellenlänge von 0.11 nm als optimal ermittelt. Dieser Wert stellt einen Kompromiss zwischen der Beugung der hinter die Absorberkante der Maske gelangten Synchrotronstrahlung und der durch die Bestrahlung verursachten Kantenunschärfe dar.

Bei der Montage der Komponenten besteht bei herkömmlichen Bondtechniken (z.B. Löten) der Nachteil, dass die gesamte optische Bank erwärmt wird und die sich ergebenen Dämpfe zur Verschmutzung der optischen Komponenten führen. Durch den Einsatz von Leitklebern und UV-härtendem Klebstoff werden diese Nachteile vermieden.

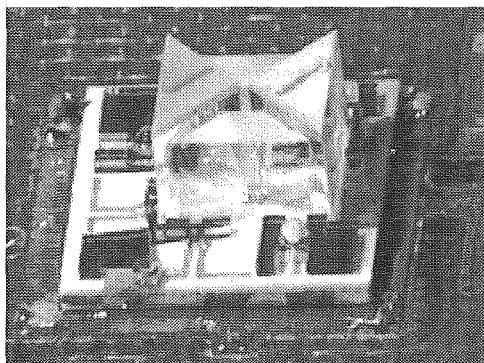


Abb. 2: Kompletter Aufbau der optischen Bank

Zunächst werden die Kugellinsen durch zwei Punktkontakte fixiert. Das Zentrum der Linsen definiert damit die optische Ebene. Dann werden Halteelemente für die Glasfasern (HE) verklebt. Durch sie wird die unterschiedliche Dicke von Linsen und Fasern kompensiert und die Fasern in die optische Ebene gehoben. Die Glasfasern werden in entsprechende Fasergräben auf den Halteelementen eingelegt und auch verklebt. Die genaue Position der Fasern, der Prismen sowie der Photodioden wird durch aus PMMA strukturierte Mikroanschlüsse bestimmt. Sie gewährleisten auch die Montage der Dioden mit einem Win-

kel von 8° relativ zur optischen Achse zur Vermeidung von störenden Rückreflexen. Nach dem Fixieren der Photodioden mit UV-Kleber werden sie mittels Leitkleber auf der Goldleiterbahn kontaktiert. Ein kompletter Aufbau der optischen Bank ist in Abb. 2 gezeigt.

### 4. Analyse des Heterodyn-Empfängers

Zahlreiche Versuche wurden durchgeführt, um die für die Funktion des Heterodynempfängers wichtigen Kennwerte zu ermitteln. Eine kohärente Überlagerung ist bei Wellenlängen von 1532 bis 1566 nm möglich. Die maximale Bandbreite beträgt 1.7 GHz.

Am Ort des sensitiven Photodiodengebiets erscheint die Überlagerung beider Lichtsignale. Der Abstand zwischen den Schwerpunkten ihrer Intensitätsverteilungen ist ein Maß für die Genauigkeit des LIGA-Aufbaus. Die Intensitätsverteilung der einzelnen Signale wurde mit einer IR-Röhrenkamera aufgenommen. Die Ergebnisse zeigen [Abb. 3], dass der Abstand in der parallel zum Substrat ausgewählten Richtung 5.1  $\mu\text{m}$  beträgt. Dieses garantiert eine ausreichend gute Überlagerung beider Signale [1].

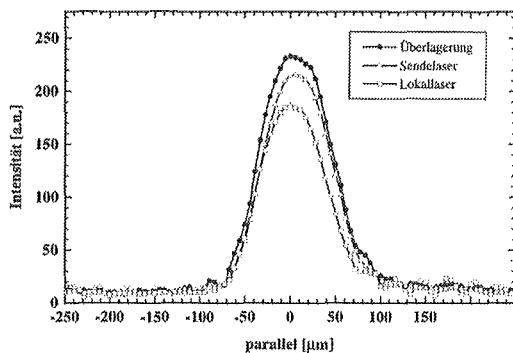


Abb. 3: Parallele Verteilungen beider Signale und ihre Überlagerung

### Literatur

- [1] Ziegler P.: „Aufbau von optisch-elektrischen Funktionsmodulen mit Hilfe des LIGA-Verfahrens für die optische Übertragungstechnik“, Dissertation, FZKA-Bericht Nr. 6344, Karlsruhe, 1999
- [2] Agrawal G.: „Fiber-Optic Communication System“, John Wiley & Sons Verlag, New York, 1997, 544
- [3] Cvijetic M.: „Coherent and Nonlinear Lightwave Communications“, Artech House Verlag, Boston, 1996, 304

# Optische 2x2-Schaltmatrix mit elektromechanischen Stellelementen

A. Ruzzu, J. Mohr, U. Wallrabe

Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Für komplexe Schaltaufgaben in den heutzutage rasch zunehmenden optischen Telekommunikationsnetzwerken bieten sich optische Schaltmatrizen an. Hierfür wurde ein erster Prototyp einer optischen Schaltmatrix mit 2 Eingangs- und Ausgangskanälen entwickelt. Das Konzept sieht die prinzipielle Erweiterbarkeit auf größere Kanalzahlen vor. Die Lichtsignale werden in einer mikrooptischen Bank mittels beweglicher Spiegel umgelenkt. Die Spiegelbewegung erfolgt durch Stellmotoren, welche zusammen mit der optischen Bank strukturiert werden. Hierdurch werden aufbaubedingte optische Verluste verringert. Erste Funktionsmuster wurden hergestellt und werden zur Zeit hinsichtlich Schaltzeiten und optischem Schaltverhalten charakterisiert.

## 1. Einleitung

Durch den zunehmenden Einsatz von Glasfasern im Bereich der Telekommunikation steigt auch das Interesse an rein optischen Mehrfachschaltern, die sowohl in Vermittlungsstellen als auch zur Herstellung von leicht änderbaren Verschaltungen (Rekonfiguration von Netzwerken) eingesetzt werden können. Insbesondere die Monomodetechnik stellt für solche Schaltaufgaben eine Herausforderung dar.

NxM-Schaltmatrizen, welche eine Verschaltung von N optischen Eingangs- auf M Ausgangskanälen ( $N, M \geq 2$ ) ermöglichen, bieten sich für solche Aufgaben an. Die matrixartige Anordnung der Schaltelemente ermöglicht eine Erweiterung der Anzahl von Ein- und Ausgängen mit dem gleichen Konzept. Gegenüber kaskadierten Schaltern zeichnen sich solche Schaltmatrizen durch kompakte Bauweise und geringere optische Verluste aus.

Aus diesem Grunde wird am IMT ein Prototyp einer NxN-Schaltmatrix in Monomodetechnik entwickelt. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Präzision in Abmessung und Position der Bauteile, werden die Matrizen in LIGA-Technik gefertigt.

## 2. Konzept und Aufbau

Als erster Prototyp wurde am IMT eine 2x2-Matrix mit prinzipielle Erweiterbarkeit auf größere Kanalzahlen entworfen.

Bei dem verfolgten Konzept werden die mittels Glasfasern zugeführten Lichtstrahlen der Eingänge durch bewegliche Spiegel auf die Ausgänge umgelenkt. Die Faserendflächen werden über eine Freistrahlloptik mit Kugellinsen aufeinander abgebildet (s. Abb. 1). Der Schaltvorgang wird durch aktive Stellelemente ermöglicht, welche

exzentrisch zu den Kreuzungspunkten der Lichtwege angeordnet sind.

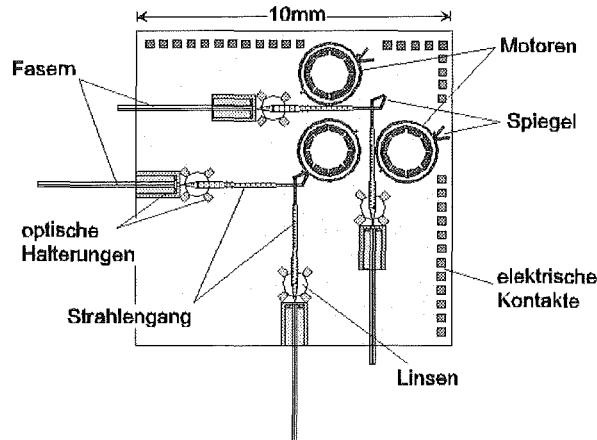


Abb. 1: Prinzip der 2x2 Schaltmatrix

Die Schaltmatrizen bestehen somit im wesentlichen aus einer mikrooptischen Bank mit Fasern, Linsen und entsprechenden Haltestrukturen und den Stellmotoren. Um aufbaubedingte optische Verluste zu minimieren, werden sämtliche statischen Bauelemente durch den Strukturierungsprozeß in einem Fertigungsschritt auf dem Trägersubstrat hergestellt. Die für den Einsatz von Monomodetechnik erforderliche Präzision wird durch Anschläge sowohl auf der optischen Bank als auch für die Position der Spiegel gewährleistet. Um eine gleichmäßige Einfügedämpfung in allen Kanälen zu erreichen, werden die Linsen und Fasern so angeordnet, daß alle schaltbaren Lichtwege gleichlang sind. Die Abstimmung von Motor- und Spiegeldimensionen und der optischen Elemente aufeinander ergab für die Motoren einen Durchmesser von 1,7 mm, für die Linsen 650 µm (Brechungsindex  $n = 1,44$ ) und damit eine Kanalänge des Systems von 10 mm.

## 2.1. Schaltelemente

Als Stellelemente für die Spiegel dienen elektrostatische Rotationsantriebe, sogenannte Wobblemotoren. In die auf dem Substrat befindlichen Statorstrukturen werden die gesondert hergestellten Rotoren eingesetzt (s. Abb. 2).

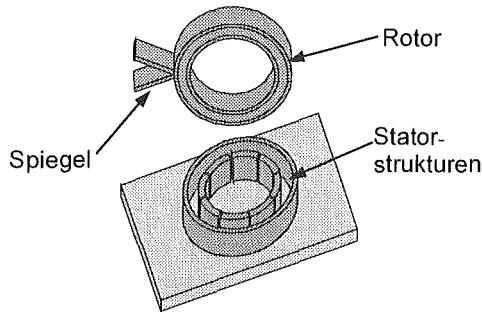


Abb. 2: Prinzip des zweiteiligen Wobblemotors mit integriertem Spiegel

Die Spiegelemente werden als Bestandteil der Rotoren an der Außenwandung strukturiert. Die Umlenkung der Lichtstrahlen erfolgt durch zweifache Reflektion an einem Doppelspiegel (vgl. Abb. 1 und 2). Vorteil dieses Spiegelsystems ist, daß der Lichtstrahl, im Gegensatz zu einem einfachen Spiegel, unabhängig von der relativen Lage zwischen Strahl und Spiegelement um  $90^\circ$  umgelenkt wird. Mögliche Positionierungsfehler des reflektierenden Elementes in der Systemebene führen dadurch nicht zu einem Winkelfehler des Lichtstrahles, sondern treten lediglich als lateraler Strahlversatz auf. Da die lateralen Justiertoleranzen hinsichtlich des Herstellungsprozesses unkritischer als Winkelfehler sind [1], können so optische Verluste, bedingt durch Lagefehler der verschiedenen optischen Elemente, minimiert werden (s. Abb. 3).

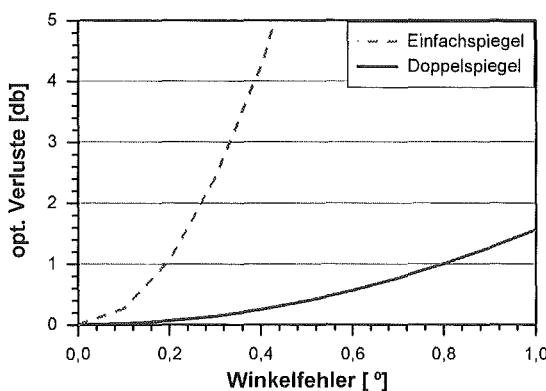


Abb. 3: Optische Verluste durch Winkelfehler des Stellelementes bei Verwendung eines Einfach- bzw. Doppelspiegels (Berechnung für  $850 \mu\text{m}$  Rotorradius und Strahlen mit  $35 \mu\text{m}$  Strahltailli)

## 3. Realisierung

Erste Strukturen für die opto-elektro-mechanische Schaltmatrix wurden nach dem LIGA-Verfahren in Verbindung mit Titan-Opferschichttechnik hergestellt [2]. Um ein verzugsfreies und gleichmäßiges Abbilden der röntgenlithografisch hergestellten Strukturen durch die Ni-Galvanik zu ermöglichen, wurden im Layout komplexe Hilfstrukturen neben den eigentlichen optischen Bänken und den Motorstrukturen vorgesehen. Abb. 4 zeigt den ersten Prototypen einer optischen Schaltmatrix mit entsprechenden Hilfstrukturen.

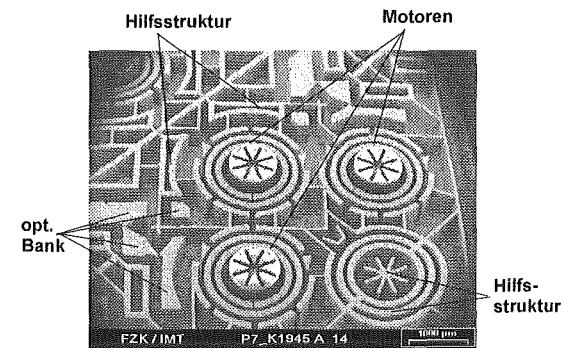


Abb. 4: Prototyp einer  $2 \times 2$  Schaltmatrix mit Hilfstrukturen

Abb. 5 zeigt ein Detail eines zweiten, optimierten Prototypen der Matrix. Zur Zeit werden die hergestellten Matrizen hinsichtlich Schaltzeiten und optischem Schaltverhalten charakterisiert.

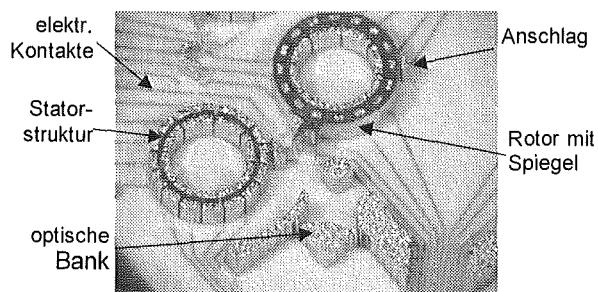


Abb. 5: Detail einer  $2 \times 2$  Schaltmatrix mit optischer Bank, elektrostatischen Motoren mit Anschlägen und einem eingesetzten Rotor mit Doppelspiegel

## Literatur

- [1] Joyce, W.B., DeLoach, B.C., "Alignment of Gaussian beams", Appl. Opt., 23, 1984, 4187-4196
- [2] Kunz Th, Mohr J, Ruzzu A, Skrobanek K.D, Wallrabe U, "Adhesion of Ni-Structures on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic substrates used for the sacrificial layer technique", wird veröffentlicht in Microsys. Technol., 2000

# Kommerzielle Produkte auf der Basis des LIGA-Mikrospektrometers

Peter Krippner <sup>1)</sup>, Thomas Kühner <sup>2)</sup>, Arndt Last <sup>1)</sup>, Jürgen Mohr <sup>1)</sup>, Sven Schönfelder <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik

<sup>2)</sup> Hauptabteilung Prozessdatenverarbeitung und Elektronik

<sup>3)</sup> STEAG microParts GmbH, Dortmund

## Zusammenfassung

Die am Forschungszentrum auf der Basis der LIGA-Technik entwickelten Mikrospektrometer [1] für den sichtbaren Wellenlängenbereich werden heute von der Firma STEAG microParts in Serie produziert. Diese überwiegend zur Farbmessung eingesetzten Bausteine bilden mittlerweile den Kern von portablen Farbmesssystemen für unterschiedliche Anwendungsgebiete. Die Entwicklung dieser Messgeräte, ihre Produktion und Vermarktung erfolgt durch Firmen mit meist langjähriger Expertise auf dem jeweiligen Anwendungsgebiet.

Von den daraus aufgebauten Farbmesssystemen werden beispielhaft unter Verwendung der Produktinformationen der im folgenden genannten Firmen drei vorgestellt. Diese sind ein Gerät zur Bestimmung der Kennzahlen von farbigen Oberflächen (Spectro-pen, Fa. Dr. Lange GmbH), ein Gerät zur nichtinvasiven Messung der Bilirubinkonzentration bei Neugeborenen (Bili Check System, Fa. SpectRx Inc.), sowie eines zur Bestimmung der Farbe von Diamanten (Diamond Colorimeter, Fa. Gran Computer Industries Ltd.).

## 1. Spectro-pen

Der Spectro-pen [2] wird überwiegend zur Qualitätskontrolle in Produktionsabläufen eingesetzt. Hier dient er zur Bestimmung der Farbkennzahlen von Oberflächen wie z.B. Lackierungen. In das in Abb. 1 dargestellte Handgerät sind die Beleuchtungsoptik und die Auswerteelektronik integriert. Die Ausgabe des Messergebnisses erfolgt auf einer LC-Anzeige in Form normierter Farbkennzahlen.

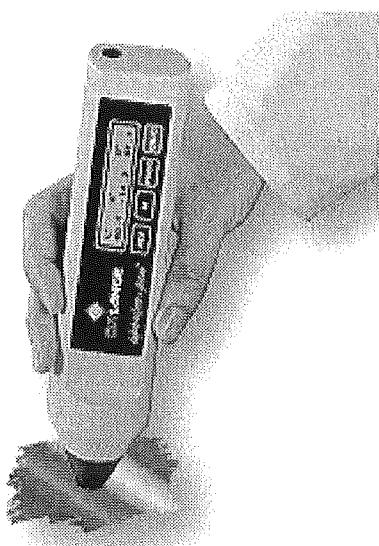


Abb. 1: Spectro-pen der Fa. Dr. Lange.

Der Transfer der Daten zur weiteren Auswertung im PC ist über eine Schnittstelle möglich. Den schematischen Aufbau des Systems zeigt Abb. 2. Das von der Meßprobe reflektierte Licht wird durch das LIGA-Mikrospektrometer spektral zerlegt und die über einen Zeilendetektor ausgelesene Spektralinformation mit einem Mikroprozessor ausgewertet.

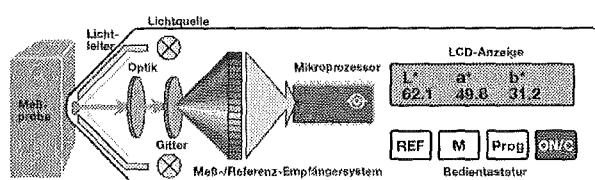


Abb. 2: Schematischer Aufbau des Spectro-pens.

## 2. Bili Check System

Mit dem Bili Check System [3] ist es erstmals möglich, die bei Neugeborenen häufig auftretende Gelbsucht (erhöhter Bilirubingehalt des Blutes) ohne Entnahme von Blut zu diagnostizieren. Hierzu wird mit dem von der Fa. SpectRx entwickelten Handgerät, das vom Prinzip dem oben erwähnten Farbmesssystem ähnelt, die Gelbfärbung der Haut bestimmt und durch eine entsprechende Auswertung der gewonnenen Spektren der Bilirubingehalt ermittelt. Dieser Messvorgang ist in Abb. 4 dargestellt. Das Messverfahren arbeitet hierbei unabhängig von z.B. Hautfarbe oder Geschlecht des Neugeborenen [4].



Abb. 3: Transkutane Messung der Bilirubinkonzentration im Blut eines Neugeborenen mit dem Bili Check System.

Abb. 4 zeigt den mit dem Bili Check System transkutan ermittelten Bilirubingehalt des Blutes als Funktion des realen Gehalts. Die Genauigkeit der Messung ist ausreichend für den Einsatz im medizinischen Bereich ohne zusätzliche Kontrolle durch Blutentnahme.

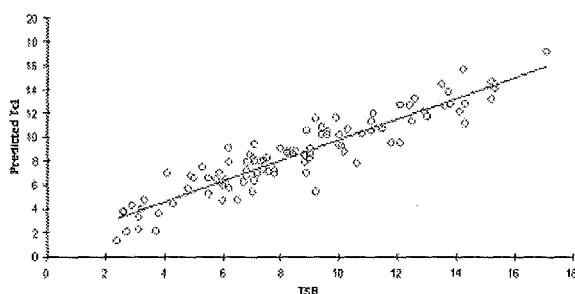


Abb. 4: Zusammenhang zwischen realem Bilirubingehalt und mit dem Bili Check System ermittelten Anzeigewert.

### 3. Diamond Colorimeter

Neben der Größe von Einschlüssen bestimmt die Farbe von Diamanten ihre Qualität und damit

### Literatur

- [1] C. Müller, J. Mohr: „Miniaturisiertes Spektrometersystem in LIGA-Technik“, FZKA-Bericht 5609, Forschungszentrum Karlsruhe, 1995
- [2] Produktinformation „spectro-pen“, Dr. Lange GmbH, Berlin
- [3] Produktinformation „Bili Check System“, SpectRx Inc., Norcross, GA, USA
- [4] H. K. Delcher, G. Newman, S. Bambot, S. L. Jacques: „Transkutane Bilirubin-Messung bei einem gemischten Patientenkollektiv: Klinische Beurteilung eines neuen Gerätes“, SpectRx, Inc., USA
- [5] Produktinformation „Diamond colorimeter DC2000fs“, Gran Computer Industries Ltd., Migdal Ha'Emek, Israel

entscheidend ihren Marktwert. Dies war für die Fa. Gran Computer Industries Ltd. der Anlass, ein Tischgerät für den Einsatz im Diamantenhandel und beim Juwelier zu entwickeln, mit dem sich die Farbe von Diamanten bestimmen lässt [5] (Abb. 5). Im Gegensatz zu herkömmlichen Geräten ist es durch die Auswertung des gesamten sichtbaren Spektrums möglich, alle bei Diamanten auftretenden Farbschattierungen zu bestimmen. Es ermöglicht außerdem die Messung an losen oder gefassten Steinen.

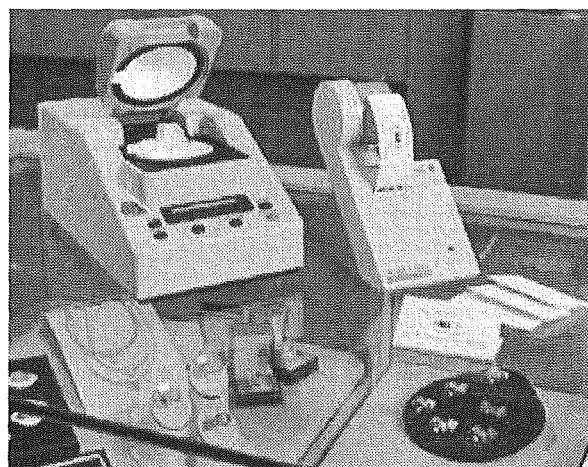


Abb. 5: Messsystem zur Bestimmung der Farbe von Diamanten.

### 4. Zusammenfassung

Die oben genannten Beispiele stehen für eine Reihe von innovativen Produkten, die mit der Entwicklung des LIGA-Mikrospektrometers möglich wurden. Sie erlauben eine verbesserte Qualitätskontrolle in der Produktion, erhöhen die Lebensqualität oder vereinfachen Klassifizierungsaufgaben. Dies zeigt, dass die Miniaturisierung klassischer Messsystem-Komponenten bei gleichzeitig akzeptablen Produktionskosten durch den Einsatz der Mikrosystemtechnik eine Wertschöpfung gerade bei den daraus aufgebauten Systemen bewirkt, auch wenn diese in vielen Fällen keine eigentlichen Mikrosysteme darstellen.

# Weiterentwicklung von Spektrometersystemen für den NIR-Bereich

Peter Krippner <sup>1)</sup>, Thomas Kühner <sup>2)</sup>, Stefan Oppermann <sup>1)</sup>, Arndt Last <sup>1)</sup>, Jürgen Mohr <sup>1)</sup>, Peter Wicht <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik

<sup>2)</sup> Hauptabteilung Prozessdatenverarbeitung und Elektronik

## Zusammenfassung

Die erfolgreiche Markteinführung der Mikrospektrometer für den sichtbaren Wellenlängenbereich (VIS) in der Farbmesstechnik gab den Anlass, für den nahen Infrarotbereich (NIR) von 0,9 µm bis 1,75 µm Wellenlänge ein ähnliches System zu entwickeln [1, 2, 3]. Die Auswertung der spektralen Information in diesem Wellenlängenbereich ermöglicht die Lösung einer Vielzahl interessanter Messaufgaben, so z.B. die chemische Analyse von Kohlenwasserstoffen, wie Kunststoffe und Kraftstoffe, oder auch die Feuchtemessung in Lebensmitteln. Dies eröffnet wie im VIS-Bereich einen Markt mit großen Anwenderzahlen.

Das System ist modular aufgebaut. Es teilt sich in das Spektrometermodul, auf dem die optisch-elektrische Wandlung und die Digitalisierung des Spektralsignals vollzogen wird, und das Mikrocontrollermodul, das die Weiterverarbeitung der Digitalsignale und die Kommunikation mit einem Host-PC übernimmt. Der Aufbau und die Funktionsweise dieser Komponenten, die eingesetzte Aufbau- und Verbindungstechnik, sowie die Eigenschaften des Gesamtsystems werden beschrieben.

## 1. Systemaufbau

Das elektrische Blockschaltbild des Systems ist in Abb. 1 dargestellt. Es ist geteilt in das Spektrometermodul und das Mikrocontroller-Modul. Beide sind über einen Leiterplattenverbinder elektrisch

und mechanisch verbunden. Hierdurch wird es möglich, Spektrometermodule, die hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften für unterschiedliche Messaufgaben optimiert wurden, mit demselben Mikrocontroller-Modul zu betreiben und flexibel auf Kundenwünsche zu reagieren.

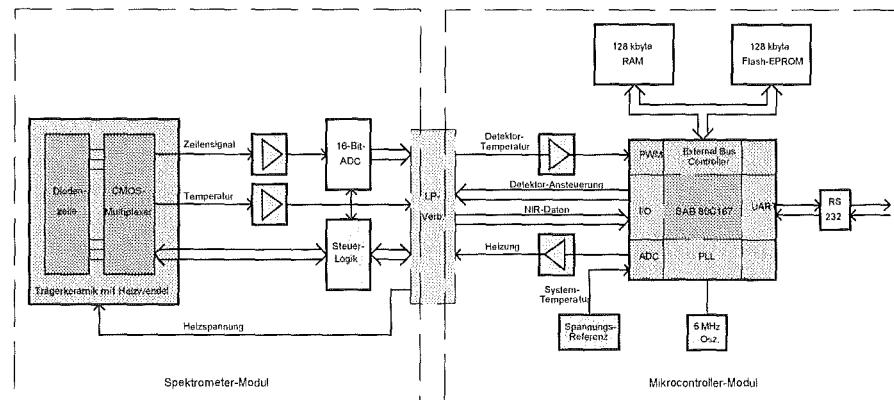
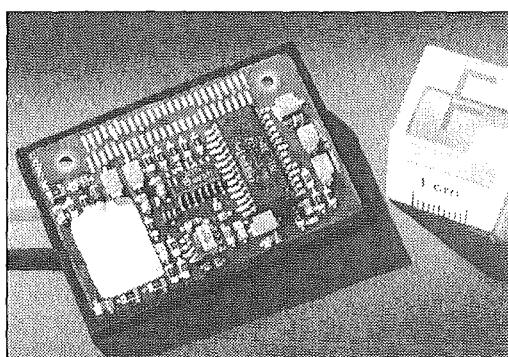


Abb. 1: Blockschaltbild des Systems bestehend aus Spektrometer- und Mikrocontrollermodul.



Das Spektrometermodul ist in Abb. 2 dargestellt. Es beinhaltet bei Außenabmessungen von 54 x 36 x 7 mm<sup>3</sup> alle Funktionselemente, die, beginnend an der optischen Einkoppelfaser bis zum Vorliegen der digitalisierten Spektralinformation, notwendig sind.

Abb. 2: Integriertes NIR-Spektrometermodul mit Fasereinkopplung, Spektrometer, Detektorzeile, Signalaufbereitung und Digitalisierung.

## 2. Aufbau- und Verbindungstechnik

Die Konzeption des Spektrometermoduls erfordert eine besondere Aufbau- und Verbindungstechnik, da trotz des notwendigen Einsatzes von Materialien mit stark unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, wie oxydischer Keramik und Polymerteilen, ein stabiles Ausgangssignal bei Umgebungstemperaturschwankungen gewährleistet werden muß. Dies wird erreicht durch die Kombination von elastischen und starren Klebeverbindungen.

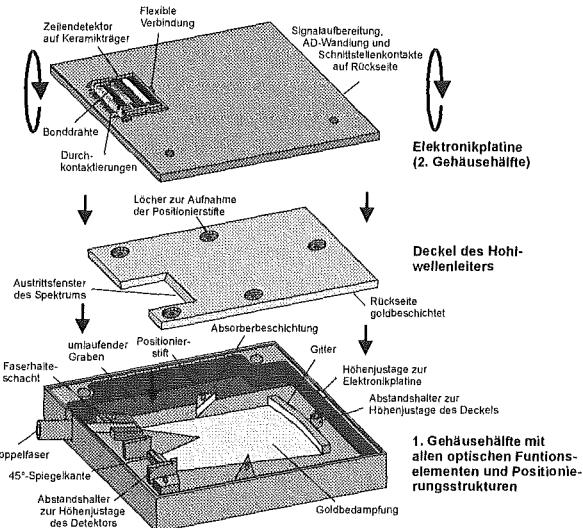


Abb. 3: Explosionszeichnung des Spektrometermoduls.

Abb. 3 zeigt eine Explosionszeichnung des Spektrometermoduls, das sich grob in die untere Gehäusehälfte mit allen optischen Funktionselementen, in den Wellenleiterdeckel als Abschluss der optischen Funktionsebene und die Elektronikplatine gliedern läßt.

Insbesondere im Bereich des Detektors wurden neue Wege beschritten. Hier wird auf die Kühlung mit einem Peltier-Element verzichtet; über eine integrierte Heizung wird er jedoch temperiert. Dies erfordert einen gewissen Abstand zwischen keramischem Detektorträger und Elektronikplatine zur

thermischen Entkopplung. Die Keramik wird lediglich über flexible Säulen gehalten. Den auf der Platine vorjustierten Träger während des Bondvorgangs zeigt Abb. 4.

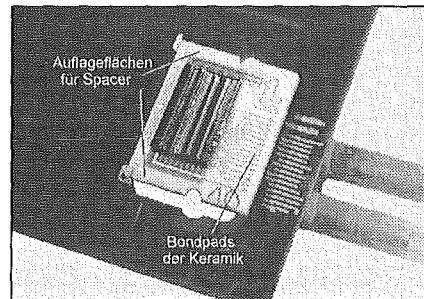


Abb. 4: Justierter und durch Vakuumansaugung gehaltener Detektorträger vor Ausführung der Bondverbindungen.

## 3. Systemeigenschaften

Das vorliegende System arbeitet in erster und zweiter Beugungsordnung. Dies ist in Abb. 5 gezeigt. Die erreichte Auflösung ist besser als 13 nm in zweiter bzw. 20 nm in erster Ordnung. Mit einem Systemrauschen von 2,3 Counts liegt durch die Verwendung einer 16-Bit AD-Wandlung die Systemdynamik bei einer Einzelmessung bei 28000.

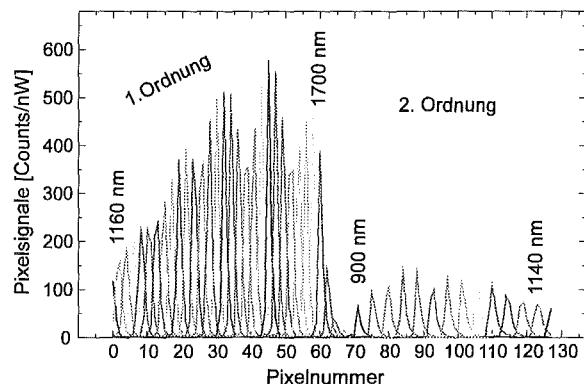


Abb. 5: Antwort des Spektrometersystems bei monochromatischer Strahlungseinkopplung (Integrationszeit 10 ms).

## Literatur

- [1] P. Krippner, J. Mohr: „Hochempfindliche LIGA-Mikrospektrometersysteme für den Infrarotbereich“, FZKA-Bericht 6346, Forschungszentrum Karlsruhe, 1999
- [2] P. Krippner, T. Kühner, J. Mohr, V. Saile: „Microspectrometer System for the Near Infrared Wavelength Range based on the LIGA Technology“, Proc. of Photonics West, SPIE Vol. 3012, 2000
- [3] T. Kühner, P. Krippner: „Systementwicklung für LIGA-Spektrometer“, Wissenschaftlich-Technische Berichte, FZR-280, Forschungszentrum Rossendorf, 1999, S.41-46

# Elektromagnetisch angetriebener Mikrochopper

Peter Krippner, Andreas Fath, Jürgen Mohr

Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Bei der Entwicklung des Spektrometersystems für den nahen Infrarotbereich [1] zeigte sich, dass ein weiteres Vordringen in den infraroten Wellenlängenbereich zwar hinsichtlich der sich hier stellenden Aufgaben wie z.B. der Gasanalytik sinnvoll ist, aber durch die auftretende Rauschproblematik zunehmend schwieriger wird. Dies wird verursacht durch das relativ hohe Rauschen der Detektoren in diesen Bereich in Kombination mit einer nachlassenden optischen Strahlungsintensität. Durch den Einsatz von rauschunterdrückenden Detektionsverfahren wie dem Lock-in Verfahren ist hier eine starke Verbesserung möglich. Dies erfordert jedoch ein zusätzliches Systemelement, da nun die Strahlung vor dem Auftreffen auf dem Detektor in ihrer Intensität moduliert werden muss.

Deshalb wurde ein elektromagnetisch angetriebener Mikrochopper [2, 3] entwickelt, der ohne Zunahme des Systemvolumens in das Mikrospektrometer im Bereich des Einkoppelschachts integriert werden kann. Das Integrationskonzept, die Funktionsweise und die Eigenschaften dieses Choppers werden vorgestellt.

## 1. Aufbau und Funktionsweise

Es handelt sich um einen Schwingchopper, bei dem sich eine bewegliche Blende, die an einer Rechteckparallelfeder aufgehängt ist, parallel zum Substrat bewegt. Die Position dieser Blende liegt nach der späteren Montage vor dem Eintrittsspalt des Mikrospektrometers. Hier moduliert sie die effektive Spaltbreite und somit die in das System einfallende Strahlungsleistung.

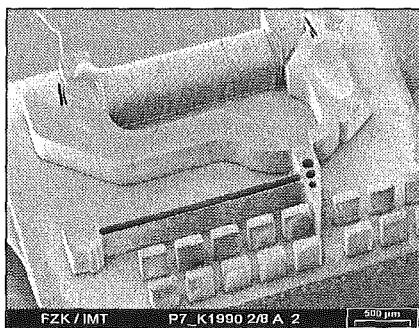


Abb. 1: Elektromagnetischer Schwingchopper.

Der durch LIGA-Technik und galvanische Abscheidung von Permalloy [4] auf einem Keramiksubstrat hergestellte Aktor ist in Abb. 1 dargestellt. Die Außenabmessungen betragen  $3,0 \times 3,2 \text{ mm}^2$ . Die Strukturhöhe ist mit  $280 \mu\text{m}$  an die Strukturhöhe des Spektrometers angepasst, in die er integriert wird. Bei dem hier gezeigten Typen sind zusätzliche Faserführungsstrukturen vorhanden,

die eine Charakterisierung des Aktorverhaltens unabhängig vom Einsatz im Spektrometer ermöglichen.

Fließt durch die hybrid eingesetzte Erregerspule ein Strom, so wird der Anker des Eisenkreises, der gleichzeitig die Blende bildet, vom Kern angezogen. Bei harmonischer Erregung der Spule führt dies dazu, dass die Blende mit der doppelten Frequenz des Erregerstroms schwingt.

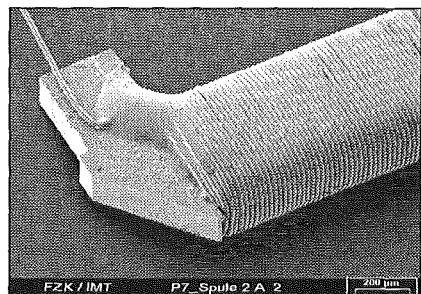


Abb. 2: Erregerspule des Aktors aus Permalloy mit einer fünfflagigen Wicklung mit 450 Windungen.

Die Erregerspule ist in Abb. 2 dargestellt. Im Gegensatz zu monolithischen Ansätzen [5] wird sie konventionell mit Kupferlackdraht (Durchmesser  $15 \mu\text{m}$ ) bewickelt und anschließend montiert [6]. Dadurch ist eine wesentlich höhere Windungsdichte möglich, die einen Betrieb mit relativ geringem Erregerstrom erlaubt.

## 2. Integrationskonzept

Der Chopper lässt sich mit oben liegender Keramik, die dadurch die Höhenjustage gewährleistet, in das Mikrospektrometer integrieren. Seine Lage neben der Einkoppelfaser ist in Abb. 3 gezeigt. Durch Anschlagsnasen am Aktorkörper, die am Justierrahmen anliegen, ist eine vollständig passive Justage möglich.

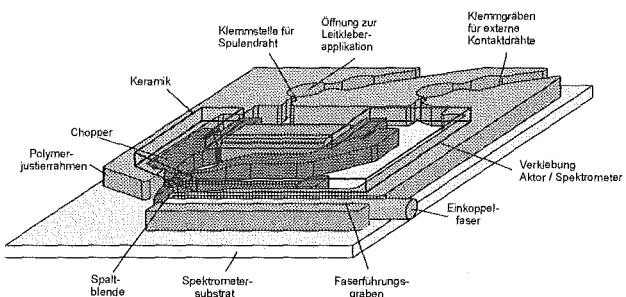


Abb. 3: Integration des Aktors in die Spektrometerstruktur.

Zur elektrischen Kontaktierung des Spulendrahtes in der Polymer-Spektrometerstruktur wird dieser über Klemmstellen gehalten und mit elektrisch leitfähigem Klebstoff kontaktiert.

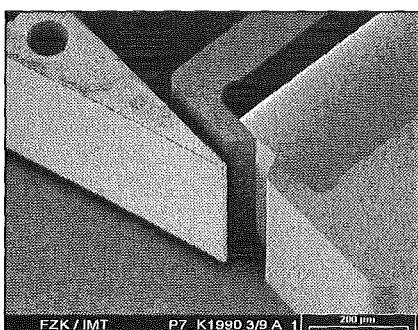


Abb. 4: Eintrittsspalt des Spektrometers mit Einkoppelfaser und der davor liegenden Blende des Choppers.

## Literatur

- [1] P. Krippner, T. Kühner, J. Mohr, V. Saile: „Microspectrometer System for the Near Infrared Wavelength Range based on the LIGA Technology“, Proc. of Photonics West, SPIE Vol. 3012, 2000
- [2] P. Krippner, J. Mohr: „Hochempfindliche LIGA-Mikrospektrometersysteme für den Infrarotbereich“, FZKA-Bericht 6346, Forschungszentrum Karlsruhe, 1999
- [3] P. Krippner, J. Mohr, V. Saile: „Electromagnetically Driven Microchopper for Integration into Microspectrometers based on the LIGA Technology“, Proc. of SPIE Vol. 3878, S. 144-154, 1999

Die resultierende Anordnung aus beweglicher Blende und Spaltblende des Spektrometers zeigt Abb. 4.

## 3. Eigenschaften

Die Resonanzfrequenz des Aktors liegt bei ca. 1100 Hz. Die Schwingungsamplitude und die Phasenbeziehung zwischen Strom und Bewegung sind in Abb. 5 dargestellt.

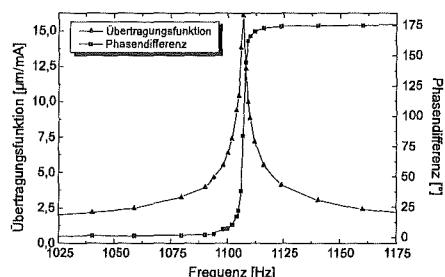


Abb. 5: Auslenkung und Phase als Funktion der Betriebsfrequenz.

Für die Kombination mit Lock-in Detektion erweist sich der Betrieb knapp unterhalb der Resonanz als stabilster Arbeitspunkt bei Schwankungen der Umgebungstemperatur. Hier beträgt bei einer Leistungsaufnahme von 14,2 mW (Spannungsamplitude 1,3 V) die Stabilität des Lock-in-Ausgangssignals  $\pm 0,3\%$ , wenn sich die Temperatur von 10°C auf 50°C erhöht. Die Amplitude der Blendenbewegung übersteigt hierbei 100 µm.

## 4. Ausblick

Der Chopper ermöglicht den Aufbau von hochempfindlichen Spektrometersystemen im IR-Bereich. Hierzu ist die Entwicklung eines vielkanaligen Ausleseschaltkreises auf der Basis von Lock-in Verstärkung für Zeilendetektoren notwendig.

- [4] A. Fath, W. Bacher, K. Bade: „Electrodeposition of nickel alloys as materials for magnetic actuators and for mechanically stable molding tools“, zur Veröff. In *Electrochimica Acta*, 2000
- [5] B. Rogge, J. Schulz, J. Mohr: „Entwicklung und Test von elektromagnetischen Linearaktoren basierend auf LIGA-Mikrotechnik“, FZKA-Bericht 5793, Forschungszentrum Karlsruhe, 1996
- [6] H. Guckel, T. Earles, J. Klein, L.D. Zook, T. Ohnstein: „Electromagnetic linear actuators with inductive position sensing“, *Sensors and Actuators A*, Bd. 53, Heft 1-3, S. 386-391, 1996

## Dreistufige Mikrostrukturen am Beispiel eines Zyklogetriebes

H. Hein <sup>1)</sup>, S.J. Chung <sup>1)</sup>, J. Mohr <sup>1)</sup>, T. Akashi <sup>2)</sup>, T. Hirata <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik, <sup>2)</sup> Sumitomo Heavy Industries Ltd, Japan

### Zusammenfassung

Für ein Mikro-Zyklogetriebe mit einem Untersetzungsverhältnis von 1:17 und den Außenmassen von 2mm Durchmesser und 1,15mm Höhe werden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie dreistufige Komponenten mit einer Gesamthöhe von 485 $\mu$ m aus galvanisch abgeschiedenem Ni hergestellt.

Die Herstellung des Mikro-Zyklogetriebes wird in einem Vortrag - Programmfpunkt Anwendungen – beschrieben. Im Exponat werden die aus Nickel gefertigten Komponenten und entsprechende REM-Aufnahmen des Getriebes gezeigt, wobei Detailaufnahmen die Qualität und Funktion der Komponenten verdeutlichen.

### 1. Komponenten des Mikro-Zyklogetriebes

Bei der Herstellung der Komponenten für das Getriebe werden 3 Lithographieprozesse kombiniert und die Resiststrukturen galvanisch mit Nickel aufgefüllt.

Die Komponenten werden einer sorgfältigen Qualitätsanalyse unterzogen, um so die Einhaltung der Spezifikationen zu gewährleisten. Die wichtigsten Größen sind die Exzentrizität der Antriebsscheibe und das hieraus resultierende Achsspiel sowie die Bauhöhen der Komponenten in den einzelnen Ebenen. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie ist die erreichte Ausbeute ausreichend

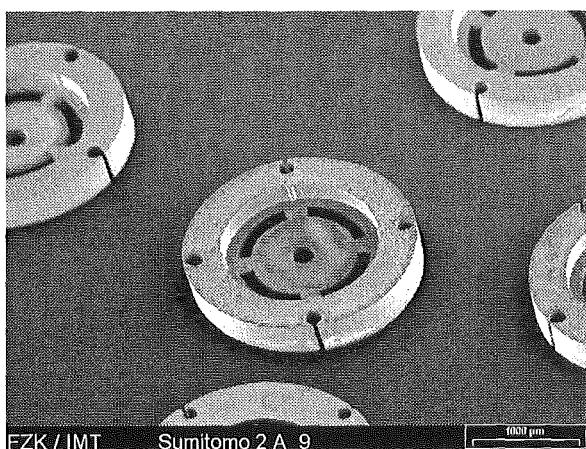


Bild 1: Unterteile des Gehäuses aus Nickel in einer Bauhöhe von ca. 445 $\mu$ m (Ebene 2+3). Die Ni-Oberfläche ist nicht bearbeitet.

Die Detailaufnahmen zeigen die gute Qualität der Strukturen

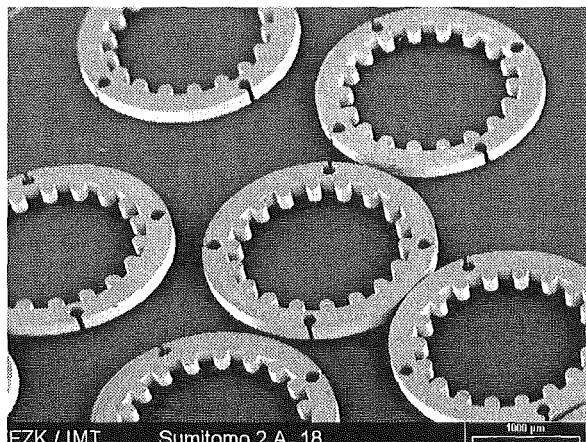


Bild 2: In das Gehäuse integrierte Ritzel mit 18-Zahnteilung. Zur Strukturierung dieser Bauteile werden UVL und RTL benutzt. Die Bauhöhe beträgt ca. 235 $\mu$ m (Ebene 1+2).

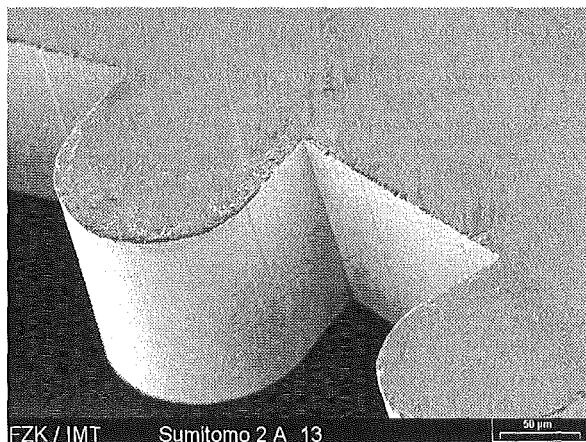


Bild 3: Zahnflanken des Ritzels (2. Ebene).

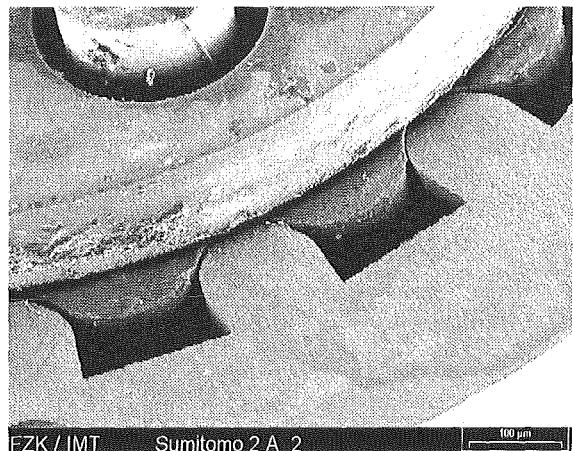
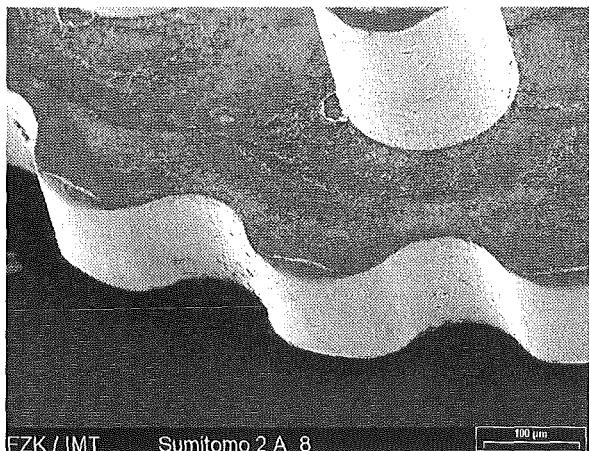


Bild 4: Das Innenzahnrad (Bild links) greift während der exzentrischen Bewegung in das Ritzel und dreht dabei über die Mitnehmerstifte die oben liegende Ausgangsscheibe (Bild rechts).

Für das sich drehende Innenrad sind deutlich verrundete Zahnflanken gewählt worden (Bild 4, links). Die Zahnflanken des Ritzels sind in Richtung des Fußkreises senkrecht ausgebildet (Bild 3), während in Richtung des Kopfkreises die

Zahnflanken kreisförmig sind. Hierdurch wird eine gutes Eingreifen des Innenrades während der exzentrischen Drehbewegung gewährleistet. Das Bild 4 (rechts) zeigt das Zusammenspiel der Getriebeteile.

# Mikroventile für ein fluidisches Baukastensystem

M. Kohl, T. Rogge und W.K. Schomburg

Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Langfristiges Ziel im Forschungszentrum ist die Entwicklung eines flexiblen Baukastensystems für fluidische Anwendungen. Hier werden zwei Ventilkonzepte für den Einsatz in diesem Baukastensystem vorgestellt. Beim ersten Konzept werden mikrostrukturierte Formgedächtnis-Dünnsschichten als Antrieb eingesetzt. Beim zweiten Konzept wird die Biegung einer Piezoscheibe über eine Art Hydraulik in den Hub einer Ventilmembran umgesetzt. Durch beliebige Kombinierbarkeit der Ventile mit anderen fluidischen Komponenten wird ein breites Anwendungsfeld möglich.

## 1. Einleitung

Zur Realisierung anwendungsspezifischer fluidischer Mikrosysteme werden Ventile, Sensoren und andere Komponenten benötigt, die durch modulare Verbindungstechnik beliebig kombinierbar sind. Im Forschungszentrum werden derzeit modular integrierbare Komponenten für ein fluidisches Baukastensystem entwickelt, die mit dem AMANDA-Verfahren gefertigt werden [1].

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit modular integrierbaren Mikroventilen, die entweder mit einem Formgedächtnis- oder Piezoantrieb angesteuert werden. Das Funktionsprinzip der Ventile wird erläutert, die Leistungsmerkmale werden vorgestellt und mögliche Anwendungsbereiche aufgezeigt.

## 2. Formgedächtnis-Mikroventil

Formgedächtnislegierungen (FGL) besitzen extrem hohe Energiedichten (bis  $10^7 \text{ J/m}^3$ ) und erlauben einfache, kompakte Bauformen mit hoher Miniaturisierbarkeit [2]. FGL-Mikroantriebe sind darüber hinaus elektrisch mit niedrigen Spannungen ansteuerbar und dadurch mit mikroelektronischen Schaltungen kompatibel [2].

Die Entwicklung von FGL-Mikroventilen erfordert geeignete FGL-Materialien. Das am weitesten verbreitete Material ist NiTi, das mittlerweile in allen Dickenbereichen erhältlich ist.

Abb. 1 zeigt schematisch eine Seitenansicht des FGL-Mikroventils im geöffneten (a) und geschlossenen Zustand (b). Das Ventil besteht im wesentlichen aus einem Gehäuseunterteil mit integrierter Ventilkammer und Ventilsitz, einer Kunststoffmembran, einer Distanzscheibe, dem FGL-Mikroantrieb und einem Gehäuseoberteil. Der Durchmesser der Ventilkammer beträgt hier 2 mm. Der Durchmesser der fluidischen Durchführung ist 200  $\mu\text{m}$ , die Ventilsitzbreite 100  $\mu\text{m}$ .

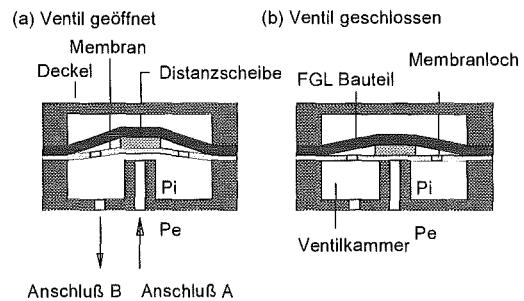


Abb. 1: Schema des FGL-Mikroventils.

Bei angelegter Druckdifferenz zwischen den fluidischen Anschlüssen wird die Membran über dem Ventilsitz angehoben und die Arme des FGL-Antriebs gedehnt. Das Ventil befindet sich dann im geöffneten Zustand, Abb. 1(a). Beim Beheizen der FGL-Arme mit elektrischem Strom nehmen die Arme ihre planare Gedächtnisgestalt an und pressen die Membran auf den Ventilsitz, der dadurch abgedichtet wird, Abb. 1(b).

Die Herstellung der FGL-Mikroventile umfasst die fotolithografische Strukturierung des FGL-Antriebs, das Abheben von Kunststoffmembran und FGL-Antrieb und die Hybridintegration der Ventilkomponenten durch Klebeverfahren. Auf der Ventilunterseite sind mechanische, fluidische und elektrische Schnittstellen vorgesehen, um einen modularen Aufbau auf einer fluidischen Grundplatte zu ermöglichen.

Abb. 2 zeigt statische Kennlinien des Gas-Durchflusses und des elektrischen Widerstands. Der maximale Druck kann durch die Dicke der Distanzscheibe eingestellt werden. Bei einer Dicke von 100  $\mu\text{m}$  liegt der maximal kontrollierbare Druck bei ca. 5 bar.

Das Verhalten der Schließzeiten ist in Abb. 3 als Funktion der elektrischen Leistung dargestellt. Im untersuchten Leistungsbereich unterhalb 90 mW

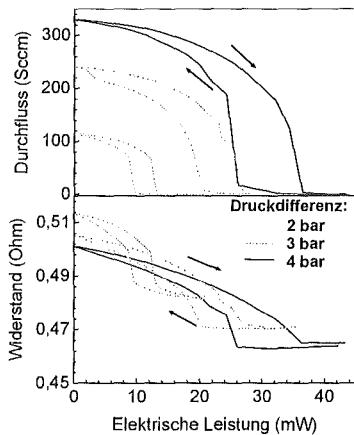


Abb. 2: Gas-Durchfluss und elektrischer Widerstand des Ventilantriebs.

liegen die minimalen Schließzeiten bei ca. 25 ms. Minimale Öffnungszeiten liegen bei ca. 90 ms.

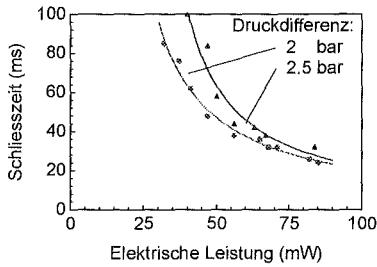


Abb. 3: Leistungsabhängigkeit der Schließzeiten

### 3. Piezo-Mikroventil

Aktorsysteme mit Piezokeramiken zeichnen sich durch kurze Reaktionszeiten (< 1 ms), geringe Leistungsaufnahme und hohe Energiedichte (bis  $10^5 \text{ J/m}^3$ ) aus. Abb. 4 zeigt schematisch das Piezo-Mikroventil. Es besteht aus einer Übersetzungs- kammer, die durch einen Piezo-Biegeaktor, das Gehäuse und eine Kunststoffmembran gebildet wird. Der Biegeaktor besteht aus einem Piezobimorph mit PZT als piezoaktivem Material. Wölbt sich das Biegeelement nach oben durch, erzwingt das volumenkonstante Übersetzungsmedium eine Auswölbung der Membran und öffnet so das Ventil. Von einer hydraulischen Übersetzung unterscheidet sich diese Übersetzung durch die Verwendung eines elastischen Feststoffs, der die Herstellung wesentlich vereinfacht. Darüberhinaus kann so keine Hydraulikflüssigkeit auslaufen, die bei Mikroaktoren ja nicht nachgefüllt werden kann.

Wie beim AMANDA-Verfahren üblich [1], wird das Piezo-Mikroventil aus zwei abgeformten Gehäuseteilen hergestellt, zwischen denen eine Kunststoffmembran angebracht ist. Als Antrieb wird ein Biegeaktor eingeklebt. Das Übersetzungsmedium wird in flüssiger Form eingespritzt und härtet unter Nachdruck aus. Der Druckbereich des Ventils kann durch den Einspritzdruck des Übersetzungsmediums eingestellt werden, sodass ohne Änderungen am Design Ventile für unterschiedli-

che Einsatzbedingungen hergestellt werden können. Dabei werden mehrere Ventile parallel gefertigt, die nach Aushärten des Übersetzungsmediums vereinzelt werden. Auf der Ventilunterseite sind wie bei den FGL-Ventilen modulare Schnittstellen vorgesehen. Abb. 5 zeigt den Gasfluss durch die Ventile als Funktion der anliegenden Spannung. Bisher konnten Ventile für einen Druckbereich bis 2 bar hergestellt werden, die Ansprechzeiten unter 20 ms erreichen.

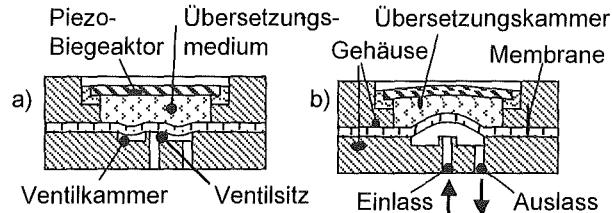


Abb. 4: Schema des Piezo-Mikroventils

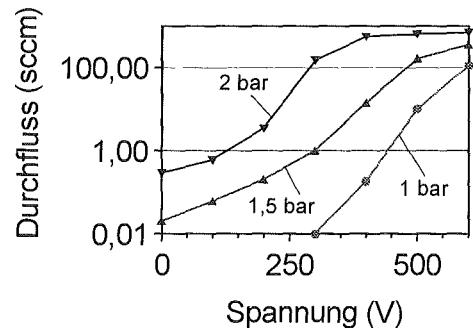


Abb. 5: Gasfluss durch die Piezo-Ventile in Abhängigkeit der anliegenden Spannung bei der angegebenen Druckbelastung.

### 4. Anwendungen

Die Leistungsmerkmale der Mikroventile sind in Tab. 1 zusammengestellt. Als möglicher Einsatzbereich wird die Laboranalytik von Gasen und Flüssigkeiten angesehen. Durch Integration eines Durchflusssensors können Aufgaben der Dosier-technik erfüllt werden. Weitere Anwendungen sind durch die modulare Kombinierbarkeit mit anderen fluidischen Komponenten denkbar.

Leistungsmerkmal	FGL-Ventil	Piezo-Ventil
Ø Ventilkammer	2 mm	2 mm
Steuerleistung	< 40 mW	< 1mW
Fluss (Gas)	< 400 Sccm	< 700 Sccm
Druckdifferenz	< 5 bar	< 2 bar
Schließzeit	> 25 ms	< 20 ms
Öffnungszeit	> 90 ms	< 20 ms

Tab. 1: Leistungsmerkmale der Mikroventile

### Literatur

- [1] W.K. Schomburg, Fertigung marktgerechter mikrofluidischer Systeme mit dem AMANDA-Verfahren, dieser Tagungsband.
- [2] M. Kohl, Shape memory actuators in MEMS (Invited), Proc. SMST 99, Antwerp Zoo, Belgium, (1999).

# Einfluss der Luftfeuchtigkeit und anderer Umgebungsparameter auf AMANDA-Komponenten für die Mikrofluidik

R. Ahrens, Z. Rummler, W.K. Schomburg, C. Stingl, K. Wulff

Institut für Mikrostrukturtechnik

## Zusammenfassung

Mikrofluidische Komponenten, die mit dem AMANDA-Verfahren hergestellt werden, bestehen aus Kunststoffen. Dieser Werkstoff bestimmt wesentlich das Verhalten der Mikrokomponenten bei Veränderungen der Umgebungsparameter. Der vorliegende Bericht beschreibt unter anderem Untersuchungen zum Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Förderleistung von Mikropumpen und der Temperatur auf Drucksensoren. Durch die richtige Auswahl der eingesetzten Werkstoffe und ein an deren spezifische Eigenschaften angepasstes Design gelingt es, Umgebungs-einflüsse soweit zu reduzieren, dass sie sich bei vielen Anwendungen nicht störend bemerkbar machen und ihre Vorteile voll genutzt werden können.

## 1. Einleitung

Das AMANDA-Verfahren fasst die Verfahrensschritte Abformung, Oberflächenmikromechanik und Membranübertragung zusammen und erlaubt eine besonders preisgünstige Fertigung von Mikrostrukturprodukten aus Kunststoffen [1, 2]. Der Kostenvorteil, der durch die Mikroabformung im Nutzen und die Fertigung von Membranen aus Polymeren gewonnen wird, ist mit besonderen Materialeigenschaften verbunden. Je nach Anwendung sind die Materialeigenschaften der Polymere ein Vorteil oder stellen ein Begrenzung der Einsatzmöglichkeiten dar. Oft müssen die Stoffeigenschaften der verwendeten Polymere beim Entwurf der Mikrokomponenten und bei der Planung der Fertigung berücksichtigt werden, um die Vorteile des Materials voll nutzen bzw. Beschränkungen überwinden zu können.

Im Institut für Mikrostrukturtechnik werden die Einflüsse und die Möglichkeiten, die sich aus den Materialeigenschaften von Polymeren für die daraus gefertigten Mikrosysteme ergeben, systematisch untersucht. Im vorliegenden Artikel wird besonders auf den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Leistung von Mikropumpen und der Temperatur auf die Kennlinie von Drucksensoren eingegangen.

## 2. Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Förderleistung von Mikropumpen

Die Luftfeuchtigkeit hat Einfluss auf das Verhalten von AMANDA-Komponenten, weil manche Kunststoffe dazu neigen, Feuchtigkeit aufzunehmen und dabei zu quellen. Da bei AMANDA-Komponenten eine verhältnismäßig dünne Membran mit einem massiveren Gehäuse verbunden wird, äu-

ßert sich der Einfluss der Luftfeuchtigkeit in der Regel in Änderungen der Membranspannung. Wenn das Gehäuse durch Quellung an Volumen zunimmt, wird eine daran angebrachte Membran zusätzlich gespannt. Umgekehrt führt ein Quellen der Membran relativ zum Gehäuse zu einer schlafferen Membran, die womöglich Falten wirft.

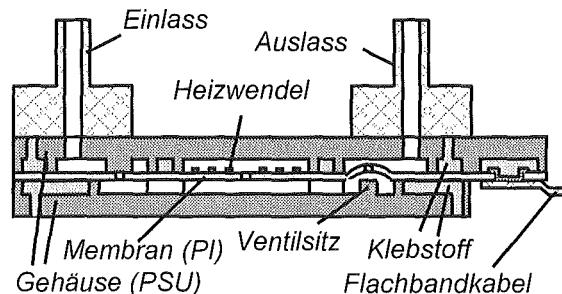


Abb. 1: Schematischer Querschnitt durch eine Mikropumpe

Dies wird auch bei der Untersuchung von Mikropumpen deutlich, die mit einer Polyimidmembran versehen sind [3]. Abb. 1 zeigt einen Schnitt durch eine solche Mikropumpe. Eine nur 160 nm dünne Heizwendel aus Gold, die von einer Membran aus Polyimid (PI) gehalten wird, erhitzt die Luft in der Pumpkammer. Der damit verbundene Druckanstieg wölbt die Ventilmembran vom Ventilsitz weg und öffnet so das Auslassventil. Nach ca. 1,8 ms wird der Heizpuls wieder abgeschaltet, die Luft kühlt ab und die Druckverhältnisse in der Mikropumpe kehren sich um. Dadurch schließt sich das Auslassventil und durch das Einlassventil wird frische Luft angesaugt.

Die Förderleistung der Mikropumpe ist davon abhängig, wie straff die Ventilmembranen über den

Ventilsitzen gespannt sind, denn bei einer stark gespannten Membran wird ein größerer Druck benötigt, um das Ventil zu öffnen. Da Polyimid dazu neigt, Feuchtigkeit aufzunehmen, lässt die Membranspannung mit zunehmender Feuchtigkeit nach. Dies äußert sich in einer höheren Förderrate bei gleichem Gegendruck, wie die Kennlinien einer Mikropumpe oben in Abb. 2 zeigen, die bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten aufgenommen wurden. Wenn die Vorspannung der Membran von vorn herein gering ist, führt eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit nicht mehr zu einer größeren Leistung der Pumpe. Statt dessen bilden sich Falten am Ventilsitz und bei geringem Gegendruck sinkt die Förderrate stark ab (vgl. Abb. 2 unten). Erst, wenn die Falten durch einen hinreichend hohen

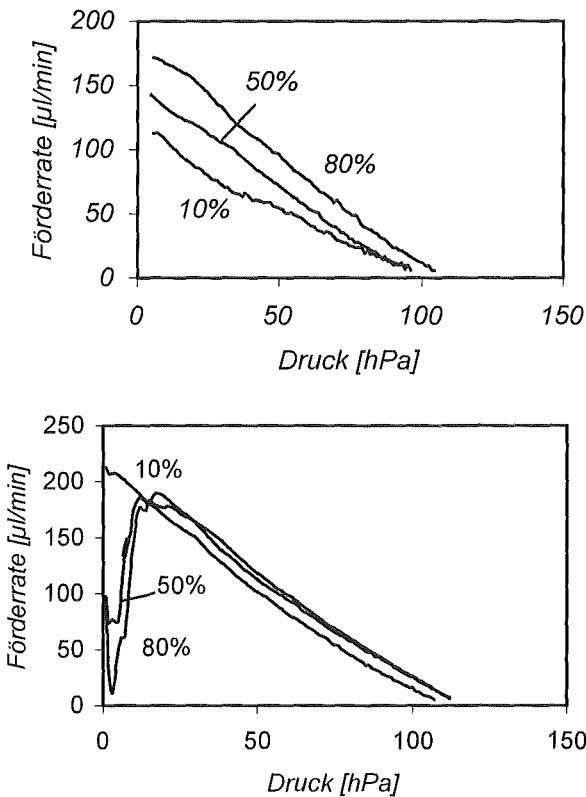


Abb. 2: Förderraten von Mikropumpen als Funktion des Gegendrucks in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit. Oben: Mikropumpe mit hoher Vorspannung der Membran, unten: geringe Membranspannung.

Gegendruck flach gedrückt werden, stellt sich die übliche Kennlinie ein.

Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Förderrate lässt sich verhindern, indem die Membran von der Luft abgeschirmt wird. Dies wird deutlich, wenn die Ventilmembranen mit einer dünnen Goldschicht überzogen werden. Abb. 3 zeigt die Veränderung der Förderrate von Mikropumpen ohne Gegendruck unter dem Einfluss von Änderungen der Luftfeuchtigkeit. Eine andere Möglich-

keit ist die Verwendung einer Membran aus einem Polymer, das unter dem Einfluss der Luftfeuchtigkeit nicht quillt wie z.B. PTFE [3].

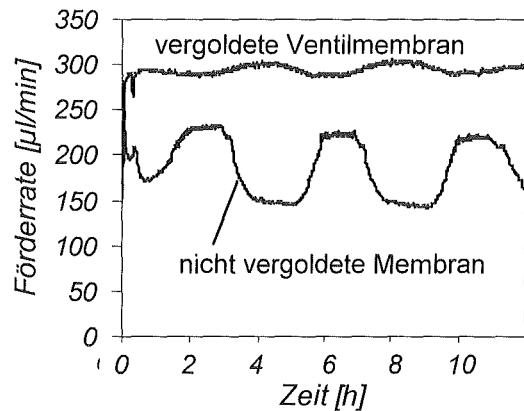


Abb. 3: Förderrate ohne Gegendruck von Mikropumpen ohne (unten) und mit (oben) vergoldeter Ventilmembran unter dem Einfluss einer zwischen 20 % und 80 % wechselnden Luftfeuchtigkeit. Durch das Abschirmen der Membran konnte die Schwankung der Förderleistung von 20 % auf 1,7 % reduziert werden.

### 3. Einfluss der Temperatur auf die Förderleistung von Mikropumpen

Aufgrund des thermopneumatischen Antriebs der Mikropumpe hat die Umgebungstemperatur einen starken Einfluss auf deren Förderleistung. Die besten Ergebnisse erzielt man mit kurzen, kräftigen Heizpulsen, an die sich eine rasche Abkühlung anschließt. Erfolgt die Aufheizung zu langsam, fließt vorzeitig Wärme an das Gehäuse ab.

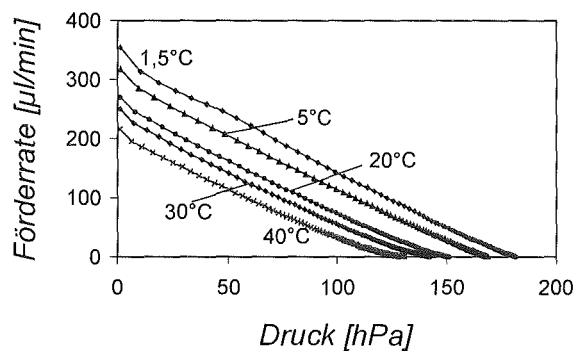


Abb. 4: Förderrate in Abhängigkeit vom erzeugten Druck bei 5 verschiedenen Umgebungstemperaturen.

Abb. 4 zeigt 5 Kennlinien einer Mikropumpe bei Temperaturen zwischen 1,5°C und 40 °C. Für diese Untersuchung wurde die Pumpe auf ein temperaturgeregeltes Peltierelement montiert. Gegenüber einem Betrieb bei 20°C lässt sich durch Ab-

kühlen auf 1,5°C die Förderrate um 30 % steigern, gleichzeitig kann ein um 20 % erhöhter Enddruck erzeugt werden. Andererseits nehmen Förderrate und Druck um 20 % bzw. 15 % ab, wenn die Pumpe bei 40°C betrieben wird. Als Konsequenz dieser Untersuchung sollte die Pumpe stets mit einer ausreichenden Kühlung betrieben werden, etwa durch Montage auf einen geeigneten Kühlkörper. Durch aktive Kühlung (wie im Versuch mit einem Peltierelement) lässt sich die Förderleistung merklich steigern.

#### 4. Abbau der Querempfindlichkeit von Drucksensoren auf mechanische Spannungen und Temperaturänderungen

Für die Handhabung und präzise Dosierung kleiner flüssiger oder gasförmiger Probenmengen werden Druck- und Flußsensoren benötigt, die sich durch kleine Totvolumina auszeichnen. Ihr Signal darf nicht von äußeren Einflüssen wie z.B. Änderungen der Temperatur oder mechanischen Belastungen des Gehäuses beeinträchtigt werden. Da Kunststoffe eine große thermische Dehnung aufweisen, erscheinen sie zunächst nicht das ideale Material für Sensoranwendungen zu sein. Wie das hier beschriebene Beispiel zeigt, ist es durch ein günstiges Design aber trotzdem möglich, das preisgünstige AMANDA-Verfahren für die Herstellung von Drucksensoren zu nutzen.

Der Drucksensor besteht im wesentlichen aus zwei abgeformten Gehäuseteilen, einer Kunststoffmembran und einer Messplatte (s. Abb. 5). Die Messplatte ist aus einem Material, das sich durch eine geringe thermische Dehnung auszeichnet wie z.B. Glas oder Keramik.

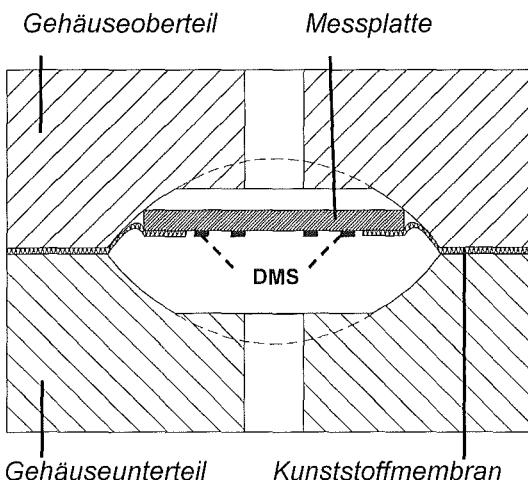


Abb. 5: Drucksensor mit Messplatte

Auf der Oberfläche der Messplatte befinden sich Dehnungsmeßstreifen (DMS), die der Messung der Messplattendehnung dienen. Wenn sie mit

einer Druckdifferenz belastet wird, wölbt sich die Messplatte, und ihre Dehnung wird mit den DMS erfasst. Die Kunststoffmembran dient der Abdichtung des Sensors. Sie wird nach der Montage überdehnt, so daß sie sehr schlaff ist und sich der Form des Gehäuses anpasst. Sie kann keine nennenswerten Kräfte mehr vom Gehäuse auf die Messplatte übertragen, so dass die Messplatte von thermischen oder mechanischen Dehnungen des Gehäuses entkoppelt ist.

Je nach der Richtung einer Druckbelastung legt sich die Messplatte entlang ihres Randes an ein Gehäuseteil an. Die innen liegenden Wände der Gehäuseteile haben in dem Bereich, in dem die Messplatte sie berühren kann, die Form einer Hohlkugelschale. Dadurch erfolgt die Lagerung unabhängig von der genauen Ausrichtung und der genauen Position der Messplatte relativ zum Gehäuse immer auf die gleiche Weise an ihrem Rand. Deshalb wird die Durchbiegung der Messplatte auch nur wenig von Fertigungstoleranzen beeinflusst und selbst kleine Verformungen des Gehäuse wirken sich nicht auf das Messsignal aus. Wenn sich die Richtung der anliegenden Druckdifferenz umkehrt, wird die Messplatte vom jeweiligen Gehäuseteil weg bewegt und legt sich am gegenüberliegenden Gehäuseteil an. Dabei führt selbst ein Versatz der Gehäuseteile gegenüber oder eine Abweichung der Lage der Messplatte aus der Mitte nicht zu einer veränderten Kennlinie des Sensors, denn die Durchbiegung der Messplatte ist nur durch die Druckdifferenz und die Lagerung der Messplatte bestimmt, die immer in ähnlicher Weise entlang ihres Randes erfolgt (s. Abb. 6).

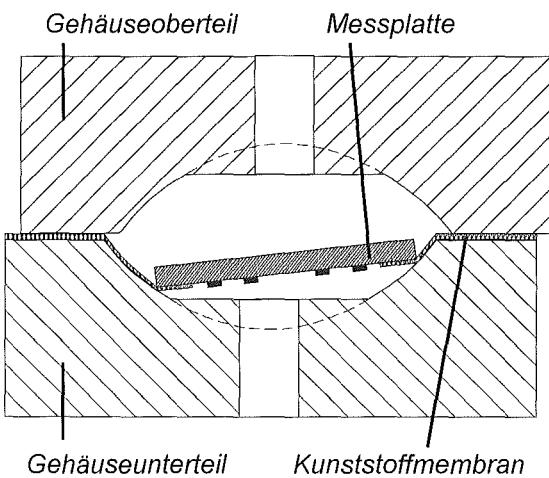


Abb. 6: Gehäuseversatz und Abweichung der Lage der Messplatte aus der Mitte

Die Messplatte hat idealerweise eine Kreisform und ermöglicht somit bei kleinen Auslenkungen eine lineare Kennlinie des Sensors. Die Kontur der Messplatte kann jedoch auch in bestimmten Fäl-

len von der Kreisform abweichen, wodurch die Kennlinie gezielt verändert werden kann. Statt den Wänden der Gehäuseteile die Form einer Hohlkugelschale zu geben, ist es auch möglich, eine gleichbleibende Lagerung der Messplatte durch eine Dreipunktllagerung zu erreichen.

Das Design sieht außerdem im Bereich der DMS eine Unterbrechung der Membran vor, sodass bei Temperaturänderung eine unterschiedliche thermische Dehnung von Membran und Messplatte nicht zu einer Krümmung der Messplatte führt, die das Messsignal stören könnte.

Die Entkoppelung durch eine schlaffe Membran erlaubt es, für die Gehäuseteile, die Membran sowie die Messplatte unterschiedliche Materialien einzusetzen, was besonders im Hinblick auf die Langzeitstabilität des Sensors von Interesse ist. So sollte die Messplatte aus einem stabileren Werkstoff als Kunststoff sein, da dieser dazu neigt zu kriechen.

## 5. Resümee

Das AMANDA-Verfahren zeichnet sich aus durch die besonders preisgünstige Fertigung von Mikrokomponenten aus Kunststoffen, die durch die Kombination von Mikroabformung mit den Methoden der Oberflächenmikromechanik und der Übertragung von Membranen erreicht wird. Die Verwendung von Kunststoffen für Mikrokomponenten eröffnet neue Möglichkeiten wie z.B. die freie Auswahl aus einer Vielfalt von Materialeigenschaften und den Einsatz einfacher Verbindungstechniken. Andererseits müssen die besonderen Eigenschaften von Polymeren bei der Konstruktion und bei der Planung der Fertigung berücksichtigt werden.

Am Beispiel des Einflusses der Luftfeuchtigkeit, der Temperatur und mechanischer Belastungen auf die Förderrate von Mikropumpen und das Signal von Drucksensoren wird deutlich, wie durch eine geschickte Materialauswahl und einen überlegten Entwurf die Vorteile der polymeren Werkstoffe voll genutzt werden können.

## Literatur

- [1] Schomburg, W.K.; Ahrens, R.; Bacher, W.; Martin, J.; Saile V., "AMANDA – Surface Micromachining, Molding, and Diaphragm Transfer", Sensors and Actuators A **76** (1999) 343 - 348
- [2] Schomburg, W.K.; Kaiser, S., „Fertigung marktgerechter mikrofluidischer Systeme mit dem AMANDA-Verfahren“, 2000, dieser Band
- [3] Stingl, C., „AMANDA-Mikropumpe mit einer PTFE-Membran“, Diplomarbeit an der Fachhochschule Kaiserslautern und am Forschungszentrum Karlsruhe, 2000

# Mikrokapillarstrukturen aus Kunststoff für die Biotechnologie

Andreas Guber <sup>1)</sup>, Walter Bacher <sup>1)</sup>, Eric Gottwald <sup>2)</sup>, Mathias Heckele <sup>1)</sup>,  
Dirk Herrmann <sup>1)</sup>, Alban Muslija <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Mikrostrukturtechnik  
<sup>2)</sup> Institut für Medizintechnik und Biophysik

## Zusammenfassung

Mikrokapillarstrukturen für LabChips und Mikro/Nanotiterplatten für Anwendungen in der Biotechnologie und in den Life-Science-Bereichen enthalten verschiedene Formen von Mikrokanälen und Mikrovertiefungen. Damit diese als kostengünstiges Massenprodukt erfolgreich sind, müssen sie in zunehmendem Maße aus Kunststoffen gefertigt werden.

## 1. Einleitung

Für biotechnologische und Life-Science-Anwendungen in den Bereichen der LabChips und der Mikro/Nanotiterplatten werden derzeit extrem miniaturisierte Komponenten auf Basis unterschiedlicher mikrofluidischer Baugruppen benötigt, welche möglichst in integrierter Form auf einem Substrat untergebracht sein sollen. Typischerweise sind dies im Falle von LabChips und  $\mu$ TAS-Systemen Stellen zur Probenaufgabe, Reservoirs für Zusatzstoffe und Reagenzien, Mikrokapillarstrukturen auf Basis integrierter Mikrokanäle und Mischkanäle sowie Detektionszonen. Mikro- und Nanotiterplatten enthalten mehrere hundert oder tausend Wells (Mikrovertiefungen), welche beispielsweise im Falle von Hochdurchsatz-Screening meist isoliert voneinander mit Chemikalien gefüllt werden können. Bei Bedarf können modifizierte Mikro- bzw. Nanotiterplatten auch in den Bereichen des Tissue Engineering zur Gewebekultivierung eingesetzt werden [1]. Derzeit zeichnet sich ein Trend zur Produktion obiger Komponenten auf Basis von Einwegprodukten aus Kunststoff ab.

## 2. Fertigung von mikrofluidischen Strukturen

Eine äußerst kostengünstige Fertigung von LabChips sowie Mikro/Nanotiterplatten für medizinisch/diagnostische Anwendungen ist mit Hilfe von Kunststoff-Replikationstechniken, wie beispielsweise dem Vakuumheißprägen, möglich. Die benötigten metallischen Abformwerkzeuge können u.a. auch mit der  $\mu$ EDM-Technik (Mikroerodiertechnik) gefertigt werden [2].

Abb. 1 zeigt ein Abformwerkzeug für Mikrokapillarstrukturen aus Edelstahl, welches durch Senkerodiertechnik gefertigt worden ist. Die hier eingesetzte Senkelektrode ist zuvor durch Schneiderodiertechnik in Kupfer realisiert worden. Durch nachträgliches Elektropolieren kann die Oberflächenqualität des Formeinsatzes erheblich verbessert werden. Die Stege auf dem Edelstahl-

Formeinsatz sind zwischen 150 und 400  $\mu$ m breit, etwa 400  $\mu$ m hoch und teilweise mehrere Millimeter lang.

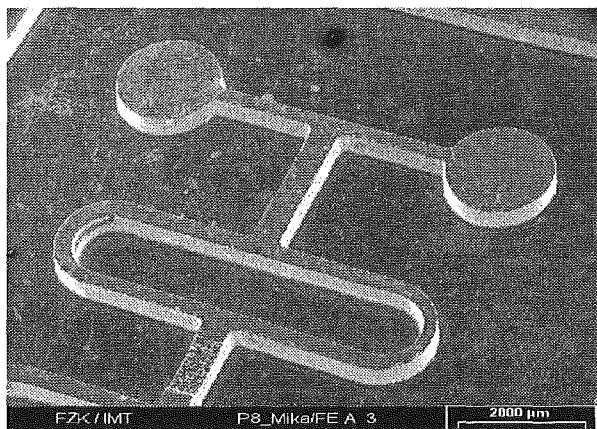


Abb. 1: Senkerodierter Formeinsatz aus Edelstahl, welcher die inversen Strukturen für zwei Probenaufgabestellen und für mehrere Mikrokanäle enthält.

Durch Schneiderodieren mit einem nur 50  $\mu$ m dicken Schneiddraht ist der in Abb. 2 dargestellte Formeinsatz aus Edelstahl realisiert worden. Auf einer Fläche von einem Quadratzentimeter befinden sich 256 Mikroquaderstrukturen.

Mit Hilfe der Vakuum-Prägetechnik werden die metallischen Mikrostrukturen direkt in biokompatible Kunststoffe (PMMA, PC) überführt und ergeben entsprechende Mikrokanal- bzw. Mikrowellstrukturen (vgl. Abb. 3 bzw. Abb. 5). Mikrokapillarstrukturen erhält man schließlich durch eine großflächige, sehr dichte Abdeckung sämtlicher Mikrokanäle bzw. Stege und der Mischkanäle. Abb. 4 zeigt in einem Schnittbild einen gedeckelten Mikrokanal, welcher entweder durch Kleben oder Verschweißen an der Oberseite verschlossen werden kann. Kapillare Fließversuche an parallel angeordneten Mikrokanalstrukturen zeigen eine sichere Trennung und damit kein Über-springen der Medien.

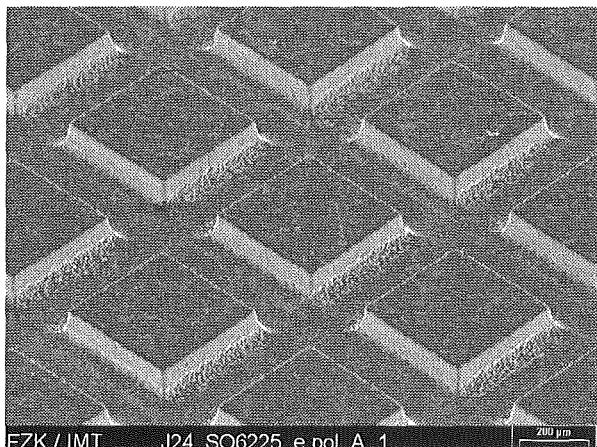


Abb. 2: Schneiderodierisch gefertigte Mikroquaderstrukturen aus Edelstahl. Jeder Quader besitzt ein Seitenmaß von 400  $\mu\text{m}$  und ist ca. 200  $\mu\text{m}$  hoch. Das Rastermaß beträgt 600  $\mu\text{m}$ .

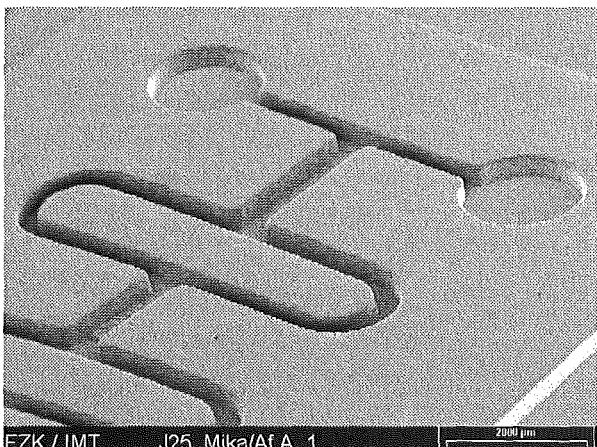


Abb. 3: Durch Prägetechnik in PMMA abgeformte Mikrokanalstrukturen.

Die in Abb. 5 dargestellten Wells können beispielsweise als Grundstruktur in fortschrittlichen Mikro- bzw. Nanotiterplatten für Hochdurchsatz-Screening-Versuche zum Einsatz kommen. Durch das Einarbeiten von mikrofluidischen Hilfsstrukturen in die Bodenplatte eines jeden Wells werden Kunststoffmikrobehälter für das Tissue Engineering erhalten, welche sich für eine dreidimensionale Langzeitkultivierung von tierischen oder menschlichen Zellen besonders eignen. Die relativ rauen Innenflächen der Wells begünstigen vermutlich das Anwachsen von Zellkulturen.

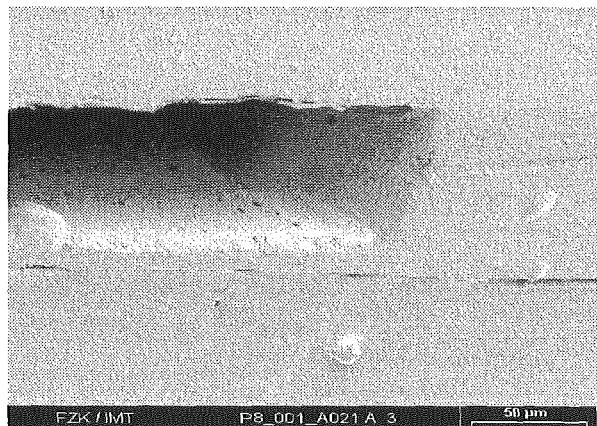


Abb. 4: REM-Aufnahme einer gedeckelten Mikrokapillarstruktur.

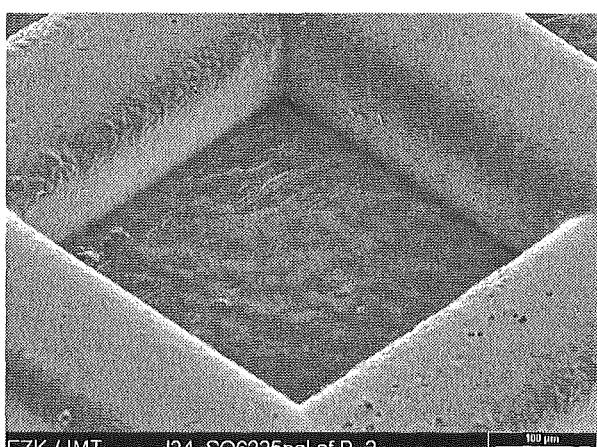


Abb. 5: Detailaufnahme einer in PC abgeformten Mikrowellstruktur mit einem Öffnungsmaß von 400  $\mu\text{m}^2$  und einer Well-Tiefe von ca. 180  $\mu\text{m}$ .

### 3. Ausblick

Eine kostengünstige Fertigung von filigranen Mikrokapillarstrukturen für LabChips und von Arrays von Mikrowellstrukturen für Mikro- bzw. Nanotiterplatten aus Kunststoffen auch über größere Flächen ist mittels erodiertechnisch gefertigten Abformwerkzeugen und durch Vakuum-Prägetechniken möglich.

### Literatur

- [1] G. Knedlitschek et al., "A tissue-like culture-system using microstructures: influence of extracellular matrix material on cell adhesion and aggregation", J Biomech Eng 121, 35-39 (1999)
- [2] A. E. Guber et al., "Microcapillarystructures for lab chips and micro/nanotiterplates to be used in biosensor technology and medical laboratory diagnostics", J Int. Fed. Medical & Biological Engineering, Vol. 37, Supl. 2, 360-361 (1999)

# SAW–Sensorsysteme für die industrielle Prozessanalytik

M. Rapp <sup>1)</sup>, A. Voigt <sup>1)</sup>, T. Wessa <sup>2)</sup>, J. Reibel <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Instrumentelle Analytik; <sup>2)</sup> Schering AG, Berlin; <sup>3)</sup> Bürkert GmbH, Großröhrsdorf

## Zusammenfassung

Als Exponat wird das Sensorsystem SAGAS (= **S**urface **A**coustic **W**ave **A**roma und **G**as **A**naly**s**is **S**ystem) in seiner neuen, kompakten Form gezeigt. Es basiert nun auf einem weiter miniaturisierten multiplex-gesteuerten Array aus acht polymer-beschichteten Surface Acoustic Wave (SAW) Sensoren. Vorgeführt werden sekundenschnelle Unterscheidungen verschiedener organischer Gase, wie Lösungsmitteldämpfe, unter Laborbedingungen. Aktuelle Industrieanwendungen bei der Schering AG werden anhand des Posters vorgestellt und erläutert. Speziell für diese Anwendungen wurde zusammen mit dem Lizenzpartner, Bürkert, ein ausgerüstetes Sensorsystem für explosionsgeschützte Industriebereiche aufgebaut und bei der präparativen Prozeß-HPLC zur on-line Kontrolle eines Gradientenmischers erfolgreich eingesetzt. Die Datenanalyse ergibt nun sowohl eine qualitative wie auch quantitative Aussage über Eluentzusammensetzungen. Bei der quantitativen Bestimmung ergaben sich erfreulich geringe Meßunsicherheiten von besser als 1% ! Das System ist mittlerweile in den Routinebetrieb integriert und die verwendeten analytischen Methoden wurden in Anlehnung an die ICH-Guidelines validiert. Darüber hinaus zeigte das Sensorsystem hervorragende Eigenschaften bei der Rohstoffkontrolle. Dabei können flüssige und gasförmige Rohstoffe im Betrieb direkt vor dem Rührwerk auf Identität geprüft werden. Damit ergibt sich die Möglichkeit, Verwechslungen Vorort schnell und einfach zu vermeiden.

## 1. SAW–Sensorsystem SAGAS

Neues Kernstück des Sensorsystems ist nun ein weiter miniaturisierter Sensorkopf, der aber dieselbe Sensorkonfiguration wie sein Vorgänger [1] nutzt: Acht auswechselbare Polymer-beschichtete SAW–Einzelsensoren und eine gemeinsame Referenz. Die Miniaturisierung gelang mit einem neuen Schaltungskonzept, einem Multiplexverfahren, bei dem die Sensoren nacheinander angesteuert werden, wobei für das Auslesen des kompletten Arrays nach wie vor nur eine Sekunde benötigt wird. Durch den damit verbundenen seriellen Betrieb fällt nun der Zwang zur elektromagnetischen Trennung der Oszillatoren weg, wodurch die SAW–Sensorköpfe generell kleiner und kostengünstiger aufgebaut werden können. Die Abb. 1 zeigt ein Demonstrationsgehäuse dieses neuen Sensorkopfes, der im wesentlichen nun folgende Spezifikationen aufweist:

- ◆ 8 auswechselbare Polymer-beschichtete SAW–Einzelsensoren und eine gemeinsame Referenz
- ◆ Sensoren basieren auf kommerziellen SAW–Resonatoren von Siemens ( $f_0=433,92$  MHz)
- ◆ Spezieller Multiplexbetrieb und damit kostengünstige Einplatinentechnik
- ◆ Abmessungen von nur  $60 \times 46 \times 17$  mm<sup>3</sup>
- ◆ PC–gestützte Sensorschicht–spezifische Sensitivitätsoptimierung

Mit der im letzten Punkt erwähnten PC-gesteuerten Sensitivitätsoptimierung lässt sich die Elektronik exakt auf den jeweiligen SAW–Sensor abstimmen. Unterschiedliche akusto–elektrische Eigenschaften der Sensorschichten lassen sich über dieses Werkzeug elektronisch ausgleichen. Insgesamt gesehen verbessert sich dadurch das Nutzsignal und die Sensor–Reproduzierbarkeit erheblich [2]. Abb. 2 zeigt das neue SAGAS, welches neben dem Sensorkopf, seine Ansteuerelektronik, eine Temperaturregelung, Probenahmeeinrichtung, Ablaufsteuerung auch bereits eine Signalmusterauswertung mittels künstlichen neuronalen Netzen enthält.

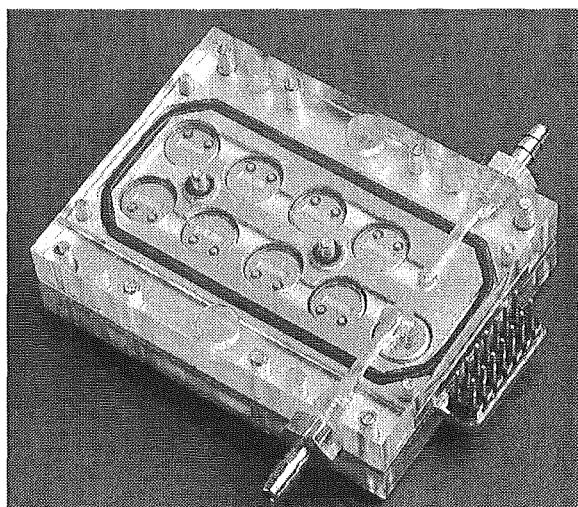


Abb. 1: Neuer Sensorkopf im Demonstrationsgehäuse mit der Größe  $60 \times 46 \times 17$  mm<sup>3</sup>



Abb. 2: Komplettes SAW-Sensorsystem mit Ablaufsteuerung und Datenauswertung der Signalmuster mit künstlichen neuronalen Netzen.

## 2. Industrieanwendungen

Im Rahmen eines Industrieprojektes mit der Schering AG in Berlin wurde SAGAS für verschiedene Anwendungen ausgerüstet. Hierbei waren zwei Fälle zu unterscheiden: die qualitative Analyse zur Identifikation einzelner Stoffe aus einem Ensemble vieler Reinstoffe und die quantitative Analyse zur Konzentrationsbestimmung einzelner Komponenten in binären und ternären Gemischen. Grundsätzlich gemessen wurde hierbei in der Gasphase, weshalb jeweils eine spezielle Probenahme zur Evaporation der meist flüssigen Analyten entwickelt wurde.

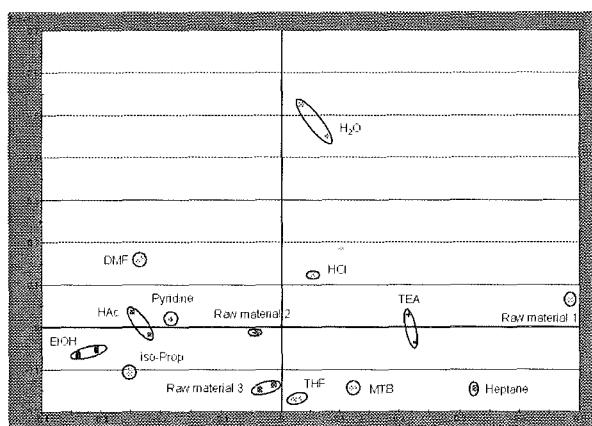


Fig. 1: PCA-Plot zeigt die gute Identifizierung von Rohstoffen für die organische Synthese

### 2.1 Qualitative Gasanalyse

Aufgabe war die Identifikation von flüssigen oder gasförmigen Rohstoffen für die organische Synthese. Die Fig. 1 zeigt einen PCA-Plot von Messungen mit 14 verschiedenen organischen Substanzen, die bei Schering für eine typische Synthese eines Wirkstoffzwischenproduktes verwendet werden. Wie das Diagramm zeigt, sind alle Substanzen gut voneinander zu unterscheiden.

Insbesondere konnte Wasser durch eine entsprechend geschickte Auswahl von sensitiven Polymeren für das Sensorarray ideal von den anderen Stoffen diskriminiert werden. Am gezeigten PCA-Plot erkennt man dies anhand des großen Abstandes des Wasserclusters von den Clustern der anderen Stoffe.

### 2.2 Quantitative Gasanalyse

Eine Steigerung gegenüber der qualitativen Gasanalyse ist die quantitative Gasanalyse [3]. Hier werden einzelne Komponenten in Gasmischungen nicht nur erkannt (identifiziert) sondern auch quantifiziert, d.h. ihre Konzentrationen bestimmt. Bei Schering wurde für die schnelle quantitative on-line Kontrolle der Eluentenzusammensetzung einer präparativen HPLC-Anlage (PHPLC) zusammen mit dem Lizenzpartner Bürkert ein Sensorsystem für explosionsgeschützte Industriebereiche aufgebaut [4]. Fig. 2 zeigt ein Ergebnis aus der Normal-Phasen-HPLC: eine quantitative Analyse von Aceton / Dichlormethan Mischungen. Die Genauigkeit der Konzentrationsbestimmungen war dabei besser als 1% [5]!

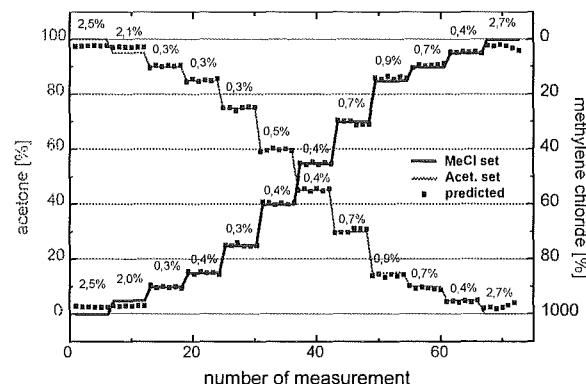


Fig. 2: Quantitative Analyse einer binären Mischung: Die bestimmten Konzentrationen (Punkte) zeigen gegenüber den eingestellten (Linien) Abweichungen < 2,7 %. Ohne die extremalen Konzentrationen sinkt die Fehlerrate auf < 1% ab!

### Literatur:

- [1] Rapp M., Reibel J., Voigt A., Bülow O.. 3. PMT-Statuskolloquium, 2. – 3. April 1998
- [2] Rapp, M.; Reibel, J.; Voigt, A.; Balzer, M.; Bülow, O., New Miniaturized SAW-Sensor Array for Organic Gas Detection Driven by Multiplexed Oscillators, Sensors and Actuators, B, in press.
- [3] Rapp, M., Reibel, J.: Gasanalytik mit Sensorsystemen: Ein Weg zur elektronischen Nase?, Nachr. Chem. Tech. Lab. 44 (1996), S. 1088–1092
- [4] Töpfer H., Rapp M., 4. PMT-Statuskolloquium, 30.–31. März 2000, in diesem Tagungsband !
- [5] Wessa T., Küppers S., Rapp M., Reibel J., Stahl U.: Industrial Applications of SAW-Sensors: on-line control of preparative HPLC, Fresenius Journal of Analytical Chemistry 363, 1999, 8, 744-748.

# Massenproduktion oxidischer Mehrschichtsysteme für Gassensormikroarrays

Joachim Fuchs, Jürgen Benz, Michael Bruns, Joachim Goschnick

Institut für Instrumentelle Analytik

## Zusammenfassung

Das Institut für Instrumentelle Analytik (IFIA) entwickelt im Rahmen des PROXI-Projekts unter dem BMBF-Förderprogramm "Produktion 2000" zusammen mit Industriepartnern ein Produktionsverfahren zur kostengünstigen Massenfertigung von Gassensormikroarrays für die Karlsruher Mikronase KAMINA. Das IFIA bearbeitet dabei die Weiterentwicklung der zur Strukturierung eingesetzten Schattenmaskentechnik und entwickelt ein Qualitätsmanagementsystem für die Fertigung. Dieses enthält sowohl physikalisch-chemische Prüfverfahren für jede Fertigungsstufe als auch gassensorische Prüftechniken, die eine effiziente Prüfung auch größerer Stückzahlen erlauben.

## 1. Einleitung

Elektronische Nasen werden zunehmend in der Produktion zur Überwachung von Stoffströmen, zur Arbeitsplatzüberwachung, zur Sicherstellung von Umweltverträglichkeit oder zur Qualitätskontrolle von Produkten ihren Einsatz finden. Die Anwendungspalette lässt sich um ein Vielfaches erweitern, wenn es gelingt, eine Elektronische Nase zu deutlich unter 100 DM herzustellen. Dann wird eine Integration in Massenprodukte mit diversen Anwendungen im Konsumbereich möglich; so in der Automobil-, Küchen- und Gebäudetechnik, wie auch in der privaten medizinischen Diagnostik.

Seit Mitte 1998 wird zusammen mit Industriepartnern die Großserienfertigung von Gassensor

mikroarrays (GSMA), Abb. 1, für die Karlsruher Mikronase (KAMINA) des IFIA [1-3] entwickelt, und zwar im Rahmen des Projekts "Wirtschaftliche Produktionstechnik für oxidische Mehrschichtsysteme mit lateraler Mikrostruktur am Beispiel eines Mikrogassensorsystems (PROXI)" als Teil des BMBF-Förderprogramms "Produktion 2000".

## 2. Aufgaben der Projektpartner

Im IFIA werden Gassensormikroarrays in Kleinserienfertigung mittels HF-Magnetron-Sputtern unter Verwendung von strukturgebenden Schattenmasken auf 3"- bzw. 6"-Siliziumscheiben mit jeweils 26 bzw. 122 Einzelarrays pro Wafer hergestellt.

Das PROXI-Projekt zielt darauf ab, auf dieser Basis ein industrielles Fertigungsverfahren zur Verfügung zu stellen, das GSMA in hohen Stückzahlen (100000 St./a) zu niedrigen Preisen produzieren kann. Neben dem Forschungszentrum Karlsruhe als Entwickler sind folgende industriellen Projektpartner beteiligt: Leybold Systems (Metall-oxidfeld) und IPT Ionen- und Plasmatechnik (Gradientenmembran) als Hersteller von Fertigungsanlagen, Jenoptik L.O.S. GmbH (Metallisierungen) als Produzent von Dünnschichtsystemen sowie Hella KG Hueck & Co. als Automobilzulieferer, der die Qualität der Mikroarraychips in der praktischen Anwendung repräsentativ an der Lüftungsklappenregelung bei PKW prüft, vgl. Abb. 2. In der ersten Projektphase wurden die GSMA nach den einzelnen Teilstufen fertiggestellt und auf ihre gassensensitiven Eigenschaften getestet, um jeden Einzelschritt bezüglich der erreichten Qualität beurteilen zu können. In der derzeitigen Phase wird die Gesamtfertigung bei den Partnern erprobt und

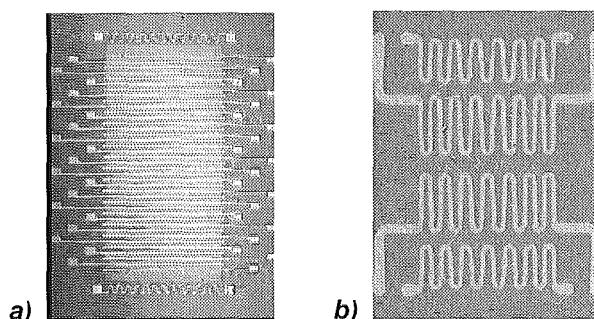


Abb. 1: Standard-GSMA: Ein Metalloxidfilm auf einem beidseitig oxidierten Si-Substrat ist mit parallelen Elektrodenstreifen in 38 Sensorelemente unterteilt (a). Zwei Temperaturfühler links und rechts des Metalloxidfelds kontrollieren die Einstellung des lateralen Betriebstemperatur-Gradienten über die rückseitigen Pt-Heizmäander (b). Eine gaspermeable Gradientenmembran über der aktiven Chip-Oberfläche ( $8 \times 9 \text{ mm}^2$ ) dient zur Sensitivitätsdifferenzierung.

erst das komplettierte Array im IFIA auf die geometrische Integrität sowie die gassensorischen Eigenschaften untersucht.

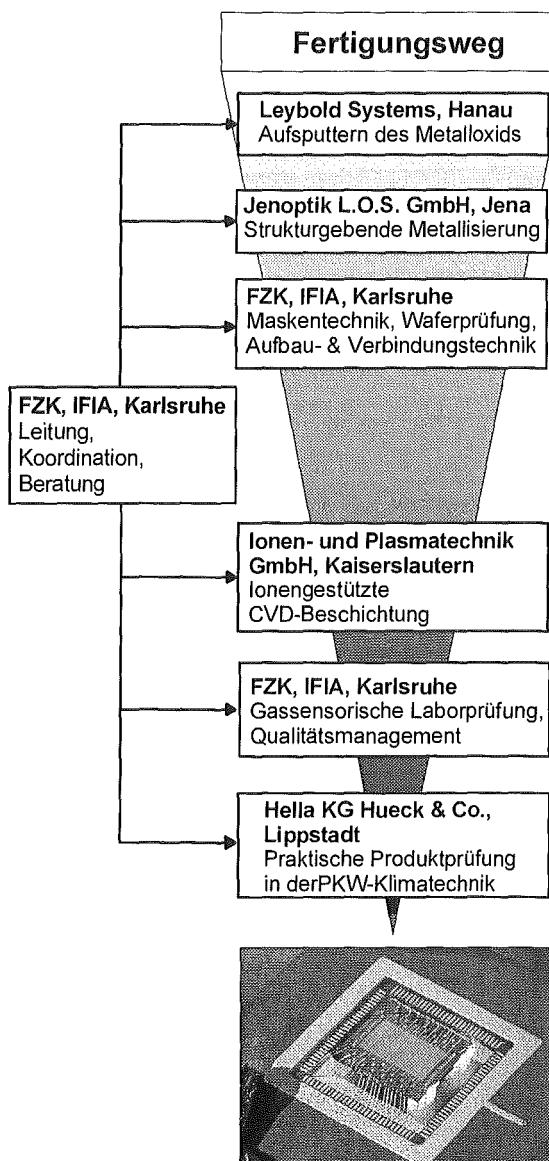


Abb. 2: Fertigungsweg zur Massenproduktion von Gassensormikroarrays; beteiligte Projektpartner und ihre Aufgaben.

Neben der Projektleitung und -koordination widmet sich das IFIA in mehreren Arbeitspaketen der Weiterentwicklung der zur Strukturierung eingesetzten Schattenmaskentechnik sowie dem Aufbau eines Qualitätsmanagements für die Fertigung. Dazu werden physikalisch-chemische Prüfverfahren für jede Fertigungsstufe und gassensorische Prüftechniken ausgearbeitet, die eine effiziente Prüfung auch größerer Stückzahlen erlauben.

Vordringliches Ziel bei der Weiterentwicklung von Schattenmasken war es, die technologisch aufwendigen und damit äußerst kostenintensiven

Fertigungsmethoden durch kostengünstigere Verfahren abzulösen. Durch den Einsatz von nasschemischem Ätzen konnten die Herstellungskosten von Schattenmasken mit geringen Strukturanforderungen (Heizungsstruktur) um den Faktor hundert reduziert werden. Zur Zeit werden nur noch die strukturfeinsten Masken für die Elektrodenstruktur durch Kombination von Lithographie und Nickel-Galvanik hergestellt.

Für die Qualitätskontrolle auf Chip-Ebene wurde ein kommerzieller Viernadeltester mit einem neuen Messkopf und einer Heizplatte ausgerüstet, so dass jetzt die komplette Elektroden- bzw. Heizungsstruktur der vereinzelten Arrays und darüber hinaus die sensiven Eigenschaften der Metalloxidsschichten vor der Kontaktierung und Häusung auf Funktionalität getestet werden können.

Für die Endkontrolle des komplettierten GSMA wurde ein Teststand mit dazugehöriger Steuerungssoftware entwickelt, auf dem bis zu 64 Chips auf 8 Radialträgern mit jeweils 8 Mikroarrays gleichzeitig in einem Gas-Pulsepositionsverfahren gassensorisch getestet werden können.

### 3. Schlussbemerkung

Bis Mitte 2000 wird zusammen mit den Industriepartnern ein Fertigungsverfahren auf der Basis von 6"-Wafern entwickelt und erprobt worden sein, das Gassensormikroarrays hoher analytischer Leistungsfähigkeit in großen Stückzahlen zu niedrigen Preisen produzieren kann. Aufgabe eines geplanten Anschlussprojekts sowie des gerade begonnenen HGF-Projekts ELMINA (Elektronische Mikronasen für Überwachungs- und Regelarbeiten in Gebäuden und Produktionsanlagen) ist es unter anderem, die Peripherie des Arrays (Elektronik, Aufbau- und Verbindungstechnik, Software) für kostengünstige Gesamtsysteme zu optimieren.

### Literatur

- [1] Althainz, P. Goschnick, "Multigassensorchip auf Metalloxidbasis für Prozesssteuerung und Umweltüberwachung", 2. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, 28./29. November 1995, FZKA 5670 (1995) 131-135
- [2] Althainz, P. Goschnick, J., Ehrmann, S., Ache, H.J., "Multisensor microsystem for contaminants in air", Sensors and Actuators B33, (1996) 72-76
- [3] Ehrmann, S., Jüngst, J., Goschnick, J., "Automated Cooking and Frying Control using a Gas Sensor Microarray", Technical Digest of the 7th International Meeting on Chemical Sensors, July 27-30, 1998, Beijing, CHINA, 861-863

# Elektrisch beheizte Wärmeübertrager und Verdampfer mit Mikrokanalstrukturen

Jürgen Brandner, Maximilian Fichtner, Klaus Schubert

Hauptabteilung Versuchstechnik

## Zusammenfassung

Die kontrollierte Beheizung von Fluiden wird in der Prozesstechnik entweder mittels elektrischer Heizelemente oder durch Wärmeträgerfluide vorgenommen. Der vorliegende Text soll einen Überblick über Design und Eigenschaften elektrisch beheizter Mikrostrukturwärmeübertrager geben.

Die bislang entwickelten prototypischen Labormuster wurden aus Edelstahl gefertigt. Mit diesen Bauteilen wurden maximale Anschlußleistungen von über 15000 Watt erzielt. Die Mikrostrukturwärmeübertrager können als Heizelemente für Gase oder Flüssigkeiten bis zu Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius eingesetzt werden. Aufgrund der inhärenten Sicherheit der Mikrostruktursysteme sind sie auch für leicht entflammbare oder explosive Gemische einsetzbar. Weiter können sie auch als Verdampfer für Flüssigkeiten oder elektrisch beheizte Mikrostrukturreaktoren für chemische Prozesse verwendet werden.

## 1. Einleitung

In der Prozesstechnologie wird großer Wert auf eine schnelle und präzis steuerbare Methode zur Beheizung von Fluiden gelegt. Beheizung mittels Wärmeübertragermedien scheidet bei bestimmten Anwendungen wegen Temperaturlimitierung sowie des aufwendigen Fluidhandlings aus. Eine elektrische Beheizung mit konventionell erhältlichen Heizelementen ist wegen der Größe der Heizelemente, des meist auftretenden großen Temperaturunterschieds zwischen Heizelement und Fluid sowie eines üblicherweise limitierten Wärmeübergangs nur eingeschränkt möglich. Das Wärmeübertragungsverhalten von Mikrostruktursystemen ist deutlich besser als das konventioneller Techniken, so daß eine Kombination von elektrischen Heizelementen und Mikrostrukturen naheliegt.

## 2. Aufbau der prototypischen Labormuster

Zwischen zwei Deckplatten werden in alternierender Reihenfolge eine Anzahl mikrostrukturierter Metallfolien und Platzhalterelemente für elektrische Heizwiderstände gestapelt. Der so entstandene Folienstapel wird diffusionsverschweißt und mit Anschlußstücken versehen. Anschließend werden die elektrischen Heizelemente sowie Temperatursensoren in den Gesamtkörper eingefügt und verschaltet.

Als Heizelemente kommen elektrische Widerstände zum Einsatz. Der Hauptvorteil dieser Heizwiderstände ist ihre kurze Ansprechzeit sowie die gute Regelbarkeit der Ausgangsleistung. Die Temperaturregelung erfolgt mittels Prozessreglern. Die verwendeten Widerstände weisen kleine Außenabmessungen auf. Es wurden bisher ke-

ramische Dickschichtheizelemente sowie Heizpatronen eingesetzt. Die Anschlußleistung variiert von 60 W bis zu 1050 W pro Heizelement. Damit lassen sich Flächenleistungsdichten von  $18 \text{ W/cm}^2$  bis zu  $165 \text{ W/cm}^2$  realisieren [1]. Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines elektrisch beheizten Mikrostrukturwärmeübertragers.

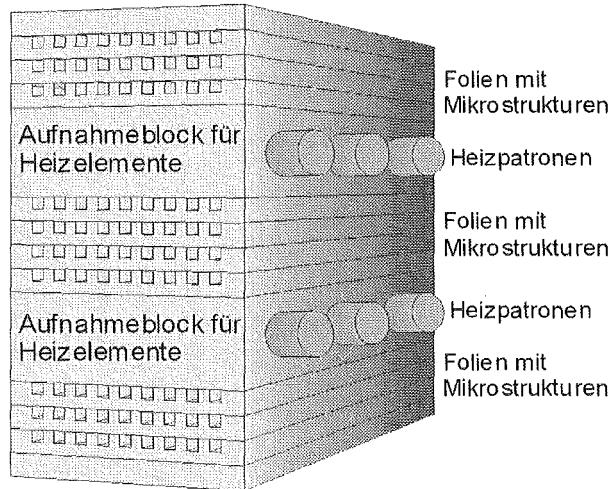


Abb. 1: Prinzipskizze eines elektrischen Mikrostrukturwärmeübertragers mit Heizpatronen.

### 2.1 Labormuster

Derzeit werden vier Grundbauarten getestet, die sich in Art, Anordnung und Anzahl der Heizelemente sowie Abmessungen und Form der Mikrostrukturen unterscheiden. Die maximale Einsatztemperatur der Mikrostrukturkörper liegt bei etwa  $850^\circ\text{C}$ . In Abbildung 2 ist ein elektrisch beheizter Mikrostrukturwärmeübertrager vom Typ 4 dargestellt. Dieser Wärmeübertrager verfügt über eine maximale Anschlußleistung von 15750 W.

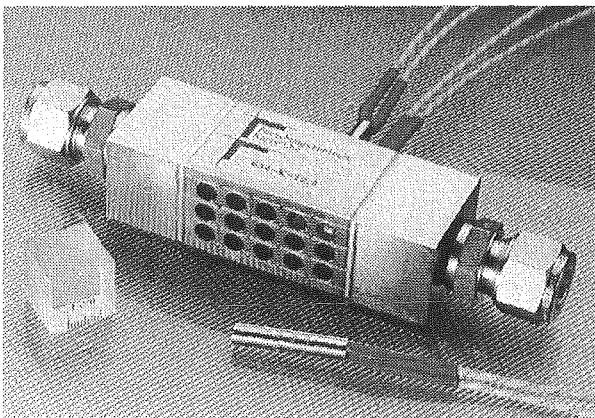


Abb. 2: Elektrisch beheizter Mikrostrukturwärmeübertrager Typ 4 mit Heizpatronen.

## 2.2 Versuchsergebnisse

Bei Versuchen mit Wasser konnten Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  von ca.  $17500 \text{ W/m}^2\text{K}$  erreicht werden. Konventionelle elektrische Erhitzer erreichen Werte im Bereich von  $2400 \text{ W/m}^2\text{K}$  [2]. Ein Wasserstrom von  $2,5 \text{ kg h}^{-1}$  wurde in einem Mikrostrukturwärmeübertrager Typ 3 bei 6 bar Druck mit etwa  $12 \text{ K/min}$  bis zur Einstellung eines Gleichgewichtszustandes bei ca.  $140^\circ\text{C}$  erhitzt. Im thermischen Gleichgewicht konnte die Durchflussmenge gegen Atmosphärendruck vollständig verdampft werden. Abbildung 3 zeigt den Temperaturverlauf eines Verdampfungsversuchs.

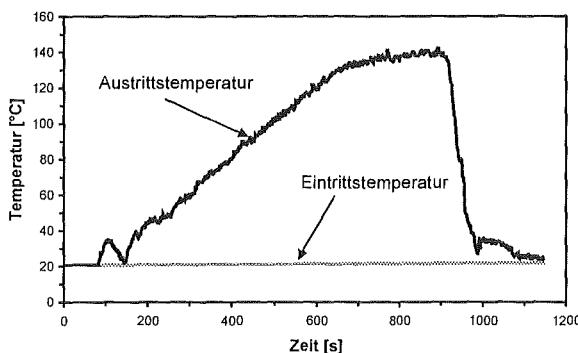


Abb. 3: Verlauf der Eintritts- und Austrittstemperaturen an einem elektrisch beheizten Mikrostrukturwärmeübertrager Typ 3.

## Literatur

- [1] Brandner, J.; Fichtner, M.; Schubert, K., „Electrically Heated Microstructure Heat Exchangers and Reactors“, Proceedings to the 3<sup>rd</sup> International Conference on Microreaction Technology, 18. – 21.4.1999, Frankfurt/M. (in Druck)
- [2] HTT Hoch-Temperatur-Technik GmbH, Herford, „The wte/cps-system: Information for electrically driven heater systems for fluids“
- [3] Mayer, J., Fichtner, M., Schubert, K. Wolf, D., „A microstructured reactor for the catalytic partial oxidation of methane to syngas“, Proceedings to the 3<sup>rd</sup> International Conference on Microreaction Technology, 18. – 21.4.1999, Frankfurt/M. (in Druck)

Ein Gasstrom von  $1000 \text{ l/h}$  Luft konnte bei einem Druck von 2 bar in einem elektrisch beheizten Mikrostrukturwärmeübertrager Typ 3 auf  $850^\circ\text{C}$  aufgeheizt werden. Dabei wurden Aufheizraten von  $687000 \text{ Ks}^{-1}$  erzielt. Abbildung 4 zeigt den Temperaturverlauf während eines Versuches mit Luft. Durch langsame Steigerung der Spannung wurde dabei die Temperatur des ausströmenden heißen Gases so weit erhöht, bis ein Gleichgewichtszustand zwischen Wärmeübergang an das Gas und Abstrahlung an die Umgebung erreicht war. Ein elektrisch beheizter Mikrostrukturwärmeübertrager Typ 2 wurde als Erhitzer für eine leicht entflammbare Mischung aus Methan und Sauerstoff im BMBF-Verbundprojekt MIKREAK eingesetzt [3].

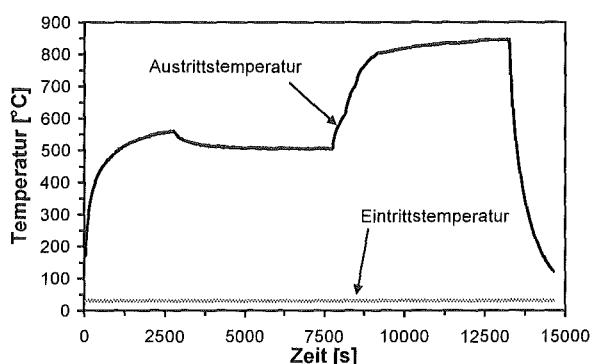


Abb. 4: Temperatur eines Luftstroms am Eintritt und am Austritt eines Mikrostrukturwärmeübertragers Typ 3.

## 3. Ausblick

Um beim Verdampfen von Flüssigkeiten durch die Bildung von Dampfblasen bedingte Druckschwankungen in einem weiten Durchsatzbereich zu minimieren, soll sowohl die Anordnung der Heizelemente als auch die Form und die Abmessungen der Mikrostruktur optimiert werden. Zusätzlich sollen spezielle Regelalgorithmen entwickelt werden, mit denen eine durchsatzabhängige, schnelle Temperatursteuerung möglich ist. Des Weiteren sollen elektrisch beheizte Mikrostrukturwärmeübertrager entwickelt werden, die die Einstellung von Temperaturprofilen entlang der Mikrostruktur erlauben.

# Künstliche Hand auf der Basis flexibler Fluidaktoren

Stefan Schulz, Christian Pylatiuk

Institut für Angewandte Informatik

## Zusammenfassung

Bislang in der Praxis eingesetzte Handprothesen verfügen über sehr eingeschränkte Bewegungsmöglichkeiten und unnatürliche Bewegungsmuster. Auf der Basis neuartiger, flexibler Fluidaktoren konnte eine künstliche Hand realisiert werden, die viele zusätzliche Bewegungsmöglichkeiten besitzt, die zudem sehr natürlich wirken.

## Beschreibung

In Deutschland lebten 1997 ca. 61705 Menschen, denen eine Hand oder ein ganzer Arm fehlen [1]. Nur ein kleiner Teil dieser Personengruppe sind bislang mit einer Funktionsprothese versorgt, die Mehrheit mit einer rein kosmetischen oder mit gar keiner Prothese. Patientenbefragungen ergaben daß eine Funktionsprothese möglichst folgende Kriterien erfüllen sollte: sie sollte leicht sein, einfach zu bedienen sein, mehrere Bewegungsmuster aufweisen und kosmetisch ansprechend sein. Die am weitesten verbreitete Funktionsprothese [2] weist daher eine Reihe von Nachteilen auf, da sie nur sehr eingeschränkte Bewegungsmöglichkeiten bietet mit zudem unnatürlich wirkenden Bewegungsabläufen.

Durch den Einsatz eines neu entwickelten Antriebselements, dem flexiblen Fluidaktor (siehe Abb.1) konnte eine künstliche Hand realisiert werden, die eine hohe Beweglichkeit und hohe Dynamik aufweist. Die wichtigsten Bewegungen der menschlichen Hand wurden nachempfunden, indem 15 Fluidaktoren, zwei in jedem Finger, drei im Daumen und vier im Handgelenk in den Greifmechanismus integriert wurden. Da bei einem Greifvorgang das Antriebsmedium unter Überdruck steht und sich dieser im gesamten System gleichmäßig verteilt, wird jedes Gelenk so lange bewegt, bis eine entsprechend große Gegenkraft erreicht ist. Die Finger der Hand schmiegen sich dadurch individuell an den zu greifenden Gegenstand an. Durch diesen verbesserten Formschluß ist eine geringere Haltekraft erforderlich. Der gleiche Effekt erhöht die Greifsicherheit und ermöglicht auch ohne eine optische Kontrolle ein sicheres Hantieren.

Die neuen Aktoren ermöglichen die Grundlage für ein natürliches Erscheinungsbild: die Bewegungen der künstlichen Hand wirken weniger mechanisch und durch ihre Flexibilität vermittelt sie das gewohnte, Berührungsgefühl. Abbildung 2 zeigt ein Ausführungsmuster der neuartigen, künstlichen Hand. Die Anlehnung an das natürliche Original ist offensichtlich. Jeder der nur 20 Gramm schweren Finger kann unabhängig von den anderen Fingern um 180 Grad gebeugt werden.

Die Weiterentwicklung des fluidisch angetriebenen Greifsystems zu einer Handprothese ist ein interdisziplinäres Unternehmen. Die notwendigen miniaturisierten Ventile, die Steuerung und Energieversorgung, Druckerzeugungseinheit und Mikrosensoren, werden in enger Zusammenarbeit mit anderen Instituten entwickelt.

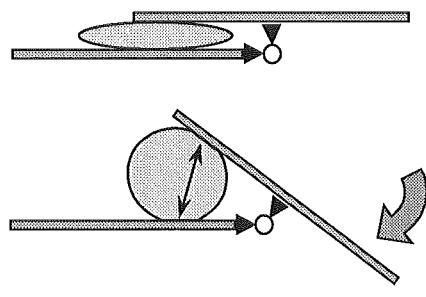
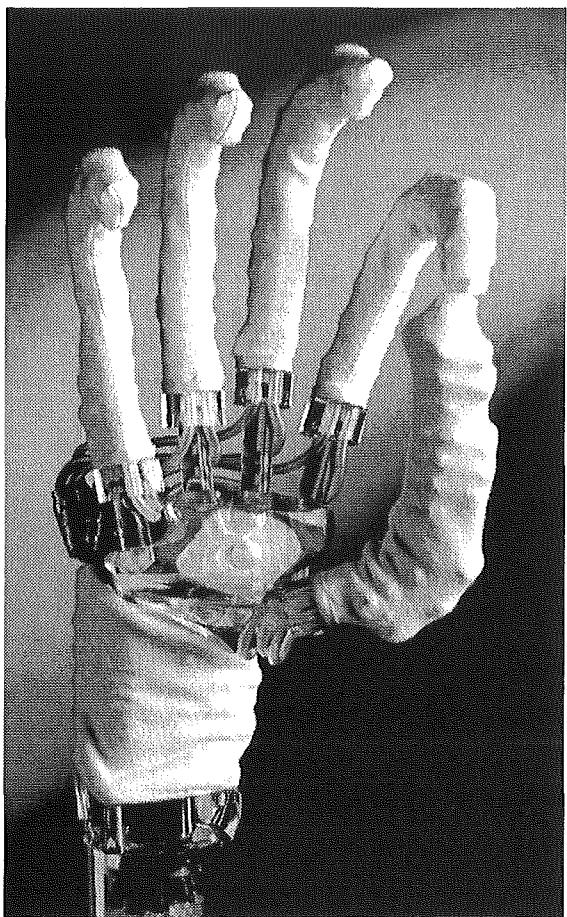


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines einfachen Gelenks. Beim Befüllen des hellgrau dargestellten flexiblen Fluidaktors expandiert der Antrieb und bewegt den dunkelgrauen Balken über einen Drehpunkt.



*Abb. 2: Die künstliche Hand auf der Basis flexibler Fluidaktoren kann jeden einzelnen Finger unabhängig von den anderen Fingern um 180 Grad beugen und wirkt in den Bewegungen sehr natürlich.*

## Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt, Dez. 1998
- [2] Fa. Otto Bock, Duderstadt, Deutschland
- [3] Schulz, S.: Patent: PCT/EP97/01954; Verfahren zur planaren Herstellung von pneumatischen und von fluidischen Miniaturmanipulatoren. Patentamt München, 1997
- [4] Schulz, S.; et.al.: Hydraulische Muskeln als Antriebseinheit für endoluminale Systeme in der Medizin. 3. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik. Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6080, Karlsruhe, 1998
- [5] Schulz, S.; Pylatiuk, Ch.; Brethauer, G.: A New Class of Flexible Fluidic Actuators and their Applications in Medical Engineering. Automatisierungstechnik Vol. 47, no. 8 , Seite 390-395, 1999

## **Liste aller ausgestellten Poster/Exponate**

1. Herstellung von Formeinsätzen aus Nickel bis 120 mm Durchmesser mit Hilfe konventioneller Optischer Lithographie
2. Fertigung von Mikrostrukturen durch Röntgentiefenlithographie an der Karlsruher Synchrotronstrahlungsquelle ANKA
3. Lasergefertigte Mikrostrukturen für die Kapillaranalytik
4. Galvanische und außenstromlose Methoden zur Herstellung metallischer Mikrostrukturen
5. Mikrostrukturierung von Stahl mit Hartmetallfräsern
6. Prägen von Mikrobauteilen ohne Restschicht
7. Werkstoffe und Abformverfahren für polymere, metallische und keramische Mikrobauteile
8. Herstellung und Charakterisierung ferromagnetischer Dünnschichten für Hochfrequenzanwendungen im GHz-Bereich
9. KomPas: Thermophysikalisches Prüfsystem für Mikrokomponenten
10. Fortschritte in der Mikrozugprüfung
11. Komponenten zum Aufbau modularer Mikrofertigungssysteme
12. Datenanalyse für Sensorsysteme
13. Inertialnavigation mit Komponenten der Mikrosystemtechnik
14. Analoge-digitale ASIC-Realisierung für Mikrosysteme
15. Gekoppelte Simulation für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik
16. Entwurfssimulation mikrooptischer Systeme in Anwendung auf einen Heterodynemempfänger
17. Aufbau und Montage von mikrooptischen Bänken am Beispiel eines Heterodynemempfängers
18. Optische 2 x 2 - Schaltmatrix mit elektromechanischen Stellelementen
19. Kommerzielle Produkte auf der Basis des LIGA-Mikrospektrometers
20. Weiterentwicklung von Spektrometersystemen für den NIR-Bereich
21. Elektromagnetisch angetriebener Mikrochopper
22. Dreistufige Mikrostrukturen am Beispiel eines Zyklogetriebes
23. Mikroventile für ein fluidisches Baukastensystem
24. Einfluss der Luftfeuchtigkeit und anderer Umgebungsparameter auf AMANDA-Komponenten für die Mikrofluidik
25. Mikrokapillarstrukturen aus Kunststoff für die Biotechnologie
26. SAW-Sensoren für die industrielle Prozessanalytik
27. Massenproduktion oxidischer Mehrschichtsysteme für Gassensormikroarrays
28. Elektrisch beheizte Wärmeübertrager und Verdampfer mit Mikrokanalstrukturen
29. Künstliche Hand auf der Basis flexibler Fluidaktoren

## Liste der am Programm Mikrosystemtechnik beteiligten Organisationseinheiten

Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT)  
 Institut für Instrumentelle Analytik (IFI)  
 Institut für Angewandte Informatik (IAI)  
 Institut für Materialforschung I (IMF I)  
 Institut für Materialforschung II (IMF II)  
 Institut für Materialforschung III (IMF III)  
 Institut für Kern- und Energietechnik (IKET)  
 Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (HPE)  
 Hauptabteilung Versuchstechnik (HVT)  
 Programmleitung Mikrosystemtechnik (PMT-PL)

## Liste der Autoren

Name	Seite	Name	Seite
Ahrens, R.	235	Guber, A.	31, 239
Akashi, T.	173, 231	Guth, H.	219
Aktaa, J.	209	Guttmann, M.	31, 39, 199
Albatal, S.	221	Haas-Santo, K.	159
Bacher, W.	31, 239	Häfele, K.-H.	197
Bade, K.	11	Halstenberg, S.	151
Bauer, K.	3	Hanemann, T.	39, 73, 139, 187
Bauer, W.	45, 205	Hartmann, V.	119
Benz, J.	243	Haußelt, J.	45
Benzinger, W.	159	Hecke, M.	39, 73, 105, 203, 239
Berger, L.	221	Heim, U.	105
Blank, T.	125	Hein, H.	25, 173, 195, 231
Bley, P.	13	Herrmann, D.	239
Brandner, J.	245	Hirata, T.	173, 231
Bruns, M.	243	Hoffmann, W.	73, 139
Bulling, F.	131	Hofmann, A.	59, 211
Chung, S.J.	25, 173, 195, 231	Jacobi, O.	187
Czolk, R.	79	Jakob, W.	219
Dickerhof, M.	131	Jakobs, P.	83, 131
Dittrich, H.	187, 203	Just, E.	211
Eberle, F.	211	Kaiser, S.	167
Eggert, H.	151, 219	Karl, B.	83
Ehnes, R.	83	Kautt, M.	73
El-Kholi, A.	111	Klotz, M.	209
Engelhardt, F.	59, 211	Knitter, R.	45, 53, 205
Eppler, W.	119	Kohl, M.	211, 217, 233
Fahrenberg, J.	79	Köhler, B.	211
Fath, A.	199, 229	Köhler, U.	83
Fergen, I.	145	Königer, F.	221
Fichtner, M.	159, 245	Krevet, B.	217
Fritz, P.	1	Krippner, P.	179, 225, 227, 229
Fuchs, J.	243	Krömer, O.	213, 221
Gemmeke, H.	119	Kühner, T.	225, 227
Gengenbach, U.	59, 211	Last, A.	225, 227
Gietzelt, T.	39	Lienert, C.	83
Göhring, D.	205	Maas, D.	83
Goschnick, J.	65, 243	Maute, A.	95
Gottwald, E.	73, 239		

<u>Name</u>	<u>Seite</u>	<u>Name</u>	<u>Seite</u>
Mohr, J.	25, 173, 179, 187, 197, 221, 223, 227, 225, 229, 231	Scherer, K.-P.	219
Moser, H.O.	197	Schloßmacher, P.	31
Moss, D.	73	Schmidt, A.	131
Müller, K.	39, 187	Schneider, H.	209
Muslija, A.	239	Schomburg, W.K.	73, 95, 167, 233, 235
Oppermann, S.	227	Schön, C.	151
Paasche, S.	11	Schönenfelder, S.	225
Pantenburg, F.J.	25, 197	Schubert, K.	245
Peters, R.-P.	151	Schulz, J.	83, 131
Pfeifer, P.	159	Schulz, S.	247
Pfleging, W.	31, 73, 139	Seemann, K.	53, 145
Piotter, V.	39, 45, 187, 205	Sieber, I.	219
Pylatiuk , C.	247	Stingl, C.	235
Quinte, A.	151	Straka, J.	111
Rapp, M.	99, 241	Töpfer, H.	99
Reibel, J.	241	Tschermak von Seysenegg, A.	7
Reichert, J.	73	Voigt, A.	241
Ritzhaupt-Kleissl, H.-J.	45	Walch , E.	199
Rogge, T.	233	Wallrabe, U.	179, 187, 221, 223
Rohde, M.	207	Wechsung, R.	91
Rummller, Z.	235	Wessa, T.	241
Ruprecht, R.	39, 45, 53, 187	Wicht, P.	227
Ruther, P.	187	Wulff, K.	235
Ruzzu, A.	223	Wunsch, R.	159
Saile, V.	25, 83	Wüstling , S.	215
Schaller, T.	31, 73, 187, 201	Ziegler, P.	219, 221
Scharnowell, R.	59, 211	Zißler, W.	187
		Zum Gahr, K.-H.	53

