

# Status und Perspektiven des Programms Mikrosystemtechnik (MIKRO)

P. Bley, MIKRO

## Einleitung

Im Jahre 1992 wurden alle im Forschungszentrum laufenden Aktivitäten zur Mikrosystemtechnik in einem Projekt bzw. Programm Mikrosystemtechnik zusammengefasst. Über den Stand der Arbeiten wurde in regelmäßig stattfindenden Statuskolloquien berichtet [1-4]. In diesem Heft der Nachrichten sind neueste Ergebnisse der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten aus dem Bereich der Technologien und deren Anwendungen zusammengestellt. Der erste Beitrag dieses Heftes zeigt den Status des Programms und seine mittel- und langfristigen Perspektiven auf. Dazu wird die Struktur des Programms sowie die Einordnung und vielfältige Verknüpfung der unterschiedlichen Arbeiten beschrieben.

## Zielsetzung des Programms Mikrosystemtechnik

Ein wesentliches Ziel des Programms Mikrosystemtechnik ist es, die Durchgängigkeit der Arbeiten von einer längerfristig angelegten Vorlaufforschung über die angewandte Forschung bis zur industriellen Anwendung sicherzustellen. Dabei orientieren sich auch längerfristige Forschungsarbeiten an Themen mit hohem industriellen Bedarf, in denen die Kernkompetenzen des Programms bei der Entwicklung mikrotechnischer Komponenten aus Kunststoffen, Metallen und Keramiken voll zum Tragen kommen. Das Programm Mikrosystemtechnik hat aber auch das Ziel, einen wesentlichen Beitrag

zur möglichst schnellen und weitreichenden Verbreitung der Mikrosystemtechnik zu leisten.

In diesem Programm sind daher Arbeiten mit unterschiedlichen Zeithorizonten enthalten: Einerseits längerfristige Entwicklungsarbeiten im Rahmen einer wissenschaftlich anspruchsvollen und interdisziplinären Grundlagen- und Vorlaufforschung, andererseits Kooperationen mit der Industrie zur kurzfristigen Umsetzung der bisher erreichten Ergebnisse in marktfähige Produkte.

## Struktur des FuE-Programms

Um seine Strategie klarer zu verdeutlichen und noch zielorientierter durchführen zu können, hat

das Programm Mikrosystemtechnik sein FuE-Programm 2002 neu strukturiert. Die Basis der Mikrosystemtechnik im Forschungszentrum bildet dabei der Bereich „Fertigungstechnologien und Materialien“. Dabei hat sich das Forschungszentrum auf Mikrosysteme konzentriert, deren funktions tragende Strukturen aus Kunststoffen, Metallen oder Keramiken bestehen. Die in diesem „Technologiebereich“ erarbeiteten Kenntnisse werden im Bereich „Anwendungen und Visionen“ umgesetzt. Die beiden Bereiche gliedern sich jeweils in vier FuE-Arbeits-themen.

Abb. 1 stellt für das Programm Mikrosystemtechnik die Verknüpfung der beiden Bereiche sowie der acht Arbeitsthemen und ihrer Ausrichtung dar.

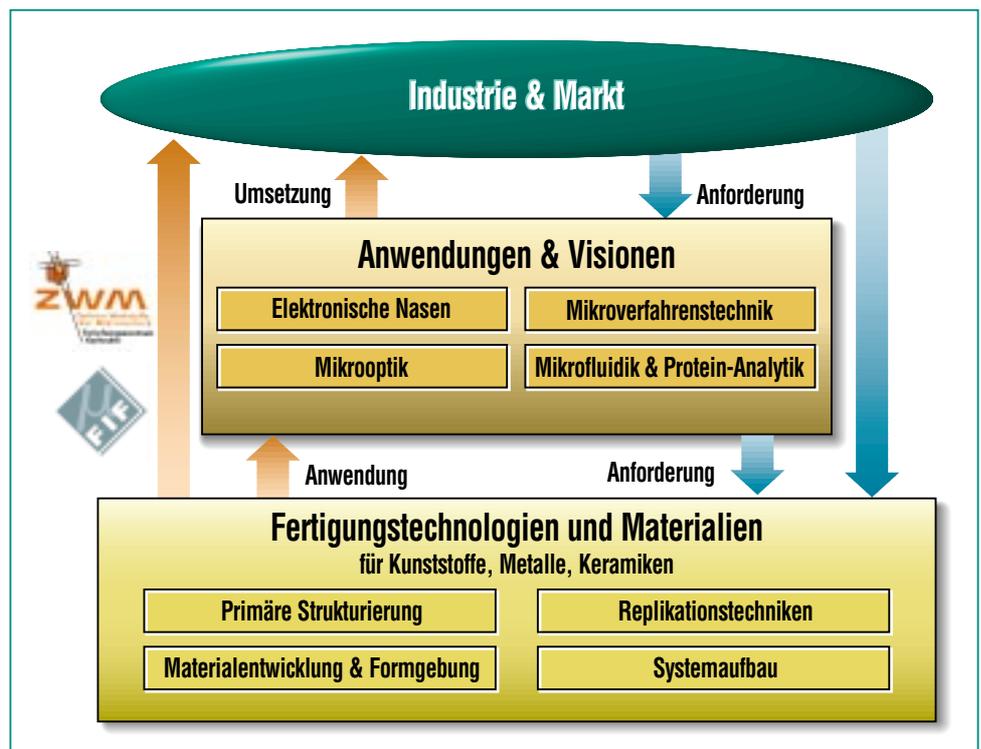


Abb. 1: Arbeitsthemen des Programms Mikrosystemtechnik mit ihrer Verknüpfung und Ausrichtung.

Der Bereich „Fertigungstechnologien und Materialien“ ist in die Arbeitsthemen „Primäre Strukturierung“, „Replikationstechniken“, „Materialentwicklung und Formgebung“ sowie „Systemtechniken“ gegliedert. Diese Arbeitsthemen stellen die Basistechnologien des Programms Mikrosystemtechnik dar. Der Bereich „Anwendungen und Visionen“ umfasst „Elektronische Nasen“, „Mikroverfahrenstechnik“, „Mikrooptik“ sowie „Proteinanalytik und Mikrofluidik“.

Die Verknüpfung der beiden Bereiche ist sehr eng: Die Fertigungstechnologien und Materialien dienen einerseits als Technologiebasis für die Anwendungen und Visionen. Andererseits orientieren sich die Entwicklungsarbeiten für diese Fertigungstechnologien und für die Materialentwicklung vornehmlich am anwendungsbezogenen Bedarf. So kann etwa die Hälfte der technologieorientierten Arbeiten direkt als „Zuarbeit“ zu den verschiedenen Anwendungsfeldern angesehen werden, während sich die andere Hälfte der Weiterentwicklung der Technologien und der direkten Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie widmet.

Die industrielle Umsetzung der wissenschaftlichen Ergebnisse erfolgt aus dem Bereich Anwendungen und Visionen meist durch Bearbeitung von Forschungsaufträgen zur Entwicklung von Prototypen. Ein direkter Know-how-Transfer erfolgt aber auch aus dem Bereich Fertigungstechnologien und Materialien, oft im Rahmen der Durchführung von Entwicklungsaufträgen oder Dienstleistungen. Um den Transfer insbesondere aus den Basistechno-

logien zu intensivieren, wurde 1999 das Forschungszentrum Karlsruhe IndustrieForum Mikrofertigungstechnik (FIF) gegründet. Im Jahre 2000 wurde mit dem Zentrum Werkstoffe der Mikrotechnik (ZWM) eine weitere Einrichtung etabliert, die den Wissenstransfer, diesmal im Bereich der Materialentwicklung, beschleunigen und Ausgründungen vorbereiten soll.

Hinsichtlich seiner langfristigen Ziele wird das Programm Mikrosystemtechnik seit seiner Gründung durch einen externen, industriegeführten Beirat beraten. Für die Bereiche Mikrooptik und Protein-Analytik wurden je ein spezieller Beraterkreis etabliert.

### Interdisziplinäre Zusammenarbeit

Die Mikrosystemtechnik ist eine interdisziplinäre Technologie. Zur Entwicklung von Mikrosystemen werden Kenntnisse aus sehr unterschiedlichen Bereichen benötigt: Entwurfsmethoden (CAD, Simulationsprogramme), Mikrofertigungstechniken, Materialwissenschaften, Informationsverarbeitung, Mikroelektronik, Aufbau- und Verbindungstechnik, Mikromontage und Testeinrichtungen. Zusätzlich ist es notwendig, vertiefte Kenntnisse auf den Gebieten zu besitzen, in denen die Mikrosysteme eingesetzt werden. Dieses Wissen wird auch in vielfältigen Kooperationen mit Partnern aus der Industrie und anderen Forschungseinrichtungen oder Universitäten erschlossen. Nur wenn die geforderten Leistungsdaten hinreichend genau bekannt sind, können anwen-

dungsorientierte Mikrosysteme entwickelt werden. Das Forschungszentrum Karlsruhe ist als Mitglied der Hermann-von-Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren für solche interdisziplinären Forschungsarbeiten besonders geeignet.

### Am Programm Mikrosystemtechnik beteiligte Institute

Zur Entwicklung komplexer Mikrosysteme arbeiten im Programm Mikrosystemtechnik insgesamt zwölf Institute mit unterschiedlichen Fachkompetenzen interdisziplinär zusammen (siehe Tab. 1). Dabei erstrecken sich die Spezialkenntnisse der Institute insbesondere auf die Herstellung der Mikrosysteme (Strukturierung, Materialentwicklung, Test, Systemintegration usw.) aber auch auf deren Anwendungen (z. B. Optik, Verfahrenstechnik, Lebenswissenschaften, Analytik). Insgesamt arbeiten im Programm Mikrosystemtechnik 226 Personen. Der jährliche Gesamtaufwand des Programms beläuft sich auf ca. 30 Mio. €.

In Tab. 2 ist in Form einer Matrix dargestellt, in welchen Arbeitsthemen des Programms Mikrosystemtechnik die einzelnen Institute mitarbeiten. Es wird deutlich, dass zur Bearbeitung aller Arbeitsthemen das Fachwissen aus verschiedenen Forschungsbereichen erforderlich ist.

Die Interdisziplinarität der Arbeiten zur Entwicklung von Mikrosystemen wird auch durch die Beteiligung von meist mehreren Instituten an den einzelnen Beiträgen dieser „Nachrichten“ ersichtlich.

OE	Organisationseinheiten	Personen
IMT	Institut für Mikrostrukturtechnik	77
IFIA	Institut für Instrumentelle Analytik	33
IMF III	Institut für Materialforschung III	24
IPE	Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik	20
IMF I	Institut für Materialforschung I	17
IMVT	Institut für Mikroverfahrenstechnik	16
IAI	Institut für Angewandte Informatik	15
IKET	Institut für Kern- & Energietechnik	6
IRS	Institut für Reaktorsicherheit	6
ITG	Institut für Toxikologie und Genetik	2
IMF II	Institut für Materialforschung II	1
IMB	Institut für Medizintechnik & Biophysik	1
PL	Programmleitung	8
$\Sigma$	<b>Summe</b>	<b>226</b>

Tab. 1: Am Programm Mikrosystemtechnik im Jahre 2002 beteiligte Organisationseinheiten und Personen.

Arbeitsthema	Institut	IAI	IFIA	IKET	IMB	IMF I	IMF II	IMF III	IMT	IMVT	IPE	IRS	ITG
Primäre Strukturierung						•			•	•			
Replikationstechniken								•	•				
Materialentwicklung und Formgebung						•	•	•					
Systemtechniken		•					•				•		
Elektronische Nasen		•	•						•		•		
Mikroverfahrenstechnik						•		•		•	•	•	
Mikrooptik		•				•		•	•		•		
Proteinanalytik und Mikrofluidik		•	•	•	•	•		•	•		•		•
FIF (FZK-Industrieforum Mikrofertigungstechnik)		•				•	•	•	•	•	•		
ZWM (Zentrum Werkstoffe der Mikrotechnik)			•			•	•	•	•				

Tab. 2: Beteiligung der Institute an den Arbeitsthemen.

## Infrastruktur

Neben einem interdisziplinären Entwicklungsteam ist es in der Mikrosystemtechnik auch erforderlich, Zugriff auf die notwendigen Anlagen für Entwicklung, Fertigung und Testbetrieb zu besitzen. Das Forschungszentrum Karlsruhe verfügt über diese erforderliche Infrastruktur, deren Aufbau, Betrieb und Unterhalt oft mit erheblichen Aufwendungen verbunden sind. Es ist dabei selbstverständlich, dass diese Infrastruktur stets an neue Technologien und Aufgaben angepasst werden muss.

Die wichtigsten Anlagen zur Herstellung von Mikrosystemen sind hier kurz aufgelistet, einige von ihnen werden in den nachfolgenden Artikeln ausführlicher dargestellt:

- Elektronenstrahlschreiber
- Reinraum-Maskenlabor mit dem erforderlichen Equipment
- Bestrahlungsstationen an ANKA (Angströmquelle, Karlsruhe, Synchrotronstrahlenquelle)
- Galvanikanlagen
- Abformanlagen für Prägen
- Spritzgießmaschinen

Die o.g. Anlagen stellen eine komplette Fertigungslinie für das LIGA-Verfahren dar.

Das Forschungszentrum verfügt jedoch neben dem LIGA-Verfahren auch über weitere Technologien und die hierfür erforderlichen Anlagen:

- Laseranlagen mit verschiedenen Wellenlängen zur Struktur-

rierung unterschiedlicher Materialien

- Präzisions-Bearbeitungsmaschinen für die spanabhebende Bearbeitung
- Beschichtungsanlagen für Funktions- und Schutzschichten
- Anlagen zur Erzeugung von Pulvern für die Pulvermetallurgie
- Umfangreiche Prüfeinrichtungen (Zug-, Druckprüfmaschinen, Nanoindenter, AFM, usw.)
- Analytikeinrichtungen, insbes. Mikrobereichs- und Elementaranalytik (Auger-Spektroskopie, Röntgenmikroanalyse, Atomabsorptionsspektroskopie, usw.)
- Geräte für die rechnergestützte Mikromontage
- Mikroelektronik-Labors
- Geräte für die Aufbau- und Verbindungstechnik
- Umfangreiche Softwaretools (Werkzeuge) für den Entwurf und Test

Zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit der anwendungsorientierten Mikrosysteme sind im Forschungszentrum Karlsruhe hochspezialisierte Anlagen und Testeinrichtungen vorhanden, z. B.:

- Anlagen zur Erzeugung und Verteilung von Testgasgemischen (Konzentrationen bis in den sub-ppm-Bereich)
- Optiklabors (z. B. Reflektometer, Monochromatoren, Laser-

quellen, optische Diagnose-Systeme)

- Fluid-Labors (Messung von Strömungsgeschwindigkeiten, Durchsätzen usw.)
- Versuchstände für die chemische und thermische Verfahrenstechnik

## Fertigungstechnologien und Materialentwicklung als Technologie-Basis

Das Forschungszentrum Karlsruhe hat sich frühzeitig darauf konzentriert, Mikrosysteme zu entwickeln, deren funktionstragende Strukturen aus Kunststoffen, Metallen oder Keramiken hergestellt sind. Mit der Ausrichtung auf den Aufbau von Mikrosystemen aus diesen Materialklassen traf das Programm Mikrosystemtechnik eine wegweisende Entscheidung zugunsten von Systemen und Komponenten, die Eigenschaften erschließen, wie sie Silizium-basierten Mikrosystemen bislang verschlossen waren. Entsprechend besitzt das Programm Mikrosystemtechnik auf diesen Arbeitsgebieten Alleinstellungsmerkmale.

### Primäre Strukturierung

Die Herstellung von Mikrosystemen beginnt – nach Entwurf und Simulation – mit der erstmaligen Herstellung einer „materiellen“, dreidimensionalen Mikrostruktur. Hierzu stehen dem Forschungszentrum mehrere Technologien zur Verfügung.

Mit Hilfe der Röntgen- und UV-Lithographie werden dreidimensionale Mikrostrukturen aus strahlungsempfindlichen Kunststoffen

(sogenannten Resists) hergestellt [5]. Diese Technologien werden i. a. gewählt, wenn an die Mikrostrukturen besonders hohe Anforderungen bezüglich der minimalen Abmessung, der Qualität der Seitenwände oder des Aspektverhältnisses (Verhältnis von Höhe zur minimalen lateralen Abmessung) gestellt werden. Die Strukturhöhen können mehrere Millimeter betragen, die minimalen Abmessungen liegen im Sub-Mikrometerbereich. So hohe Anforderungen an die Mikrostrukturen werden z. B. in der Mikrooptik gestellt. Für die Röntgentiefenlithographie steht dem Forschungszentrum dabei seit Mitte 2000 die eigene Synchrotronstrahlungsquelle ANKA zur Verfügung. Die Lithographie, insbesondere die Röntgentiefenlithographie, ist der erste Prozessschritt des im Forschungszentrum entwickelten LIGA-Verfahrens, dessen weitere Prozessschritte die Galvanik und die Abformtechnik sind.

Wenn auch die Lithographie als „die“ Strukturierungstechnologie der Mikrosystemtechnik bezeichnet werden kann, so werden in zunehmendem Maße auch material-abtragende Verfahren eingesetzt. Diese erreichen zwar nicht die hohe Genauigkeit der Lithographie, sind in vielen Fällen jedoch völlig ausreichend und teilweise erheblich einfacher und daher billiger [6]. Mit diesem Verfahren ist es auch möglich, Mikrostrukturen herzustellen, die in allen drei Dimensionen eine nahezu beliebige Geometrie aufweisen.

Die sog. Mechanische Mikrofertigung, d. h. die Herstellung von

Mikrostrukturen durch spanabtragende Techniken (Fräsen, Bohren, Drehen, etc.) hat in den letzten Jahren beträchtliche Fortschritte erzielt. Die Bearbeitungsgenauigkeit, die natürlich material- und strukturabhängig ist, ist heute generell besser als 5 µm, in Einzelfällen können sogar noch deutlich genauere Strukturen hergestellt werden. Ein großer Vorteil ist, dass mit den spanabhebenden Verfahren sehr viele unterschiedliche Werkstoffe bearbeitet werden können, weiterhin hat sich diese Technik als relativ kostengünstig erwiesen. Einen großen Anwendungsbereich findet die Mechanische Mikrofertigung in der Mikrofluidik. Dabei werden meist Werkzeuge für die Abformtechnik hergestellt. Aber auch in Kombination mit anderen Strukturierungstechnologien (Lithographie und Galvanik) werden hochpräzise Abformwerkzeuge hergestellt.

Ein weiteres Material-abtragendes Verfahren der Mikrotechnik ist die dreidimensionale Laserbearbeitung. Mit Excimer-Lasern und Neodym-YAG-Lasern steht ein breiter Wellenlängenbereich für die Materialbearbeitung zur Verfügung, mit dem Metalle und Polymere, in Einzelfällen aber auch Keramiken, bearbeitet werden können. Die erreichbaren Genauigkeiten liegen im Bereich der Werte der mechanischen Mikrofertigung. Im Programm Mikrosystemtechnik wird die Laserbearbeitung eingesetzt zur Herstellung von Prototypen (meist Kunststoffstrukturen) und metallischen Abformwerkzeugen für die Mikrofluidik.

### *Replikationstechniken*

Zu den Replikationstechniken gehört die Mikrogalvanik, mit welcher lithographisch (oder auch abformtechnisch) erzeugte Kunststoffstrukturen in metallische Strukturen umkopiert werden [7]. Es können sowohl metallische Endprodukte als auch Abformwerkzeuge (meist aus Nickel oder Nickel-Legierungen) gefertigt werden.

Die metallischen Abformwerkzeuge, gefertigt über Galvanik, Mechanischer Mikrotechnik oder Laserbearbeitung, werden eingesetzt, um kostengünstig und in hohen Stückzahlen Mikrostrukturen aus Kunststoffen herzustellen. Dabei stehen dem Forschungszentrum zwei sich ergänzende Techniken zur Verfügung, die auch hier entwickelt worden sind: das Mikrospritzgießen und das Heißprägen [8].

### *Materialentwicklung und Formgebung*

Für die Erschließung des Anwendungspotentials der Mikrosystemtechnik muss eine breite Palette spezifischer Werkstoffe zur Verfügung stehen, und diese Werkstoffe müssen optimal sowohl an die Strukturierungstechniken als auch an die Anforderungen angepasst werden [9]. Zur Erweiterung der heute verfügbaren Materialpalette wird die Pulvertechnologie für Keramiken und Metalle ertüchtigt [10] [11]. In Anlehnung an die Abformtechniken zur Herstellung von Kunststoffstrukturen werden Pulverspritzgießprozesse entwickelt und eingesetzt: CIM (Ceramic Injection Molding) für keramische

und MIM (Metal Injection Molding) für metallische Mikrostrukturen. Dabei kommt der Entwicklung der zu verarbeitenden Materialien (Feedstocks als Gemisch aus Binder und Pulver), der Formgebung und der Prozesstechnologie eine besondere Bedeutung zu.

Dünnschichten werden mit Hilfe von Physical Vapor Deposition (PVD)-Verfahren als Funktions-, Hilfs- und Schutzschichten aufgebracht und in komplexer Form kombiniert. Hochfrequenztaugliche weichmagnetische Materialien werden in Dünnschichttechnik für Kernkomponenten der Mikroelektronik entwickelt [9]. Da der Materialprüfung und der Zuverlässigkeit von Mikrosystemen eine wesentliche Bedeutung zukommt, ist es erforderlich, auf Materialien und Dimensionen zugeschnittene Prüftechniken und geeignete Simulationstools zur Verfügung zu stellen.

### Systemaufbau

Um aus einzelnen Mikrokomponenten komplexe und intelligente Gesamtsysteme aufbauen zu können, werden im Arbeitsthema „Systemaufbau“ Arbeiten zur Aufbau- und Verbindungstechnik, Mikroelektronik sowie zur rechnergestützten Mikromontage durchgeführt [12] [13]. Ohne diese Systemintegration könnten für die Anwendungsorientierten Arbeiten keine funktionstüchtigen Systeme gefertigt werden. Hierzu gehören neben der Bereitstellung industrieller Fertigungstechniken wie Drahtbonden und Aufbau hybrider elektronischer Schaltungen auch deren Weiterentwicklung. Bei der Mikromontage wer-

den modulare Fertigungsstrukturen eingesetzt, um auch bei kleinen und mittleren Stückzahlen eine wirtschaftliche Umsetzung der mikrosystemtechnischen Entwicklungen zu erreichen.

### Mittel- und langfristige Arbeiten zu „Anwendungen & Visionen“

Für Mikrosysteme aus „Nicht-Silizium-Materialien“ gibt es heute schon eine sehr große Zahl unterschiedlicher Anwendungsfelder. Da nicht alle diese Felder im Rahmen des Programms Mikrosystemtechnik bearbeitet werden können, hat sich das Forschungszentrum entschlossen, seine Arbeiten zunächst auf vier anwendungsorientierte Themenfelder zu konzentrieren. Die wichtigsten Kriterien für die Auswahl der Themen im Bereich „Anwendung und Visionen“ waren Anwendungsrelevanz, Fachkompetenz, Erreichen einer führenden Position, Innovationshöhe und Interdisziplinarität. Wichtig bei der Auswahl war somit einerseits, dass auf diesen Gebieten eine rasche industrielle Umsetzung erzielt werden kann, andererseits dass diese Gebiete auch neue visionäre Felder der Mikrosystemtechnik eröffnen.

### Elektronische Nasen

Motivation für unsere Arbeiten auf diesem Gebiet ist, dass heute noch kein „Chemometer“ kostengünstig verfügbar ist, das die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Umgebung ermöglicht. Im Programm Mikrosystemtechnik wurden in der Ver-

gangenheit zwei unterschiedliche Konzepte entwickelt, die sich gegenseitig ergänzen: Ein Sensorarray auf der Basis von Surface Acoustic Wave-(SAW) Sensoren [14] für den Einsatz in Produktionsanlagen und ein Sensor-Array mit Metalloxid-(MOX)-Sensoren [15] für den Massenmarkt. In Kombination mit modernsten Auswertungen wurde in Kooperation mit Partnern aus der Industrie der Nachweis erbracht, dass beide Systeme vielfältig für die Gasanalytik eingesetzt werden können. Im Rahmen eines HGF-Strategiefonds-Projekts werden die Leistungsdaten beider Systeme (z. B. hohe Empfindlichkeiten für unterschiedliche Gasklassen) weiter verbessert und die Systeme zu einer noch leistungsfähigeren Kombination integriert. Diese Arbeiten sind mittelfristig angelegt, mit dem Ziel, die Elektronischen Nasen innerhalb von ca. 5 Jahren vollständig in die Industrie zu überführen. Eine erste Ausgründungen in diesem Bereich ist – auch im Rahmen des ZWM – in Vorbereitung. Anwendungsgebiete für die Elektronischen Nasen sind beispielsweise: Einsatz in Massenprodukten (Kochtöpfe, Zahnbürsten, Autos ...), Umweltüberwachung, Gebäudetechnik, Produktionsanlagen, Medizintechnik.

### Mikroverfahrenstechnik

Stoff- und Wärmetransporte laufen aufgrund der geringen geometrischen Abmessungen und des großen Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen in Mikrostrukturapparaten etwa 100 mal effizienter ab als in konventionellen Anlagen. Die FuE-Arbeiten

widmen sich insbesondere den Auslegungsgrundlagen und dem Verständnis der in mikrostrukturierten Apparaten ablaufenden Vorgängen [16] sowie der Fertigung und Anwendung von Mikrostrukturapparaten aus Metallen und Keramiken [17]. Im Forschungszentrum wurden weltweit die ersten mikrostrukturierten Kreuzstrom-Mikrowärmeübertrager aus verschiedenen Metallen hergestellt [18]. Sie werden laufend an den Bedarf der Industrie angepasst und wenn benötigt (z. B. sehr hohe Temperaturen, aggressive Medien) auch in Keramik gefertigt. Sie werden weiterentwickelt, um chemische Prozesse effizienter, sicherer, wirtschaftlicher sowie umwelt- und ressourcenschonender durchzuführen. Die speziellen Anwendungsgebiete sind: chemische und pharmazeutische Industrie, Lebensmitteltechnik, Umweltverfahrenstechnik, Energie (Brennstoffzellentechnik), Mischer, Kälte- und Heizungstechnik, Raumfahrt, usw. Als Fernziel soll der Einsatz hochleistungsfähiger Mikrostrukturapparate Prozessführungen ermöglichen, die es gestatten, neuartige Umsetzungen durchzuführen, welche dann letztlich auch zu neuartigen Materialien und Produkten führen können.

### *Mikrooptik*

Die „optischen Technologien“ werden allgemein als besonders wichtig hinsichtlich der Sicherung des Industrie- und Innovationsstandorts Deutschland angesehen. Dies ist z. B. in der „Deutschen Agenda Optik im 21. Jahr-

hundert“ ausführlich dokumentiert. Die Anwendungen der Mikrooptik sind vielfältig, ein besonders hohes Marktpotential wird in der optischen Informationstechnik (Telekommunikation, Datenübertragung und Datenspeicherung) gesehen, aber auch in der optischen Sensorik und Messtechnik. Im Programm Mikrosystemtechnik werden mikrooptische Komponenten höchster Güte (d. h. mit Strukturen im Sub-Mikrometer-Bereich und Strukturhöhen über 100 µm) mit dem LIGA-Verfahren hergestellt [19]. Viele funktionstüchtige Labormuster sind erprobt, verschiedene Produkte (Mikrospektrometer für den sichtbaren und für den IR-Bereich) wurden von unseren Industriepartnern auf den Markt gebracht, bei anderen zeichnet sich ein wirtschaftlicher Erfolg ab.

### *Proteinanalytik und Mikrofluidik*

Nach der weitgehenden Entzifferung des menschlichen Genoms im Jahr 2000 müssen nun die noch wesentlich komplexeren und umfangreicheren funktionalen Zusammenhänge zwischen der Erbinformation und dem Auftreten bestimmter Proteine sowie bei der Wechselwirkung verschiedener Biomoleküle (i. A. Proteine) aufgeklärt werden. Eine zentrale Rolle spielen hierbei neuartige Analyse-Instrumente. Im Rahmen der FuE-Arbeiten werden fluidische Systeme (Mikropumpen, Mikroventile, Mikromischer, Kanalsysteme, Mikromischer usw.) [20] [21] auf Anwendungen in der wissenschaftlich und wirtschaftlich als sehr attrak-

tiv geltenden Bioanalytik und hier insbesondere auf die Proteinanalytik übertragen: Im Programm Mikrosystemtechnik wurden bisher miniaturisierte Komponenten der Fluidik und Biosensorik, (FTIR-Spektroskopie, SAW-Sensoren, Elektrochemische Arrays) entwickelt. Diese werden zusammen mit Komponenten der Mikroelektronik zu hochintegrierten, leistungsfähigen Gesamtsystemen zusammengefügt [22], [23]. Die Anwendungsgebiete dieser Analyse-Instrumente sind u. a.: die schnelle Entwicklung neuer, effektiver Wirkstoffe, die medizinische Diagnostik, die Gesundheitsvorsorge und Therapie sowie die Funktionsanalyse von Bio-Reaktoren oder künstlichen Organen.

### **Verwertungsstrategie**

Um die erzielten Ergebnisse rasch in industrielle Produkte umzusetzen, arbeitet das Programm Mikrosystemtechnik in vielfältiger Form mit der Industrie zusammen: Bearbeitung von Industrieaufträgen, Durchführung bilateraler Projekte mit Industriepartnern und Beteiligung an Verbundprojekten. Weiterhin vergibt das Forschungszentrum Lizenzen an Industriefirmen und unterstützt Ausgründungen. Als wichtige Elemente der Verwertungsstrategie hat das Programm Mikrosystemtechnik das „Forschungszentrum Karlsruhe IndustrieForum Mikrofertigungstechnik“ (FIF) und das „Zentrum Werkstoffe der Mikrotechnik“ (ZWM) etabliert.

**FIF (Forschungszentrum Karlsruhe IndustrieForum Mikrofertigungstechnik)**

Das Forschungszentrum Karlsruhe Industrie-Forum Mikrofertigungstechnik – kurz FIF – ist eine Initiative zur Verbesserung des Wissens- und Technologietransfers im Bereich Mikrosystemtechnik. FIF ist eine Kommunikationsplattform (bildlich gesprochen eine Drehscheibe) für den unmittelbaren Austausch zwischen den Industrieunternehmen, die Mitglied werden, und der Forschung. Basierend auf dem gesammelten Wissen der über 200 Experten des Programms Mikrosystemtechnik am Forschungszentrum

Karlsruhe wird den Mitgliedsunternehmen für einen Jahresbeitrag von 10.000 € ein besonderes Leistungsangebot (Information & Networking, Beratung & Analyse, Technischer Service & Training) zugänglich gemacht. Aufgrund der Einbindung in ein Netzwerk aus Anwendern und Wissenschaftlern schafft FIF den gemeinsamen Rahmen für eine langfristige und vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschung. Neben der Übernahme neuer Technologien wird den Mitgliedsunternehmen ermöglicht, im Dialog mit den Mitarbeitern des Programms Themen zu identifizieren, die bei der Planung zukünftiger Forschungs-

arbeiten Berücksichtigung finden sollen.

Nach vielfältigen Gesprächen mit der Industrie wurde deren Bedarf erkundet, das Angebot von FIF darauf abgestimmt und FIF Anfang des Jahres 1999 gegründet. Das FIF-Team innerhalb des Programms Mikrosystemtechnik besteht z. Z. aus zwei hauptamtlichen Mitarbeitern und ca. 14 Mitarbeitern der am Programm beteiligten Institute, die einen Teil ihrer Arbeit FIF widmen. Seit Gründung von FIF stieg die Mitgliederzahl kontinuierlich an und hat heute einen Stand von 23 erreicht (Abb. 2).

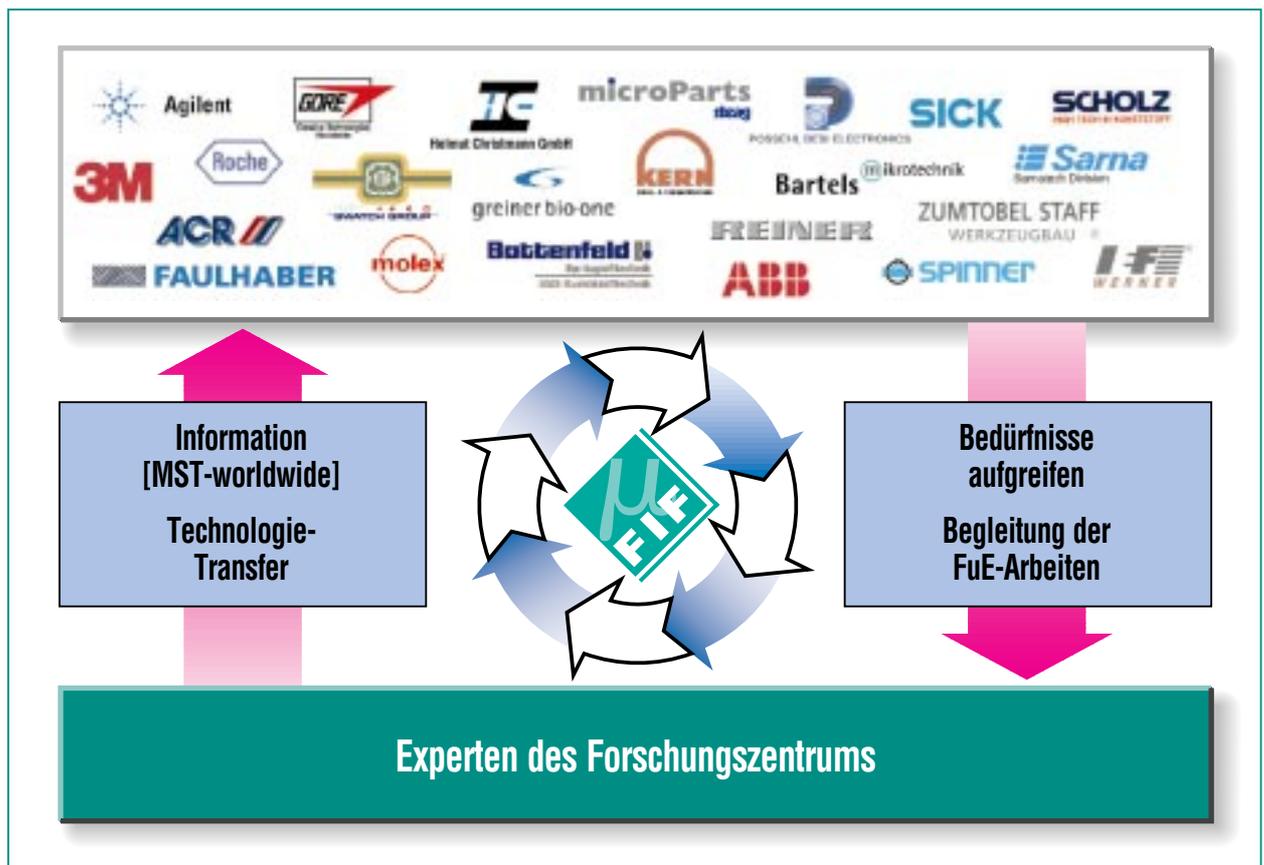


Abb. 2: Zielsetzung und Firmenlogos der 23 Mitgliedsfirmen von FIF (Forschungszentrum Karlsruhe IndustrieForum Mikrofertigungstechnik).

## ZWM (Zentrum Werkstoffe der Mikrotechnik)

Das Zentrum Werkstoffe der Mikrotechnik (ZWM) ist darauf angelegt, in Kooperation mit Partnern aus der Industrie, Universitäten und einer Existenzgründungsinitiative (KEIM, Karlsruher Existenzgründungs-Impuls) dem Potential der Werkstoffe der Mikrotechnik für innovative und zugleich wirtschaftlich attraktive Problemlösungen zu einer beschleunigten praktischen Umsetzung zu verhelfen.

Das ZWM wird vom BMBF und dem Land Baden-Württemberg gefördert. Das Forschungszentrum war dabei mit zwei anderen Zentren (in Berlin und Ulm) Gewinner einer 1999 durchgeführten Ausschreibung. Das geförderte Projekt, das einen integralen Bestandteil des Programms Mikrosystemtechnik darstellt, ist auf 4 1/2 Jahre angelegt. Die Förderquote beträgt am Beginn etwa 80% und reduziert sich zum Ende auf ca. 20%. Der restliche Aufwand für ZWM wird über steigende Drittmittelwerbungen aus der Industrie gedeckt. Die zentrale wirtschaftliche Zielsetzung des ZWM ist die schrittweise Überführung in eine sich finanziell selbst tragende Einheit. Weiterhin soll ZWM die Möglichkeiten zur Ausgründung junger innovativer Unternehmen bieten.

Das ZWM, das eine Personalstärke von 10 Personen aufweist, konzentriert sich auf zwei Schwerpunkte:

- Werkstoffe & Dünnschichtverfahren für mikrotechnische Anwendungen und

- Werkstoffe, Verfahren & Werkzeuge zur Herstellung polymerer und keramischer Mikroteile.

### Ausblick

Am Beginn des Einsatzes/Siegeszuges der Mikrosystemtechnik wurde fast ausschließlich Silizium als Material eingesetzt, da hier auf Strukturierungsprozesse, die im Rahmen der elektronischen Halbleiter-Fertigung entwickelt wurden, zurückgegriffen werden konnte. Die ersten (dreidimensionalen) Mikrostrukturen aus anderen Materialien (Polymere, Metalle, Keramiken) wurden schließlich im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt. Heute haben Mikrosysteme, deren funktionstragende Elemente aus Kunststoffen bestehen, weltweit ihre Verbreitung in industriellen Anwendungen gefunden. Bei Mikrostrukturen aus Metallen ist eine deutliche Steigerung der Nachfrage festzustellen (Formeinsätze für Replikationstechniken, Komponenten in der Telekommunikation wie Spulen oder Induktoren usw.). Keramische Mikrostrukturen werden dort zum Einsatz kommen, wo sie aufgrund ihrer besonderen Materialeigenschaften (Beständigkeit bei hohen Temperaturen und gegenüber aggressiven Medien, Abriebsbeständigkeit) den bisher meist eingesetzten Materialien (Silizium, Polymere, Metalle) überlegen sind.

Das Programm Mikrosystemtechnik des Forschungszentrums Karlsruhe wird weiterhin einen wesentlichen Beitrag zum wirtschaftlichen Durchbruch und zum

Eingang der Mikrosystemtechnik in neue Anwendungsgebiete leisten. Der Durchbruch zu breiter wirtschaftlicher Anwendung wird zukunftssichere Arbeitsplätze in einem Hochtechnologiebereich schaffen, wie sie der Wirtschaftsstandort Deutschland braucht.

Für potenzielle Interessenten aus der Industrie und der Forschung bietet das Programm Mikrosystemtechnik ein in sich geschlossenes und attraktives Angebot. Dieses reicht von der Entwicklung neuer Funktionsmaterialien über die Bereitstellung neuer Fertigungsverfahren und die Herstellung von Demonstratoren, Testmustern und Kleinserien bis hin zu anwendungsspezifischen Gesamtlösungen. Besondere Synergien erschließen sich so durch die Bereitstellung umfassender mikrotechnischer Kompetenz aus einer Hand.

Das Programm Mikrosystemtechnik folgt dabei einer bewusst selektiven Strategie. Bei den Fertigungstechnologien und Materialien hat sich die frühe Ausklammerung von Silizium als Strukturmaterial strategisch bewährt, so dass das Forschungszentrum Karlsruhe heute anerkannte Alleinstellungsmerkmale besitzt.

Bei den Anwendungen wurden wirtschaftlich attraktive und nachgefragte Bereiche ausgewählt, bei denen diese Alleinstellungsmerkmale zum Tragen kommen. Jenseits der bis 2010 detailliert geplanten Anwendungsentwicklungen bekennt sich die Strategie zu Visionen, die erst langfristig realisiert werden können, jedoch im Trend der immer besser beherrschbaren Miniaturisierung

von Strukturen und Verfahren sowie der immer gezielter entwickelbaren Materialien und Funktionsschichten liegen.

### Zusammenfassung

Im Forschungszentrum Karlsruhe arbeiten im Programm Mikrosystemtechnik ca. 230 Personen in zwölf Instituten mit unterschiedlicher fachlicher Ausrichtung interdisziplinär an der Entwicklung der Mikrosystemtechnik. Die Basis der Arbeiten bilden die Fertigungstechniken und Materialien für Mikrosysteme. Dabei werden

insbesondere Mikrosysteme entwickelt, deren funktionstragende Strukturen aus Kunststoffen, Metallen oder Keramiken bestehen. Bei den Anwendungen hat sich das Forschungszentrum Karlsruhe zunächst auf Elektronische Nasen, die Mikroverfahrenstechnik, die Mikrooptik sowie auf die Mikrofluidik und Proteinanalytik konzentriert. Ein Teil des Programms beinhaltet längerfristige Entwicklungsarbeiten im Rahmen einer wissenschaftlich anspruchsvollen und interdisziplinären Grundlagen- und Vorlauforschung. Im andern Teil werden

in Kooperationen mit der Industrie die erreichten Ergebnisse in marktfähige Produkte überführt. Um hier einen möglichst raschen Technologietransfer zu erreichen, wurden ein spezielles Industrieforum (FIF, FZK-Industrieforum Mikrofertigungstechnik) und ein Zentrum Werkstoffe der Mikrotechnik (ZWM) etabliert.

### Literatur

- [1] 1. Statuskolloquium Projekt Mikrosystemtechnik, KfK-Bericht Nr. 5238, 9/1993
- [2] 2. Statuskolloquium Projekt Mikrosystemtechnik FZKA-Bericht Nr. 5670, 11/1995
- [3] 3. Statuskolloquium Projekt Mikrosystemtechnik FZKA-Bericht Nr. 6080, 6/1998
- [4] 4. Statuskolloquium Programm Mikrosystemtechnik FZKA-Bericht Nr. 6423, 3/2000
- Beiträge in dieser Ausgabe der Nachrichten:
- [5] J. Schulz, J. Mohr
- [6] W. Pfleging, T. Schaller
- [7] G. Baumeister, N. Holstein, V. Piotter, R. Ruprecht, G. Schanz, M. Guttmann, F. Winkler, A. Häfele
- [8] V. Piotter, T. Hanemann, K. Müller, R. Ruprecht, G. Dittrich, M. Hecke, M. Worgull
- [9] K.-H. Zum Gahr
- [10] H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, J.R. Binder, E. Klose, J. Haußelt
- [11] W. Bauer, R. Knitter, V. Piotter, R. Ruprecht
- [12] T. Blank, H. Gemmeke
- [13] M. Dickerhof, U. Gengenbach, B. Köhler, I. Sieber
- [14] M. Rapp, A. Voigt, V. Hartmann
- [15] W. Andlauer, M. Harms, R. Körber, J. Goschnick
- [16] V. Heinzl, U. Imke, H. Sauter
- [17] R. Knitter, D. Göhring, P. Risthaus
- [18] K. Schubert
- [19] U. Wallrabe, H. Dittrich, U. Hollenbach, P. Krippner, A. Last, J. Mohr, A. Ruzzu, W. Zißler
- [20] W.K. Schomburg
- [21] P. Ehrhard, G. Jannsens-Maenhout, I. Meisel, T. Schulenberg
- [22] M. Kautt, J. Reichert, W. Hoffmann, M. Strasser, M. Rapp, A. Voigt, K. Länge, K.-F. Weibezahn, E. Gottwald
- [23] M. Kautt, S. Halstenberg, D. Moss, A. Guber, D. Herrmann, A. Muslija