

POSITIONSPAPIER

1991

des Fachausschusses

MIKROSYSTEMTECHNIK

der VDE/VDI-Gesellschaft für Mikroelektronik (GME)

Schutzgebühr: 3,- DM

Januar 1991

POSITIONSPAPIER

1991

des Fachausschusses

MIKROSYSTEMTECHNIK

der VDE/VDI-Gesellschaft für Mikroelektronik (GME)

Redaktion:

Dr.Werner Kulcke, IBM Deutschland, Sindelfingen
Dr.Wolfgang Berger, Hahn-Schickard-Gesellschaft, Freudenstadt
Dr.Thomas Grandke, Siemens AG, Erlangen
Dipl.-Phys. Peter Kleinschmidt, Siemens AG, München
Dr.Helmut Seidel, Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH, München
Prof.Dr.Hans-Rolf Tränkler, Universität d. Bundeswehr, München.

Januar 1991

Vorwort

Mikrosystemtechnik ist ein junger Zweig der Hochtechnologie, dem Einfluß auf viele Bereiche der Wissenschaft und Technik vorhergesagt wird. Von der Medizintechnik bis zur Kraftfahrzeugtechnik, der Luft- und Raumfahrt, von der Kommunikation bis zur Computertechnik reichen die Einsatzmöglichkeiten dieses neuen Fachgebietes, dessen Anwendungspotential auf dem synergetischen Einsatz von Mikromechanik, Mikroelektronik und/oder Mikrooptik beruht. Durch Übernahme von Herstellungsverfahren der Halbleitertechnologie wurde es möglich, auch mechanische und optische Bauelemente zu miniaturisieren und zu komplexen Anordnungen zu integrieren. Wie schon für die Mikroelektronik eröffnet diese Entwicklung nun auch der Mikromechanik und der Mikrooptik ganz neue, bedeutende Einsatzmöglichkeiten.

Im Jahre 1987 stellte der damalige Fachausschuß Mikroelektronik und Mikromechanik mit einem ersten Positionspapier das neu aufgekommene Arbeitsgebiet Mikromechanik einer breiteren Öffentlichkeit vor.

Der Fachausschuß setzte es sich zum Ziel, an der Erschließung des Arbeitsgebietes Mikromechanik für die Wissenschaft, die Technik und die Wirtschaft der Bundesrepublik Deutschland mitzuwirken. Dazu sollten unter anderem:

- o die technischen Grundlagen verbreitert,
- o interdisziplinäre Kooperationen angeregt,
- o die Aus- und Weiterbildung gefördert,
- o vorhandene Ressourcen erfaßt, sowie
- o Denkanstöße für die Bereitstellung weiterer Ressourcen gegeben werden.

Der Fachausschuß ist in den vergangenen drei Jahren dieser selbstgestellten Zielsetzung erfolgreich nachgegangen: Mitglieder des Fachausschusses haben in ihren Firmen und Forschungsinstituten neue Anwendungen erarbeitet, vor allem auch für die mittelständische Industrie, und maßgeblich am Aufbau neuer Forschungseinrichtungen in mehreren Bundesländern mitgewirkt. Fünf Standardwerke über grundlegende Themen der Mikrosystemtechnik wurden von Mitgliedern des Fachausschusses veröffentlicht:

- H. Reichl: "Hybridintegration" (1988) /1/,
- A. Heuberger: "Mikromechanik" (1989) /2/,
- T. Grandke, W.H. Ho: "Sensors, Fundamentals and General Aspects" (1989) /3/,
- R. Spohr: "Ion Tracks and Microtechnology" (1990) /4/,
- S. Büttgenbach: "Mikromechanik" (1990) /5/.

Andere Mitglieder des Fachausschusses organisierten Fachtagungen oder veranstalteten Einführungskurse, die in starkem Maße von Industriefirmen nachgefragt wurden. Wesentliche Beiträge konnten dem Bundesminister für Forschung und Technologie bei der Erarbeitung des Förderprogramms "Mikrosystemtechnik" erbracht werden. Mitglieder des Fachausschusses wirkten an der Einrichtung neuer Lehrstühle für Mikrosystemtechnik an Universitäten und Fachhochschulen mit und nahmen an deren Besetzung beratend und auch aktiv teil.

Wie im ersten Positionspapier des Fachausschusses vorhergesagt entwickelte sich das Arbeitsgebiet Mikromechanik rasch zur Mikrosystemtechnik, der Verbindung mechanischer und optischer Miniaturisierung mit komplexer elektronischer Signal-

und Informationsverarbeitung, weiter. Dem Trend der Entwicklung des Arbeitsgebietes folgend änderte der Fachausschuß im Jahre 1988 seinen Namen in "Fachausschuß Mikrosystemtechnik" der VDE/VDI-Gesellschaft für Mikroelektronik (GME).

Das Positionspapier wird im folgenden den Status und die Entwicklungstrends der Mikrosystemtechnik beschreiben. Es wird auf Schwierigkeiten eingehen, die sich bei der Entwicklung von Mikrosystemen ergeben und die vorteilhaft durch Kooperationen gelöst werden können. Es wird Mittel und Wege angeben, die auch kleineren Unternehmen den Zugang zur Mikrosystemtechnik erleichtern, und ihnen damit eine breitere Basis für Kooperationen erschließen.

Könnte dieses Positionspapier dazu beitragen, den Fortschritt in der Mikrosystemtechnik aufrecht zu erhalten oder gar noch zu beschleunigen, so wäre sein Sinn voll erfüllt.

Dr. Wolfgang Berger

Vorsitzender des Fachausschusses Mikrosystemtechnik
der VDE/VDI Gesellschaft für Mikroelektronik (GME)

Positionspapier 1991

des Fachausschusses Mikrosystemtechnik
der VDE/VDI Gesellschaft für Mikroelektronik (GME)

Inhalt

	Seite
1. Zielsetzung des Positionspapiers	4
2. Mikrosystemtechnik	5
a. Mikroelektronik	5
b. Mikromechanik	6
c. Mikrooptik	9
3. Hauptanwendungsgebiete	11
a. Anwendungen in der Verfahrenstechnik	11
b. Anwendungen in der Fertigungstechnik	13
c. Anwendungen in der Computer- und Informationstechnik	14
d. Anwendungen in der Medizintechnik	17
e. Anwendungen in der Kraftfahrzeugtechnik	18
f. Anwendungen in der Haustechnik	21
g. Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt	22
4. Technologie, Ressourcen und Hilfsquellen	24
5. Publikationen	28
a. Bücher und Veröffentlichungen von Grundlagen	28
b. Zeitschriften	29
c. Fachtagungen	29
6. Förderprogramme	30
a. Förderungsschwerpunkt Mikrosystemtechnik	30
b. Förderprogramme des Bundes und der Länder	32
c. Förderprogramme der Europäischen Gemeinschaft	33
7. Mitglieder des Fachausschusses Mikrosystemtechnik	34

1. ZIELSETZUNG DES POSITIONSPAPIERS

Zielsetzung dieses Positionspapiers ist es, Beiträge zur Erschließung des wissenschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Potentials der Mikrosystemtechnik zu erbringen. Entsprechend adressiert dieses Positionspapier wissenschaftliche Institute ebenso wie Hersteller oder Lieferanten von Komponenten oder Materialien und Systemen, Entwickler von Hardware ebenso wie solche von Software, Ausführende ebenso wie Planer.

Dieses Positionspapier beschreibt den Status der Mikrosystemtechnik, es informiert über neue Entwicklungen sowie über deren Anwendungsgebiete. Es legt Schwierigkeiten offen, die heute in dieser Technik bestehen, und es zeigt Maßnahmen zu deren Überwindung auf. Es benennt Ressourcen, zeigt Fördermöglichkeiten auf und regt Kooperationen an. In diesem Sinne wendet es sich ebenso an Großfirmen wie auch an kleine und mittlere Unternehmen (KMU).

Mikrosystemtechnik ist für Unternehmen aller Größen interessant. Ihr industrieller Ursprung ist zwar sicher in großen Unternehmen der Mikroelektronik-Industrie zu suchen, wo die erforderlichen technologischen Kenntnisse, Herstellmöglichkeiten wie auch eine besonders breite Sicht der Anwendungsmöglichkeiten gegeben sind. Andererseits zwingen wirtschaftliche Gesichtspunkte solche Unternehmen zur Massenfertigung von Produkten, die oft von den äußersten Möglichkeiten der Technik Gebrauch machen. Eine solche Massenfertigung kann aber nicht die für die Herstellung kleinerer Stückzahlen erforderliche Flexibilität der Prozesse und Arbeitsgänge erlauben, wie sie andererseits ein typischer Vorteil der KMUs ist. In vielen Fällen werden daher Kooperationen innerhalb einer guten Infrastruktur den wirtschaftlichen Idealzustand darstellen.

Durch Skizzierung der Zukunftsperspektiven möchte dieses Positionspapier das Interesse an der Mikrosystemtechnik weiten, durch Beschreibung der Technologie den Zugang zu ihr erschließen, sowie durch Nennung von Ressourcen und Hilfsquellen Kooperationen zwischen Unternehmen erleichtern.

2. MIKROSYSTEMTECHNIK

Mikrosystemtechnik ist der Überbegriff für die gemeinsame Verwendung verschiedener, mindestens zweier Basistechniken. Unter diesen Basistechniken haben die folgenden drei - Mikroelektronik, Mikromechanik und Mikrooptik - einen hohen Reifegrad erreicht, der zu ihrer häufigen Anwendung in Mikrosystemen führt. Grundsätzlich können jedoch auch andere physikalische oder chemische Phänomene als Basistechniken eingesetzt werden.

Die gemeinsame Anwendung der Basistechniken eröffnet den Weg zur Nutzung von Synergie-Effekten. Folge ist, daß Mikrosystemtechnik stets mehr zu leisten vermag als die Basistechniken alleine. Durch die Synergie erschließt die Mikrosystemtechnik in einem noch viel stärkeren Maße Zugang zu neuen Märkten, als es die Mikroelektronik für sich alleine tun kann. So ist es sicher nicht vermessen, auch der Mikrosystemtechnik ähnliche Entwicklungs-Chancen zuzusprechen, wie sie für die Mikroelektronik in den letzten 20 Jahren Realität geworden sind.

Die Definition der Mikrosystemtechnik als Kombination mehrerer Basistechniken deutet allerdings auch auf spezielle Probleme hin: Bei der Konzeption und Realisierung von Systemen muß viel interdisziplinäres Wissen über technische Möglichkeiten und Technologien zusammenfließen. Dieses Wissen ist in großen Unternehmen meist nicht in einer Abteilung, in kleineren Unternehmen oft nicht in einer einzigen Firma verfügbar. Entsprechend wird die Realisierung von Mikrosystemen ein hohes Maß an Zusammenarbeit erfordern. Diese wiederum kann nur bei gutem Informationsaustausch und guter Logistik erfolgreich sein und muß auf Standardisierung und hoher Qualität aufbauen.

a. Mikroelektronik

Die Entwicklung der Mikroelektronik aus der Elektronik stellt keineswegs nur eine Verkleinerung der in der Elektronik benutzten Komponenten dar. Einhergegangen mit der Miniaturisierung sind eine starke Steigerung der Arbeitsgeschwindigkeit der Komponenten, ein erhebliches Wachsen der Komplexität der Anordnungen mit entsprechend erhöhter Leistungsfähigkeit der Funktionen sowie ein stark reduzierter Leistungsverbrauch. Die Summe dieser Veränderungen macht einen beachtlichen Vorteil aus, der zu einer großen Zahl neuer Anwendungen mit hohem Nutzen für die Gesellschaft führte. In vielen Bereichen des täglichen Lebens kann auf die Nutzung der Mikroelektronik nicht mehr verzichtet werden.

Zur Nutzung der wachsenden Leistungsfähigkeit mikroelektronischer Systeme sind entsprechende Verbesserungen in der Peripherie erforderlich: "Informations"-Speicher wie Kassetten, Disketten oder Plattenspeicher müssen bei abnehmendem Raumbedarf mehr Informationen bereithalten, Sensoren müssen mehr Information aufnehmen und Drucker oder Anzeigeeinheiten müssen detailliertere Informationen abgeben können. So wie die räumliche Größe des Speichers abnimmt oder die Feinheit des gedruckten oder angezeigten Bildes zunimmt, so muß auch der für ein einzelnes Informationselement (hier bit, dort Pixel) verfügbare Raum schrumpfen. Dem wiederum haben die geometrischen Dimensionen der Komponenten der peripheren Geräte zu folgen: Ein Trend, der von der Miniaturisierung der Elektronik unausweichlich zur Miniaturisierung auch der Mechanik führt.

b. Mikromechanik

Die für die Mikroelektronik entwickelten Fertigungsverfahren sind natürlich nicht auf die Herstellung elektronischer Komponenten beschränkt. Sie können vielmehr allgemein zur Herstellung geometrischer Anordnungen eingesetzt werden, also auch solcher der Mikromechanik. Als Kind der Mikroelektronik konnte die Mikromechanik von vornherein auf ein großes Reservoir von Fertigungstechniken zurückgreifen, das die Konstruktion feinsten, komplexer Strukturen im "Batch"-Verfahren ermöglichte. Die in der konventionellen Feinmechanik nicht gebräuchlichen Verfahren setzten die Mikromechanik von der Feinmechanik deutlich ab und etablierten sie zu einem neuen eigenständigen Fachgebiet.

Das der Mikromechanik vorhergesagte hohe Anwendungspotential ergibt sich aus der Nutzbarkeit von fünf technischen Dimensionen:

- o Materialien
- o Mikrostrukturen
- o Komplexe Anordnungen
- o Kombination (Systemfähigkeit) mit der Mikroelektronik und der
- o Nutzung der ganzen Breite physikalischer Phänomene.

Unter den zur Verfügung stehenden MATERIALIEN spielt das Silizium eine hervorragende Rolle. Alle in der Mikroelektronik entwickelten Bearbeitungsverfahren sind auf dieses Material anwendbar. Diese Verfahren erlauben es, geometrische Formen bis hinab in Mikron-Dimensionen zu strukturieren und - nach Reaktion mit anderen Materialien - das Silizium hinsichtlich seiner elektrischen und thermischen Eigenschaften wesentlich zu modifizieren.

Die scheinbar nachteilige Sprödigkeit des Siliziums stellt sich bei näherem Hinsehen als fehlende Fließgrenze (Plastizität) heraus und gewährleistet damit hervorragende elastische Eigenschaften, weitgehend frei von Ermüdungserscheinungen.

Andere MATERIALIEN außer Silizium können ebenfalls angewendet werden, wenn entsprechende formgebende Bearbeitungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Beispielsweise sind für die Formgebung durch Schwer-Ionen-Beschuß /4/ eine große Zahl von elektrisch nichtleitenden MATERIALIEN, für das LIGA-Verfahren /7/ elektrolytisch abscheidbare harte MATERIALIEN wie Chrom-Nickel sowie zur Abformung dienende Thermoplaste von besonderem Interesse.

Es kann sich auch ergeben, daß neue MATERIALIEN und deren Bearbeitungsprozesse der Mikromechanik sich als vorteilhaft für die Halbleiterfertigung herausstellen, daß also umgekehrt eine Befruchtung der Halbleitertechnik aus der Mikromechanik heraus erfolgt. Eine solche Entwicklung scheint sich heute bereits bei der Herstellung von Nanometer-feinen Spitzen für die Atomic-Force-Mikroskopie abzuzeichnen.

Die Verwendung von MIKROSTRUKTUREN stellt die eigentlich neuartige Möglichkeit der Mikromechanik dar. Sei es die Erzeugung von Resonanzfrequenzen im MHz-Bereich, sei es die elektrostatische Ablenkung der Flugbahn kleiner Tröpfchen oder der Zugriff zu atomaren Dimensionen: Es bieten sich hier technische Möglichkeiten, die erst mit Strukturen im Mikron-Bereich realisierbar werden. Es sei daran erinnert, daß beispielsweise die Masse eines Teils mit der dritten Potenz seiner Größe, das Trägheitsmoment einer Kugel gar mit der fünften Potenz abnimmt.

Ein Temperaturunterschied von 1 K, bezogen auf die im täglichen Leben normale Distanz von etwa 1 cm, stellt einen sehr kleinen Temperaturgradienten dar, bezogen auf 1 μm Distanz ergibt er einen gewaltigen Gradienten von 10^4 K/cm.

Das Verhalten von MIKROSTRUKTUREN überrascht fast immer das normale menschliche Vorstellungsvermögen. Es kann in vielen Fällen nur rechnerisch vorhergesagt werden und eröffnet häufig ungeahnte neue Perspektiven.

Ein weiteres Moment der Mikromechanik ist ebenfalls eine Folge ihrer Abstammung aus der Mikroelektronik. Es ist die Möglichkeit, ohne großen Aufwand KOMPLEXE ANORDNUNGEN herzustellen. Das aus dieser Möglichkeit resultierende Anwendungspotential ist bisher noch kaum angedacht worden. Konzeptionell wurde es erstmals in dem Trenndüsen-Verfahren genutzt, das, auf einem Gedanken von E.W.Becker /6/ basierend, am Kernforschungszentrum in Karlsruhe entwickelt worden ist. Dieses für die Trennung der Uran-Isotope entwickelte Verfahren verwendet mikromechanisch hergestellte Trenndüsen (Abb.1). Zwar hat jede der mikromechanischen Trenndüsen nur eine marginale Ausbeute. Die Hintereinanderschaltung s e h r vieler solcher Düsen gewährleistet jedoch eine ausreichende Trennung.

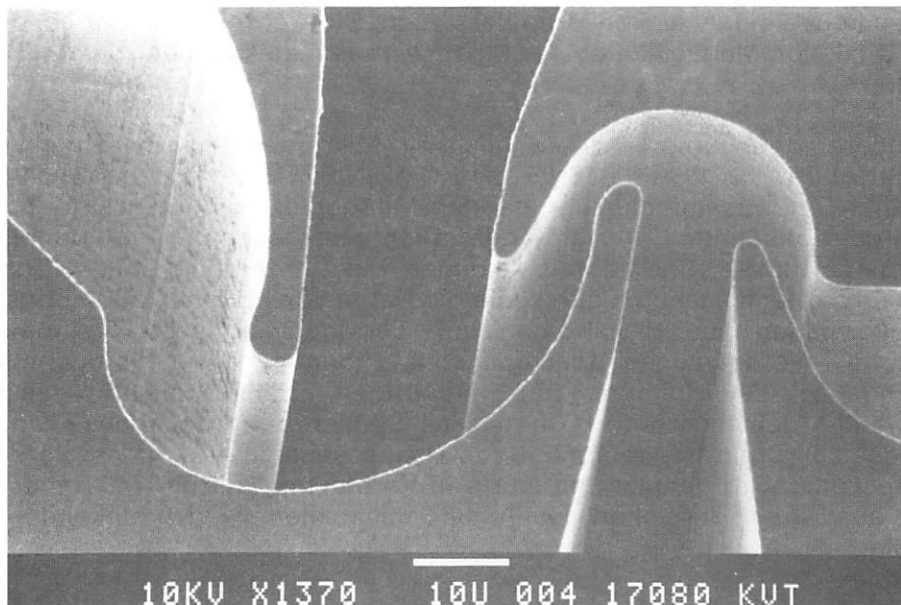
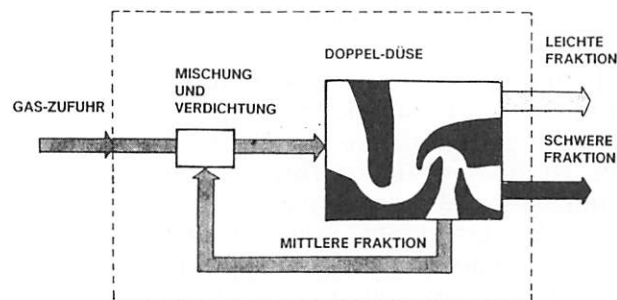


Abb.1: Trenndüsen zur Trennung von Isotopen.
(Quelle: W.Ehrfeld, STEAG)

Die Möglichkeit der Verwendung KOMPLEXER ANORDNUNGEN bietet immer dann besonders große Vorteile, wenn, wie bei den Trenndüsen, eine lange Kette von Elementen die Wirkung eines einzigen verstärkt; wenn lineare oder flächenhafte Anordnungen von Elementen benötigt werden wie zur Abtastung oder Wiedergabe bildhafter Information; wenn viele gleichartige oder einander ähnliche Elemente zum Beispiel eines Sensors diesem besondere Eigenschaften wie Redundanz, Erweiterung des Meßbereichs, multifunktionalen Einsatz oder andere Vorteile verschaffen, welche konventionelle Ein-Element-Sensoren nicht aufweisen können.

Ganz besondere Vorteile resultieren aus der Möglichkeit der Kombination mikromechanischer Komponenten mit solchen der Mikroelektronik. In der KOMBINATION MIT DER MIKROELEKTRONIK kann den mikromechanischen Komponenten lokale "Intelligenz" verliehen werden sowie die Möglichkeit, detektierte und vermittels der "Intelligenz" kondensierte Information an die Zentrale zu übermitteln. Während heutige Sensoren die roh detektierten Signale einem Rechner zur Auswertung zuführen, werden künftige Sensoren mit einem eigenen Mikroprozessor ausgerüstet sein, der die Daten an Ort und Stelle auswertet und nur die relevante Information auf Anforderung an den Steuerrechner weiterleitet. Aus wirtschaftlichen Gründen werden dazu hybride Standard-Sensor-Prozessoren eingesetzt werden, die durch Laden eines entsprechenden Auswerteprogrammes auf die Auswertung der Daten ihres Sensors individualisiert sind. Die Standard-Sensor-Prozessoren werden beispielsweise einen größeren Speicher zur Aufnahme des Auswerteprogramms, einen A/D-Wandler, einen Taktgeber, einen Multiplexer, eine arithmetische Einheit und einen Datenkanal (Daten-Bus) zur Auswertung der Sensordaten auf einem Chip vereinigen. Mit dem Sensor-Prozessor integriert wird auf dem Chip weiterhin ein serieller Datenkanal zur Übertragung der Meßergebnisse an den Steuerrechner vorgesehen sein. Vorzugsweise wird dieser Datenkanal zur optischen Übertragung der Meßergebnisse ausgerüstet sein, da hier die Senderkomponenten besonders klein gehalten werden können und da diese Übertragungsart oft auch ohne Wellenleiter durch den freien Raum ausgeführt werden kann und dann in der Anwendung besonders flexibel ist.

In dieser Anordnung werden dann Sensoren nicht mehr nur mikrotechnische Nachbauten konventioneller Sensoren darstellen. Sie werden vielmehr vollen Nutzen aus den vielfältigen Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik ziehen.

Von besonderer Bedeutung ist die Möglichkeit, Mikromechanik mit einer VIELZAHL VON PHYSIKALISCHEN PHÄNOMENEN zu KOMBINIEREN. So ergeben sich breiteste Anwendungen im Zusammenhang mit der Mikrooptik, wo integrierte brechende Strukturen oder beugende Gitter die erforderlichen statischen Verteilerfunktionen für die Informationsflüsse übernehmen können. In Verbindung mit Magnetismus detektieren mikrotechnische Magnetköpfe die Daten von Magnetplatten oder nehmen SQUIDS Information aus Hirnströmen auf. Thermodynamische Phänomene wie Wärmeleitung, Verdunstung, Diffusion o.ä. können bei mikrogeometrischer Formgebung zu Anordnungen mit neuartigen, bisher nicht realisierbaren Wirkungsweisen genutzt werden. Chemische Sensoren werden entwickelt, die die Zusammensetzung und Konzentration von Gasen bestimmen können. Ja selbst die Quantenmechanik wird genutzt und führte in Verbindung mit der Mikromechanik zu der heute aus vielen Bereichen der Technik nicht mehr wegzudenkenden Tunnel-Mikroskopie.

Bei diesen Zukunftsaussichten kann man fragen, warum sich die Mikrosystemtechnik eigentlich nicht viel schneller einführt, als sie es in Wirklichkeit tut. Ein Grund ist sicher der, daß die Entwicklung komplexer Anordnungen zeitaufwendig ist. Ein anderer Grund ergibt sich aus dem Umstand, daß zu einem vollständigen Sensor außer dem Sensorelement auch das Gehäuse gehört. Bei gleichbleibenden Gehäusekosten ist der wirtschaftliche Gewinn beim Übergang von konventioneller zu mikrotechnischer Fertigung nur begrenzt.

Die Situation ändert sich dann, wenn das Sensorelement komplexer aufgebaut und dadurch mit Redundanz versehen wird und wenn es durch Integration eines mikroelektronischen Prozessors Intelligenz erhält. Hier ergeben sich dann zusätzliche Vorteile, wenn beispielsweise der gesuchte Meßwert nicht mehr nur aus einer einzigen, sondern aus mehreren Messungen ermittelt wird und dann mit erhöhter Meßgenauigkeit anfällt.

Häufig wird ein gesuchter Parameter der Messung nicht direkt zugänglich sein, wohl aber andere Objektparameter, die mit dem gesuchten Parameter in Beziehung stehen. So kann beispielsweise die Geschwindigkeit eines bewegten Gegenstandes von Interesse aber nicht meßbar sein, wohl aber sein jeweiliger Ort. In solchen Fällen kann der gesuchte Parameter indirekt aus Messungen anderer Parameter ermittelt werden. Durch indirekte Messungen und geeignete Programmierung kann ein "intelligenter" Sensor auf eine größere Zahl verschiedener Meßproblemen adaptiert werden. Diese Möglichkeit bringt zusätzlichen wirtschaftlichen Nutzen, da sie die sonst erforderliche Typenvielfalt von Sensoren reduziert.

c. Mikrooptik

Neben der Mikroelektronik und der Mikromechanik ist auch die Mikrooptik als eine Basistechnologie anzusehen. Sie erlaubt es, auf kleinstem Raume Kommunikationskanäle von höchster Übertragungskapazität zu realisieren.

Herkömmlicherweise werden in der Mikroelektronik Informationen über Leiterbahnen oder Drähte übertragen. Diese Übertragungsart entspricht wohl den in der Mikroelektronik gebräuchlichen Konstruktionsprinzipien. Von ihrer Qualität her gesehen ist sie jedoch keineswegs optimal: Erdschleifen fangen elektromagnetische Störungen ein, und nebeneinander geführte Leitungen unterliegen der Gefahr gegenseitigen Übersprechens. Erheblich günstigere Übertragungsbedingungen ergeben sich, wenn elektromagnetische Wellen als Träger des Informationsflusses verwendet werden. Gegenüber konventionellen Radiowellen ist Licht als Übertragungsmedium durch seine besonders hohe Schwingungsfrequenz und entsprechend große Bandbreite ausgezeichnet. Darüberhinaus erlaubt seine kurze Wellenlänge eine gute Strahlenbündelung und erschließt dadurch den Vorteil extrem guter Richtwirkung. Diese Vorteile der optischen Informationsübertragung lagen schon immer klar auf der Hand. Sie waren jedoch weitgehend gegenstandslos, solange nur herkömmliche optische Elemente bekannt waren und der Lichtstrahl zwischen "Sender" und "Empfänger" über Luftstrecken mit wechselnden atmosphärischen Verhältnissen geführt werden mußte.

Erst die Entwicklung kontinuierlich strahlender Halbleiter-Laser und dämpfungsarmer Glasfasern brachte den Durchbruch für optische Informationsübertragung. Der intensive Laser-Strahl kann, in die Glasfaser eingeschlossen, die Informationen störungsfrei über große Strecken übertragen. Laufzeitunterschiede zwischen

Lichtkomponenten, die die Faser in verschiedenen Moden oder verschiedenen Frequenzen (Farbdispersion) durchlaufen haben, brauchen erst nach Distanzen von vielen km kompensiert zu werden.

Außer in Glasfasern kann das Laser-Licht auch in zweidimensionalen Wellenleitern geführt werden, in denen es mittels integrierter optischer Elemente (Linsen, Prismen etc.) in seiner Ausbreitung beeinflusst werden kann. Zunehmend finden dabei auch beugende Gitter und Hologramme Verwendung, die die Realisierung komplexer Strahlengänge ermöglichen, wie sie zum Beispiel in den Schreib-/Leseköpfen für optische Speicher benötigt werden.

Für die Herstellung mikrooptischer Komponenten spielen mikrotechnische Herstellverfahren eine ausschlaggebende Rolle. Angefangen von der Herstellung der Halbleiter-Laser über die Justage der Glasfaser an das Ausgangsfenster des Lasers oder das verlustarme Verspleißen von Glasfasern bis hin zur Herstellung der optischen Elemente, der Beugungsgitter oder Hologramme sind μm -genaue Justagen und die erstmalige Erzeugung sowie kostengünstige Replikation der Strukturen ausschlaggebend für die Qualität der Produkte. Dabei werden Materialsysteme (z.B. die III-IV-Halbleiter) und Herstellprozesse (wie zum Beispiel die Molekularstrahl-Epitaxie MBE) eingesetzt, die über die in der Silizium-Halbleitertechnologie verwendeten weit hinausgehen.

Der Status der Mikrooptik ist inzwischen soweit fortgeschritten, daß z.B. ganze Arrays von Linsen hergestellt werden können, von denen jedes einzelne Element Abmessungen von einigen hundert Mikrometern besitzt. So lassen sich solche Elemente auf III-V-Halbleiterbasis durch photoinduziertes Ätzen herstellen, bzw. es können Fresnel-Linsen auf Polyimid-Basis durch Stempeltechniken im Batch-Verfahren hergestellt werden.

Weitere Grundelemente der Mikrooptik sind Wellenleiter, die z.B. durch Ionenaustausch in speziellen Gläsern, mit Oxinitriden auf Silizium, mit Polyimiden auf Glassubstraten oder mit speziellen Strukturen auf der Basis von III-V-Halbleitern hergestellt werden können. Mit Wellenleiterstrukturen wie Verzweigern und Spiegeln lassen sich komplexe Strahlführungen auf einem Substrat durchführen. Darüberhinaus können mit Hilfe einer Mach-Zehnder-Struktur optische Sensoren gebaut werden, die beispielsweise auf Druck, Brechungsindexänderungen und Temperatur reagieren.

Optische Gitter, die mehrere Linien pro Mikrometer aufweisen, spielen eine immer größere Rolle. Solche Gitter werden bei der Ein- und Auskopplung optischer Strahlung in Wellenleiter benötigt, bei oberflächenemittierenden Lasern und als Wellenlängenfilter an seitlich angeschliffenen Monomode-Fasern. Solche Gitter lassen sich auch seitlich an einem Streifenwellenleiter anbringen, wobei dann der Einkoppelwinkel eines über das Gitter in den Wellenleiter gebeugten Lichtstrahles vom Brechungsindex des umgebenden Mediums abhängt. Theoretisch lassen sich so Δn 's von 10^{-5} noch messen.

Auf dem Gebiet dotierter optischer Fasern ist seit etwa einem Jahr ein bedeutender Fortschritt zu verzeichnen: Mit Hilfe seltener Erden (z.B. Erbium) und einer Dotierung im Bereich von etwa 100 ppm können optische Faserverstärker hergestellt werden, deren optimale Pumpwellenlänge bei 980 nm liegt. Die Wellenlänge der emittierten Strahlung liegt bei 1,53 μm , einer Wellenlänge, die sehr nahe bei der Nachrichtenwellenlänge von 1,55 μm liegt.

3. HAUPTANWENDUNGSGEBIETE

Die Vielfalt ihrer Eigenschaften macht die Mikrosystemtechnik für viele Bereiche der Technik interessant. Im folgenden seien die wohl wichtigsten Anwendungsgebiete herausgegriffen.

a. Anwendungen in der Verfahrenstechnik

Unter Verfahrenstechnik versteht man die Gesamtheit der physikalischen, chemischen und biologischen Prozeßtechniken zur gezielten Modifikation vorwiegend flüssiger und gasförmiger Stoffe. Die Bearbeitung fester Medien bildet dagegen das Gebiet der Fertigungstechnik (s. Abschnitt 3b). Die Kraftwerkstechnik sowie die chemische Prozeßtechnik einschließlich der Biotechnologie und der Umwelttechnik stellen die Hauptgebiete der Verfahrenstechnik dar.

Die Verfahrenstechnik kann als eine der Keimzellen der Meß-, Steuer- und Regeltechnik angesehen werden. Die Notwendigkeit der Prozeßkontrolle z.B. für eine Optimierung der Ausbeuten hat schon sehr früh zum Einsatz einfachster Meßvorrichtungen zur Überwachung und Steuerung der Prozeßabläufe geführt. Ein Beispiel ist die Temperaturmessung, die als indirekte Meßmethode Aufschluß über den Ablauf endo- und exothermer chemischer Prozesse geben kann. Im Laufe der Zeit kamen natürlich weitere Meßverfahren und auch Regelverfahren hinzu. Heute werden großtechnische Anlagen durch komplexe Prozeßleitsysteme überwacht und geführt, in denen eine Vielzahl von Sensoren und Aktoren implementiert sein kann. Eine erhebliche Rolle spielt dabei die Modellierung der Prozesse, weil vielfach die unmittelbar interessierenden Größen - i.a. Stoffkonzentrationen - direkt und on-line mangels geeigneter Sensoren nicht erfaßt werden können und man daher indirekt durch Messung zugänglicher Parameter auf sie schließen muß.

Die Situation der Mikrosystemtechnik in der Verfahrenstechnik kann derzeit etwa folgendermaßen charakterisiert werden:

- o Einfache mikrotechnisch hergestellte Komponenten finden langsam aber stetig Eingang in die Verfahrenstechnik,
- o Perspektiven für komplexe Mikrosysteme sind derzeit nur in Spezialfällen erkennbar, z.B. für die Entnahme und Analyse kleinster Proben.

Eine genauere Betrachtung der Anwendungen der Mikrosystemtechnik in der Verfahrenstechnik ergibt etwa das folgende Bild. Danach sind die für die Verfahrenstechnik besonders zu beachtenden Merkmale:

- o sehr rauhe Umgebungsbedingungen (Temperaturen typisch -50 bis $+100^{\circ}\text{C}$, Feuchte, Schmutz, Vibrationen usw.). Eine entsprechend robuste Gehäusetechnik für alle prozeßnahen Systeme muß dem Rechnung tragen.
- o Explosionsgefahr an vielen Orten. Gefährdete Systeme müssen durch Begrenzung der Leistungsdichte (typisch $< 5 \text{ mW/mm}^2$) "entschärft" werden.

- o Die Anlagen besitzen oft eine sehr große räumliche Ausdehnung. Entsprechend hoch ist der Kommunikationsaufwand.
- o Die Stückzahlen sind niedriger als in typischen Massenmärkten (z.B. Meßumformer für Differenzdruck: Weltmarkt 1986 ca. 700.000 Stück, verteilt auf eine große Zahl von Druckbereichen).
- o Hohe Genauigkeitsanforderungen (typisch wenige o/oo).

Mikrotechnisch gefertigte Komponenten finden nur sehr zögernd Eingang in die Prozeßmeßtechnik. Mitverantwortlich ist hier eine ausgeprägt konservative Haltung der Anwender und - damit verknüpft - eine im allgemeinen sehr hohe Lebensdauer der Produkte. Selbst wenn die Mikrotechnik in der Lage ist, neue Problemlösungen anzubieten, so sind diese am Markt nur schwer durchsetzbar. Zum andern haben neue Technologien auch oft nicht das gehalten, was versprochen wurde. So wurden die faseroptischen Sensorsysteme als ideal angepriesen, u.a. weil sie mit geringsten Leistungen arbeiten und damit intrinsisch als explosionssicher einzustufen sind. Dennoch haben sie trotz langer und kostspieliger Entwicklungsarbeit bisher praktisch keine Anwendung in der Verfahrenstechnik gefunden, weil es an kostengünstig realisierbaren Sensorprinzipien mangelt, die eine ausreichende Genauigkeit aufweisen.

Erste mikrotechnische Komponenten, die tatsächlich eingesetzt werden, sind Siliziumdrucksensoren in Meßumformern für Druck und Differenzdruck. Keramikdrucksensoren, die mit Hilfe einfacher Dünnschichttechniken strukturiert sind und zusätzliche Funktionen wie Selbstüberwachung aufweisen, sind ebenfalls seit kurzem bekannt. Ein großer Bedarf besteht sicherlich bezüglich (bio)chemischer Sensoren, die entweder die Kontrolle von Prozessen oder die Überwachung umweltrelevanter Größen ermöglichen. Entwicklungsarbeiten laufen dazu an sehr vielen Stellen, wobei die Fortschritte aber nur sehr moderat sind.

Die Großflächigkeit verfahrenstechnischer Anlagen bedingt einen erheblichen Aufwand für die Kommunikation zwischen Sensoren, Aktoren und Leitwarten. Auf lange Sicht ist dieses Problem nur mit Hilfe eines standardisierten Feld-Bus-Systems zu lösen, der ein offenes Protokoll besitzt und somit allen Kommunikationslieferanten zugänglich ist.

Entsprechende Normungsbestrebungen laufen seit geraumer Zeit ohne endgültigen Erfolg. Selbst im günstigsten Fall muß damit gerechnet werden, daß in den USA und Europa verschiedene Systeme verwendet werden werden. "Intelligente" Meßumformer, die über entsprechende Schnittstellen verfügen, werden sich auf breiter Front erst nach erfolgter Standardisierung durchsetzen können.

Dieser Trend zum intelligenten Meßumformer beinhaltet einen zunehmenden Elektronikeinsatz vor Ort. Ein Zwang zur Integration in ein komplexeres Mikrosystem ist dabei derzeit nicht erkennbar, weil die Mikrosystemeigenschaften in diesem Zusammenhang keine Vorteile bieten und die Kosten in Anbetracht der mäßig großen Stückzahlen überproportional hoch wären. Insbesondere die Aktorik muß oft auf große Leistungen zurückgreifen können, so daß für sie eine generelle Integration nicht in Betracht kommt.

b. Anwendungen in der Fertigungstechnik

Fertigungstechnik wie Verfahrenstechnik werden heute gleichermaßen zur Herstellung moderner Produkte angewandt. Hinsichtlich der angewandten Methoden unterscheiden sich beide jedoch wesentlich. Während in der Verfahrenstechnik zumeist chemische oder physikalische Verfahren zur "Batch"-Fabrikation (d.h. zur gleichzeitigen Herstellung vieler Einzelteile) eingesetzt werden, verwendet die Fertigungstechnik vornehmlich mechanische Verfahren zur sequentiellen Herstellung der Bauteile. Walzen, Ziehen, Gießen, Schweißen, Bohren, Schleifen, Fräsen, Drehen, Montieren, Prüfen, Testen sind die in der Fertigungstechnik dominierenden Techniken.

Die wachsenden Ansprüche moderner Produkte hinsichtlich Präzision, Feinheit und Komplexität erfordern auch von der Fertigungstechnik ständige Verbesserungen. So sind bei den formgebenden Verfahren engere Toleranzen einzuhalten, es müssen Schwingungen der Werkzeuge detektiert und eliminiert werden. Die Zustellungen der Werkzeuge müssen rascher und mit höherer Präzision erfolgen. Wirtschaftliche Gründe erzwingen eine zunehmende Automation. Dabei muß die Abnutzung der Werkzeuge überwacht werden. Es müssen geeignete Roboter entwickelt werden, die von der einfachen Handhabung bis zur visuell gesteuerten automatischen Montage flexibel eingesetzt werden. Schließlich sind auch die Test- und Prüfverfahren den gestiegenen Anforderungen anzupassen.

Bei der Erfüllung dieser Aufgaben spielen die Mikroelektronik und die Informationsverarbeitung eine wesentliche Rolle, indem sie Ist-Zustände analysieren oder Aktionsprogramme ermitteln. Zur Aufnahme der Ist-Daten und zur Ausführung der Aktionen werden neuartige Sensoren und Aktoren benötigt. Diese müssen vornehmlich Größen wie Länge, Abstand, Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Druck, Temperatur, usw. messen. Da sie - relativ zu herkömmlichen Sensoren - feiner, genauer, komplexer und schneller arbeiten müssen, bietet sich die Mikrosystemtechnik auch hier als Basis-Technik an.

Anders als herkömmliche Sensoren werden mikrotechnische Sensoren eine gewisse Intelligenz zur Vorauswertung der Meßdaten besitzen. Bei komplizierten Fertigungssystemen werden mikrotechnische Sensoren auch nicht nur vereinzelt sondern in größeren Stückzahlen eingesetzt sein. Zur Übertragung der Daten zwischen Steuerrechner und Sensor/Aktor bietet sich eine weitere mikrosystemtechnische Lösung an, die der optischen oder mikrooptischen Kommunikation. Verbindungen durch Glasfasern oder durch die Luft weisen für eine Fertigungsumgebung besondere Vorteile auf: Sie sind leicht herzustellen, unempfindlich gegen Übersprechen und Störungen durch Erdschleifen.

c. Anwendungen in der Computer- und Informationstechnik

Aus der Mikroelektronik hervorgegangen, hat die Mikrosystemtechnik in der Computertechnik frühzeitig Eingang gefunden. Es ist zumindest naheliegend, daß in einer komplexen mikroelektronischen Umgebung entsprechend feine mikro-technische Komponenten bevorzugt zur Anwendung kommen. Mikrosystemtechnik ist heute in der Computer- und Informationstechnik fest etabliert und breitet sich in den Anwendungen rasch weiter aus.

Man kann unterscheiden zwischen Anwendungen

- o zur Herstellung von Rechnern und solchen
- o im Innern von Rechnern sowie solchen
- o in deren Peripherie.

Für die HERSTELLUNG VON RECHNERN ist die Mikrosystemtechnik geradezu unerläßlich. Schon in der Vergangenheit war Mikrotechnik bei den Lithographie-Masken im Spiel, die zur Erzeugung der Schaltkreis-Strukturen auf die Silizium-Scheiben optisch projiziert worden waren. Beim heutigen Stand der Technik entsprechen die Dimensionen der feinsten Strukturen etwa der Wellenlänge des Lichtes. Zukünftige Strukturbreiten werden noch einmal um etwa einen Faktor fünf schmaler hergestellt werden müssen. Das aber kann nur mit sehr kurzwelligem ultraviolettem Licht, mit Röntgen- oder Elektronenstrahlen geschehen. Die Abb. 2 zeigt einen Ausschnitt aus einer Lochmaske, wie sie beim Elektronenstrahl-Schattenwurf-Verfahren zur lithographischen Herstellung des 64 Mbit Chips benötigt wird. Darin sind die zu belichtenden Strukturen im Trockenätz-Verfahren in eine etwa $2\text{ }\mu\text{m}$ dünne Siliziummembran geätzt worden. Die Stege zwischen den Öffnungen haben eine Breite von nur $0,35\text{ }\mu\text{m}$, also etwa $1/200$ der Breite eines menschlichen Haares.

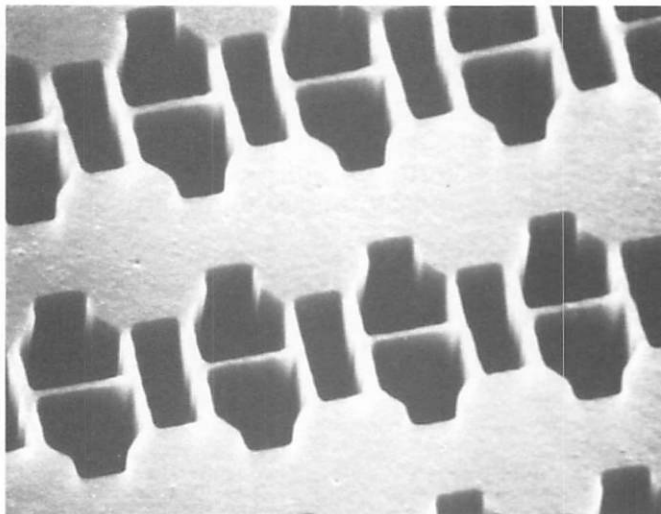


Abb.2: Silizium-Lochmaske mit $0,35\text{ }\mu\text{m}$ feinen Strukturen.
(Quelle: U.Behringer, IBM)

Aber nicht nur hergestellt werden müssen die Strukturen, sie müssen auch auf Lagegenauigkeit und Fehlerfreiheit überprüft werden. Beim Vermessen der Strukturen stellt sich das Problem, daß sie, wenn schon zu schmal um optisch hergestellt werden zu können, sie noch weniger optisch präzise lokalisiert werden können. Neben der sehr aufwendigen und daher gern umgangenen Untersuchung im Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) kann die Tunnel-Mikroskopie bei geringem Aufwand eine räumliche Genauigkeit bis herab in atomare Dimensionen bieten. Als mikrotechnisches System kann sie in ihren verschiedenen Varianten auf eine Vielzahl verschiedener Phänomene als Eingangsgrößen (Tunnelstrom, atomare Kräfte, Wärme, Magnetismus etc.) ausgelegt werden.

Das Prinzip eines mikrotechnischen Leiterplattentesters, bei dem die Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik besonders zum Ausdruck kommen, ist in Abb. 3 gezeigt. Aufgabe dieses Test-System ist es, Leiterbahnen von etwa 10 μm Breite elektrisch zu kontaktieren. Die Mikrosystemtechnik erlaubt es, zinkenförmigen Kontakte wesentlich schmäler zu gestalten, als es die Leiterbahnbreiten sind. Dadurch kann der kammförmige Testkopf beliebig auf die Leiterplatten aufgesetzt werden, ohne daß dabei ein Kurzschluß zwischen den Leiterbahnen zu befürchten wäre. Das Problem der exzessiv vielen elektrischen Zuleitungen wird durch die hybride Integration eines (in der Abb. gestrichelt angedeuteten) Prozessor-Chips eliminiert.

Es sei darauf hingewiesen, daß dieses durch die Mikrosystemtechnik ermöglichte Prinzip der superfeinen Zinken natürlich vielfältig, auch zur abtastenden Verfolgung feinsten Linienzüge eingesetzt werden kann.

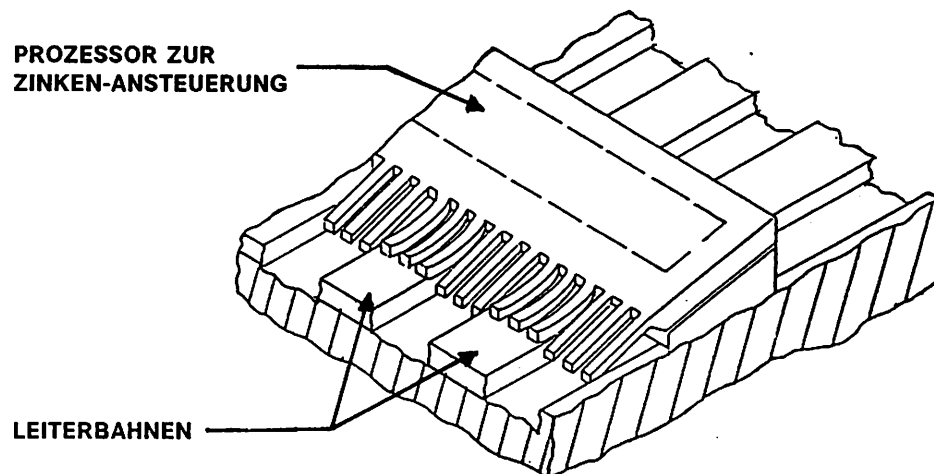


Abb.3: Mikrotechnischer Leiterplattentester.
(Quelle: W.Kulcke, IBM)

Im INNERN VON RECHNERN dominiert die Mikroelektronik zusammen mit der Aufbau- und Verbindungstechnik. Die letztere, die die integrierten Schaltkreise miteinander verbindet, wies bei den keramischen Chip-Trägern (Moduln) und den aus

Epoxidharzen bestehenden Leiterplatten bis in die jüngste Vergangenheit feinmechanische Dimensionen auf. Dabei wurden zur Herstellung durchaus auch schon Verfahren der Mikroelektronik wie Lithographie, elektrochemische Abscheidung oder chemisches Ätzen angewandt.

Die rasch zunehmende Leistungsfähigkeit der Rechner führt im INNEREN DER RECHNER zu einem wachsenden Bedarf an Mikrosystemtechnik. Da die Leistungssteigerung im wesentlichen durch weitere Miniaturisierung erreicht wird, steigt die Verdrahtungsdichte an und können die feineren Leiterbahnen in herkömmlichen Techniken nicht mehr realisiert werden. Es kündigen sich neue Aufbautechniken an, bei denen die Chips auf Siliziumträgern montiert werden, auf denen die Leiterbahnbreiten denen auf den Chips entsprechen können. Zusätzlich ermöglichen solche Siliziumträger die Aufnahme von Ladekondensatoren (und weiteren Schaltelementen), die bisher auf den Chips wertvollen Platz beanspruchen.

Bei weiterer Miniaturisierung ist ebenfalls die Verlustwärme aus immer kleineren Volumina abzuführen. Mikromechanische Anordnungen erlauben die Optimierung der Wärmeabfuhr durch optimale Auslegung der Geometrie der Kühlvorrichtung unter Berücksichtigung von Wärmeleitung, Wärmeübergang und laminarem Fluß des Kühlmittels.

Schließlich, bei immer schnelleren Rechnerkomponenten machen sich zunehmend zu lange oder auch unterschiedlich lange Signal-Laufzeiten störend bemerkbar. Abhilfe bietet hier die optische Datenübertragung, die zur Zeit in großen Rechenanlagen Einzug hält. Die hohe Bandbreite optischer Datenkanäle erlaubt eine serielle Übertragung der Daten ohne Laufzeitunterschiede in den bit-Leitungen, ohne elektromagnetische Störungen aus der Umgebung und mit erhöhter Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die Herstellung von GaAs-Lasern stellt dabei hohe Anforderungen an mikromechanische Fertigungsverfahren. Das gleiche gilt für die Ankoppelung der zur Übertragung verwendeten Glas-Fasern. Der Einsatz der Mikrotechnik wird sich weiter erhöhen, wenn in Zukunft die Signalübertragung mittels integrierter optischer Elemente vorgenommen werden wird. Dazu gehören vor allem in der Ausbreitungsebene integrierte brechende Elemente (Linsen) oder aus der Ebene heraus und zu einem beliebigen Detektor führende Gitterstrukturen.

In der PERIPHERIE von datenverarbeitenden Anlagen bieten sich der Mikrosystemtechnik große Anwendungsbereiche bei der Datenspeicherung und -Auslesung von magnetischen und optischen Speichermedien. Ebenso werden bessere Bildschirm-Anzeigen oder Drucker, jeweils mit Foto-Qualität, für viele neue DV-Anwendungen Voraussetzung sein.

Die folgende Überlegung führt bei vorhersehbar wachsenden Rechnerleistungen zu einem großen Bedarf an mikrotechnischen Sensoren und Aktoren: Zu einem großen Teil werden DV-Anlagen für relativ unkomplizierte Geschäftsvorgänge eingesetzt. Dazu wird der überwiegende Teil der zu verarbeitenden Information von Personen über Tastaturen eingegeben und über Bildschirme oder Drucker ausgelesen. Man wird davon ausgehen können, daß bei zunehmender Leistung der DV-Anlagen diese Art von Informationstransfer irgendwann einmal an Personalgrenzen stößt wird und daß dann die Informationen über automatisch arbeitende Geräte ein- bzw. ausgegeben werden müssen. Erste Beispiele für diesen Trend finden sich schon heute in den Bankautomaten und Supermarktscannern.

d. Anwendungen in der Medizintechnik

Die Anwendungen von Mikrosystemen in der Medizintechnik lassen sich grob in drei Kategorien unterteilen:

- o Extrakorporale Anwendungen am Patienten
- o Intrakorporale Anwendungen am Patienten
- o Anwendungen im medizintechnischen Labor.

Die Anwendungen am Patienten beinhalten Diagnose und/oder Therapie, während sich die Aufgaben des medizintechnischen Labors auf die Diagnose beschränken.

In die EXTRAKORPORALE DIAGNOSE UND THERAPIE hat die Mikrosystemtechnik bereits an einigen Stellen erfolgreich Einzug gehalten. Auf dem Gebiet der bildgebenden Verfahren sind insbesondere die Ultraschall-Bildgebung sowie die Erfassung biomagnetischer Felder zu nennen. Ultraschallapplikatoren für Frequenzen bis zu 20 MHz sind komplexe, heute feinwerktechnisch angefertigte Systeme aus piezokeramischen Wandler-Arrays und elektronischen Schaltungen zur Signalerzeugung und -erfassung. Der Trend zu noch höheren Frequenzen und zu noch handlicheren, kleineren Applikatoren, die dann auch intrakorporal eingesetzt werden könnten, läßt die Feinwerktechnik zunehmend an ihre Grenzen stoßen. Es liegen auch bereits erste Ansätze für eine mikrotechnische Herstellung solcher Arrays vor, die aber noch weit von einer industriellen Realisierbarkeit entfernt sind.

SQUID-Vielkanalsysteme mit höchstempfindlichen supraleitenden Dünnsfilmsensoren ermöglichen erstmals die Erfassung biomagnetischer, z.B. die von der Gehirn- oder Herztätigkeit herrührenden Felder in vertretbaren Zeiten. Erste Geräte befinden sich zur Zeit in der klinischen Erprobung. Mittelfristig wird hier von den Hochtemperatur-Supraleitern noch ein beträchtliches Innovationspotential erwartet.

In der EXTRAKORPORALEN THERAPIE sind vor allem die Hörgeräte zu nennen. Durch konsequente Miniaturisierung ist heute der Schritt zum "In-Ohr"-Hörgerät gelungen, wobei es sich auch hier noch um feinwerktechnische Kunstwerke handelt. Die weitere Entwicklung zielt auf den Einsatz von mikromechanischen Silizium-Mikrofonen ab, die bisher aber noch nicht in den geforderten Spezifikationen hergestellt werden konnten. Wann das Ziel eines nochmals kleineren, vollständig integrierten Mikrosystems mit Mikrofon, Elektronik und Schallgeber erreicht sein wird, läßt sich heute noch nicht absehen.

Das in vieler Hinsicht anspruchsvollste Anwendungsgebiet stellt die INTRAKORPORALE DIAGNOSE UND THERAPIE dar. Bei jeglicher intrakorporaler Anwendung spielt die Miniaturisierung eine Schlüsselrolle, so daß hier auch das größte Potential für die Mikrosystemtechnik zu vermuten ist. Auf der anderen Seite bringen die Forderungen nach Körperverträglichkeit, Sterilisierbarkeit und höchster Zuverlässigkeit ganz erhebliche Probleme mit sich, die bislang nur zu einem sehr kleinen Teil gelöst sind.

Bezogen auf die reine Diagnose sind zunächst alle Messungen zu nennen, die mit Hilfe von Kathetern durchgeführt werden. Im Sinne eines minimal-invasiven Vorgehens zur Schonung des Patienten ist man bestrebt, mit möglichst wenigen Eingriffen möglichst viele physiologische Parameter zu erfassen. Außer Sensorsystemen, die gleichzeitig Blutdruck und -temperatur erfassen, sind heute noch keine multifunktionalen Kathetersensoren im Einsatz.

Implantate, die kranke Organe in ihrer Funktion teilweise oder ganz ersetzen, beinhalten immer Diagnose und Therapie, d.h. Sensoren und Aktoren. In diesem Zusammenhang ist der Herzschrittmacher zu einem Standardgerät geworden. Moderne Schrittmacher sind telemetrisch auf verschiedene Belastungszustände des Patienten programmierbar und enthalten bewegungsempfindliche Sensoren, die die Aktivität des Patienten registrieren. Noch weitergehende Konzepte zielen auf die direkte Messung von Parametern, z.B. des Sauerstoffgehaltes des Blutes ab, wozu aber erst noch geeignete langlebige Sensoren entwickelt werden müssen. Andere Implantate wie die künstliche Bauchspeicheldrüse - ein Mikrosystem aus Glucosesensor und Insulindosierpumpe - oder Hörhilfen für 100 prozentig Hörgeschädigte, die direkt auf die Gehörnerven in der Cochlea wirken, stecken ebenfalls noch in den Kinderschuhen.

Im Rahmen der Mikrochirurgie bieten sich einige heute noch überhaupt nicht abgedeckte Anwendungsfelder. Neurochirurgische Eingriffe am Gehirn erfordern ebenso wie Operationen an beschädigten Nervenfasern extrem präzises Arbeiten, welches durch geeignete Mikroaktoren unterstützt werden könnte. Auch die Funktionalität aktiver endoskopischer Systeme, die im Sinne der minimal-invasiven Chirurgie zunehmend eingesetzt werden, ließe sich durch die Verknüpfung mit Mikrosystemen für die in-situ-Diagnose und -Therapie weiter verbessern. Allerdings schäumt gerade auf diesem Gebiet die Phantasie teilweise über und man muß beispielsweise vor der Vorstellung warnen, daß schon bald Mikroroboter die Gefäße von ihren Kalkablagerungen befreien könnten.

Im MEDIZINTECHNISCHEN LABOR schließlich besteht ein großer Bedarf an Sensoren zur Messung biologischer Parameter. Der hier zu verzeichnende Trend zur Analyse immer kleinerer Probemengen zwingt zur Entwicklung immer empfindlicherer Sensorsysteme für die physiologisch relevanten Meßgrößen. Daneben sind Mikrofilter von einem gewissen Interesse. Ansonsten gibt es auf dem Gebiet der Analysentechnik nur wenig medizintechnisch-spezifische Besonderheiten.

Insgesamt bietet die Medizintechnik somit eine Reihe sehr attraktiver Perspektiven für die Mikrosystemtechnik. Andererseits gibt es wegen der Wesensfremdheit zwischen technischen und biologischen Systemen wohl kein anderes Anwendungsgebiet, bei dem es so sehr auf die Kooperation zwischen Entwickler und Anwender ankommt, will man zu technisch ausgereiften und für den Patienten nützlichen und akzeptablen Lösungen kommen.

e. Anwendungen in der Kraftfahrzeugtechnik

Das Kraftfahrzeug bildet das Stückzahlgerüst für den wirtschaftlichen Einsatz der Mikrosystemtechnik. Dabei stehen die mögliche Erhöhung der Zuverlässigkeit und die Schaffung autonomer, wartbarer Subsysteme zu vertretbaren Kosten im Vordergrund des Interesses. Einsatzgebiete finden sich bei

- o Sensoren
- o Aktoren sowie bei
- o Kommunikationskomponenten.

Mikromechanische Druck- und Beschleunigungsaufnehmer sind Stand der Technik, ebenfalls multifunktionale Power-FETs und Oberflächenwellen-Transponder. Weitere Komponenten werden schrittweise dazukommen.

Mikrosysteme haben im Kraftfahrzeug Eingang gefunden, obwohl weder Miniaturisierung noch Interdependenzen verschiedener physikalischer Vorgänge eine wesentliche Rolle spielen. Beherrschende Faktoren sind Kosten und Zuverlässigkeit.

Je mehr Elektronik zur Entlastung des Fahrers eingesetzt wird, desto umfangreicher und komplexer werden die Systeme. Nach Angaben von VW bewegt sich der Elektrik- und Elektronikanteil auf 24% der Gesamtkosten eines Kfz, nach Ford auf 2000 \$ im Jahre 2000 zu. Dabei verdoppelt sich die Zahl der elektronisch realisierbaren Funktionen alle 10 Jahre.

Durch das rasante Wachstum sind Zuverlässigkeit und Wartbarkeit immer schwerer zu beherrschen. Besondere Probleme bereitet die elektrische Verbindungstechnik, insbesondere die der Steckverbindungen. In dieser Hinsicht sind prüfbare, autonome Teilsysteme hoher Zuverlässigkeit gefragt, deren Verknüpfung zukünftig zunehmend durch Busse erfolgen wird. Diese Subsysteme konfigurieren sich hauptsächlich um Sensoren und Aktoren. Ihre Realisierung erfolgt bereits heute immer in Mikrosystemtechnik, wenn dadurch Zuverlässigkeit erhöht und Kosten eingespart werden können. Die folgenden Beispiele zeigen die Felder, die derzeit oder zukünftig von Mikrosystemtechnik besetzt sein werden.

Bei allen Anwendungen der Mikrosystemtechnik im Automobilbau stützt sich die Kfz-Industrie erfolgreich auf Zulieferer. Kleine und vor allem mittelgroße Unternehmen haben hier Chancen, sich im Wettbewerb zu qualifizieren. Die Mikrosystemtechnik, die diesen Unternehmen zugänglich ist, bietet dabei eine große Chance. Durch zunehmende Standardisierung der Funktionen und Bus-Protokolle im Kfz können wirtschaftlich interessante Lösungen von Spezialisten angeboten werden. Voraussetzung ist allerdings die Beherrschung beispielhafter Zuverlässigkeit in der bekannt rauen Kfz-Umgebung.

Elektronische SENSOREN werden vornehmlich zur Vermeidung mechanisch bewegter, dem Verschleiß unterworfenen Teile eingesetzt. Die Integration mit signalverarbeitender Elektronik verbessert die Prüfbarkeit und Zuverlässigkeit. Mikromechanische Sensoren sind insbesondere interessant als Drucksensoren im Ansaugrohr, zur Messung von Beschleunigungen, für die Abgas-Optimierung sowie für Strömungsmessungen. Zur Unterdruckmessung im Ansaugrohr kommen mikromechanisch realisierte Drucksensoren als Ein- oder Zwei-Chip-Anordnungen zum Einsatz.

Mikromechanische Beschleunigungssensoren werden wegen ihrer hohen Zuverlässigkeit in der zweiten Generation zur Auslösung des Air-Bags von Bedeutung sein. Wegen ihres günstigen Preises dürften sie auch eine beherrschende Rolle als Trägheits-Navigations-Sensoren in aktiven Fahrwerken spielen.

Bei der Abgasreinigung, bzw. der emissionskontrollierten Verbrennung im Kfz-Motor werden zukünftige Anforderungen hinsichtlich Ansprechzeit und Komponentenselektivität auftreten, die nur mit planaren Dünnschichtstrukturen erfüllt werden können. Solche Sensorsysteme befinden sich derzeit noch im Entwicklungsstadium und werden erst Mitte der 90er Jahre ihre Massenanwendung finden. Luftmassenmesser arbeiten heute teilweise nach dem Hitzdrahtprinzip. Hier sind Bemühungen zu beobachten, die Drähte oder Heißfilme durch mikromechanisch

erzeugte, freitragende Brücken aus Silizium zu ersetzen, die sich über anisotrop geätzte Gräben spannen.

Zu den AKTOREN gehören Motoren, Stellglieder, Ventile, Anzeigeelemente (Dash Board) und Module der Leistungselektronik.

Bei den Motoren ist trotz häufigen Einsatzes im Kfz (z.B. 80 Elektromotoren in einem Kfz der Luxusklasse) keine Verbesserung der Eigenschaften durch den Einsatz der Mikrosystemtechnik in Sicht. Die Leistungserfordernisse werden durch gegenwärtige Entwicklungen der Mikrosystemtechnik nicht abgedeckt.

Beim Armaturenbrett besteht ein Trend zum elektronischen Flachdisplay mit integrierten Rechnerfunktionen. Mehr Intelligenz und höhere Zuverlässigkeit bei niedrigen Kosten werden die Folge sein. Wichtig für den Hersteller ist dabei eine Design-Flexibilität durch rechnergestützten Entwurf zur Anpassung an die Anforderungen in verschiedenen Kfz-Typen.

Intelligente Leistungsschalter stellen ein aussichtsreiches Feld dar, auf dem durch Einsatz von MST-Methoden und -Mitteln mehr Übersichtlichkeit, Zuverlässigkeit, Diagnose- und Wartungsfreundlichkeit zu erzielen sind. Übertemperatur- und Überlastungsschutz, Notlaufeigenschaften sowie Überwachung peripherer Verschleißteile wie Lampen, Fensterheber, Scheibenwischer werden angestrebt. Für eine wirtschaftliche und ausfallsichere Realisierung kommt vornehmlich eine Kombination aus monolithischer und hybrider Integration von Leistungsfeldeffekttransistoren, Sensor- und Signalverarbeitungsstrukturen mit Sensoren und ggf. Bus-Treibern infrage. Mittelintegrierte Smart-FETs werden bereits von verschiedenen Herstellern angeboten.

Im KOMMUNIKATIONSBEREICH ist die Mikrosystemtechnik von Interesse für die Datenübertragung innerhalb des Kfz, für die Verkehrsleitung, die Verkehrsorientierung sowie die Identifikation von Fahrzeugen.

Bei den Bussen könnte die Mikrosystemtechnik zukünftig eine Rolle spielen, sobald es um faseroptische Komponenten mit optisch-elektronischer Kopplung gehen wird.

Bei der Verkehrsleitung konkurrieren Funk, Satellitenfunk und Kommunikation über Infrarotbaken.

Für die Orientierung von Kraftfahrzeugen im Straßennetz werden autarke Systeme, basierend auf Radar-, Ultraschall-, Infrarot-Technik oder optischer Bildauswertung in Zukunft Bedeutung erlangen. Mikrosystemtechnik kann dazu beitragen, daß aus dem industriellen und militärischen Bereich stammende Orientierungstechniken bei entsprechenden Stückzahlen im Kfz durch planare Integration um ein Vielfaches billiger werden. Ohne diese Verbilligung ist ein Einsatz dieser Techniken wirtschaftlich nicht durchführbar.

Zur Identifikation von Fahrzeugen ist ein Mikrowellentransponder nach dem Oberflächenwellen-Prinzip, ein sogenanntes ID-tag in Diskussion. Die Probleme der Einführung sind weniger technischer als organisatorischer und politischer Art. In Oslo sind solche Identifizierungsbauteile bereits im Einsatz. Die Bauelemente werden mit typischen mikrotechnischen Werkzeugen auf LiNbO₃-Wafeln strukturiert und prozessiert.

f. Anwendungen in der Haustechnik

Seit einiger Zeit werden in verstärktem Maße Komponenten der Meß- und Automatisierungstechnik zur Klimatisierung, Überwachung und Beleuchtung von Häusern eingesetzt. Diese Entwicklung hat ihre Ursachen sowohl im steigenden Umweltbewußtsein (Minimierung des Energieverbrauchs und der Schadstoffemission) als auch in der verstärkten Tendenz zum behaglichen Wohn- und Arbeitsplatz.

Konventionelle Maßnahmen basieren zum größten Teil auf der Installation lokaler, voneinander unabhängiger Stellglieder (Heizungsventil, Lichtschalter), die entweder vom Menschen direkt betätigt werden oder Teil eines einfach strukturierten Regelkreises sind (Heizungsthermostat). Dagegen versucht man, insbesondere bei größeren Nutzbauten (Bürogebäude, Fabrikationshallen), durch eine zentrale Klimaanlage eine effektive Klimatisierung zu erreichen, wobei aber eine raumindividuelle Anpassung nur mehr unter großen Schwierigkeiten möglich ist.

In Zukunft werden Lösungskonzepte angestrebt werden müssen, die zwischen diesen Extremen liegen. Es werden in jedem Raum lokale Aktoren zum Ansteuern von Heizkörpern, Lüftern, Beleuchtungskörpern, etc. sowie Sensoren zum Erfassen von Temperatur, Feuchte, Gaskonzentrationen, Luftzug, Lichtstärke etc. vorhanden sein. Untereinander werden diese Komponenten, die mit eigener "Vor-Ort-Intelligenz" ausgestattet sind, durch ein seriell Bus-System gekoppelt sein, das auch die Verbindung zu übergeordneten Kontrollstationen herstellt. Das Haus von morgen wird ein intelligentes Gebäude sein.

Entscheidend wird dabei die Verfügbarkeit kompakter, zuverlässiger und preiswerter intelligenter Sensor-/Aktorstrukturen sein. Die Mikrosystemtechnik kann dazu wesentliche Impulse liefern: Nicht nur die Realisierbarkeit neuer physikalischer Wirkmechanismen mit Techniken der Mikromechanik und Mikrooptik könnte hierbei wegweisend sein; die komplette Integration von Sensor-/Aktorelementen mit analoger Signalverarbeitung und Mikrocontroller-Schaltkreisen zur Implementierung von Signalverarbeitungs- und Regelalgorithmen wird wesentlich zum effektiven und kostengünstigen Einsatz dieser Verfahren im intelligenten Haus beitragen.

Grundsätzlich lassen sich die folgenden Aufgabenbereiche nennen, die aber stets Teilsysteme eines umfassenden "Gebäudemanagements" darstellen:

Heizung und Klimatisierung:

Während bereits zahlreiche, auch integrierbare Sensorprinzipien zur genauen Temperaturmessung verfügbar sind, müssen die Methoden der Feuchtemessung insbesondere hinsichtlich Reproduzierbarkeit und einfacher Auswertung noch näher untersucht werden. Zur Zeit konzentrieren sich die Arbeiten vorwiegend auf kapazitive Sensoren auf Keramik- oder Polymerbasis. Für Steueraufgaben erscheinen Entwicklungen mit Methoden der Mikrostrukturtechnik sehr aussichtsreich, wie erste Modelle von Mikroturbinen und -pumpen zeigen.

Gefahrenmeldesysteme:

Hier können drei Teilgebiete unterschieden werden: Die Intrusionsdetektion (vorwiegend mit Infrarot- und Ultraschallverfahren), die Branddetektion (z.B. die Erfassung von Rauchpartikeln mit Streulicht- oder Ionisationsmeldern) und die Überwachung der Gaskonzentrationen (Gasmelder, MAK-Überwachung). Vor allem letzteres bedarf des kombinierten Einsatzes von Herstelltechniken und sensorspezifischen Signalverarbeitungs-Maßnahmen, da Gassensoren in der Regel nicht selektiv arbeiten.

Beleuchtung:

Intelligente Lösungen, wie das arbeits- und personenspezifische Regeln der effektiven Lichtstärke oder das Ausschalten der Beleuchtung bei nichtbesetzten Räumen können durch Mikrosysteme einfach gelöst werden.

Kommunikation:

Die benötigte Infrastruktur in Form eines Bus-Systems könnte auch Träger von Kommunikationsleistungen sein. Aufgrund der hierbei jedoch oft sehr großen benötigten Bandbreiten (Übertragung von Sprache, Computerdateien oder Bildern) könnte sich aber auch ein eigenes Netz als sinnvoll erweisen. Preiswerte Ankoppelelemente, realisiert mit Methoden der Mikrosystemtechnik, wären sehr wünschenswert.

Sonstige Anwendungsgebiete (Aufzugsteuerung, etc):

Diese Systeme sollten im Sinne optimaler synergetischer Aspekte in die Infrastruktur obiger Anlagen eingefügt werden.

Der wesentliche Teil der Infrastruktur wird, wie bereits angeführt, ein leistungsfähiges und dennoch preiswertes serielles Bus-System sein. Dabei wird man wahrscheinlich zur direkten Vernetzung der Sensoren und Aktoren kein teures und mit hohem Protokoll-Aufwand verbundenes Konzept aus dem Bereich der Fertigung (Feldbus; z.B. Bitbus, Profibus) heranziehen. Es bieten sich hierfür vielmehr Verfahren an, die einen Großteil der benötigten Ankoppelfunktionen und Protokolle in einem VLSI-Baustein (bzw. in Zukunft auch als ASIC-Zelle) zur Verfügung stellen.

Hierfür bieten sich zum Beispiel sogenannte Auto-Busse an, Bus-Systeme, welche die Grundanforderungen für den Kfz-Einsatz wie hohe Datensicherheit, hohe Übertragungsgeschwindigkeit und niedriger Preis erfüllen. Als Beispiel sei der CAN-Bus genannt, der inzwischen von mehreren Halbleiterherstellern als Controller-IC angeboten wird und demnächst auch zusammen mit einem Microcontroller auf einem Chip integriert verfügbar sein wird.

Die Bedeutung der Bus-Systeme für die zukünftige Gebäudesystemtechnik zeigt sich auch an der Tatsache, daß sich eine Reihe europäischer Firmen zu einer "European Installation Bus Association" zusammengeschlossen hat. Diese Assoziation hat einen Bus spezifiziert, der als Standardbus für die Gebäudesystemtechnik eingeführt werden soll.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß der konzentrierte Einsatz mikrosystemtechnischer Methoden die Einführung intelligenter, umwelt- und menschengerechter Haustechnik in hohem Maße erst ermöglichen wird.

g. Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt

Moderne Luft- und Raumfahrzeuge sind Systeme mit einem außerordentlich hohen Grad an Komplexität. Fragen der Sicherheit, die sich in sehr hohen Anforderungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Komponenten sowie hinsichtlich der Intelligenz des Gesamtsystems ausdrücken, spielen eine zentrale Rolle. Die Systemintelligenz bestimmt letztlich das Zusammenspiel der Sensorik, Aktorik und der Signalverarbeitung. Aus ökonomischen und ökologischen Gründen besteht ferner ein starker Zwang zur Minimierung des Treibstoffverbrauchs bei steigender Nutzlast. Dieses Ziel kann unter anderem durch Gewichts- und Platzeinsparungen mit miniaturisierten Funktionsgruppen erreicht werden. Am eklatantesten ist die

Forderung nach Gewichtseinsparung in der Raumfahrt, wo die Beförderung von 1 kg Nutzlast in eine Umlaufbahn ca. 0,5 Mio. DM kostet. Weitere wichtige Themen sind die Reduzierung von Schadstoffausstoß und Lärm.

In allen diesen Bereichen kann die Mikrosystemtechnik insbesondere durch verbesserte und neuartige Sensorik entscheidende Beiträge leisten. Zu erwähnen sind vor allem folgende Punkte:

- o Erhöhung der Systemleistung durch vermehrte Intelligenz,
- o Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Integration und vermehrte Zustandsüberwachung (Sensorik),
- o Minimierung des Energieverbrauchs und des Platzbedarfs durch Miniaturisierung,
- o Kostensenkung durch rationelle Aufbau- und Verbindungstechnik,
- o Innovationspotential durch neuartige Anwendungen.

Die Mikrosystemtechnik findet ein breites Anwendungspotential in allen Bereichen der Luftfahrzeugtechnologie. Dazu gehören die Flugsteuerung, die Flugzeugstruktur sowie die Avionik.

In der Flugsteuerung müssen alle wichtigen Flugzustände erfasst werden. Dazu gehören unter anderem Geschwindigkeit, Anströmung (Erkennung von Turbulenzen), Höhe, Steig- und Sinkverhalten, Drehraten in allen Flugzeugachsen, Stellung der Flügelklappen sowie Erfassung der Betriebsdaten der Triebwerke und des Treibstoffsystems. Diese Erfassung erfolgt mit einer Vielzahl von Sensoren für Druck, Beschleunigung, Drehraten (mechanische Kreisel), Temperatur, Weglänge und Durchfluß, wobei höchste Anforderungen an Zuverlässigkeit und Genauigkeit gestellt werden. Ein besonderes Problemfeld stellt die Erfassung der Betriebsdaten der Triebwerke dar, da dort sehr hohe Temperaturen auftreten, zu deren Messung nur wenige Sensorarten zur Verfügung stehen.

Zur Flugsteuerung gehört neben der Verknüpfung der Sensorsignale mit dem Cockpit auch die Übertragung der Steuerbefehle an die Aktoren der Flügelklappen. Hier wurde erst in jüngster Zeit (z.B. beim Airbus 320) das sogenannte "Fly-by-Wire"-Konzept zur vollständigen und ausschließlichen elektrischen Signalübertragung von Steuerbefehlen verwirklicht. Zur Verbesserung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) wird jedoch bereits seit längerem das sogenannte "Fly-by-Light"-Konzept diskutiert. Danach soll die gesamte Signalübertragung über Lichtleitfasern abgewickelt werden. Hierzu werden z.B. Lichtwellenleiter-Koppler, faseroptische Multiplexer sowie optische Bypässe für Lichtwellenleiter-Übertragungsstrecken benötigt. Weiterhin besteht der Wunsch, auch in der Datengewinnung optisch auszulesende Sensoren zu verwenden. Hier kann die Mikromechanik in Verknüpfung mit Mikrooptik entscheidende Beiträge leisten.

Ein weiteres Aufgabenfeld für Mikrosystemtechnik ist die Avionik, z.B. der Sprechfunkverkehr oder Leitsysteme für den Landeanflug, insbesondere Einrichtungen zur vollautomatischen Landung bei schlechten Sichtverhältnissen. Eine wichtige Aufgabe der Avionik ist auch die gesamte Flugnavigation über Funk bzw. über autonome Systeme mit Laserkreiseln (Sagnac-Effekt), bei denen sehr hohe Genauigkeiten und minimale Langzeitdrift gefordert werden. Für die Avionik müssen immer größere Datenströme mit verteilter Intelligenz effizient übertragen werden. Der Trend geht auch hier zur optischen Datenkommunikation mit optoelektronischen Sende- und Empfangsmodulen sowie optischen Multiplexern.

Zur Erhöhung der Flugsicherheit und der Flugleistung gibt es Bestrebungen, die passive Außenhaut sowie andere mechanisch tragende Teile durch sogenannte

"smart structures" zu ersetzen. Darunter versteht man z.B. eine Integration von ausgedehnten Sensornetzen in den Strukturen (insbesondere bei Faserverbundwerkstoffen), die Materialdefekte aufgrund von Überbeanspruchung, Materialermüdung oder Einschlägen (z.B. Vögel) frühzeitig erkennen lassen. Eine weitere Anwendung ist die Einführung von Tragflächen mit variabler Geometrie zur optimalen Anpassung an die jeweiligen aerodynamischen Verhältnisse. Hier wird eine flächige Anordnung von Sensoren und Aktoren benötigt.

In der Raumfahrt wird ebenfalls eine Vielzahl von Sensoren benötigt. Ein wichtiger Themenkomplex ist die Lageregelung von Satelliten. Hierzu werden vorzugsweise optische Sensoren mit intelligenter Signalverarbeitung eingesetzt. Beispiele sind Erdhorizont-Sensoren sowie Sonnenstands-Sensoren zur Drei-Achsen-Lageregelung von Kommunikationssatelliten. Bei Satelliten mit astronomischen Aufgaben muß die Lageregelung mit einer Genauigkeit von wenigen Bogensekunden erfolgen. Dies wird mit optischen Stern-Trackern mit hochauflösenden Photodioden erreicht. Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet der Mikrosystemtechnik ist die Sensorik für Docking- und Rendezvous-Manöver. Hierfür werden Abstands- und Positionssensoren, die z.B. mit Mikrowellen oder optischen Interferometern arbeiten, verwendet.

Schließlich ist die Mikrosystemtechnik wichtig für die Ausstattung von wissenschaftlichen Satelliten. Dort wird eine große Vielfalt von Sensoren und Systemen für unterschiedlichste Aufgaben bei oftmals höchsten Qualitätsanforderungen benötigt. Beispiele sind Messungen schwacher elektromagnetischer Felder sowie astronomische Sensorik für das gesamte Wellenlängenspektrum von Radiowellen über Infrarot-, sichtbarer und Röntgenstrahlung bis hin zu Gammastrahlen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Luft- und Raumfahrt aufgrund ihrer außerordentlich hohen Anforderungen häufig einen wesentlichen Anstoß für neuartige Entwicklungen leisten kann, die später Eingang in die allgemeine Technik finden.

4. TECHNOLOGIE, RESSOURCEN UND HILFSQUELLEN

Wie im Abschnitt 2 näher ausgeführt können Mikrosysteme wesentliche, vorteilhafte Eigenschaften aus der Kleinheit und der Komplexität der Strukturen ziehen. Zur Herstellung solcher Strukturen werden naturgemäß ähnliche Hilfsmittel und Prozesse verwendet, wie sie in der Halbleitertechnik gebräuchlich sind. So finden auch in der Mikromechanik Entwicklungswerkzeuge Verwendung, die die Konstruktion komplizierter Strukturen erleichtern. Auch die Fertigungsprozesse sind den in der Halbleitertechnik verwendeten ähnlich, wenn auch die Geräte meist nicht den strengen Spezifikationen zu entsprechen brauchen, wie sie für Spitzenprodukte der Halbleitertechnologie erforderlich sind. So sind auch die für die Anschaffung der Geräte erforderlichen Investitionen im Falle der Mikrosystemtechnik im allgemeinen geringer als die für die Mikroelektronik.

Trotz solcher Vorteile stellt die Herstellung von mikrotechnischen Prototypen im allgemeinen einen beachtlichen Kostenaufwand dar. Es ist daher angezeigt, die Funktion der Mikrosysteme an Hand von vorausgehenden Simulationen zu untersuchen und möglichst weitgehend abzusichern.

Folge des hohen Entwicklungsaufwandes ist, daß viele Firmen, vor allem kleine und mittlere Unternehmen, die volle Palette der erforderlichen Geräte und Hilfsmittel

nicht selbst verfügbar haben können und auf Kooperationen angewiesen sind. In diesem Abschnitt des Positionspapiers werden daher die wichtigsten Hilfsmittel und Fertigungsprozesse sowie beschreibende Literatur zusammengestellt. Aus Wettbewerbsgründen können Hilfsquellen hier zwar nicht benannt werden. Es wird jedoch auf eine börsenartige Datenbank hingewiesen, die vom VDI/VDE Technologiezentrum eingerichtet wurde.

Diese Datenbasis enthält die im weiten Umfeld der Mikrosystemtechnik tätigen Personen und Institutionen (Firmen, wissenschaftliche Einrichtungen) nach Technologien gegliedert. Sie gibt Auskunft über deren Tätigkeitsfelder, wie z. B. Forschung, Entwicklung, Hersteller, Vertreiber, Qualifizierer u.a.):

“Datenbank Szene Mikrosystemtechnik”
VDI/VDE Technologiezentrum Informationstechnik GmbH
z.Hd. Herrn A. Botthof
Budapester Str. 40
1000 Berlin 30
Tel.: 030/26489-195

Die Entwicklung eines Mikrosystems kann in groben Zügen in die folgenden Phasen untergliedert werden:

- o Konzeptionsphase
- o Optimierung der Eigenschaften
- o Konstruktion
- o Fertigung
- o Test

In der KONZEPTIONSPHASE werden - in konventioneller Weise - die an das Mikrosystem zu stellenden Anforderungen festgelegt und in einem Lastenheft zusammengestellt.

Die OPTIMIERUNG DER EIGENSCHAFTEN des Mikrosystems erfolgt durch Simulation. Dabei wird die Geometrie der mikrotechnischen Komponente so dimensioniert, daß die obigen Lasten erfüllt werden ohne daß die Komponente übermäßig belastet oder gar überlastet wird. Zur Simulation können aufwendige Verfahren wie zum Beispiel das der Finiten Elemente verwendet werden. Dafür gibt es rechenintensive Programme wie NASTRAN oder ANSYS zur Simulation mechanischer oder thermischer, bzw. MAFINA zur Simulation elektromagnetischer Phänomene. In vielen Fällen werden optimale Dimensionierungen aber auch nach den Gleichungen aus Mechanik- oder Physik-Handbüchern berechnet.

Für die KONSTRUKTION des Mikrosystems ist zunächst eine Architektur zu schaffen, die die Art der Integration der zu verwendenden Basissysteme (hybrid oder integral, Art der Schnittstellen usw.) festlegt. Eine zusammenfassende Darstellung hierzu ist in /1/ ausgeführt.

In der Mikroelektronik wird die Fertigung der äußerst feinen und komplexen Strukturen im wesentlichen durch die Lithographie ermöglicht. Jedes Strukturmuster wird in einer Fotomaske aufgezeichnet, die auf das mit Fotolack beschichtete Siliziumchip projiziert wird. Bei der Entwicklung des Fotolacks entstehen Fenster, durch die hindurch die chemischen oder physikalischen Prozesse in das Silizium eingebracht werden.

Wie schon ausgeführt, werden ähnliche Fertigungsverfahren wie in der Mikroelektronik auch in der Mikrosystemtechnik angewandt. Die Übernahme der Lithographie in die Mikrosystemtechnik stellt sich jedoch nicht so einfach dar, wie man vielleicht annehmen könnte. Treten in der Mikroelektronik im wesentlichen Rechtecke und gerade Linienzüge auf, die Manhattan-ähnlich angeordnet sind, so können in der Mikrosystemtechnik Kurvenzüge und beliebige Formen vorkommen, wie sie z.B. zur Definition von Federn oder gar Zahnrädern erforderlich sind. Entsprechende Micro-CAD-Systeme existieren derzeit nur in Anfängen.

Die Basis einer zukunftsweisenden Entwicklungsumgebung für Mikrosystemtechnik ist die Verfügbarkeit leistungsfähiger Entwicklungswerkzeuge. Zur Verkürzung der Entwicklungszyklen und zur Steigerung der Produktqualität sollten Konstruktions- und Simulationsprogramme leicht zugreifbar in einer einheitlichen Entwicklungsumgebung integriert werden.

Komplizierte Linienzüge bereiten nicht nur den gegenwärtigen CAD-Systemen Schwierigkeiten. Auch die zur Herstellung der Maskenmuster verwendeten Pattern-Generatoren sind auf die Erzeugung rechtwinkliger Geraden optimiert und können beliebige Strukturen nur bedingt schreiben. Da aber der im CAD-System entwickelte Datensatz jedenfalls auf die Befehlsstruktur des jeweiligen Pattern-Generators abgestimmt sein muß, empfiehlt es sich, den Entwurf der Strukturen ohnehin in enger Zusammenarbeit mit der Lithographiegruppe durchzuführen.

Für die FERTIGUNG mikrotechnischer Bauteile kommen die gleichen Verfahren zur Anwendung, die auch in der Mikroelektronik eingesetzt werden. Dazu gehören die Lithographie ebenso wie das Naß- und Trockenätzen, das Aufdampfen und Zerstäuben, der Niederschlag aus der Dampfphase (CVD) ebenso wie das Oxidieren, Implantieren oder die Epitaxie.

Zusätzliche, speziell für die Mikromechanik entwickelte Prozesse, seien im folgenden zusammengestellt:

Für die Herstellung dreidimensionaler Strukturen spielt die naßchemische Tiefenätzung [2/18] eine besondere Rolle. Bei Verwendung der auch in der Halbleitertechnologie gebräuchlichen Ätzlösung aus HF und HNO_3 erfolgt der Ätzvorgang richtungsunabhängig: Die Ätzung beginnt innerhalb des gleich wie auch immer geformten Maskenfensters, dringt in die Tiefe des Siliziums ein, aber unterätzt gleichermaßen auch die Maskierung. Ein für die Mikromechanik besonders bedeutendes Ätzverhalten ergibt sich bei Verwendung bestimmter basischer Ätzlösungen (z.B. KOH oder NaOH): Bestimmte Kristallflächen (die "hoch-indizierten" (111)-Ebenen) werden sehr viel langsamer abgetragen als andere (die "nieder-indizierten" (110)- oder (100)-Ebenen). Folge dieses anisotropen Ätzverhaltens ist es, daß die Wände der Ätzgruben stets als (111)-Ebenen ausgebildet werden. In Siliziumscheiben mit (111)-Oberflächen bilden diese Wände Winkel von $54,7^\circ$ zur Scheibenoberfläche.

Für die Herstellung von dünnen Siliziummembranen wird das Ätzstop-Verfahren angewandt: Eine der für anisotropes Ätzen verwandten Ätzlösung ("EDT") beendet den Ätzprozess, sobald sie auf eine hohe Fremdatomkonzentration oder auf eine Potentialschwelle trifft. So kann durch Dotierung der Oberfläche mit ca. 10^{20} Boratomen/cm³ die Siliziumscheibe innerhalb eines Maskenfensters bis auf eine μm -dünne Membran heruntergeätzt werden.

Feinste Strukturen mit weitgehend beliebig geformten Seitenwänden können in das Silizium mittels Trockenätzverfahren eingebracht werden. Dabei wird Material im

Plasma-Ätzverfahren abgetragen, wobei der Abtrag durch reaktive Ionen beschleunigt werden kann. Da die Reaktivität der Ionen materialspezifisch ist, kann das verwendete Gas so gewählt werden, daß das zu strukturierende Material aus den Fenstern einer Maske, die selbst erhalten bleibt, herausgeätzt wird. Je nach dem verwendeten Gasdruck im Reaktionsgefäß werden die Strukturen mit vertikalen oder ausgebauchten Wänden geätzt /2/.

Die Abb. 4 zeigt eine Reihe typischer Konstruktionselemente, die mit den genannten Verfahren hergestellt werden können.

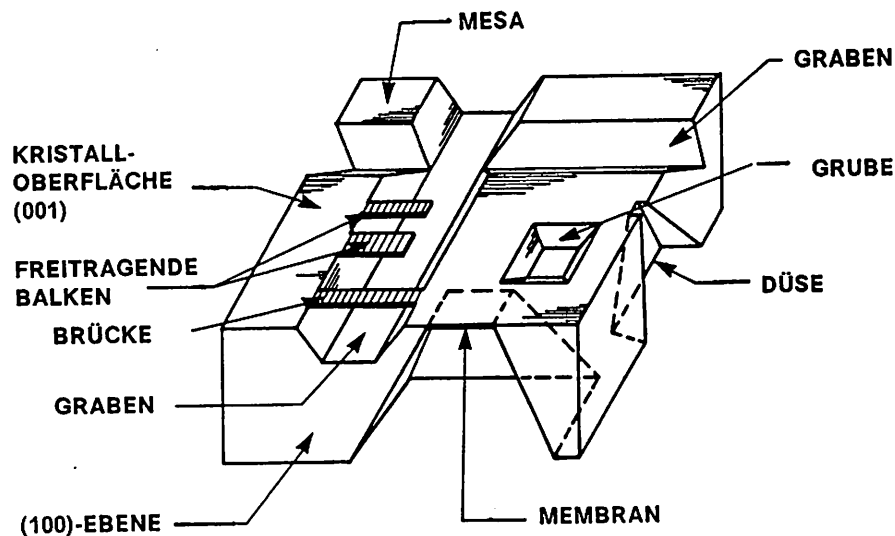


Abb.4: Konstruktionselemente der Mikromechanik.
(Quelle: E. Bassous, IBM)

Silizium-Strukturen der geschilderten Art sind im wesentlichen noch zweidimensional. Echte Dreidimensionalität wird durch Übereinanderschichtung und "kittfreies Verkleben" mehrerer Lagen erreicht. Bei dem Verfahren des "anodic bonding" /2//8/ kann eine Glasplatte hermetisch mit einer Siliziumscheibe verbunden werden, indem beide Teile auf etwa 500°C erwärmt werden und eine Spannung von ca. 1000 V angelegt wird. Dabei wandern Na-Ionen aus der Grenzfläche ab, sodaß nach abgeschlossenem Prozeß ein starkes elektrostatisches Feld entsteht, das die beiden Lagen fest miteinander verbindet. In ähnlicher Weise können auch zwei Siliziumlagen miteinander verbunden werden, die vorher oberflächlich leicht oxidiert worden waren.

Frei bewegliche Siliziumteile werden nach einem Verfahren hergestellt, bei dem man Siliziumschichten epitaktisch auf einer später zu entfernenden Schicht ("sacrificial layer") aus Siliziumoxid aufwachsen läßt. Durch Strukturieren des Siliziums und Wegätzen der Trägerschicht kann man frei bewegliche Arme, Gelenke und Greifer für Mikromanipulatoren oder Rotoren für Mikromotoren erhalten /10/.

Zur Herstellung besonders hoher dreidimensionaler Strukturen in Kunststoff oder Metall ist das LIGA-Verfahren (Lithographie, Galvanoformung, Abformung) /7/ entwickelt worden. Bei diesem Verfahren wird in einer dicken Fotolackschicht durch Röntgen-Tiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung eine primäre Kunststoffform erzeugt, die galvanisch mit einem Metall aufgefüllt wird. Die entstandene Metallstruktur wird als Formeinsatz für die Herstellung sekundärer Kunststoffformen benutzt, die bei der Massenfertigung an die Stelle der primären Kunststoffformen treten. Nach dem LIGA-Verfahren können Strukturen von einigen hundert μm Höhe bei Breitentoleranzen von nur etwa $0,1 \mu\text{m}$ hergestellt werden.

Elektrochemische Verfahren können ebenfalls zum Bohren von tiefen Löchern in Metalle verwendet werden, wobei senkrechte Wände mit Toleranzen von weniger als $0,1 \mu\text{m}$ erreicht werden.

Abformungsverfahren von Metallstrukturen in Kunststoffe spielen auch eine bedeutende Rolle bei der Replikation feiner Gitterstrukturen oder von Hologrammen für die Mikrooptik.

Schließlich sei auf die Möglichkeit der Herstellung feinsten Strukturen in nichtleitenden Materialien durch Schwerionenbeschuß hingewiesen. Die in das Material eingeschossenen Schwerionen hinterlassen einen geraden ionisierten Kanal, der in der Folge chemisch herausgeätzt werden kann. Technik, Theorie und Anwendungsmöglichkeiten sind in /4/ ausführlich beschrieben.

5. PUBLIKATIONEN

a. Bücher und Veröffentlichungen von Grundlagen

- /1/ H. Reichl: "Hybridintegration", Hüthig-Verlag, Heidelberg, 1988,
- /2/ A. Heuberger: "Mikromechanik", Springer-Verlag, 1989,
- /3/ T. Grandke, W.H. Ho: "Sensors, Fundamentals and General Aspects", Vol.1 in W. Goepel, J. Hesse, J.N. Zemel: "Sensors, a Comprehensive Survey in Eight Volumes", VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1989, 1990,
- /4/ R. Spohr: "Ion Tracks and Microtechnology", Vieweg, Braunschweig, 1990,
- /5/ S. Büttgenbach: "Mikromechanik", Teubner Studienbücher, 1990,
- /6/ E.W. Becker et al.: "Production of Separation Nozzle Systems for Uranium Enrichment by a Combination of X-Ray Lithography and Galvanoplastics", in Naturwissenschaften 69 (1982) 520-523,
- /7/ W. Ehrfeld, E.W. Becker: "Das LIGA-Verfahren zur Herstellung von Mikrostrukturkörpern mit großem Aspektverhältnis und großer Strukturhöhe", KfK-Nachrichten, Jg.19, Heft 4 (1987),
- /8/ K.E. Petersen: "Silicon as a Mechanical Material", Proc.IEEE 70, 420, 1982,
- /9/ C.D.Fung, P.W. Cheung, W.H. Ko, D.G.Fleming: "Micromachining and Micropackaging of Transducers", Elsevier, Amsterdam, 1985,
- /10/ F. Harashima: "Integrated Micro-Motion Systems", Elsevier, 1990.

b. Zeitschriften

- (1) "Sensors and Actuators", Elsevier Sequoia, Lausanne, Schweiz.
- (2) "Sensors and Materials", Scientific Publishing Division of MYU, Tokyo.
- (3) "Sensors", North American Technology Inc., Peterborough, NH.
- (4) "Sensor Review", IFS Publications LTD., Bedford, GB.
- (5) "Journ. of Micromechanics and Microengineering", IOP Publ., Bristol, England.
- (6) "Nanotechnology", IOP Publishing, Bristol, England.
- (7) "Mikroelektronik" mit Fachbeilage "Mikroperipherik", VDE-Verlag, Berlin.
- (8) "Technisches Messen", Oldenbourg
- (9) "Sensor Magazin", Magazin Verlag, Kronberg

c. Fachtagungen

"Transducers '91"	Weltweit, alle zwei Jahre. Nächste Tagung: Juni 1991 in San Francisco,
"Micro Electro Mechanical Systems" (MEMS)	Weltweit, jährlich. Nächste Tagung: Jan. 1991, Nara, Japan,
"Biosensors '90"	Weltweit, erstmals Mai 1990 in Singapur,
"Solid-State Sensor and Actuator Workshop"	USA, alle zwei Jahre. Nächste Tagung: 1992 Hilton Head Island, S. Carolina,
"International Conf. on Chemical Sensors"	USA, Cleveland, Ohio,
"Sensors Expo"	Tagung und Ausstellung, jährlich Abwechselnd in Detroit und Chicago,
"Japanese Sensor Symp."	Japan, jährlich in Tokio,
"Eurosensors"	Europa, jährlich. Nächste Tagung: Oktober 1991, Rom,
"Micromechanics Europe" (MME '90)	Europa, jährlich, zuletzt Nov. 1990, Berlin,
"Sensor 91" (Ausstellg.m.Kongreß)	Deutschland, alle 3 Jahre in Nürnberg, Nächste Veranstaltg.: 14.-16.Mai 1991 in Nürnberg.
"Sensoren, Technologie und Anwendungen"	Deutschland, alle zwei Jahre. Nächste Tagung: 1992, Bad Nauheim,
"Mikrosystemtechnik"	Deutschland, alle zwei Jahre. Nächste Tagung: Januar 1991, Stuttgart-Büsnau.

6. FÖRDERPROGRAMME

a. Förderungsschwerpunkt Mikrosystemtechnik

Im Rahmen des Zukunftskonzeptes Informationstechnik der Bundesregierung hat der Bundesminister für Forschung und Technologie einen "Förderungsschwerpunkt Mikrosystemtechnik" eingerichtet. Dieser hat die Zielsetzung, besonders kleinen und mittleren Unternehmen das Innovationspotential zu erschließen, das der systemorientierte Einsatz von Mikrotechniken, Aufbau- und Verbindungstechniken und Systemtechniken erwarten läßt. Der Förderungsschwerpunkt besteht aus mehreren sich ergänzenden und miteinander verknüpften Maßnahmen:

- o Förderung von Verbundprojekten
- o Indirekt-spezifische Förderung
- o Förderung von Technologietransfer und Querschnittsaufgaben sowie
- o Aus- und Bewertung der Förderung.

VERBUNDPROJEKTE sind zeitlich befristete, im vorwettbewerblichen Bereich angesiedelte Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die auf die Entwicklung der Technik ausgerichtet sind. Sie sollen von mehreren Partnern kooperativ geplant und durchgeführt werden. Ziel von Verbundprojekten soll es vor allem sein, die Systemfähigkeit und Handhabbarkeit bereits fortgeschrittener Mikro-, Aufbau- und Verbindungs- und Systemtechniken zu verbessern, für die Mikrosystemtechnik geeignete Systemtechniken sowie System- und Signalverarbeitungskonzepte weiter zu entwickeln, modellhafte Mikrosystemtechnik-Lösungen zu erarbeiten und das Angebot von Mikrotechniken als technische Dienstleistungen aufzubauen. Sie soll auch genutzt werden, um überbetriebliche Probleme wie Qualifizierung und Qualitätssicherung zu lösen oder entwicklungsbegleitende Normung zu unterstützen.

Die INDIREKT-SPEZIFISCHE FÖRDERUNG ist auf die Entwicklung von Produkten ausgerichtet. Sie soll kleinen und mittleren Unternehmen die Fähigkeit zur strategischen Veränderung ihrer internen Organisation stärken, um auf diese Weise ihre Wachstumschancen in einer turbulenten Umwelt zu verbessern. Sie soll helfen, eine systemtechnisch orientierte Kultur des Innovationsmanagements aufzubauen und Beziehungsnetzwerke von Unternehmen untereinander und zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen oder Transferstellen zu intensivieren.

Ansatzpunkt der INDIREKT-SPEZIFISCHEN FÖRDERUNG ist die Entwicklung von miniaturisierten und intelligenten Systemen. Damit soll die breite Anwendung der dazu notwendigen, modernen und anwendungsreifen Miniaturisierungstechniken und der Entwicklungsmethodik der Mikrosystemtechnik beschleunigt werden. Das indirekt-spezifische Instrument gestattet es, in einem bestimmten, klar umrissenen Feld von Techniken (spezifischer Aspekt) alle Einführungsprozesse anhand von überprüfbaren Prototypenentwicklungen in einem hinsichtlich Antragstellung, Mittelanforderung und Verwendungsnachweis einfachen Verfahren zu fördern. Es umgeht staatliche Einflußnahme auf die konkrete Konzeption des Einführungsprozesses oder die Produktentwicklung selbst und überläßt die Beurteilung der Richtigkeit der zugehörigen individuellen Unternehmensentscheidungen den Marktkräften (indirekter Aspekt). Zudem ist es weitgehend wettbewerbsneutral und breitenwirksam angelegt.

Die Umsetzung von Mikrosystemtechnik-Innovationen in Markterfolge findet in einem Handlungsfeld mit ständig zunehmender Komplexität statt. Wenn Nachteile im Wettbewerb vermieden werden sollen, müssen Entscheidungen zügig und auch mit unvollständigen Informationen getroffen werden. Besonders kleine und mittlere Unternehmen mit ihren begrenzten Ressourcen werden durch die Komplexität des Innovationsprozesses vor starke Herausforderungen gestellt. Der Milderung dieser Probleme sollen die flankierenden Fördermaßnahmen TECHNOLOGIETRANSFER und QUERSCHNITTSAUFGABEN dienen.

Die Ziele von TECHNOLOGIETRANSFER und QUERSCHNITTSAUFGABEN bestehen darin, die Unternehmen über die Ergebnisse technischer Entwicklungen, insbesondere ihrer Einsatzreife, sowie über mikrosystemtechnisch relevante Erfahrungen im Innovationsmanagement zu informieren. Ein weiteres Ziel ist die aktive Vermittlung von Kooperationskontakten von Unternehmen untereinander sowie zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen.

Die AUS- UND BEWERTUNG DER FÖRDERUNG soll nicht nur die Inanspruchnahme der Förderung und deren Wirkungen erfassen, sondern auch den Einführungsprozeß der Mikrosystemtechnik vor dem Hintergrund der weltweiten Trends im Ganzen analysieren.

Die FINANZPLANUNG DES FÖRDERUNGSSCHWERPUNKTES MIKROSYSTEMTECHNIK sieht Mittel in Höhe von ca. 400 Mio DM, verteilt über die Jahre 1990 bis 1993, vor. Die Förderung soll vornehmlich kleinen und mittleren Unternehmen zugute kommen. Dabei kann der Fördersatz bei Verbundprojekten zwischen 30% und 50% der Aufwendungen liegen, je nachdem ob es sich um Projekte der "angewandten Forschung und Entwicklung" oder solche der "industriellen Basisforschung" handelt. Für indirekt-spezifisch geförderte Projekte liegt der Fördersatz bei 40%.

Nähere Informationen können einer Broschüre "Förderungsschwerpunkt Mikrosystemtechnik im Rahmen des Zukunftskonzeptes Informationstechnik" entnommen werden, die über das Referat Öffentlichkeitsarbeit beim Bundesministerium für Forschung und Technologie, Heinemannstr. 2 in 5300 Bonn 2 erhältlich ist. Informationen können auch eingeholt und Projektanträge gestellt werden beim zuständigen Projektträger:

VDI/VDE-Technologiezentrum
Informationstechnik GmbH
Budapester Str. 40
1000 Berlin 30
Telefon 030/2609-230

b. Förderprogramme des Bundes und der Länder

Außer dem großangelegten Förderungsschwerpunkt Mikrosystemtechnik gibt es spezielle Förderprogramme des Bundes und der Länder. Im folgenden seien einige für die Mikrosystemtechnik besonders relevante aufgezählt:

Elektronik	Herstellungsverfahren für IC's, Prozeßtechnologie der Mikroelektronik, Rechnergesteuerter Entwurf von Schaltkreisen. Ansprechpartner: Bundesminister für Forschung u.Technologie Ref. 415 Heinemannstr. 2 5300 Bonn 2
Technische Kommunikation	Komponenten u.Systeme optischer Nachrichtentechnik, integrierte Optik. Ansprechpartner: Bundesminister f.Forschg. u. Technologie Ref.412. Heinemannstr. 2 5300 Bonn 2
Materialforschung	Hochleistungskeramik, Verbundwerkstoffe, Polymere. Ansprechpartner: KFA Jülich GmbH Postfach 19 13 5170 Jülich
Fertigungstechnik	Flexibel automatisierte Montagesysteme. Ansprechpartner: Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH (KfK) Projektträger Fertigungstechnik Postfach 36 40 7500 Karlsruhe 1
Umweltforschung und -technik	Umweltschutzmeßtechnik Ansprechpartner: Deutsche Forschungsanstalt f. Luft- u. Raumfahrt Projektträgerschaft Umweltschutztechnik Südstr. 125 5300 Bonn 2

Forschg.u. Entwickl.
im Dienste der
Gesundheit

Implantierbare Mikrosensoren

Ansprechpartner:
Ges.f. Strahlen- u. Umweltforschung mbH
Bereich Projektträgerschaften
Ingolstädter Landstr. 1
8042 Neuherberg

In den meisten Bundesländern gibt es Programme zur Förderung der Einführung neuer Technologien und Produkte. Auskünfte erteilt das jeweilige Wirtschaftsministerium, Wirtschaftsförderungsgesellschaften und Industrie- und Handelskammern.

c. Förderprogramme der Europäischen Gemeinschaft

Förderprogramme der Europäischen Gemeinschaft wollen insbesondere die internationale Zusammenarbeit anregen. Die bekanntesten Programme sind:

ESPRIT II

Europäisches strategisches Programm für Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Informationstechnik.

Ansprechpartner: EG Kommission,
Generaldirektion XIII, Herr I. Collisson,
200, rue de la Loi
B-1049 Brüssel

SPRINT

Strategisches Programm für Innovation und Technologietransfer.

Ansprechpartner: Wie ESPRIT II

BRITE/EURAM II

Forschungsprogramm für Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Industrietechnologie und fortgeschrittener Materialien.

Ansprechpartner: EG Kommission
Generaldirektion II, Herr J. Wurm
200, rue de la Loi
B-1049 Brüssel

EUREKA

Internationale Zusammenarbeit insbesondere in den Bereichen: Informations- u. Kommunikationstechnik, Robotertechnik, Werkstoffe, Fertigungstechnik, Biotechnologie, Meerestechnik, Lasertechnik, Techniken für Umweltschutz und Verkehr.

Ansprechpartner: Bundesminister für Forschung und Technologie
Referat 228
Heinamnnstr.2
5300 Bonn 2

TELEMAN

Entwicklung fernbedienter Geräte für den Nuklearbereich. Wissenschaftliche und technologische Grundlagen für den Entwurf von Fernbedienungssystemen.

Ansprechpartner: VDI/VDE Technologiezentrum
Informationstechnig GmbH
Budapester Str. 40
1000 Berlin 30

8. MITGLIEDER DES FACHAUSSCHUSSES MIKROSYSTEMTECHNIK

Dr. Wolfgang Benecke
Fraunhofer Inst.f. Mikrostrukturtechnik
Dillenburgerstr. 53
1000 Berlin 33

Telefon: 030/82998-310

Dr. Wolfgang Berger
Hahn-Schickard-Ges.f.angew. Forschung, e.V.
Zeppelinstr. 5
7290 Freudensstadt

- Vorsitzender -

Telefon: 07441/2414

Dr. Stephanus Büttgenbach
Hahn-Schickard-Ges.f.angew. Forschung, e.V.
Roggenbachstr. 6
7730 VS-Villingen

Telefon: 07721/2002-20

Dr. Hans Delfs
Rhode & Schwarz
Abt. Mikroelektronik
Postfach 80 14 69
8000 München 80

Telefon: 089/4129-2811

Prof. Dr. Heinz Dimigen
Fraunh.Inst.f.Schicht- u. Oberflächentechnik
Vogt-Köln-Str. 20
2000 Hamburg 54

Telefon: 040/5493-509

Dr. Wolfgang Ehrfeld
STEAG-Mikrotechnik
Griesbachstr 10
7500 Karlsruhe 21

Telefon: 0721/84009-15

Dr. Thomas Grandke
SIEMENS AG
Abt. ZFE ME TPH 4
Paul-Gossen-Str. 100
8520 Erlangen

Telefon: 09131/721077

Prof. Dr. Anton Heuberger
Fraunhofer Inst.f. Mikrostrukturtechnik
Dillenburgerstr. 33
1000 Berlin 33

Telefon: 030/82998-100

Dr. Hans-Dieter Jacoby
Arnold & Richter Cine Technik
Türkenstr. 89
8000 München 40

Telefon: 089/3809-288

Dipl.-Ing. Werner John
Nixdorf Computer AG
CADLAB/Analoge Analyse
Bahnhofst. 32
4790 Paderborn

Telefon: 05251/284-106

Dipl.-Phys. Peter Kleinschmidt
SIEMENS AG, Abt. ZFE ME AMF4
Otto-Hahn-Ring 6
8000 München 83

Telefon: 089/636-2955

Dr. Walter Kroy
Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH
Zentralbereich Technik
Postfach 80 11 09
8000 München 80

Telefon: 089/6072-4006

Dr. Werner Kulcke
IBM Deutschland GmbH
Abteilung 0135
7032 Sindelfingen

Telefon: 07031/91-3861

Prof. Dr. Wolfgang Menz
Institut für Mikrostrukturtechnik
Kernforschungszentrum Karlsruhe
Postfach 36 40
7500 Karlsruhe 1

Telefon: 07247/822740

Prof. Dr. Herbert Reichl
Techn. Universität Berlin
Schwerpunkt Mikroperipherik
Einsteinufer 17
1000 Berlin 10

Telefon: 030/314-23555

Dr. Jörg Schweikhardt
Robert Bosch GmbH Abt. ZWD
Postfach 10 60 50
7000 Stuttgart 10

Telefon: 0711/811-6383

Dr. Helmut Seidel
Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH
Postfach 80 11 09
8000 München 80

Telefon: 089/6072-7387

Dr. Reimar Spohr
Ges.f. Schwerionenforschung GmbH
Postfach 11 05 41
6100 Darmstadt 11

Telefon: 06151/359-716

Dr. Gerd Wartmann
VDI/VDE-Technologiezentrum
Budapester Strasse 40
1000 Berlin 30

Telefon: 030/26489-126

Prof. Dr. Hans-Rolf Tränkler
Inst. f. Meß- u. Automatisierungstechnik
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
8014 Neubiberg

Telefon: 089/6004-37401

Dipl.-Ing. Rainer Theobald
VDE/VDI Gesellschaft für Mikroelektronik
Stresemannallee 15
6000 Frankfurt/M 70

- Geschäftsführer der GME -

Telefon: 069/6308-330

Dipl.-Ing. Kurt Heitmann
Fachbereichsleiter Techn. Strategien
Daimler Benz AG
Postfach 80 02 30
7000 Stuttgart 80

- Vorsitzender der GME -

Telefon: 0711/17-93064-67