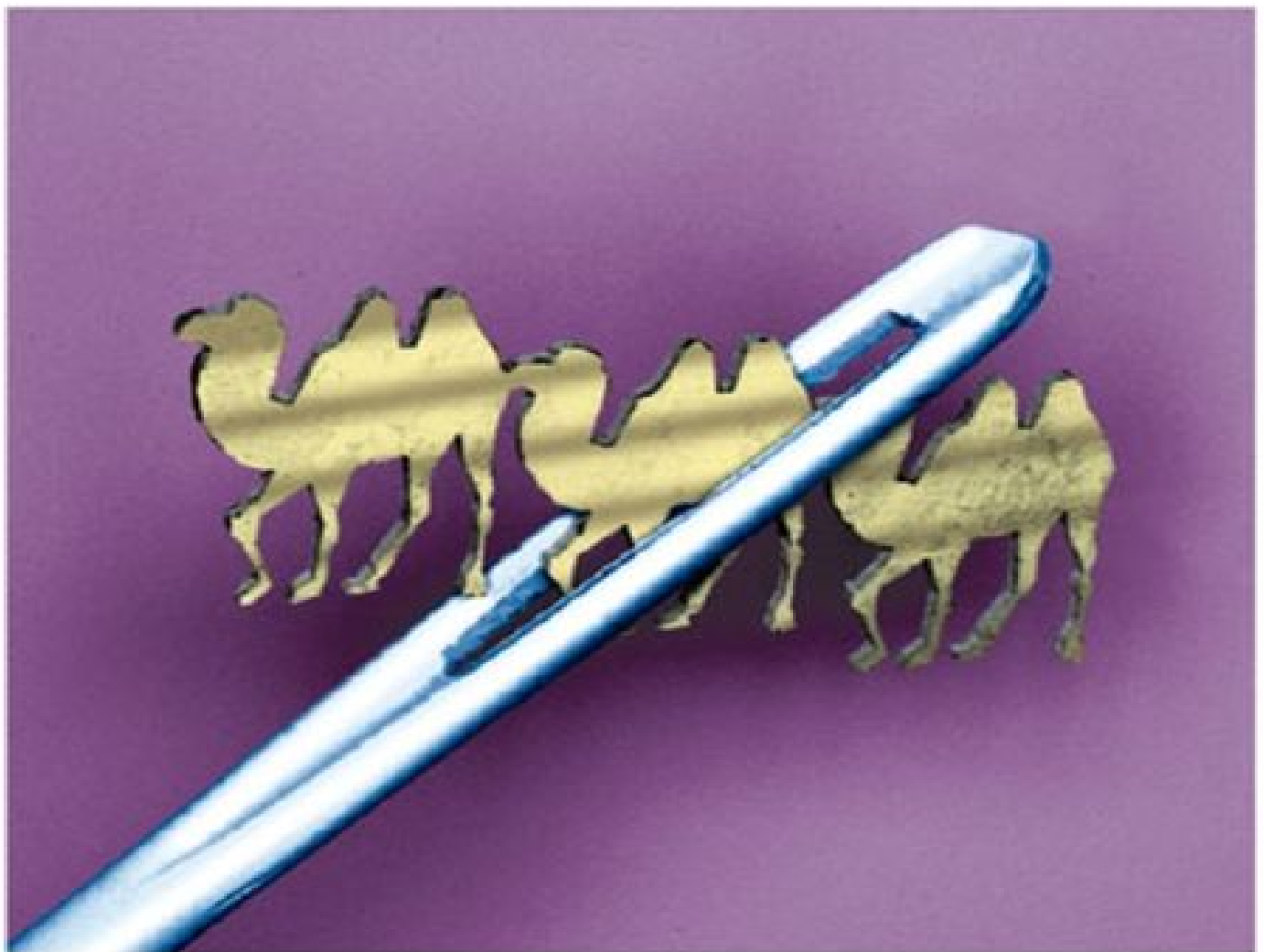


Wolfgang Menz, Jürgen Mohr,
Oliver Paul

 WILEY-VCH

Mikrosystemtechnik für Ingenieure

Dritte, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage



Inhalt

Vorwort

1 Allgemeine Einführung in die Mikrostrukturtechnik

1.1 Was ist Mikrostrukturtechnik?

1.2 Von der Mikrostrukturtechnik zur Mikrosystemtechnik

2 Parallelen zur Mikroelektronik

2.1 Herstellung von Einkristallscheiben

2.2 Technologische Grundprozesse

2.3 Weiterverarbeitung der integrierten Schaltungen

2.4 Reinraumtechnik

2.5 Punktfehler und Ausbeute bei Halbleiterbauelementen

3 Physikalische und chemische Grundlagen der Mikrotechnik

3.1 Kristalle und Kristallographie

3.2 Methoden zur Bestimmung der Kristallstruktur

3.3 Grundlagen der galvanischen Abscheidung

3.4 Grundlagen der Vakuumtechnik

3.5 Vakuumerzeugung

3.6 Vakuummessung

3.7 Eigenschaften von Dünnschichten

4 Materialien der Mikrosystemtechnik

4.1 Materialeigenschaften

4.2 Kunststoffe

4.3 Halbleiter

4.4 Keramiken

4.5 Metalle

5 Basistechnologien der Mikrotechnik

5.1 Schichtabscheidung

5.2 Schichtmodifikation

5.3 Schichtabtragung (Ätzen)

5.4 Analyse von Dünnschichten und Oberflächen

6 Lithographie

6.1 Überblick und Historie

6.2 Resists

6.3 Verfahren der Lithographie

6.4 Elektronenstrahlolithographie

6.5 Proximity-Effekt

6.6 Optische Lithographie

6.7 Weiterentwicklungen

6.8 Ionenstrahlolithographie

6.9 Röntgenlithographie

7 Silizium-Mikromechanik

7.1 Siliziumtechnologie

7.2 Silizium-Bulk-Mikromechanik

[7.3 Oberflächenmikromechanik](#)

[7.4 Mikrowandler und -systeme in der Siliziumtechnologie](#)

[7.5 Zusammenfassung und Ausblick](#)

[8 LIGA-Verfahren](#)

[8.1 Überblick](#)

[8.2 Maskenherstellung](#)

[8.3 Röntgentiefenlithographie](#)

[8.4 Galvanische Abscheidung](#)

[8.5 Kunststoffabformung im LIGA-Verfahren](#)

[8.6 Variationen und ergänzende Schritte des LIGA-Verfahrens](#)

[8.7 Protonenlithographie \(DLP\) – ein weiteres Strukturierungsverfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis](#)

[8.8 Anwendungsbeispiele](#)

[9 Alternative Verfahren der Mikrostrukturierung](#)

[9.1 Ultrapräzisionsmikrobearbeitung](#)

[9.2 Mikrofunkenerosion](#)

[9.3 Präzisionselektrochemische Mikrobearbeitung](#)

[9.4 Replikationstechniken](#)

[9.5 Laserunterstützte Verfahren](#)

[10 Aufbau- und Verbindungstechniken](#)

[10.1 Hybridtechniken](#)

[10.2 Drahtbondtechniken](#)

[10.3 Alternative Kontaktierungstechniken](#)

[10.4 Kleben](#)

[10.5 Anodisches Bonden](#)

[11 Systemtechnik](#)

[11.1 Definition eines Mikrosystems](#)

[11.2 Sensoren](#)

[11.3 Aktoren](#)

[11.4 Signalverarbeitung](#)

[11.5 Schnittstellen eines Mikrosystems](#)

[11.6 Entwurf, Simulation und Test von Mikrosystemen](#)

[11.7 Modulkonzept der Mikrosystemtechnik](#)

[Literatur](#)

[Stichwortverzeichnis](#)

Weitere interessante Titel zu diesem Thema:

O. Brand, G.K. Fedder (Volume Editors)

CMOS-MEMS

(Vol. 2)

2005

ISBN 3-527-31080-0

H. Baltes, O. Brand, G.K. Fedder, C. Hierold, J.G. Korvink, O. Tabata (Volume Editors)

Enabling Technology for MEMS and Nanodevices

(Vol. 1)

2004

ISBN 3-527-30746-X

M. Köhler, W. Fritzsche

Nanotechnology

An Introduction to Nanostructuring Techniques

2004

ISBN 3-527-30750-8

J. Marek, H.-P. Trah, Y. Suzuki, I. Yokomori (Volume Editors)

Sensors for Automotive Technology

2003

ISBN 3-527-29553-4

J.G. Korvink, A. Greiner

Semiconductors for Micro- and Nanotechnology

An Introduction for Engineers

2002

ISBN 3-527-30257-3

W. Menz, J. Mohr, O. Paul

Microsystem Technology

2000

ISBN 3-527-29634-4

Wolfgang Menz, Jürgen Mohr, Oliver Paul

Mikrosystemtechnik für Ingenieure

Dritte, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage



WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Autoren

Prof. Wolfgang Menz

Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK
Albert-Ludwigs-Universität
79110 Freiburg

Dr. Jürgen Mohr

Institut für Mikrotechnik
Forschungszentrum Karlsruhe
76201 Karlsruhe

Prof. Oliver Paul

Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK
Albert-Ludwigs-Universität
79110 Freiburg

Titelbild:

Ein biblisches Problem ist mit Hilfe der Mikrosystemtechnik gelöst, denn es heißt in Matthäus, Kap. 19, Vers 24: Es ist leichter, dass ein Kamel durch ein Nadelöhr gehe, als dass ein Reicher ins Reich Gottes komme.

Die Kamelkarawane wurde aus 0,5 mm starkem Stahlblech mittels funkenerosiven Schneidens auf einer Drahterodiermaschine Charmilles Robofil- 2020SI mit einem Draht von 50 µm Durchmesser ausgeschnitten. Die Struktur hat eine Höhe von 2 mm.

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

1. Auflage 1992

2. Auflage 1997

3. Auflage 2005

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar

© 2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Print ISBN 9783527305360

Epdf ISBN 978-3-527-66347-7

Epub ISBN 978-3-527-66346-0

Mobi ISBN 978-3-527-66345-3

Vorwort

Es ist heutzutage keine leichte Aufgabe, ein Buch über Mikrosystemtechnik zu schreiben, da die Technologie so rasant fortschreitet und ständig neue Varianten veröffentlicht werden. Wollte man aktuell bleiben, so müsste man das Manuskript ständig umschreiben, bevor es überhaupt gedruckt werden könnte. Hinzu kommt noch ein weiterer Grund, der die Herausgabe eines solchen Buches erschwert: Die Mikrosystemtechnik breitet sich mit großer Geschwindigkeit über immer neue Anwendungsgebiete aus. Waren es gestern Anwendungen in der allgemeinen Messtechnik z. B. auf dem Kraftfahrzeugsektor, so dominieren heute Problemlösungen in der minimal-invasiven Chirurgie oder der biochemischen DNA-Analyse. Da die Mikrosystemtechnik längst die Grenzen der Halbleitertechnologie überschritten hat, schien es uns angebracht, das Kapitel „Alternative Technologien“ zu erweitern. Wir freuen uns, dass wir für die Abschnitte „Mikrofunkenerosion“ und „Präzisions-Elektrochemische Mikrobearbeitung“ Herrn Dr. Ralf Förster, einen bekannten Fachmann auf diesem Gebiet, gewinnen konnten.

Es war nicht unsere Intention, als wir uns daran machten, dieses Buch zu schreiben, die neuesten Ergebnisse der Forschung und Entwicklung zu präsentieren; das soll den Proceedings der entsprechenden Fachkonferenzen vorbehalten bleiben. Stattdessen wollten wir dem Studierenden und dem interessierten Ingenieur ein Buch an die Hand geben, das die notwendigen Grundlagen vermittelt und die grundsätzlichen Techniken zur Mikrostrukturierung beschreibt. Insbesondere lag uns daran, aufzuzeigen, wie sich diese Technologie aus der Mikroelektronik entwickelte, indem sie die Grenzen der Elektronik überschritt und neue physikalische, chemische und biologische Bereiche eroberte.

Damit lassen sich Systeme aufbauen, die vielleicht einmal die wirtschaftlichen Erfolge der Mikroelektronik in den Schatten stellen.

Der Lehrstoff dieses Buches ist in vielen Vorlesungen an der Universität Karlsruhe, der ETH Zürich und schließlich am Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Universität Freiburg an zahlreichen Studentengenerationen erprobt und optimiert worden. Nach einer englischen und einer chinesischen Übersetzung des Buches liegt nun die deutsche Version in der dritten Auflage vor. Wir hoffen, mit diesem Buch einen wertvollen Beitrag zur Proliferation dieses faszinierenden Gebietes hinzufügen zu können.

Es bleibt uns die angenehme Pflicht, den vielen Studenten, Kollegen und Mitarbeitern zu danken, die mit Beiträgen, Vorschlägen und konstruktiver Kritik zu diesem Projekt beigetragen haben.

Freiburg, im März 2005

Wolfgang Menz

Jürgen Mohr

Oliver Paul

1

Allgemeine Einführung in die Mikrostrukturtechnik

1.1 Was ist Mikrostrukturtechnik?

Mit der Mikrosystemtechnik verlässt der Mensch die ihm gewohnten Dimensionen des „Begreifbaren“ und begibt sich auf ein Gebiet, das nicht mehr seinen natürlichen Sinnesempfindungen entspricht. Er muss lernen, mit diesen neuen Möglichkeiten zu arbeiten, wohl seine Erfahrungen einzubringen, aber der neuen Technologie nicht unbedacht aufzuzwingen. Diese Entwicklung setzte bereits mit der Mikroelektronik ein, nur ist die Elektronik von sich aus schon für den normalen Menschen „abstrakt“, und der Konflikt mit der persönlichen Erfahrung entstand erst bei der Auseinandersetzung mit mechanischen Mikrostrukturen.

Die Mikrosystemtechnik ist heutzutage in aller Munde. Leider trägt diese Tatsache nicht zur Versachlichung bei, sondern hat im Gegenteil zur Folge, dass die Begriffe häufig unklar erscheinen und Missverständnisse nicht ausbleiben. Zunächst soll der grundsätzliche Unterschied zwischen Mikrostrukturtechnik und Mikrosystemtechnik näher erläutert werden, obwohl eigentlich schon die Wortwahl Verwechslungen ausschließen sollte.

Die Mikrostrukturtechnik ist das Werkzeug, mit dem die geometrischen Strukturen eines Körpers, dessen Dimensionen im Mikrometerbereich liegen, erzeugt werden.

In einigen Fällen erstreckt sich der Körper nur in *einer* Dimension im Bereich weniger Mikrometer, während die beiden anderen gar im Millimeterbereich liegen, in anderen Fällen bewegt man sich schon im „Submikrometerbereich“. Wesentlich sind weniger die aktuellen Dimensionen als die Technologie, die von der Mikroelektronik abgeleitet ist und das Potential beinhaltet, in den Mikrometerbereich zu gehen. Wenn schon die „Mikrotechnik“ schwierig zu definieren ist, so ergeben sich bei der „Nanotechnik“ noch mehr Definitionsnöte. Sicherlich wäre es falsch, von Nanotechnik zu reden, wenn man eine Struktur darstellt, deren Dimensionen Bruchteile von Mikrometern ausmachen. Auch hier ist wieder von der Technologie auszugehen, die es ermöglicht, Nanostrukturen herzustellen oder zu vermessen. Diese Technologie hat wieder ganz andere Wurzeln und es wäre falsch, anzunehmen, dass die eine Technologie kontinuierlich in die andere überginge.

Mit Hilfe der Mikrostrukturtechnik besteht also die Möglichkeit, Mikrokörper oder Mikrokomponenten zu erzeugen. Tatsache ist, dass in den meisten Fällen, wenn von Mikrosystemtechnik gesprochen wird, in Wirklichkeit Mikrostrukturtechnik gemeint ist. Mikrosystemtechnik bedeutet dann konsequenterweise die Verknüpfung von Komponenten zu einem System. Ein Beispiel aus der Mikroelektronik soll dies verdeutlichen: Die intelligente Verknüpfung von Hunderten oder Tausenden von „dummen“ Transistoren führt zum Mikrosystem, dem Mikroprozessor, der erst die Leistungsfähigkeit der Mikroelektronik ausmacht.

In diesem Buch sollen also zunächst die Grundlagen der Mikrostrukturtechnik behandelt werden, bevor in weiteren Kapiteln die Mikrosysteme und die dazu notwendigen technologischen Voraussetzungen diskutiert werden.

Eine grundsätzliche Frage zur Mikrosystemtechnik soll an den Anfang des Buches gestellt werden:

Aus welchem Grund wurde die Mikrosystemtechnik entwickelt?

Zur Beantwortung dieser Frage ist es notwendig, sich mit der Entwicklung der Mikroelektronik während der letzten fünf Jahrzehnte auseinanderzusetzen. Was ist während dieser Zeit geschehen? Vor der Mikroelektronik gab es konventionelle elektrische und elektronische Bauelemente, wie Widerstände, Kondensatoren, Elektronenröhren. Diese Komponenten wurden zu Schaltkreisen zusammengefügt, geprüft und durch Veränderung der Komponentenparameter abgeglichen, bis die Schaltung die geforderte Spezifikation erfüllte. Dadurch wurde jede Schaltung zu einer Art Unikat. Durch die Größe der individuellen Bauelemente war die Packungsdichte begrenzt und die Funktionsdichte einer elektronischen Schaltung war es ebenfalls.

Mit der Mikroelektronik trat ein einschneidender Wandel in der Elektronik ein. Bauteile wurden nicht mehr mechanisch hergestellt und gefügt, sondern durch Photolithographie auf das Werkstück, den Siliziumwafer, optisch übertragen und vervielfacht. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass durch die optische Abbildung nur zweidimensionale Strukturen übertragen werden können. Zunächst sieht das wie ein schwerwiegender Nachteil für die Technologie aus, weil wir es gewohnt sind, dreidimensional zu konzipieren, zu entwerfen und zu fertigen. Da die optischen Abbildungen uns aber die Möglichkeit bieten, zum einen Strukturen zu übertragen, deren Strukturdetails im Wesentlichen nur durch die Wellenlänge des Lichtes limitiert sind, zum anderen wegen der Verschleißfreiheit der optischen Abbildungen mit extrem hoher Wiederholgenauigkeit zu arbeiten und wegen der Parallelität der optischen Übertragung außerdem sehr hohe Informationsflüsse zu erreichen, wird dieser Nachteil durch die technologischen Vorteile bei weitem aufgewogen.

Im Laufe der letzten Jahrzehnte der Entwicklung der Mikroelektronik konnten so die Dimensionen der Bauelemente um Zehnerpotenzen verringert werden. Heute befindet man sich mit den kritischen Dimensionen weit im Submikrometerbereich. Da im Fertigungsprozess in einem „Batch“, also mit einer Charge von Wafern, auf denen sich jeweils viele Millionen von Transistoren befinden, viele integrierte Schaltungen parallel hergestellt werden, konnte man die Herstellkosten wegen der Erhöhung der Packungsdichte um mehrere Zehnerpotenzen senken. Ein wichtiges Qualitätsmerkmal einer Schaltung, wie sie etwa für einen Rechner gebraucht wird, ist die Schaltgeschwindigkeit. Durch die Verkürzung der internen Leitungswege konnte auch dieser Parameter um viele Größenordnungen verbessert und damit die Qualität eines integrierten Schaltkreises erhöht werden.

Heutzutage beherrscht die Mikroelektronik unser Leben. Alle technischen Bereiche wurden wesentlich durch die Mikroelektronik bereichert, zum Teil überhaupt erst möglich gemacht. Für die Entwicklung unserer Zivilisation zur „Informationsgesellschaft“ hat die Mikroelektronik die Voraussetzungen geschaffen. Diese Einflüsse lassen sich schwerlich in Zahlen fassen. Für die technologische Entwicklung der Mikroelektronik soll ein kleines Gedankenexperiment dienen: Definiert man etwa einen Bewertungsfaktor, der aus dem Produkt „Qualitätsverbesserung“ und „Kostenreduzierung“ über eine gewisse Zeitspanne, etwa vier Jahrzehnte, gebildet wird, so wäre dieser Faktor in der Mikroelektronik etwa 10000000. Nun nehme man zum Vergleich irgendeine andere Technologie, etwa die Stahlgewinnung oder den Fahrzeugbau, so kann man den gewaltigen Unterschied zu dieser Entwicklung ermessen.

Die Frage lag nun auf der Hand, wenn die Mikroelektronik derartige Erfolge zu verzeichnen hat, kann man diese

Entwicklung nicht auch auf anderen, nichtelektronischen Bereichen nachvollziehen und ähnliche technologische Schübe erwarten? Kann man die Entwicklungskonzepte, die Prozesse, die Materialien nicht auch auf mechanische, optische, fluidische oder chemische und biochemische Verhältnisse übertragen? Diese Fragestellung schließlich hat zur Mikrosystemtechnik geführt. Es lässt sich also konstatieren:

Die Mikrosystemtechnik kann als die konsequente Weiterentwicklung der Mikroelektronik auf nichtelektronische Gebiete angesehen werden.

Die Mikrosystemtechnik baut also auf dem gewaltigen technologischen und theoretischen Erfahrungsschatz der Mikroelektronik, die diese in mehreren Jahrzehnten mit hohem Aufwand erarbeitet hat, auf. Viele Technologien, die uns heute eine Selbstverständlichkeit sind, wurden mit hohem finanziellen und personellen Aufwand von der wirtschaftlich blühenden Mikroelektronik entwickelt. An hervorragender Stelle steht hier die Photolithographie, von der an zahlreichen Stellen in diesem Buch noch die Rede sein wird. Aber auch die Dünnschichttechnik, die Oberflächenanalyse und die Simulation sind Bereiche, die entscheidende Impulse aus der Mikroelektronik gewonnen haben.

Um auf diesen Erfahrungen eine neue Technologie aufbauen zu können, ist es zunächst nötig, die grundlegende „Philosophie“ der Mikroelektronik zu ergründen, oder, um es mit einfachen Worten zu sagen, die „Erfolgsrezepte“ der Mikroelektronik zu definieren, um sie, entsprechend modifiziert, auch für andere Technologien nutzbar zu machen.

Dazu lassen sich aus der Vielzahl von Verfahren und Denkansätzen drei Schwerpunkte herauschälen, die im

Folgenden näher erläutert werden sollen.

Der Entwurf eines integrierten Schaltkreises geschieht ausschließlich auf dem Rechner. Das traditionelle Vorgehen, sich durch Versuch, Abprüfung und Wiederholung (trial and error) iterativ an eine optimale Lösung heranzuarbeiten, lässt sich wirtschaftlich in der Mikroelektronik nicht mehr vertreten. Diese Entwicklungsstufe muss durch aufwendige Entwurfs- und Simulationsverfahren bereits auf dem Rechner geleistet werden. In der Tat wird eine Schaltung (zumindest eine digitale Schaltung) nach der Entwurf- und Optimierungsphase auf dem Rechner bereits beim ersten Fertigungslauf die vorbestimmten Parameter erfüllen, wenn es sich um einen etablierten Prozess handelt. Nur in wenigen Fällen bedarf es eines zweiten Fertigungsdurchlaufes, um das Produkt zu optimieren. Die Simulationsprogramme sind mit großem Aufwand in vielen Tausenden von Personen-Jahren entwickelt worden. Bemerkenswert und neu ist hierbei auch, dass Erkenntnisse der theoretischen Physik, die Quantenmechanik, unmittelbar in die Produktgestaltung einfließen. Nirgendwo sonst kommen naturwissenschaftliche Grundlagenforschung und Fertigungsgestaltung in so engen Kontakt wie in der Mikroelektronik. Ein Begriff, der diesen Zustand beispielhaft beschreibt, ist das „band gap engineering“, ein Vorgang also, bei dem sich Erkenntnisse der theoretischen Festkörperphysik und ingenieurmäßiges Fertigungswissen unmittelbar berühren.

Man kann also als ersten Schwerpunkt der Mikroelektronik den Entwurf, die Simulation und die Optimierung eines Produktes auf dem Rechner benennen.

Ein weiterer Schwerpunkt betrifft die Realisierung der auf dem Rechner ermittelten Struktur auf dem Werkstück. Die Übertragung der geometrischen Daten geschieht hier auf optischem Wege. Die Vorteile dabei sind: Die Übertragung ist verschleißfrei und unterliegt dadurch keiner Abnutzung.

Durch die Abbildung lassen sich die Strukturen in einem Maße verkleinern, das nur durch die Wellenlänge des verwendeten Lichtes und durch Fehler des übertragenden optischen Systems begrenzt ist.

Diese optische Übertragung oder „Photolithographie“ (das Wort ist angelehnt an eine alte Drucktechnik, bei der ein glatt geschliffener Stein (griech.: *λίθος*) entsprechend geätzt wird, so dass er an bestimmten Teilen Druckfarbe annimmt, an anderen diese abstößt) hat wohl den größten technologischen Einfluss auf die Mikroelektronik, wenn man einmal von der Herstellung des Grundmaterials, dem Silizium-Einkristall, absieht.

Durch die Verkleinerung der Strukturen bis in den Submikrometerbereich lässt sich die Packungsdichte von Komponenten, die pro Flächeneinheit auf dem Werkstück unterzubringen sind, gegenüber konventionellen Techniken der Übertragung um viele Größenordnungen erhöhen. Dadurch ist es erklärlich, dass trotz steigender Prozesskosten die Kosten für das Einzelelement ständig gesenkt werden konnten. Gelingt es, durch Verbesserung der Photolithographie die linearen Dimensionen zu halbieren, kann man auf dem Substrat viermal so viele Strukturen herstellen und parallel prozessieren. Selbst wenn sich die Aufwendungen für die Photolithographie dabei um den Faktor drei erhöhen, hat man unter dem Strich für die Fertigung einen Gewinn erzielt. Neben diesem Kostenvorteil bringt die Miniaturisierung aber auch einen wesentlichen Qualitätsvorteil. Integrierte Schaltungen werden im Allgemeinen an ihrer Funktionsdichte und ihrer Schaltgeschwindigkeit gemessen. Durch die Miniaturisierung werden die elektrischen Wege innerhalb der Schaltung entsprechend verkürzt, was sich unmittelbar auf die Geschwindigkeit der Signalverarbeitung auswirkt. Eine einfache Rechnung zeigt, dass bereits die freie Lichtgeschwindigkeit 0,3 mm pro Pikosekunde beträgt. Die

Laufwege pro Pikosekunde eines Signals auf einer mit Kapazitäten und Induktivitäten behafteten Leitung sind aber noch wesentlich kürzer und kommen in die geometrischen Dimensionen der Schaltung selbst.

Die optische Abbildung bedeutet eine parallele Informationsübertragung. Mit einem hochwertigen Objektiv, wie es in der Lithographie verwendet wird, lassen sich Strukturen mit Minimalabmessungen von $0,13 \mu\text{m}$ über ein Feld von 1 cm^2 übertragen, das entspricht einem parallelen Fluss von $5 \cdot 10^9$ Pixel. Der Vorgang der Übertragung ist dabei natürlich unabhängig davon, welche Muster übertragen werden. Eine komplexe Struktur benötigt keinen höheren Aufwand als eine einfache, solange man die Minimalabmessungen einer gegebenen Technologie nicht unterschreitet. Gelingt es also, durch geschickten Entwurf Strukturen ineinander zu verschachteln, hat man damit Packungsdichte ohne zusätzlichen technologischen Aufwand gewonnen.

Eine Einschränkung bildet die optische Übertragung zunächst in ihrer Zweidimensionalität. Da die Abbildung stets eine begrenzte Tiefenschärfe aufweist, sind alle übertragenen Muster zweidimensional. Eine mikroelektronische Schaltung mag sich mehrere Millimeter oder gar Zentimeter lateral – also in x- und y-Richtung – ausdehnen, in z-Richtung, d. h. in die Tiefe, erstreckt sie sich nur selten über $10 \mu\text{m}$ hinaus. Man kann also mit gutem Recht behaupten, dass die gesamte Mikroelektronik quasizweidimensional ist. Sicherlich kann man mit weiteren Verfahren erreichen, dass eine Schaltung aus mehreren Ebenen übereinander aufgebaut ist, das ändert aber nichts an der Tatsache, dass die Strukturen im Prinzip nur zweidimensional übertragen werden. Das ist eigentlich verwunderlich, verzichtet man doch hier gegenüber der konventionellen Elektronik auf $1/3$ der Gestaltungsmöglichkeiten. Dennoch hat die optische

Übertragung der Strukturen derartige Vorteile, dass dieser Nachteil um ein Vielfaches kompensiert werden kann. Die eindrucksvolle Überlegenheit der Mikroelektronik sei hier Beweis genug.

Der zweite Schwerpunkt der Mikroelektronik ist daher zweifelsfrei die Anwendung der Photolithographie.

Durch die hohe Packungsdichte der Bauelemente auf dem Wafer unterliegen nun Millionen von Strukturelementen genau den gleichen Prozessbedingungen. Dadurch ist wiederum die Fertigungsstreuung sehr klein. Prozesse, die im Laufe der Entwicklung immer aufwendiger wurden, lassen sich durch das Herunterbrechen auf Millionen von Bauelemente auf einem Wafer kostenmäßig abfangen oder gar überkompensieren. Durch geringe Fertigungsstreuung und hohe Ausbeute lassen sich wiederum die Prozesse immer besser beschreiben und simulieren. Dadurch werden die Aussagen, die man mit den Software-Werkzeugen zum Entwurf der Schaltungen machen kann, besser und realistischer, so dass sich hier der Kreis wieder schließt.

Den dritten Schwerpunkt bilden also die Fertigungsverfahren, die gleichzeitig auf viele Wafer angewendet werden (Batch-Verfahren).

Was hat sich nun parallel zur Fertigungstechnologie grundsätzlich in der Entwicklungsphilosophie der Elektronik auf ihrem Wege zur Mikroelektronik verändert? An die Stelle der Vielfalt individueller Bauelemente sind wenige, standardisierte, eng tolerierte Baugruppen getreten, wobei allerdings durch Fokussierung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf diese vergleichsweise wenigen Standardtypen die Leistungsmerkmale gegenüber konventionellen Grundschaltungen um Größenordnungen gesteigert werden konnten.

Durch geeignete, rechnergestützte Auswahl und Verknüpfung von Bausteinen aus Bibliotheken lassen sich diese Grundbausteine zu fast beliebig komplexen

Schaltungen kombinieren. Durch Verbesserung der Design-Werkzeuge, ebenso wie durch ständige Erhöhung der Qualität der Bauelemente können heute Funktionen, die noch vor wenigen Jahren technisch nicht möglich waren, dargestellt werden. Als Beispiel seien nur die Personal Computer angeführt, die die Leistungsfähigkeit von Großrechnern der siebziger Jahre bereits um viele Größenordnungen übertreffen.

Die gleichen grundlegenden Konzepte der Mikroelektronik liegen nun auch der Mikrostrukturtechnik zugrunde. Wir haben hierbei den großen Vorteil, aus dem riesigen Technologievorrat der Mikroelektronik schöpfen zu können. Wenn auch einige Prozesse neu entwickelt werden mussten, kann doch im Wesentlichen auf den theoretischen und technologischen Grundlagen, die mit der Mikroelektronik erarbeitet wurden, aufgebaut werden.

Zusammenfassend kann man also für die Mikrostrukturtechnik fordern:

Die Mikrostrukturtechnik muss, um ähnlich erfolgreich wie die Mikroelektronik zu sein, dem Pfad folgen, der von dieser vorgezeichnet wurde.

Auch in der Mikrostrukturtechnik muss also die Entwicklungsphilosophie heißen:

- Bereitstellung leistungsfähiger Software-Entwicklungswerkzeuge für Mikrokomponenten; Entwicklung, Simulation und Optimierung der Strukturen auf dem Rechner; Vermeidung unnötiger Prozessdurchläufe.
- Übertragung der auf dem Rechner entwickelten Strukturen auf das Werkstück mittels Photolithographie; Nutzung der Möglichkeiten hoher Packungsdichte und Verkleinerung der Strukturen.

- Fertigung im Nutzen mit engen Fertigungstoleranzen durch präzise Prozesssteuerung und Prozessüberwachung.
- Entwicklung weniger, durchkonstruierter Grundstrukturen, die durch hohe Packungsdichte und Miniaturisierung kostengünstig auf dem gleichen Substrat vervielfältigt werden können und durch geeignete Verknüpfung zu einem „intelligenten“ System zusammengefügt werden können.

Natürlich führt das – ebenso wie seinerzeit in der Elektronik – zu einem völligen Umdenken in der Sensorik, der Aktorik, in der Feinwerktechnik und schließlich auch im Maschinenbau.

Wenn sich auch die Verfahren der Mikrostrukturtechnik aus guten Gründen eng an die der Mikroelektronik anlehnen, so waren doch einige Modifikationen nötig, die von der Mikroelektronik nicht geleistet werden konnten, um vor allem die dritte Dimension für die geometrischen Mikrokörper zu erschließen. Es mussten also Verfahren entwickelt werden, die trotz Nutzung der Photolithographie die Herstellung dreidimensionaler Körper ermöglichen. Das hat im Laufe der Jahre zu mehreren Varianten geführt, deren zwei wichtigste an dieser Stelle nur kurz skizziert werden sollen, da jede von ihnen ein ganzes Kapitel dieses Buches füllt.

Die *Silizium-Mikromechanik* folgt in jeder Beziehung sehr eng der Mikroelektronik. Es werden nicht nur sehr ähnliche Herstellungsprozesse übernommen, auch der Silizium-Einkristall ist hier wie dort das Grundmaterial für die Mikrostruktur. Als maßgeblicher Entwickler dieses Verfahrens ist hier K. E. Petersen, damals Mitarbeiter von IBM, zu nennen, der bereits Anfang der 1980er Jahre darüber eine grundlegende Veröffentlichung geschrieben hat: „Silicon as Mechanical Material“ [Pete82]. Zur Erschließung der dritten Dimension wurde ein anisotropes

Ätzverfahren entwickelt, mit dem man subtraktiv den Einkristall bearbeiten kann, um zur gewünschten Form zu kommen. Spezielle Ätzlösungen tragen das Material des Einkristalls anisotrop, also entsprechend der Kristallmorphologie, ab. Durch so genannte Resistmasken werden Teile der Siliziumoberfläche dem Ätzmittel ausgesetzt, um so zur gewünschten Geometrie zu kommen. Außerdem können in den Kristall künstliche Schichten eingebracht werden, die als zusätzliche Ätzstoppschichten dienen. An dieser Ebene bleibt der Ätzvorgang stehen. Durch Anwendung geeigneter Ätzmasken, Ätzstoppschichten und den Einsatz von isotropen und anisotropen Ätzlösungen können fast beliebige dreidimensionale Strukturen aus der Siliziumscheibe herausgearbeitet werden. Diese bilden dann die Basiselemente für Sensoren, Aktoren oder sonstige Komponenten ([Abb. 1.1-1](#)). Der besondere Vorteil der Silizium-Mikromechanik liegt in der Möglichkeit, durch Kombination von Ätzverfahren und den üblichen Prozessen der Mikroelektronik auf dem gleichen Substrat sowohl Mikrostrukturkörper (z. B. Sensorelemente) als auch passende elektronische Auswerteschaltungen unterzubringen [Heub89].

[Abb. 1.1-1](#) Beispiel einer dreidimensionalen Mikrostruktur in Silizium. Bei dem gezeigten Objekt handelt es sich um ein Array von CMOS-compatiblen thermoelektrischen Infrarot-Detektoren (siehe Kap. 7).

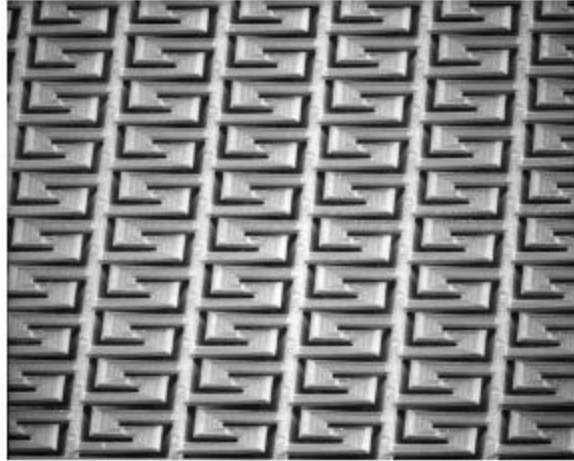
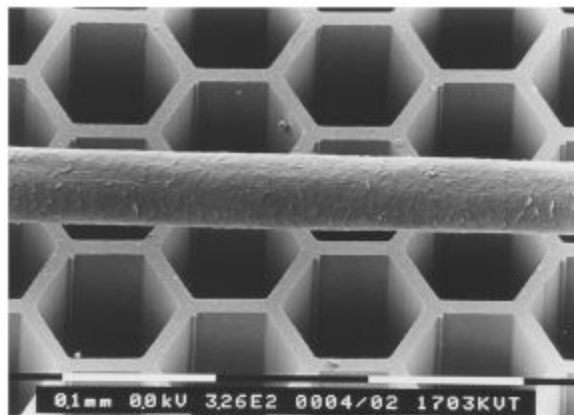


Abb. 1.1-2 Mikrostruktur in LIGA-Technik, die als mechanischer Filter verwendet werden kann. Die „Schlüsselweite“ der Löcher beträgt $80\ \mu\text{m}$, die Wandstärke ist $8\ \mu\text{m}$ bei einer Strukturhöhe von ca. $200\ \mu\text{m}$. Zum Größenvergleich dient ein menschliches Haar (siehe Kap. 8).



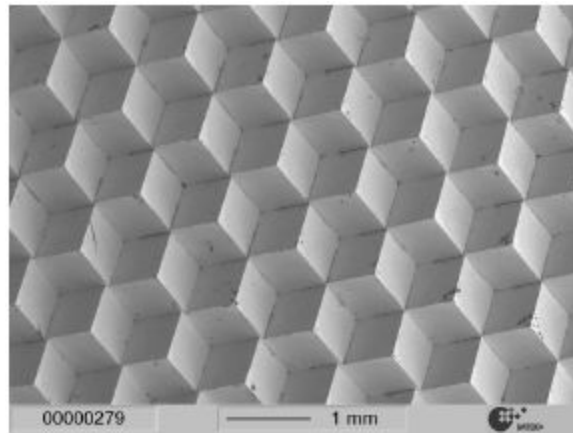
Das zweite wichtige Strukturierungsverfahren stellt das so genannte *LIGA-Verfahren* dar, das im Kernforschungszentrum Karlsruhe (heute Forschungszentrum Karlsruhe) unter der Leitung von Erwin Becker am Institut für Kernverfahrenstechnik (heute Institut für Mikrostrukturtechnik) und von Wolfgang Ehrfeld als maßgeblichem Wissenschaftler zu Beginn der achtziger Jahre entwickelt wurde, um damit Komponenten zur Isotopentrennung von Uranhexafluorid UF_6 herstellen zu können [Beck86].

Die [Abb. 1.1-2](#) zeigt eine Anordnung identischer geometrischer Formen, die als mechanischer Filter verwendet werden kann. Dieser Mikrokörper wurde im LIGA-Verfahren hergestellt, einem Strukturierungsverfahren, das auf den Grundprozessen Röntgen-Lithographie, Galvanik und Abformung beruht und das Inhalt des Kapitels 8 ist. Eine auf dem Rechner erzeugte Struktur wird mittels eines Elektronenstrahlschreibers auf eine Maske übertragen, die Struktur dieser Maske wird durch paralleles Röntgenlicht (Synchrotronstrahlung) als „Schattenwurf“ auf eine für diese Strahlung empfindliche Kunststoffschicht abgebildet. Durch die geringe Absorption der Röntgenstrahlung an diesen Kunststoffschichten dringt die Strahlung ohne merkliche Streuung tief in die Schicht ein, so dass Schichtdicken von mehreren hundert Mikrometern ohne Strukturverfälschung „belichtet“ werden können. Im Gegensatz dazu werden in der Mikroelektronik bei der Photolithographie mit Licht im sichtbaren Bereich oder im nahen Ultraviolett nur Schichtdicken von weniger als einem Mikrometer des photoempfindlichen Materials (so genannter Photoresist) verwendet. Der parallele Strahlengang der Röntgenquelle und die extreme Schichtdicke lassen die Fertigung von Strukturen mit einem Aspektverhältnis (d. h. Verhältnis von Strukturhöhe zu kleinstmöglicher lateraler Struktur) von über 100 zu. In der Mikroelektronik sind dagegen Aspektverhältnisse um 1 üblich.

In diesem ersten Schritt erhalten wir also einen Strukturkörper mit den Lateralstrukturen der Maske und einer Strukturhöhe, die durch die Schichtdicke des Resists vorgegeben ist. In weiteren Verfahrensschritten kann die so erzeugte Struktur galvanisch mit Metall aufgefüllt werden. Wird der verbliebene Kunststoff aus der Metallstruktur herausgelöst, so erhält man das negative Abbild der Struktur in Metall. Diese Metallstruktur dient als

Abformwerkzeug für weitere Kopien der Mikrostruktur mittels Spritzguss oder durch Prägeverfahren.

Abb. 1.1-3 Beispiel einer Struktur, die in mechanischer Mikrofertigung hergestellt wurde, und als Werkzeug zum Heißprägen lichtoptischer Reflektoren dient (siehe Kap. 9).



Neben diesen beiden grundsätzlichen Verfahren gibt es eine Vielzahl von Varianten, in denen Teilschritte der oben genannten Fertigungstechnologien verwendet werden und die für spezielle Anwendungen ihre besonderen Vorzüge haben. Auch diese alternativen Verfahren werden in diesem Buch ausführlich besprochen (siehe Kap. 9). An dieser Stelle sei als ein Beispiel die mechanische Mikrofertigung ([Abb. 1.1-3](#)) genannt [Bier89]. In eine ebene Metalloberfläche wird mit einem entsprechend geformten Diamanten ein Mikroprofil in die Oberfläche gefräst. Durch die Herstellung regelmäßiger Strukturen und durch geeignetes Stapeln mikrogeformter Folien lassen sich relativ kostengünstig dreidimensionale Mikrostrukturkörper aufbauen [Bier90]. So unterschiedlich auch die Herstellungsmethode gegenüber den beiden vorgenannten Verfahren ist, so können doch Teilschritte der anderen Verfahren angewendet werden, wie etwa das galvanische Auffüllen der Strukturen zur Herstellung eines Abformwerkzeuges für die Mengenfertigung von Mikrokörpern durch Spritzguss oder Heißprägen.

1.2 Von der Mikrostrukturtechnik zur Mikrosystemtechnik

Die bisher beispielhaft gezeigten Strukturen wären technologisch nur von mäßigem Interesse, wäre nicht das Potential der Integration zu einem System, also zur Mikrosystemtechnik, gegeben. Erst dann kann sich die Mikrosystemtechnik zu ihrer vollen Leistungsfähigkeit entwickeln. Als Beispiel gelte hier wiederum die Mikroelektronik, bei der die Erfindung des Transistors zwar die grundlegende Voraussetzung für wirtschaftlichen Erfolg war, als Triebfeder der ganzen Technologie aber erst die Entwicklung des Mikroprozessors wirkte. Auch in der Mikrosystemtechnik ist die Herstellung von Mikrokomponenten die Basis, auf der die Systemtechnik aufbaut. Würde man allerdings auf diesem Stadium stehen bleiben, bliebe die Technologie auf den Ersatz konventioneller Komponenten beschränkt. Von einer technologischen Revolution könnte man in diesem Falle sicher nicht sprechen. Erst die Integration mehrerer Sensoren zu einem Array, die Verknüpfung mit Aktoren und die Steuerung aller Vorgänge durch eine leistungsfähige Signalverarbeitung an Ort und Stelle macht aus einer Menge „dummer“ Komponenten ein „intelligentes“ System.

Mikrokörper, die mit den Mitteln der Mikrostrukturtechnik gefertigt wurden, müssen auf einem gemeinsamen Substrat zueinander gefügt werden. Zunächst soll nur das rein mechanische Befestigen einer Struktur auf einem geeigneten Träger betrachtet werden. Dies ist kein triviales Problem, denkt man etwa an die optische Nachrichtentechnik. Eine Monomode-Glasfaser langzeitstabil und kostengünstig zu einem optoelektronischen Bauteil auf

Bruchteile eines Mikrometers genau auszurichten, ist ein komplexes Problem, zu dessen Lösung eine kostenintensive Entwicklung nötig war. Ein anderes Problem stellt die Verbindung zweier Komponenten mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten dar.

In der Sensorik besteht ein spezielles Problem darin, zum einen den mechanisch empfindlichen Mikrostrukturkörper vor Beschädigung und korrosivem Einfluss zu schützen, andererseits aber die physikalische oder chemische Größe, die der Sensor erfassen soll, möglichst verlust- und störfrei an das Sensorelement heranzuführen, also den Sensor möglichst intensiv der Umwelt auszusetzen. Die Aufbau- und Verpackungstechnik spielt insbesondere in der Mikrosystemtechnik eine Schlüsselrolle, wie später an vielen Beispielen zu sehen sein wird.

Neben dem rein mechanischen Aufbau besteht ein Mikrosystem aber auch aus einer Vielzahl von Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten oder von der makroskopischen Außenwelt zum Mikrosystem und umgekehrt. Diese Schnittstellen sind von unterschiedlichster Art. Die elektrische Schnittstelle, die in der Mikroelektronik vorherrscht, ist nur eine unter vielen anderen. Nur für diese hält die Mikroelektronik auch Verfahren bereit, wie das Löten, das Drahtbonden, die TAB-Technik (TAB=Tape Automated Bonding) oder das Flip-Chip-Verfahren. Gerade weil das Mikrosystem aber über die Elektronik hinausgeht, müssen auch optische, mechanische, fluidische oder akustische Schnittstellen betrachtet werden. Die Techniken hierfür sind zum Teil noch nicht entwickelt. Sie unterscheiden sich von den elektrischen Schnittstellen so sehr, dass es angebracht ist, einen neuen Namen dafür zu finden, da der Begriff „Schnittstelle“ eigentlich von der Mikroelektronik mit ihrer elektrischen Verbindungstechnik besetzt ist. Ein Vorschlag wäre, den Begriff „Koppelstelle“ einzuführen.

Eine wichtige Methode für den mechanischen Schutz der empfindlichen Mikrostrukturen ist das Abdecken mit einer Glasplatte. Ein geeignetes Verfahren hierfür ist das Anodische Bonden. Die zu fügenden Oberflächen (vorzugsweise Silizium und Glas) werden in engen Kontakt zueinander gebracht. Durch Erwärmung auf etwa 400°C und mit Hilfe eines elektrischen Feldes werden Ionen im Dielektrikum des Glases irreversibel verschoben. Die dabei auftretenden elektrostatischen Kräfte sind groß genug, die beiden Oberflächen dauerhaft zusammenzuhalten und im Endeffekt eine chemische Bindung einzuleiten.

Mit den vorgestellten Verfahren sind die technologischen Voraussetzungen geschaffen, Mikromechanik, Mikrooptik, Mikrofluidik usw. und Mikroelektronik monolithisch oder in Hybridlösungen zu komplexen Systemen zu integrieren und damit ein Tor aufzustoßen für grundlegend neue Konzepte der Sensorik, der Mess- und Regeltechnik, der Kommunikationstechnik, der Umwelt- und Medizintechnik und anderer Anwendungen, die vielleicht noch nicht einmal angedacht wurden.

Bisher war von den technologischen Voraussetzungen, die für die Realisierung eines Mikrosystems gegeben sind, die Rede. Im Folgenden soll nun die Bedeutung diskutiert werden, welche die Informatik und die Softwareentwicklung in der Mikrosystemtechnik spielen werden.

Die wohl wichtigste Eigenschaft eines Mikrosystems ist die Möglichkeit, statt eines individuellen Sensors ein ganzes Array von Sensoren mit hoher Packungsdichte und geringen Kosten zu fertigen. Während ein konventioneller Aufbau den analogen Messwert eines Sensors verstärkt und am Ausgang des Verstärkers zur Weiterverarbeitung „abliefern“, hat das intelligente System die Fähigkeit, die Signale mehrerer Sensoren parallel aufzunehmen und bereits an Ort und Stelle aufzubereiten. Jeder Sensor besitzt Querempfindlichkeiten auch für Einflussgrößen, die nicht