

Thomas Gessner und Martina Vogel

## **Smart Systems Integration – Eine Herausforderung für zukünftige Mikro- und Nanosysteme**

Im Alltag haben in vielen Anwendungen und Geräten intelligente Funktionen Einzug gehalten, die auf Mikrosystemtechnik basieren. Handies sind beispielsweise mit Kameras, Spielkonsolen oder persönlichen digitalen Assistenten ausgestattet. Autos werden intelligenter über Selbstkontrollfunktionen und adaptive Sicherheitssysteme.

Im Jahr 2006 wurde der Weltmarkt für Mikrosystemtechnik auf 40 Milliarden US\$ geschätzt. Marktanalysen u.a. von SEMI und Yole Developpement prognostizieren bis 2011 einen Anstieg auf 72 Milliarden US\$. Neben Japan und den USA gehört Europa zu den führenden Standorten in der Welt. Deutschland – und insbesondere auch Sachsen – müssen verstärkte Anstrengungen unternehmen, um ihren Anteil am Weltmarkt zu halten bzw. weiter auszubauen.

Auf internationaler Ebene sind drei anwendungsübergreifende technologische Forschungsfelder für die Zukunft identifiziert worden [1, 2]:

- MEMS / Nanointegration – Nanoelektromechanische Systeme (NEMS),
- MEMS / Semiconductor Integration – System in Package (SiP),
- Multiple MEMS Integration – Multidevice.

Das erstgenannte Forschungsfeld adressiert die Verwendung von Nanotechnologien zur Erzeugung neuartiger Strukturen. Dabei steht nicht nur die Verringerung der Strukturgeometrie zur Reduzierung der Herstellungskosten im Vordergrund, vielmehr sollen neue oder verbesserte Funktionalitäten realisiert werden. Beispiele dafür sind Nanoröhren und Nanokomposite, die aufgrund ihrer Geometrie besondere Eigenschaften besitzen.

Das zweite Feld, die Integration von mikromechanischen und mikroelektronischen Komponenten zu einem Gesamtsystem in einem Gehäuse, stellt vor allem Herausforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik. Dazu gehört die vertikale 3D-Integration von IC-Chip und MEMS-Chip, die Chipintegration über Interposer und das Packaging unter Verwendung von Selbstassemblierungstechniken. Neben der Hybridintegration ist aber auch die monolithische Integration von CMOS-Elektronik und MEMS/NEMS insbesondere bei der Verwendung von Wandler-elementen im Nanometerbereich relevant.

Das dritte Feld folgt dem aus der Semiconductor Roadmap bekannten Trend „More than Moore“. Die sogenannte ‚Multi Device Integration‘ zielt auf die Herstellung intelligenter Systeme durch die Integration von Komponenten und Systemen mit unterschiedlichen Funktionalitäten, wie verschiedenen Sensoren, Aktoren, Biochips sowie Antennen, passiven und aktiven Bauelementen.

Die Smart Systems Integration adressiert den Trend zu zunehmend kleineren, multifunktionalen, sich selbst organisierenden Systemen mit Schnittstellen zur Kommunikation mit der Außenwelt. Die Smart Systems (intelligente Systeme) gehen weit über die derzeit typischen Anwendungen der Mikrosystemtechnik hinaus. Diese neuen ‚visionären‘ Produkte bestimmen in zunehmendem Maße den Erfolg der Unternehmen in allen Branchen, angefangen bei der Automobilindustrie über Medizintechnik, Maschinenbau bis hin zur Konsumgüterindustrie, Telekommunikation und Logistik. Um den internationalen Trend und den Markt mit zu bestimmen, ist der Einsatz preiswerter neuer Technologien sowie die Kombination und Integration verschiedener Komponenten, basierend auf verschiedenen Materialien und Technologien in ein Gesamtsystem, unabdingbar. Besondere Relevanz kommt dabei der Einbeziehung von Nano-Aspekten hinsichtlich der einzelnen Komponenten und Systeme und der Einbeziehung von Multi-Aspekten hinsichtlich Multi-Technologien, Multi-Komponenten, Multi-Materialien, Multi-Funktionalisierung und Multi-Funktionalität zu.

Anwendungen finden die intelligenten Systeme unter anderem in der Steuerung und im Energiemanagement im Auto, als Lab-on Chip-Systeme, im Internet of Things bzw. im Umweltmonitoring. In den nächsten 20 Jahren wird insbesondere das Internet of Things immer mehr Bedeutung gewinnen. Die Systeme werden soweit entwickelt sein, dass Sensoren nicht nur Daten erfassen und die aufbereiteten Daten über das Internet zur Basisstation melden, sondern sie werden direkt Aktionen auslösen oder andere Systeme aktivieren.

Die Fraunhofer-Einrichtung für Elektronische Nanosysteme ENAS ist gemeinsam mit dem Zentrum für Mikrotechnologien (ZfM) der TU Chemnitz auf die Smart Systems Integration unter Nutzung von Mikro- und Nanotechnologien fokussiert. Im Folgenden werden technische Entwicklungen beider Einrichtungen vorgestellt.

### **Scannersysteme / Spektrometer**

Mikroscanner bieten heute die Möglichkeit zur Realisierung von Smart Systems, welche aufgrund ihrer Flexibilität, der deutlichen Miniaturisierung und ihrer Kostenvorteile eine sinnvolle Ergänzung zu heutigen Systemen einerseits und eine Substitutionsmöglichkeit konventioneller Systeme andererseits darstellen. Neben bereits etablierten Einsatzmöglichkeiten – wie in Barcodescannern oder in Projektionsgeräten – hat der Einsatz von Microscannern bei der Vermessung infraroter Strahlung eine enorme Bedeutung erlangt. Anwendung findet diese sowohl zur kontaktlosen Temperaturmessung als auch in der instrumentellen Analytik, d.h. der quantitativen und qualitativen Bestimmung von Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen. Die realisierten Temperaturscanner zeichnen sich neben einem geringen Preis und der kompakten Bauweise durch eine kurze Messzeit aus und können somit vorteilhaft zur Überwachung von thermischen Prozessen eingesetzt werden. Die entwickelten Infrarotspektrometer verfügen ebenfalls über diese Eigenschaften und eignen sich daher für eine Vielzahl von Anwendungen.

Ein speziell für diese Anwendung am ZfM optimierter Mikrospiegel bildet die Kernkomponente in beiden Systemen. Im Temperaturscanner bewirkt er ein kontinuierliches Abtasten einer Linie eines beobachteten Messobjekts und die Vermessung der emittierten Temperaturstrahlung mittels eines Infrarotdetektors. Ein flächenhaftes Abtasten ist durch eine Bewegung des Messobjektes möglich. In Kombination mit einem Reflexionsgitter sorgt der Mikroaktor im Spektrometer für die spektrale Zerlegung einer eingekoppelten Strahlung sowie für deren kontinuierliche Projektierung auf einen Austrittsspalt. Abhängig von den Eigenschaften einer im Strahlengang positionierten Probe wird die Strahlungsleistung wellenlängenselektiv beeinflusst [3].

Eine wesentliche Bedeutung besitzt das Packaging der Systeme. Dieses muss funktional sein, Anforderungen an mechanische und chemische Stabilität genügen und möglichst unempfindlich gegenüber Temperaturschwankungen sein. Für die Fertigung MEMS-basierter Systeme (vor allem bei kleinen Stückzahlen) erweisen sich Rapid-Prototyping-Verfahren, beispielsweise das selektive Lasersintern, als vorteilhaft. Diese bieten die Möglichkeit, mechanische Funktionselemente sowie elektrische und optische Komponenten direkt zu integrieren (Abbildung 1). Folglich können Herstellungskosten und Montageaufwand reduziert und die Qualität verbessert werden. Aufgrund der parametrischen Konstruktion sind applikationsspezifische Anpassungen des Gerätedesigns relativ leicht und schnell umsetzbar (Abbildung 2).

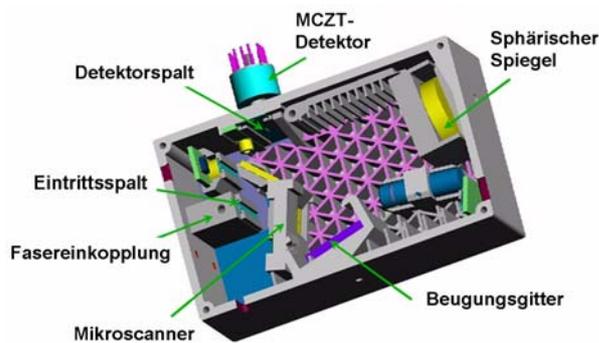


Abb. 1: Aufbau eines IR-Spektrometers

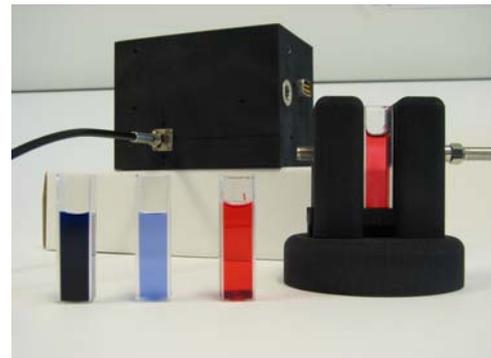


Abb. 2: Foto des Spektrometers

## Biomedizinische Mikroanalyzesysteme

Auch bei Biosensoren geht der Entwicklungstrend in Richtung integrierte Lösungen für Anwendungen in der medizinischen Diagnostik, z.B. den Nachweis von Krebserkrankungen. Man möchte kostengünstig und vor Ort Reihenuntersuchungen durchführen, die keine teuren und komplizierten Laboranlagen benötigen, sondern mit kleinen funktionalen Einwegtestkarten eine sofortige Auswertung ermöglichen. Beispielsweise wurde im Rahmen des Europäischen Forschungsprojektes SEMOFS eine Technologieplattform für zukünftige Generationen solcher Biosensoren entwickelt. Auf einem Polymersubstrat sind aktive mikrofluidische, mikrooptische und biologische Komponenten integriert worden, um verschiedene bioanalytische Protokolle zu realisieren. Integrierte Polymer-Pumpen bzw. Ventile ermöglichen den kontrollierten und dosierten Transport der Probenflüssigkeit (Blut oder andere Flüssigkeiten) sowie von Reagenzien zur Sensorfläche. Auf dieser sind Biomoleküle immobilisiert – zum Beispiel Antikörper – die spezifisch nachzuweisende Komponenten der Probenflüssigkeit binden. Durch das optisch arbeitende Detektionsverfahren der Oberflächenplasmonenresonanz (SPR) kann die Anlagerung dieser Moleküle detektiert werden. Das integrierte optische Detektionssystem beinhaltet in seiner letzten Entwicklungsstufe aktive und passive optische Komponenten wie organische Lichtquellen (Polymer Light Emitting Diodes – pLED), Lichtwellenleiter, optische Gitter sowie organische Detektoren (polymer photodiodes – pPD). Dadurch können die Schnittstellen zu einem Lesegerät sehr einfach gestaltet und dessen Kosten und Größe reduziert werden. Hohe Empfindlichkeit, einfache und schnelle Diagnose sowie geringe Kosten der Karte sind die erklärten Entwicklungsziele. Die Kostenersparnis entsteht vor allem durch die Herstellung aller Komponenten auf Polymersubstraten unter Nutzung kostengünstiger Massenfertigungsverfahren, wie z.B. Spritzguss oder Heißprägen. Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau und die verschiedenen technologischen Aspekte der integrierten Polymerkarte [4].

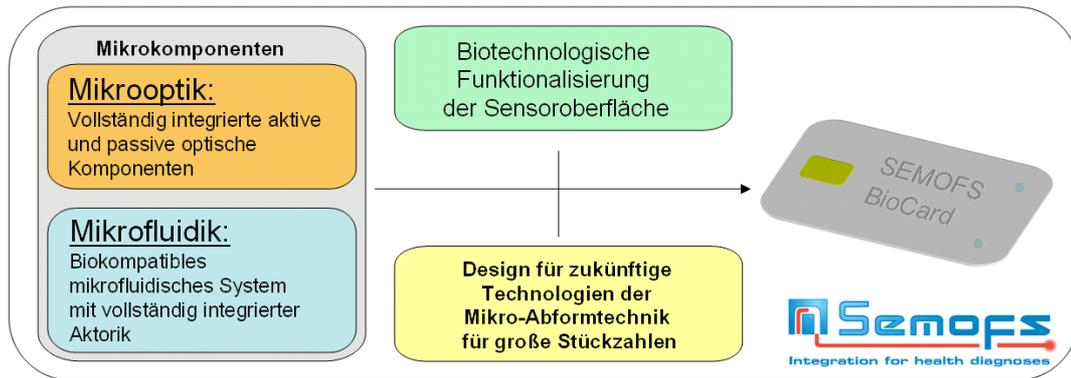


Abb. 3: Technologische Aspekte der Integration

### Intelligentes Label

Ein weiteres Beispiel für die steigenden Anforderungen der Systemintegration ist die Entwicklung und Herstellung von RFID-Label. Ihr Einsatz in Transport- und Logistikketten hat sich am Markt fest etabliert. Durch die weltweite Verfügbarkeit von unterschiedlichsten RFID-Label, Readern, kompletten Systemlösungen und der abgeschlossenen Standardisierung für die Datenkommunikationsprotokolle werden bereits hohe Wachstumsraten generiert, die aber insgesamt eine erste Startphase darstellen. Neben dem Angebot von zunehmend kostengünstigeren passiven Label für die allgemeine Produktkennzeichnung einerseits werden andererseits RFID-Label mit hoher Sicherheitsfunktionalität z.B. für Kreditkarten oder Personen-Identifikation bereitgestellt.

Für eine lückenlose Transport- und Logistiküberwachung, insbesondere von empfindlichen Gütern, ist es notwendig, neben den allgemeinen logistischen Daten auch Klima- und Umgebungseinflüsse zu registrieren. Hierfür bieten sich Datenlogger an, die teilweise auch mit einer RF-Datenkommunikation kombiniert sind. Eine sehr kostengünstige Alternative hierzu entsteht durch aktive RFID-Label. Durch die Integration von Sensorik, Anzeigeelementen, Schnittstellen und einer autarken Energieversorgung in ein passives RFID-Label werden neuartige Systemlösungen in Form eines Etiketts generiert. Die Komplexität derartiger Aufbauten ist Mikrosystemen adäquat, deren Herstellungstechnologien und Komponenten von einem enormen Kostendruck geprägt sind und in Massen Anwendungen ihre Märkte finden.

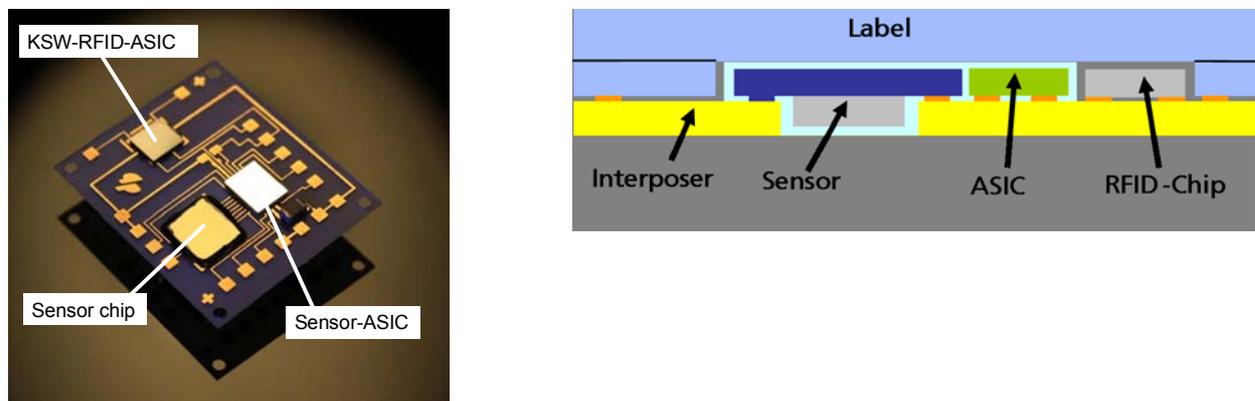


Abb. 4: Interposer mit Sensor, ASIC und RFID chip

Abbildung 4 zeigt ein gemeinsam von Schenker AG, KSW Microtec AG, Elmos Semiconductor AG, der Fraunhofer ENAS und dem ZfM der TU Chemnitz entwickeltes aktives Label. Dieses Label besteht aus einem Polymersubstrat, einem HF-Chip mit Antenne, einer Batterie für die Stromversorgung, einer Signalverarbeitungseinheit und einem Sensorsystem. Das Sensorsystem gestattet die Messung von Temperatur, Schock und Neigung.

Um alle Einzelelemente in einem Label zu integrieren, wird ein flexibler Träger (250 µm dickes PET) als Interposer benutzt, der den Sensor, den ASIC und den RFID-ASIC trägt (Abbildung 4). Der Beschleunigungssensor misst sowohl Schock als auch Neigung. Er wird in der am ZfM entwickelten und patentierten AIM-Technologie (AIM – Airgap Insulation Microstructure) gefertigt. Im ersten Ansatz wurde er durch einen 200 µm dicken Siliziumdeckel geschützt. In einer zweiten Version ist der Sensor durch Dünnschichtpackaging verkappt worden. Der Dünnschichtstapel besteht aus Oxid- und Nitridschichten. Die freistehende Dünnschichtkappe wird durch Ätzen einer Opferschicht (Oxid) unterhalb der Membran hergestellt. Diese neue Sensorpackagingmethode führt zu einer Komponentendicke von 260 µm [5].

### **Waferbonden / Waferlevelintegration**

Zur Herstellung von Mikrosystemen werden IC-kompatible Batch-Prozesse und eine Reihe zusätzlicher spezieller Technologien benötigt. Schlüsseltechnologien zur Herstellung von Mikrosystemen auf Waferebene sind Waferbondverfahren, die im Temperaturbereich von 100 °C bis 1100 °C zur Verfügung stehen und in diesem Fall der Montage von vorgefertigten Bauteilkomponenten sowie den Verfahren zur elektrischen Kontaktierung der einzelnen Bauteilkomponenten untereinander dienen.

Für die Funktion von MEMS sind die elektrische Kontaktierung der mechanischen, optischen, elektrischen und fluidischen Komponenten untereinander und die Herstellung von Schnittstellen zur äußeren Kontaktierung von großer Bedeutung. Je nach verwendeter Technologie für die Herstellung der einzelnen Komponenten (bei den mikromechanischen Teilen zum Beispiel Bulk- oder Oberflächenmikromechanik) sind unterschiedliche Kontaktierungssysteme einzusetzen [6]. Die wesentlichen Anforderungen an diese elektrischen Durchkontaktierungen sind:

- Leiten des elektrischen Potentials vom Inneren des Bauteils nach außen,
- Realisierung niedriger Ohm'scher Übergangswiderstände,
- Vermeidung von parasitären Kapazitäten und Induktivitäten,
- Gewährleistung der Dichtheit des Bauteils,
- Gewährleistung hoher Langzeitstabilität.

Zwei mögliche Konzepte des Waferlevelpackagings zur Montage von mikromechanischen und elektronischen Komponenten sind in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt. Abbildung 5 zeigt dabei eine Variante, in der ein Dichtrahmen zur Hausung der mikromechanischen Struktur eingesetzt und die elektrische Kontaktierung von mikromechanischer und elektrischer Komponente durch eine metallische Zwischenschicht erzeugt wird. In der zweiten Variante (Abbildung 6) dient eine aus Polyimid bestehende Zwischenschicht zur Verbindung der beiden Substrate. Die elektrische Kontaktierung erfolgt nach der Herstellung der Bondverbindung durch Ätzen von Löchern in der elektronischen Komponente und nachfolgende Metallisierung dieser Löcher.

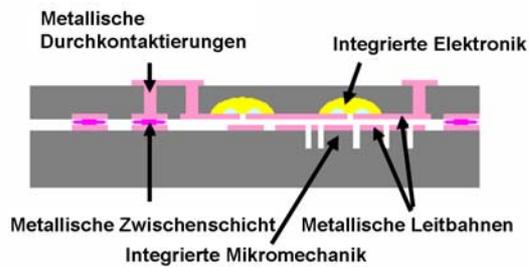


Abb. 5: Montagekonzept für mikromechanische und elektronische Komponenten mittel metallischer Zwischenschichten

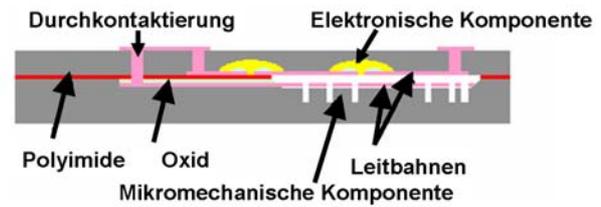


Abb. 6: Montagekonzept für mikromechanische und elektronische Komponenten mittels Polyimid-Verbindungsschicht

Der wachsende Bedarf an Niedertemperaturbondverfahren auf Waferebene schlägt sich in den Untersuchungen zu völlig neuen Verbindungstechnologien im Bereich der Halbleitertechnik und Mikrosystemtechnik nieder. Bisherige Verfahren, beispielsweise das Siliziumdirektbonden oder das anodische Bonden, werden auf niedrige Prozesstemperaturen hin untersucht und aufwändige Vorbehandlungen zur Verbindungsoptimierung durchgeführt. Ergänzend dazu werden auch andere Verfahren, wie das eutektische Bonden oder das adhäsive Bonden, erforscht und damit Bondtemperaturen von unter 400 °C bzw. unter 100 °C erreicht.

Neue Entwicklungen im Bereich Waferbonden [7, 8] adressieren insbesondere den Einsatz von Nanotechnologien für das Niedertemperaturbonden (Abbildung 7). Schichtstapel von 100 und mehr dünnen Schichten einer Dicke von 10 bis 100 nm, bilden die Basis. Diese nanostrukturierten Schichtstapel dienen als Wärmequelle. Durch Anlegen einer externen Spannung fließt lokal ein Kurzschlussstrom, der ein Intermixing und damit eine exotherme Reaktion ausgelöst.

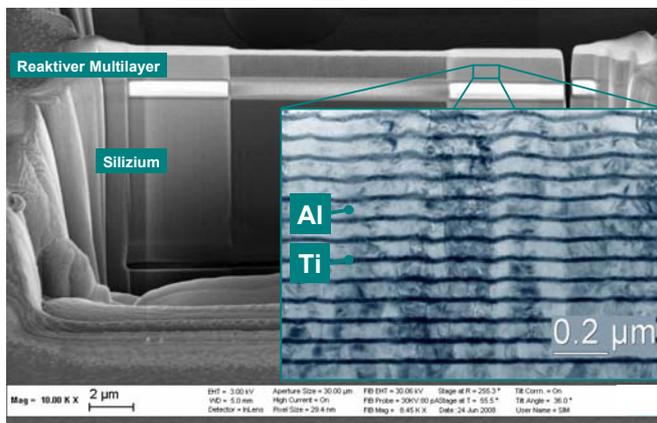
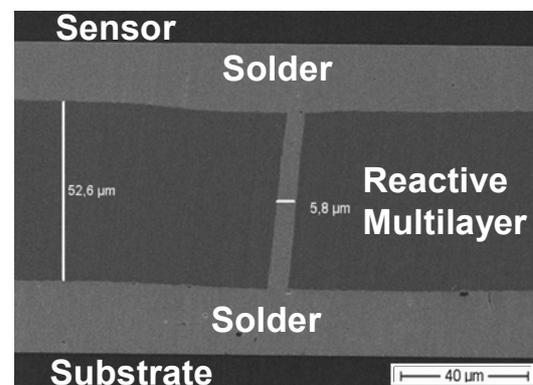


Abb. 7: Bonden mittels nanostrukturierter Multilayer



## Ausblick

Mit diesen wenigen Beispielen wurde die Entwicklung von intelligenten Systemen aufgezeigt. In den ausgewählten Teilgebieten spielen Integrationstechniken eine große Rolle. Nicht nur die Integration verschiedener Komponenten, auch die Miniaturisierung und Weiterentwicklung der Einzeltechnologien und einzelnen Elemente stehen im Fokus der Forschung. Die Integration von Nanotechnologien und gedruckten Funktionalitäten (Batterien, Antennen) führen dabei zu neuen

Herausforderungen in Richtung Integrationstechniken, Test, Zuverlässigkeit und Sicherheit der gesamten Systeme.

Als eine Herausforderung gilt die interdisziplinäre Organisation der Forschungs- und Entwicklungsarbeit und die Zusammenstellung von Teams, die alle geforderten Expertisen vom Entwurf bis zur Anwendung einbringen können und damit die Brücke von den Nanotechnologien über die Mikrosystemtechnik bis hin zur Makrowelt bauen. Dabei besteht das Ziel stets darin, Intelligenz und Kommunikationsfähigkeit in das technische System zu bringen, um damit den Aufwand zur Einrichtung, Pflege und Wartung gering zu halten.

## Literatur

- [1] Adachi, J.: *Roadmap Driven Micro- and Nanotechnology Development in Japan*. Japan Day at Hannover Fair 2008
- [2] Gessner, T.; Baum, M.; Gessner, W.; Lugert, G.: Chapter *Smart integrated systems - from components to products*. in the book: *More than Moore: Creating High Value Micro/Nano-electronics Systems*, ed. by Guo Qi Zhang, Mart Graef, Alfred J. van Roosmalen (2009) (ISBN 978-0387755922)
- [3] Otto, T.; Saupe, R.; Weiss, A.; Stock, V.; Bruch, R.; Gessner, T.: *Principle and applications of a new MOEMS spectrometer*. Proc. of SPIE Vol. 6114, ed. by A. El-Fatraty, San Jose, 77-86, 2006
- [4] Nestler, J.; Hiller, K.; Gessner, T.; Buergi, L.; Soechtig, J.; Stanley, R.; Voirin, G.; Bigot, S.; Gavillet, J.; Getin, S.; Fillon, B.; Ehrat, M.; Lieb, A.; Beckers, M.-C.; Dresse, D.: *A new technology platform for fully integrated polymer based micro optical fluidic systems*. 4M2006 Conference on Multi-Material Micro Manufacture, 20-22 Sep 2006, Grenoble, France
- [5] Reuter, D.; Nowack, M.; Rennau, M.; Bertz, A.; Wiemer, M.; Kriebel, F.; Gessner, T.: *Hermetic Thin Film Encapsulation of Mechanical Transducers for Smart Label Applications*. Transducers 09, Denver (USA), 2009 Jun 21-25; Tech. Digest
- [6] Wiemer, M.; Hiller, K.; Geßner, T.: *Waferbonding for patterning of micromechanical sensors*. Proc. of the Fourth Int. Symp. on Semicond. Wafer Bonding: Science, Technology and Applications IV; Vol. 97-36; 1997; 138
- [7] Wiemer, M.; Braeuer, J.; Besser, J.; Gessner, T.: *Trends in 3D Integration of MEMS and Electronics*. Conference on Wafer Bonding for Microsystems 3D- and Wafer Level Integration, Grenoble / France, 2009 Dez 6-8; Proceedings, pp 107-110
- [8] Braeuer, J.; Baum, M.; Wiemer, M.; Gessner, T.: *Reactive micro joining by using nanoscale effects*. Mikro-Nano-Integration, Seeheim, 2009 Mar 12-13; Proceedings (ISBN 978-3-8007-3155-8)

[15.01.10]

Anschrift der Autoren:

Prof. Dr. Thomas Gessner  
Fraunhofer-Einrichtung für Elektronische Nanosysteme (ENAS)  
Technologie-Campus 3  
D – 09126 Chemnitz  
thomas.gessner@enas.fraunhofer.de