

Konvergierende Technologien: Perspektiven der Mikro-Nano-Bio-Integration

STEPHANUS BÜTTGENBACH

Institut für Mikrotechnik der Technischen Universität Braunschweig,
Alte Salzdahlumer Straße 203, D-38124 Braunschweig

Der Begriff „Konvergierende Technologien“

Die Geschichte der Technikwissenschaften ist gekennzeichnet durch eine zunehmende Spezialisierung. Impulse für Innovationen und wirtschaftliches Wachstum beruhen in der Vergangenheit auf Entwicklungen in einzelnen Schlüsseltechnologien wie zum Beispiel der Mikroelektronik. Die Behandlung komplexer Probleme erfordert jedoch zunehmend die Integration von Erfahrungen und Kenntnissen, die über die Grenzen eines einzelnen Fachgebietes hinausgehen. Interdisziplinäre Zusammenarbeit gewinnt daher mehr und mehr an Bedeutung. Ökonomischer Fortschritt wird zukünftig weniger von der Entwicklung in einzelnen Technologien abhängen, sondern von der Konvergenz verschiedener Spitzentechnologien.

Ein bekanntes Beispiel dafür ist die Mechatronik. Um steigenden Produkthanforderungen bezüglich Funktionalität, Zuverlässigkeit, Energieverbrauch und – wo immer möglich – Portabilität gerecht zu werden, müssen Mechanik, Elektronik, Regelungstechnik, Informationstechnik und gegebenenfalls weitere relevante Technologien eng zusammenwirken (Bild 1). Dies wird mit dem Kunstwort Mechatronik bezeichnet, das durch Verschmelzen der Begriffe Mechanik und Elektronik entsteht. Mechatronik ist auch eine multifunktionale Technologie: mechatronische Systeme enthalten Sensoren, Aktuatoren sowie signal- und informationsverarbeitende Funktionen.

Konvergierende Technologien verändern den Prozess der Produktentwicklung. Die traditionelle „Throw it over the wall“-Methode, bei der jeder Teil des Entwicklungsprozesses separat ausgeführt wird und der Informationsfluss nur in einer Richtung erfolgt, muss weiterentwickelt werden zu einer interdisziplinären Methode. Alle Mitglieder der Projektgruppe besitzen gründliche Kenntnisse auf mehreren Technologiefeldern und tauschen Informationen kontinuierlich untereinander aus. Dies bedeutet, dass junge Ingenieure, die auch heute oft einen stark disziplinär ausgerichteten universitären Hintergrund haben, ihre interdisziplinären Erfahrungen ausweiten müssen.

* Der Vortrag wurde am 11.04.2014 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

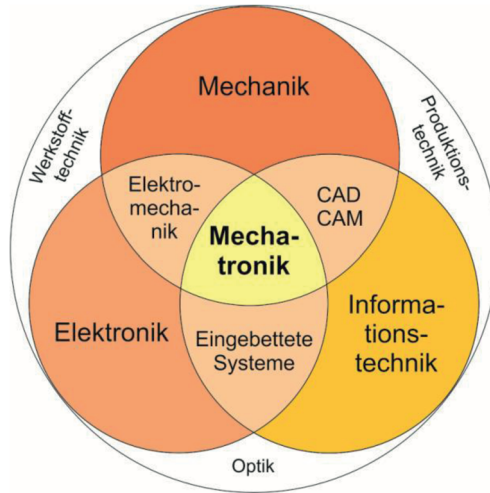


Bild 1. Disziplinen der Mechatronik.

Von der Mechatronik zur Mikrosystemtechnik

Die Entwicklung der Mechatronik ist eng verbunden mit der Entwicklung der Mikroelektronik: die hoch integrierten elektronischen Schaltkreise ermöglichen fortgeschrittene regelungstechnische und informationsverarbeitende Funktionen in mechatronischen Systemen. In der Folge wurden die hochentwickelten Fertigungstechniken der Mikroelektronik genutzt, um mechanische, optische und fluidische Bauelemente zu miniaturisieren und mit mikroelektronischen Schaltkreisen zu integrieren. Die so entstehenden mikromechatronischen Systeme – häufig als Mikrosysteme bezeichnet – vereinigen sensorische, aktuatorische und informationsverarbeitende Funktionen auf engstem Raum. Sie bieten vielfältige Vorteile: sie sind klein, leicht, verbrauchen wenig Energie, besitzen hohe Zuverlässigkeit und Multifunktionalität und können im Allgemeinen kostengünstig hergestellt werden.

Mikrosystemtechnik entsteht aus der Integration von Mikro- und Systemtechniken (Bild 2). Sie ist eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts und kann ähnliche technische und gesellschaftliche Veränderungen bewirken wie die Mikroelektronik seit den 1960er Jahren. Mikrosysteme werden heute in vielen Anwendungsfeldern, zum Beispiel in der Fahrzeugtechnik, der Kommunikationstechnik, im Maschinen- und Anlagenbau und im Konsumgüterbereich, eingesetzt:

– In Kraftfahrzeugen bilden Beschleunigungs- und Drehratensensoren die Basis für Airbags und elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP).

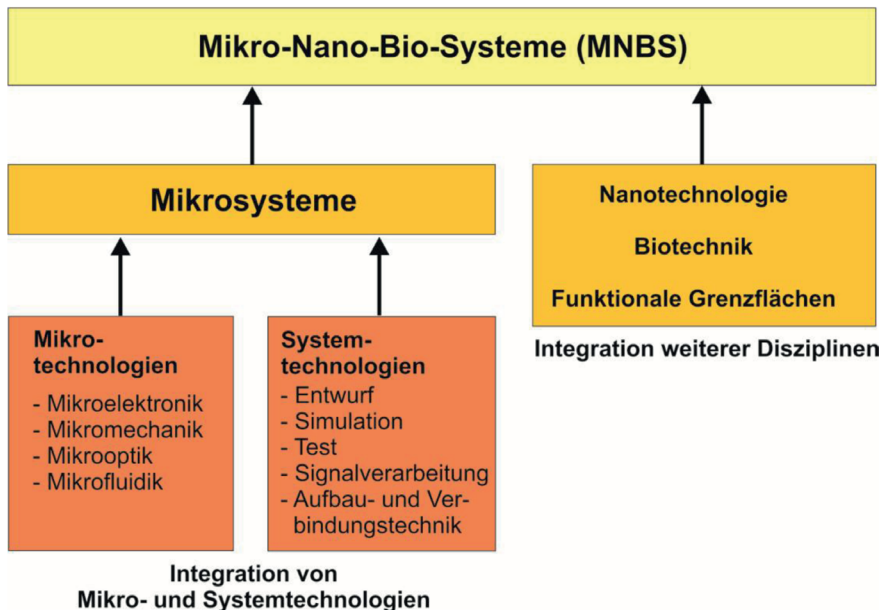


Bild 2. Konvergenz von Mikrosystemtechnik, Nanotechnologie und Biotechnik.

– In Druckköpfen für Tintenstrahldrucker sind Mikroprozessoren mit Mikrokanälen auf einem Chip integriert. Die Mikrokanäle führen mehreren Tausend Düsen mit einem Durchmesser unter $30\ \mu\text{m}$ die Tinte zu.

– In Hörgeräten, Mobiltelefonen und Tablet-Computern wandeln miniaturisierte Mikrofone Schallschwingungen mit Hilfe einer mikrotechnisch hergestellten Membran in elektrische Signale um.

Der Weltmarkt für mikrosystemtechnische Produkte wird einer Studie der Yole Développement [1] zufolge von 10 Milliarden US-Dollar im Jahr 2011 auf 21 Milliarden US-Dollar im Jahr 2017 steigen.

Mikro-Nano-Bio-Systeme

Eine ganze Reihe von Mikrosystemen integrieren bereits zusätzliche Technologien, insbesondere Nanotechnologie und Biotechnik einschließlich der Technologie funktionaler Grenzflächen. Durch diesen Prozess, der auch unter dem Begriff „Smart Systems Integration“ bekannt ist, entstehen sogenannte Mikro-Nano-Bio-Systeme (MNBS, Bild 2).



Bild 3. Erläuterung des Begriffs Nanotechnologie.

Bild 3 erläutert den Begriff „Nanotechnologie“. In Anlehnung an die Definition der Internationalen Standardisierungs-Organisation (ISO) lassen sich drei wichtige Felder erkennen [2]:

1. Die Nanotechnologie befasst sich mit Materialien die in einer oder mehreren Dimensionen Strukturen kleiner als 100 nm aufweisen. Bei Nanomaterialien kann es sich um nanoskalige Basisstrukturen oder nanostrukturierte Materialien handeln. Zu ersteren zählen Nanopartikel (drei Dimensionen im Nanomaßstab), Nanodrähte, -röhrchen und -stäbchen (zwei Dimensionen im Nanomaßstab) und Nanoplättchen (eine Dimension im Nanomaßstab). Bei den nanostrukturierten Materialien können Nanokomposite, nanokristalline Materialien und Agglomerate (lose gebundene Partikel) und Aggregate (stark gebundene Partikel) unterschieden werden.
2. Es werden neue Funktionen genutzt, die überwiegend aus dem veränderten Verhältnis von Oberflächenatomen zu Volumenatomen und dem quantenmechanischen Verhalten resultieren. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von größeninduzierten Funktionalitäten.
3. Nanotechnologie befasst sich mit der gezielten Herstellung und Handhabung von Nanoobjekten. Bei den Herstellungsprozessen gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Gruppen von Verfahren (Bild 4): Die Top-Down-Verfahren nutzen weiterentwickelte Prozesse der Mikrosystemtechnik zur Herstellung von Strukturen kleiner als 100 nm, das heißt die Struktur wird dem Material von außen aufgeprägt. Zu den Top-Down-Verfahren zählen auch mechanische Mahlverfahren zur Herstellung von Nanopartikeln. Bei den Bottom-Up-Verfahren werden komplexe Strukturen gezielt auf Basis der physikalisch-chemischen Prinzipien der Selbstorganisation aus Atomen und Molekülen aufgebaut.

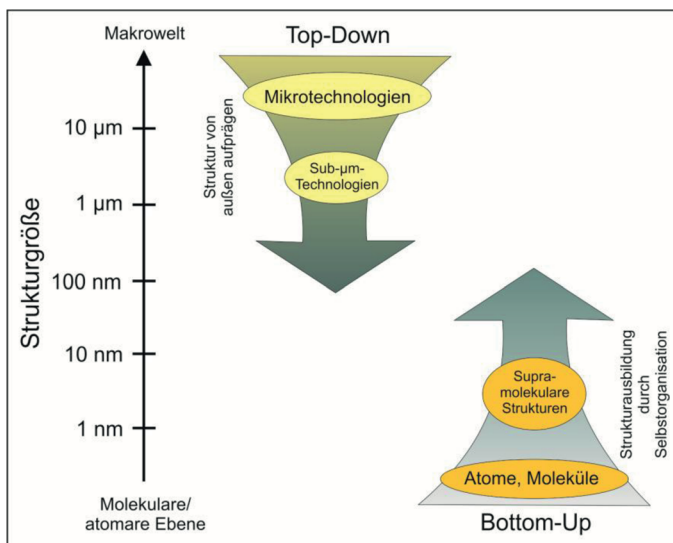


Bild 4. Herstellungsverfahren der Nanotechnologie (in Anlehnung an [3]).

Anwendungen von Mikro-Nano-Bio-Systemen in den Lebenswissenschaften

Durch die Integration von Nano- und Biomaterialien in Mikrosysteme werden in hohem Maße neuartige Anwendungen in den Lebenswissenschaften ermöglicht. Aktuelle Felder in Forschung und Entwicklung sind:

- Verfahren der molekularen In-vitro-Diagnostik und biochemischen Analyse (Lab-on-a-Chip)
- Interaktion von MNBS mit Zellen
- MNBS in der Therapie (Wirkstoffverabreichung, tragbare und implantierbare Geräte)

Einige Beispiele sollen dies verdeutlichen:

Immunosensor für C-reaktives Protein [4,5]. Die Konzentration von C-reaktivem Protein (CRP) im Blutserum steigt bei entzündlichen Erkrankungen stark an. Es ist ein Marker der akuten Phase und seine Konzentration wird daher häufig zur Diagnostik benutzt. Der Nachweis erfolgt üblicherweise in speziellen Labors und ist daher zeitaufwändig. An einer zeitnahen Bestimmung der CRP-Konzentration in den Arztpraxen oder direkt am Krankenbett (Point-of-Care-Diagnostik) besteht deshalb großes Interesse.

Der entwickelte Immunosensor zur Detektion von CRP im Blutserum besteht aus drei Teilen, CRP-Antikörpern als biologisch sensitive Komponente, einer Quarz-Mikrowaage als Wandler, der das Signal, das durch die Wechselwirkung des Analyten mit der biologisch sensitiven Komponente entsteht, in ein elektrisches Signal umsetzt, und einer Signalverarbeitung, die das Ergebnis benutzerfreundlich anzeigt. Bei der Quarzmikrowaage handelt es sich um eine Quarzmembran mit einem Durchmesser von 3 mm und einer Dicke von etwa 80 μm . Mit Hilfe von beidseitig aufgetragenen Goldelektroden wird die Membran zu Dickenscherschwingungen angeregt. Auf den Goldelektroden werden CRP-Antikörper immobilisiert. Um eine gute Haftung der Antikörper auf den Elektroden zu erreichen, wird zunächst eine selbstorganisierende Monolage eines Thiolats als Crosslinker auf die Goldoberflächen aufgebracht. Selbstorganisierende Monolagen sind Nanostrukturen, die durch Adsorption molekularer Bausteine auf Festkörperoberflächen entstehen. Die Adsorbate organisieren sich spontan in kristalline oder teilkristalline Strukturen. Die Quarzresonatoren werden in eine Fließzelle aus Polymer integriert, durch die das Blutserum fließt. Infolge der Anlagerung von CRP an die Antikörper auf der Resonatoroberfläche vergrößert sich die schwingende Masse und dadurch verringert sich die Resonanzfrequenz. Die durchgeführten Experimente zeigen eine lineare Relation zwischen der CRP-Konzentration und dem Frequenzabfall. Einige zehn Messungen konnten bei einem Reinigungsschritt mit einer Pufferlösung nach jeder Messung mit derselben Quarzmikrowaage durchgeführt werden.

Mikroplasma-Stempel zur selektiven Funktionalisierung von Oberflächen bei Atmosphärendruck. Eine geometrisch selektive Funktionalisierung von Oberflächen kann mit Hilfe von Atmosphärendruck-Mikroplasma in Kavitäten mit begrenzten Geometrien durchgeführt werden. Die dazu entwickelten Mikroplasma-Stempel mit einem Durchmesser von etwa 2 cm basieren auf dem Prinzip der dielektrisch behinderten Entladung. Als Barrierematerial wird Polydimethylsiloxan (PDMS) verwendet, in das kreisförmig angeordnete zylindrische Kavitäten mit einem Durchmesser von 100 - 500 μm und einer Höhe von 350 μm mit Hilfe eines Abformverfahrens strukturiert werden. Diese strukturierte PDMS-Membran wird auf einen Glasträger gebondet, auf dessen Rückseite sich eine Goldelektrode befindet. Das zu behandelnde Substrat ist zwischen einer Vakuum-Spannvorrichtung aus Aluminium, die gleichzeitig als Gegenelektrode dient, und dem Stempel angeordnet. Das Plasma wird in den geschlossenen zylindrischen Kavitäten erzeugt, die durch Anpressen zwischen dem Stempel und dem zu behandelnden Substrat entstehen. Dieser Plasmaprozess integriert Oberflächenmodifikation und laterale Strukturierung in einem Prozessschritt [6].

Das endgültige Ziel der Entwicklung ist die Synthetisierung einer Peptid-Bibliothek mit bis zu 10.000 individuellen Verbindungen mit Hilfe eines BioDisc-Synthesizers [7]. Als vorbereitender Schritt für die Peptid-Synthese ist eine strukturierte Aminofunktionalisierung der Polypropylen-Kohlenstoff (PP/C)-BioDisc notwendig, die mit Hilfe der Mikroplasmastempel in einem (N_2+H_2)-Plasma

erfolgt. In einer Machbarkeitsstudie konnte gezeigt werden, dass die aminofunktionalisierten Spots auf der PP/C-Scheibe als Ankerpunkte für eine chemische Peptid-Synthese sehr gut geeignet sind.

Quantenpunkte als integrierte Lichtquelle in photonischen Mikrobioreaktoren [8,9]. Mikrobioreaktoren werden üblicherweise als Kultivierungsplattform zum Screening von Bioprozessen und Wirkstoffen benutzt. Dabei ist häufig die Integration einer online Analytik notwendig. Das vorgestellte Beispiel nutzt eine Absorptionsmessung, die auf einer mehrfachen internen Totalreflexion beruht. Der Mikroreaktor besteht aus einer Reaktionskammer aus PDMS mit einem Volumen von 3,3 μL , die mit Einlass- und Auslass-Reservoirien verbunden ist. In das mikrofluidische System sind folgende optische Komponenten monolithisch integriert: Kanäle zur Führung optischer Fasern, bikonvexe Linsen und totalreflektierende Luftspiegel, die die unterschiedlichen Brechungsindizes von Luft und PDMS ausnutzen und die den optischen Weg verlängern. Licht breitet sich im Reaktor auf einem Zick-Zack-Pfad aus und wird mit einer optischen Faser in ein Mikrospektrometer eingekoppelt. Dieser optische Mikrobioreaktor kann zum Beispiel zur pH-Analyse während einer Zellkultivierung eingesetzt werden.

Eine integrierbare Lichtquelle würde die aufwendige Einkopplung von Licht einer externen Quelle überflüssig machen. Hierzu können beispielsweise Quantenpunkte genutzt werden. Quantenpunkte sind Halbleiter-Nanokristalle. Ihre Emissionswellenlänge ist größenabhängig, sie zeigen starke Emission, eine große Stokes-Verschiebung, ein breites Absorptions- und ein schmales Emissionsspektrum. Mit Quantenpunkten verschiedener Größe erhält man daher eine Lichtquelle für unterschiedliche Emissions-Wellenlängen. Quantenpunkte in einer Sol-Gel-Matrix konnten erfolgreich in das Mikrosystem integriert und für den Nachweis des Cofaktors ABTS benutzt werden.

Antiseptische Oberflächen in Mikrobioreaktoren auf Basis von Silber- und Kupfer-Nanopartikeln [10]. Bei Langzeitkultivierungen in Mikrobioreaktoren ist es wünschenswert, antiseptische Oberflächen in den Reaktor zu integrieren, um ein Zellwachstum an unerwünschten Stellen zu verhindern. Durch Einbringen von grenzflächenaktiven metallischen Nanopartikeln in eine PDMS-Matrix kann ein langfristiger antiseptischer Effekt erreicht werden aufgrund der Tatsache, dass die Volumenphase ein Reservoir darstellt, aus dem Ionen kontinuierlich an die Oberfläche des PDMS diffundieren. Bei ersten Untersuchungen mit Kupfer- und Silber-Nanopartikeln wurde ein antiseptischer - aber kein toxischer - Effekt des Nanopartikel-PDMS-Komposits beobachtet.

Integrierte Herstellung und Beladung von Lipidnanopartikeln als Arzneistoffträger [11,12]. Feste Lipid-Nanopartikel werden sowohl in der Kosmetik wie auch in der Pharmazie eingesetzt. In der Pharmazie dienen sie als Trägersysteme für Wirkstoffe. Feste Lipid-Nanopartikel sind kolloidale Partikel, die aus einem kristallinen Lipid-Kern und einer stabilisierenden Emulgatorhülle bestehen. Für

Anwendungen im Bereich des Wirkstoff- und Formulierungsscreenings sind Untersuchungen mit sehr geringen Stoffmengen wünschenswert, da auf diese Weise sowohl Kosten wie auch Arbeitsaufwand reduziert werden können. Zu diesem Zweck ist die Entwicklung entsprechender Mikroreaktoren erforderlich, wobei hohe Anforderungen hinsichtlich Temperatur- und Druckstabilität, Widerstandsfähigkeit gegenüber Abrasion, chemische Beständigkeit und Biokompatibilität gestellt werden. Daher bietet sich Edelstahl als Strukturwerkstoff an, der mittels Mikrofunkenerosion strukturiert werden kann. Das entwickelte Mikrosystem ist modular aufgebaut, um eine hohe Flexibilität zu gewährleisten. Es besteht aus mehreren übereinander platzierten Mikrokomponenten und erlaubt die Durchführung aller relevanten Prozessschritte: Dispersion, Voremulgierung und Emulgierung. Ausgangsstoffe sind eine lipophile Phase, in der die Wirkstoffkristalle suspendiert sind, und eine wässrige Phase. Beide werden außerhalb des Mikroreaktors präpariert. Ebenso erfolgt die abschließende Kristallisation in einem separaten Mikrosystem. Als Ergebnis erhält man mit dem Wirkstoff beladene Lipid-Nanopartikel. Erste Experimente lieferten bei einer Druckdifferenz von 1500 bar Partikel mit einer Größenverteilung von 60 bis 160 nm.

Nano-Bio-Info-Cogno-Integration und „technische Verbesserung“ des Menschen

Diese Anwendungsbeispiele geben einen Eindruck von dem großen Potential des Zusammenwirkens von Mikrosystemtechnik, Nanotechnologie und Biotechnik. Die Integration weiterer Wissenschaftsbereiche wird vor allem in den USA unter der Bezeichnung NBIC diskutiert. Hierbei liegt der Fokus auf Nano-, Bio- und Informationstechnologie sowie Kognitionswissenschaft (Cognitive Science) (Bild 5). Im Mittelpunkt dieser Diskussion steht die „technische Verbesserung“ des Menschen (Human Enhancement) [13]. Die Unzufriedenheit des Menschen mit sich selbst ist nicht neu. Albert Camus hat 1951 darauf hingewiesen [14]: „Man is the only creature that refuses to be what he is.“

Es lassen sich drei relevante Forschungs- und Entwicklungsbereiche für Human Enhancement erkennen [15]:

– **Therapie**. Beispiele sind: Wiederherstellung der Hörfunktion, Wiederstellung des Sehens, Nachbildung von Organstrukturen, personalisierte Medizin, genetische Impfstoffe.

– **Augmentation**. Beispiele sind: Verbessertes Gedächtnis, weiträumiges Sehen, präventive Medizin.

– **Geplante Evolution**. Beispiele sind: Optimierte Immunabwehr, Erhöhung der Lebensdauer, Regeneration von Knochen durch Selbstorganisation, Mensch-Maschine-Hybrid.

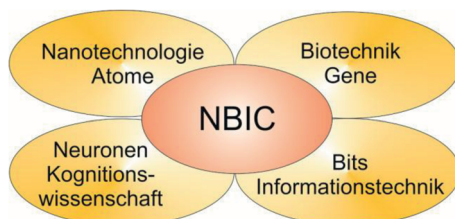


Bild 5. Technologische Konvergenz NBIC (in Anlehnung an [13]).

Obwohl die NBIC-Debatte einen hochgradig visionären Charakter aufweist, zeichnen sich gesellschaftliche Konflikte ab [16]:

„In Bezug auf die *Zukunft der Natur des Menschen* stehen damit neue Entscheidungsmöglichkeiten im Raum, zu denen sich ‚die Gesellschaft‘ eine Meinung nicht nur bilden *darf*, sondern auch bilden *muss*. Beispiele sind die Fragen, wo ethische Aspekte des Verbesserns liegen, wie mögliche Grenzziehungen begründet werden können und wie belastbar diese sind, welche Risiken für die betroffenen Individuen zu beachten sind und wie ein Missbrauch von Verbesserungstechnologien vorbeugend verhindert werden kann, welche Folgen eine ‚technische Verbesserung‘ des Menschen unter Aspekten der Verteilungsgerechtigkeit hat und ob bislang akzeptierte und praktizierte Lebensformen (zum Beispiel das Leben als behinderte Person) abgewertet oder unmöglich gemacht werden.“ (Grunwald 2007, [17] S. 951 f.)

Danksagung

Die im Abschnitt „Anwendungen von Mikro-Nano-Bio-Systemen in den Lebenswissenschaften“ vorgestellten Beispiele wurden im Institut für Mikrotechnik (IMT) der Technischen Universität Braunschweig in Zusammenarbeit mit Partnern in- und außerhalb der TU bearbeitet. Allen beteiligten Mitarbeitern des IMT und der Partnerinstitute sei herzlich gedankt für die hervorragende Zusammenarbeit. Die Arbeiten wurden gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 578 „Vom Gen zum Produkt“ und der Forschergruppe FOR 856 „Mikrosysteme für partikuläre Life-Science-Produkte“, durch die VW-Stiftung im Rahmen des Verbundprojekts „Microstructured Surface Treatment by Atmospheric-Pressure Microplasmas“ und durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Verbundprojektes „Nanomaterialien für Mikrosystem- und Halbleitertechnik“. Der Autor dankt der VW-Stiftung für finanzielle Förderung im Rahmen einer Niedersachsenprofessur.

Literatur

- [1] MOUNIER, E. MEMS 2012: Markets and Applications, 2nd Workshop on Design, Control and Software Implementation for Distributed MEMS, Besançon, Frankreich, 2–3 April 2012, URL: dmems.univ-fcomte.fr/presentations/mounier.pdf (Stand 03.01.2015)
- [2] Mikro-Nano-Integration – Einsatz von Nanotechnologie in der Mikrosystemtechnik, Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech, Band 13, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden, 2011
- [3] RAAB, C., M. SIMKÓ, U. FIEDELER, M. NENTWICH & A. GAZSÓ 2008: Herstellungsverfahren von Nanopartikeln und Nanomaterialien, NanoTrust-Dossier Nr. 006.
- [4] BALCK, A., M. MICHALZIK, L. AL-HALABI, S. DÜBEL & S. BÜTTGENBACH 2011: Design and fabrication of a lab-on-a-chip for point-of-care diagnostics. *Sensors & Transducers* **127**: 102–111.
- [5] AL-HALABI, L., A. BALCK, M. MICHALZIK, D. FRÖDE, S. BÜTTGENBACH, M. HUST, T. SCHIRRMANN & S. DÜBEL 2013: Recombinant antibody fragments allow repeated measurements of C-reactive protein with a quartz crystal microbalance immunosensor, *mAbs* **5**: 140–149.
- [6] LUCAS, N., R. FRANKE, A. HINZE, C.-P. KLAGES, R. FRANK & S. BÜTTGENBACH 2009: Microplasma stamps for the area-selective modification of polymer surfaces. *Plasma Processes and Polymers* **6**: S370-S374.
- [7] Franke, R., A. Hinze, N. Lucas, S. Büttgenbach, C.-P. Klages & R. Frank 2008: A compact disc-sized biochip structured and functionalized by microplasma-based patterned amination as substrate for an automated chemical synthesizer. *Proc. 30th European Peptide Symposium, Helsinki*, S. 484–485.
- [8] VILA-PLANAS, J., E. FERNÁNDEZ-ROSAS, B. IBARLUCEA, S. DEMMING, C. NOGUÉS, J.A. PLAZA, C. DOMÍNGUEZ, S. BÜTTGENBACH & A. LLOBERA 2011: Cell analysis using a multiple internal reflection photonic lab-on-a-chip. *Nature Protocols* **6**: 1642–1655.
- [9] DEMMING, S. 2011: Disposable Lab-on-Chip Systems for Biotechnological Screening, *Berichte aus der Mikro- und Feinwerktechnik, Band 30*, Shaker, Aachen.
- [10] DEMMING, S., A. HAHN, A. EDLICH, E. FRANCO-LARA, R. KRULL, S. BARCIKOWSKI & S. BÜTTGENBACH 2010: Softlithographic, partial integration of surface-active nanoparticles in a PDMS matrix for microfluidic biodevices. *Phys. Status Solidi A* **207**: 898–903.
- [11] RICHTER, C., D. STEGEMANN, A. VIERHELLER, T. GOTHSCHE, J.H. FINKE, A. KWADÉ, C.C. MÜLLER-GOYMANN, A. DIETZEL & S. BÜTTGENBACH 2013: Innovative process chain for the development of 3D metal microsystems. *Microelectronic Engineering* **110**: 392–397.
- [12] FINKE, J.H., S. NIEMANN, C. RICHTER, T. GOTHSCHE, A. KWADÉ, S. BÜTTGENBACH & C.C. MÜLLER-GOYMANN 2014: Multiple orifices in customized microsystem high-pressure

- emulsification: The impact of design and counter pressure on homogenization efficiency. *Chemical Engineering Journal* **248**: 107–121.
- [13] ROCO, M.C. & W.S. BAINBRIDGE (eds.) 2003: *Converging Technologies for Improving Human Performance*, Kluwer, Dordrecht.
- [14] CAMUS, A. 1951: *The Rebel: An Essay on Man in Revolt*, Vintage International, New York.
- [15] CANTON, J. 2004: *Designing the Future – NBIC Technologies and Human Performance Enhancement*. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* **1013**: 186–198.
- [16] COENEN, C. 2008: *Konvergierende Technologien und Wissenschaften. Der Stand der Debatte und politischen Aktivitäten zu »Converging Technologies«*, Hintergrundpapier Nr. 16, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag.
- [17] GRUNWALD, A. 2007: *Orientierungsbedarf, Zukunftswissen und Naturalismus – Das Beispiel der „technischen Verbesserung“ des Menschen*, *DZPhil* **55**: 949–965.