

6. Potenziale einer künftigen Entwicklung der MST in Deutschland

Um den im Kapitel 5 beschriebenen Anforderungen gerecht zu werden, wurde in der empirischen Arbeit auf die drei Säulen der quantitativen und der qualitativen Erhebung sowie auf die Auswertung von Market and Technology Forecast Studies zurückgegriffen. Ziel war es jeweils, Zukunftsfelder der MST im oben definierten Sinne zu identifizieren. Im folgenden werden die Ergebnisse der Erhebung vorgestellt.

6.1. Ableitung der potentiellen Zukunftsfelder

6.1.1. Überblick über die potentiellen Zukunftsfelder

Für die Ermittlung der Zukunftsfelder wurden mit den ausländischen Experteninterviews und der quantitativen Auswertung der Fragebögen zwei grundlegend unterschiedliche **Verfahren** angewandt. Während sich die quantitative Erhebung ausschließlich auf in Deutschland ansässige Unternehmen bzw. Forschungseinrichtungen beschränkte und damit ein Deutschland spezifisches Bild der MST und eine entsprechende Zukunftserwartung widerspiegelt, geben die Experteninterviews globale Trends und Entwicklungen wieder. Aufgrund der relativ geringen Anzahl der im Ausland geführten Experteninterviews wurden diese keiner statistischen Auswertung unterzogen; vielmehr dienten diese dazu, erste fundierte Eindrücke zu den internationalen Technologietrends und den langfristigen Produktstrategien in MST-affinen Bereichen zu gewinnen und in Teilen auch Interpretationsansätze für die Ergebnisse der Fragebogenauswertung zu liefern.

Bedingt durch die globale Streuung der Auslandsinterviews ist eine weitgehende Abdeckung der bedeutendsten Länder der Triade gewährleistet (vergl. Kapitel 5.2). Ausgehend von den Ergebnissen der verschiedenen Erhebungsinstrumente wurden die Daten im Hinblick auf gemeinsame Zukunftsfelder geprüft, wobei das Expertenwissen der Evaluatoren in die Generierung der jeweiligen Zuschnitte eingeflossen ist (vergl. Kapitel 5).

Hierbei zeigte sich, dass die in den qualitativen Erhebungen diskutierten Technologiefelder eine bemerkenswerte Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Fragebogenauswertung aufwiesen. Diese betrafen vor allem die folgenden Technologieoptionen:

- Aufbau- und Verbindungstechnologien
- Biotechnologie
- Integrierte Optik
- die Polymerelektronik/-sensorik/-aktorik
- Nanotechnologien
- Neue Werkstoffe bzw. smart materials
- Mikro- und Nanofluidik
- Funktionale Oberflächen
- Optische Faserkomponenten

Unterschiede gab es in der Bewertung der „Aufbau- und Verbindungstechnik“, die in den Experteninterviews zwar als wichtig eingestuft wurde, der jedoch, im Unterschied zur Auswertung der Fragebögen, **nicht** die höchste Priorität eingeräumt wurde. In den Zuschnitt des Zukunftsfeldes ist deshalb eine expertengestützte quantitative und qualitative Gewichtung eingeflossen. Des Weiteren nehmen die „Mikroelektroniktechnologien“ in der Auswertung der schriftlichen Befragung einen signifikanten Stellenwert ein, welcher aus den ausländischen Experteninterviews nicht hervorgegangen ist. Eine Begründung dafür könnte in der durchaus beabsichtigten Auswahl von Experten mit visionären Sichtweisen und Forschungsorientierung liegen.

Für die Ermittlung der Zukunftsfelder erfolgte die Auswertung der Fragebögen für jede der zur Diskussion stehenden Technologieoptionen anhand von drei Kategorien (vgl. Kapitel 5):

- Anforderungen
- Anwendungen
- Funktionen

Um Interdependenzen und Zusammenhänge zwischen den technologischen Optionen zu berücksichtigen, wurden expertengestützt artverwandte Technologieoptionen zu **Technologieclustern** verschmolzen (vgl. Tab. 6.1a). Unter Berücksichtigung der verfügbaren Informationen über zukünftige Anwendungen und Märkte ließen sich die folgenden 8 Zukunftsfelder belegen:

- Systemintegration
- Optronics
- Life Science
- Mikro-Nano-Interface
- Fluidtronics
- Polytronics
- Micromats
- Agile Fabrication

Des Weiteren ergaben sich in den Experteninterviews Hinweise auf **weitere mögliche Zukunftsfelder**, von denen zwei aufgenommen wurden. Diese Felder konnten anhand ihrer Wachstumspotenziale validiert werden. Dabei handelt es sich um die Felder

- Smart Energy und
- Ubicomp

Tabelle 6.1a: Relevante Technologieoptionen je Zukunftsfeld

Technologieoptionen										
Aufbau- und Verbindungstechniken	↔	↔	↔		↔	↔	↔	↔		↔
Biotechnologien			↔							
Bulk- & Surface Micro-machining		↔			↔			↔		↔
Faseroptik		↔				↔				↔
Integrierte Optik		↔								↔
Mikro- & Nanomanipulationstechniken			↔	↔				↔		
Mikro/Nanofluidik			↔		↔				↔	
Mikroelektroniktechnologien	↔			↔				↔	↔	↔
Mikroreaktionstechniken			↔		↔				↔	
Mikroreplikationsverfahren	↔	↔	↔		↔	↔		↔		
Nanotechnologie			↔	↔		↔	↔	↔	↔	
Neue Werkstoffe	↔		↔	↔		↔	↔	↔	↔	↔
Plasma- & Strahltechnologien								↔		
Polytronik	↔	↔		↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Schichttechnologien	↔	↔	↔	↔		↔		↔	↔	
Selbstorganisation			↔	↔		↔	↔	↔		
Zukunftsfelder	System-integration	Optronics	Life Science	Mikro-Nano-Interface	Fluidtronics	Polytronics	Micromats	Agile Fabrication	Smart Energy	UbiComp

Tabelle 6.1b: *Derzeitige Applikationen in den potenziellen Zukunftsfeldern²⁴*

Anwendungsfeld / Zukunftsfeld	System-integration	Optronics	Life Science	Mikro-Nano-Interface	Fluidtronics	Polytronics	Micromats	Agile Fabrication	Smart Energy	UbiComp
I&K	↗ System-on-Chip	↗ Quanten-Dot-Laser	↗ Implant. Telemetrie	↗ Massenspeicher		↗ ID-Tag	↗ Organ. Display-Mats.			↗ System-on-Chip
Medizintechnik			↗ Minimal-invasive Therapie	↗ Antifibrose-Stents	↗	↗ Artificial Muscle		↗ Harsh Environment	↗ Energie für MST	↗
Telekommunikation	↗ All Optical Chip	↗ Bubble Switch	↗ Home-Monitoring	↗ Quanten-Dot-Laser		↗ Folien-tastatur		↗ Org. Lichtleit-Layer		↗ Smart Clothes
Chemie/Pharma			↗ Lab-on-Chip		↗			↗ Lab-on-Desk		↗
Automation	↗ Autonomous Maintaining	↗ Optical Backbones	↗ High-Throughput Screening					↗		↗
Umwelttechnik			↗ Artificial Nose					↗		↗
Auto&Verkehr	↗ Navigation	↗ Fiber Optical Bus	↗ Klima Monitoring					↗ Harsh Environment		↗
Luft&Raumfahrt	↗ Health Monitoring	↗ Multi-spektrale Detektoren	↗ Health Monitoring	↗ FE-Displays		↗		↗ Harsh Environment		↗

²⁴ Im Rahmen der qualitativen und quantitativen Erhebung wurden der gegenwärtige Stand der verfügbaren bzw. sich in der Entwicklung befindenden Applikationen abgefragt. Diese wurden dann zur Veranschaulichung den jeweiligen Zukunftsfeldern zugewiesen. Damit soll die Tabelle 6.1b lediglich einen Anhaltspunkt für mögliche zukünftige Entwicklungslinien liefern.

Anwendungsfeld / Zukunftsfeld	System- integration	Optronics	Life Science	Mikro-Nano- Interface	Fluidtronics	Polytronics	Micromats	Agile Fabri- cation	Smart Energy	UbiComp
Maschinenbau	☞ Hoch- temperat ur-Häu- sung		☞				☞ MST- Bau- kasten			☞
Energietechnik	☞ Membran e Electrode Assembl y	☞ Graetzel zelle	☞ E-Ma- nage- ment für impl. Systeme	☞ CNT- basierte Kataly- satoren	☞	☞ Folien- batterie	☞ Carbon Nano- tubes	☞	☞	☞ Folien- batterie
Weiße Ware	☞	☞ Mikro- Densito- meter	☞		☞	☞ OLED- Display		☞		☞
Dienstleistungen	☞	☞ Biometrie	☞ Tele-/ Medi- Care		☞	☞	☞ OLED- Display	☞		☞
Braune Ware	☞	☞	☞ Körper- Fettwaag e						☞ Portable Fuelcell	☞
Haustechnik/ Sicherheit	☞ Feature Control- ler	☞ Biometri. Identifi- zierung	☞ Biometri. Identifi- zierung		☞	☞ Flächen- leuchten	☞ Elektro- chromes Bauglas	☞		☞
Lebensmittel- technologien	☞ Sustai- nable Sensors	☞	☞	☞ Mikro- Spektros- kopie	☞ Mikro- Reak- tionssyst eme	☞	☞ Smart- Tags	☞		☞

6.1.2. Abgleich mit dem Kriterienkatalog und Aufbau des Kapitels

Eine expertengestützte Gewichtung der 10 ermittelten Zukunftsfelder anhand der in Kapitel 5.2 dargelegten Kriterien ist in Tabelle 6.2 dargestellt.

Tabelle 6.2: Erfüllung der Kriterien durch die potenziellen Zukunftsfelder

Zukunftsfelder	Marktpotenziale	FuE-Bedarf	Standortbezug	KMU-Relevanz	Fertigbarkeit	Gesellschaftliche Kriterien
Systemintegration	+++	○	++	++	++	○
Optronics	++	++	○	○	+	++
Life Science	+++	+++	++	○	○	+++
Mikro-Nano-Interface	+	+++	+	+	+	+
Fluidtronics	++	++	++	+	+	++
Polytronik	+	+++	+	+	○	+
Micromats	k.A.	+++	+	○	○	++
Smart Energy	+	++	+	+	+	+++
Agile Fabrication	+	+	+	++	++	+
UbiComp	○	+++	○	++	+	○

+++ sehr gut erfüllt

++ gut erfüllt

+ teilweise erfüllt

○ wenig / nicht erfüllt

Mit Ausnahme des Feldes UbiComp lassen alle potentiellen Zukunftsfelder ein beträchtliches **Marktpotenzial** erwarten. Nach vergleichender Auswertung einer großen Zahl verfügbarer Marktstudien²⁵ kann von einem gesamten Weltmarktvolumen aller 10 Zukunftsfelder von über US\$ 200 Mrd. ausgegangen werden, wobei lediglich solche Anwendungen und Produkte berücksichtigt wurden, über die Marktstudien verfügbar und im Rahmen dieser Untersuchung zugänglich waren.

Jedes der Zukunftsfelder weist darüber hinaus, wie oben gezeigt, einen **Anwendungsbezug** in einer Vielzahl von Branchen auf. Anhand einer modifizierten BCG-Matrix,²⁶ die die derzeit prognostizierten Umsatzzuwächse abbildet, wurden die 10 Zukunftsfelder in Bezug zu den Kriterien Branchenvielfalt, Wachstumsrate und prognostiziertes Marktvolumen gegenübergestellt, um eine Aussage über das Markt- und Anwendungspotenzial der Felder im Vergleich zu erhalten. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 6.1 und 6.2 zusammengefasst. Insgesamt ergibt sich danach zwischen 2000 und 2005 eine Steigerung des Marktvolumens um 88%, was einem durchschnittlichen jährlichen Zuwachs von etwa 15% entspricht.

²⁵ u.a.: NEXUS Task Force, Venture Development Corporation (VDC), System Planning Corporation (SPC), Intechno Consulting, Roger Grace Association, ElectroniCast, In-Stat Group, IDC, Business Communications Co., WTEC Panel Reports

²⁶ BCG – Boston Consulting Group

Abbildung 6.1: Vergleich der Zukunftsfelder nach Branchenvielfalt, Wachstumsraten und Marktgröße im Jahr 2000

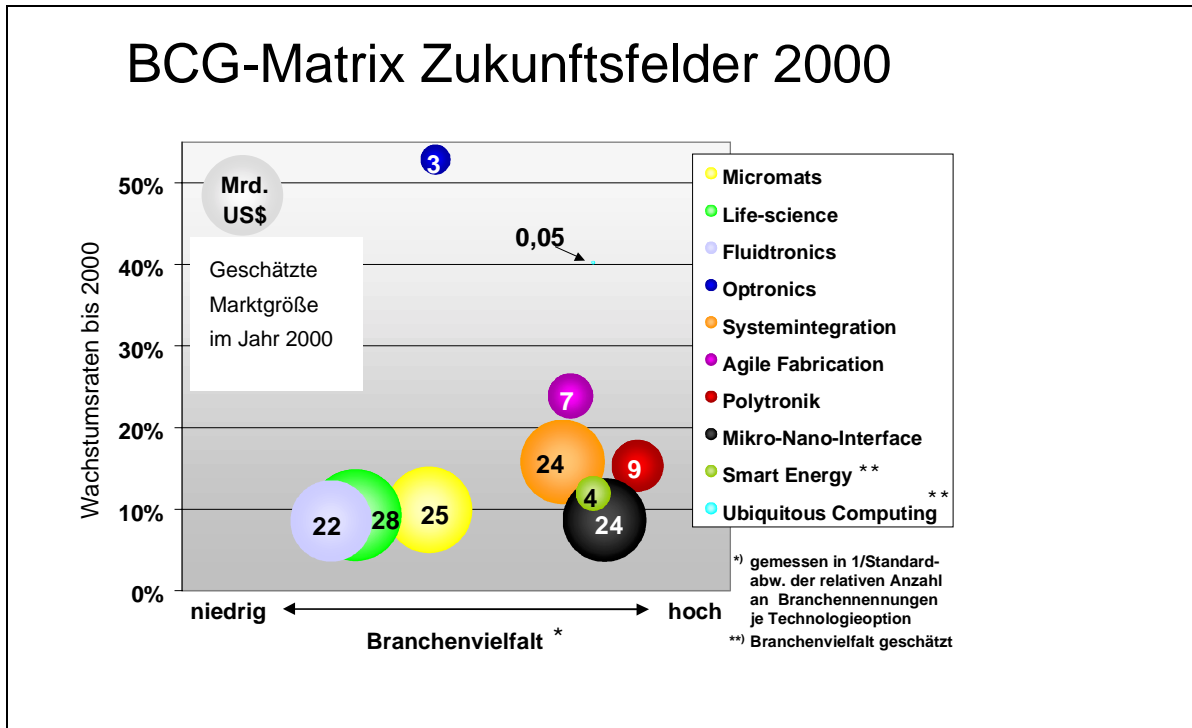
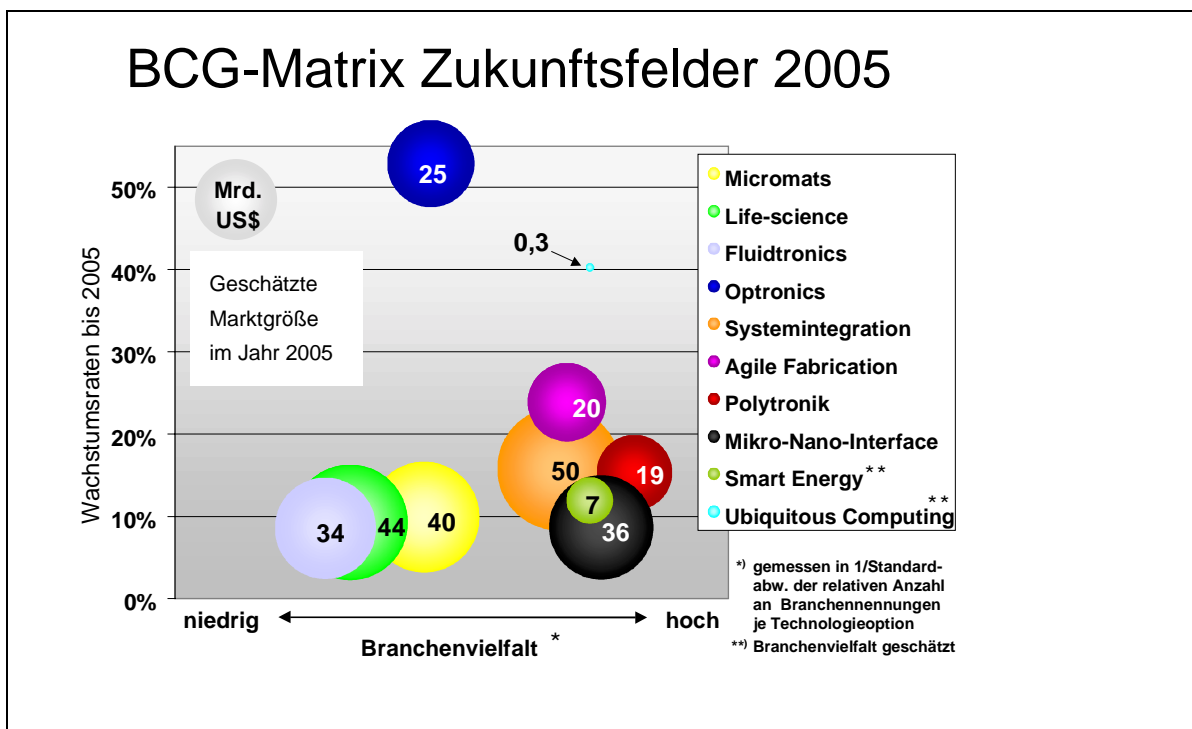


Abbildung 6.2: Vergleich der Zukunftsfelder nach Branchenvielfalt, Wachstumsraten und Marktgröße im Jahr 2005



In den folgenden Kapiteln werden die oben abgeleiteten Zukunftsfelder vorgestellt. Dies bezieht sich zunächst im Kap. 6.2 auf all diejenigen Zukunftsfelder, die nicht vertiefend analysiert wurden. Die Darstellung konzentriert sich hier allein auf eine Kurzcharakterisierung und die Beschreibung der in der ersten Untersuchungsstufe erkennbar gewordenen Innovationsbarrieren.

Um einen vertiefenden Einblick in die Potenziale ausgewählter Zukunftsfelder zu gewinnen, wurden 4 Felder intensiver untersucht. Es muss an dieser Stelle betont werden, dass die getroffene Auswahl der vier potentiellen Zukunftsfelder in keiner Hinsicht ein Präjudiz für Folgebetrachtungen darstellt.

Während die Adäquanz aller ausgewählten Felder über den im Verlauf der Studie aufgestellten Kriterienkatalog des Zukunftsfeldes gesichert wird, soll die Repräsentanz der Auswahl der 4 Zukunftsfelder durch Spiegelung an der Vielfalt der zukünftigen Anwendungen der MST sichergestellt werden. Repräsentativität ist dann gegeben, wenn sowohl die technologieübergreifende Querschnittsfunktion als auch die branchenübergreifende Anwendungsorientierung und die Verzahnung zwischen verschiedenen potentiellen Zukunftsfeldern der MST durch die ausgewählten Felder abgedeckt wird. Gerade der Aspekt der Repräsentativität hat bei der Entscheidung der zu vertiefenden Felder eine zentrale Rolle gespielt, da es ja gerade nicht das Ziel der Auswahl ist, andere Felder explizit auszugrenzen. Entsprechend diesen Grundsätzen wurden die folgenden potentiellen Zukunftsfelder für die vertiefende Analyse ausgewählt:

Agile Fabrication (vgl. Kapitel 6.3). Dieses potentielle Zukunftsfeld deckt die Themen MST als Querschnittstechnologie, Standards und Schnittstellenbedarf ab. Die Produktion von MST wie auch die damit einhergehenden Probleme der Austauschstandards und der Werkzeugkastenidee sollen im Rahmen dieses potentiellen Zukunftsfeldes untersucht werden.

Smart Energy (vgl. Kapitel 6.4) als exemplarisches Anwendungsfeld der Verflechtung der Mikro- und Makrowelt in einem zukunftssträchtigen Anwendungsbereich. Das Feld umfasst sowohl die Energieversorgung von MST-Anwendungen als aber auch die Nutzung der MST für die Prozessbeeinflussung in der Energieversorgung.

Mikro-Nano-Interface - MNI (vgl. Kapitel 6.5) als forschungsintensives Hybridfeld, das auf die Verknüpfung von Mikro- und Nanowelt abzielt. Ziel ist es hierbei vor allem Anwendungen aus der Verknüpfung von Mikro- und Nanoeffekten zu identifizieren.

Life Science und Fluidtronics (vgl. Kapitel 6.6) werden in dieser Darstellung als ein gemeinsam zu behandelndes Zukunftsfeld betrachtet, das besonders anwendungsorientiert ist. Das Feld umfasst die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der MST sowohl in Applikationen (z.B. Insulinpumpe) als auch die Nutzung der MST zur Herstellung von Pharmazeutika.

Da die Systemintegration eine zentrale Rolle in allen Zukunftsfeldern spielt, wurde entsprechend bei den Vertiefungen darauf geachtet, dass systemintegrationsspezifische Aspekte in der Betrachtung berücksichtigt wurden. Im Anschluss an den Überblick über die übrigen Felder werden die Potenziale dieser vier Zukunftsfelder ausführlich vorgestellt.

6.2. Potentielle Zukunftsfelder der MST– Ein Überblick über die nicht vertieft analysierten Felder

Im folgenden sollen die Felder dargelegt werden, die nicht in die vertiefende Analyse im Rahmen der zweiten Phase der ex-ante Evaluation eingebunden wurden

6.2.1. Systemintegration

6.2.1.1. Kurzbeschreibung und Bedeutung

Die Systemintegration umfasst alle Aspekte, die

- der Herstellung elektrischer und anderer Schnittstellen zwischen einzelnen Systemkomponenten sowie zwischen dem System und der Umwelt (Leiterplatte, Umgebung etc.),
- der Entkopplung einzelner Systemelemente auf verschiedenen physikalischen Ebenen,
- der Vermeidung bzw. Verringerung von störenden inneren Einflüssen (thermomechanischen Spannungen, Wärme etc.) und
- dem Schutz des Systems vor störenden Umgebungseinflüssen (z. B. elektrische, mechanische, thermische, Strahlung etc.) dienen.²⁷

Die Systemintegrationstechnologien für Mikrosysteme bauen zum großen Teil auf den für die Mikroelektronik entwickelten Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT), -materialien und Designmethoden auf, stellen jedoch zusätzliche Anforderungen an die AVT insbesondere im Hinblick auf:

- den Schutz von der Umgebung ausgesetzten aktiven Funktionselementen für Sensorik und Aktuatorik (z. B. bei aggressiven Arbeitsmedien),
- die Notwendigkeit zur Realisierung von komplexen 3-D-Strukturen,

²⁷ in Anlehnung an N.N., Biosensors and BioMEMS, University of Cincinnati, ECES 698

- die Berücksichtigung einer höheren Materialvielfalt, bedingt durch die größere Funktionsvielfalt von Mikrosystemen über eine reine elektrische Funktion hinaus.²⁸

Das Zukunftsfeld ist auf nahezu allen Ebenen (Chip, Häusung, Leiterplatte, ..., System) von einer zunehmenden Miniaturisierung und einer steigenden Integration geprägt. Durch stetig wachsende Anforderungen der Systeme, z. B. an die Zahl der Gehäusepins, die abzuführenden Verlustleistungen oder die zu übertragenden Taktfrequenzen, werden ständig neue Konzepte auf allen Ebenen benötigt. Technologische Optionen für die Systemintegration ergeben sich aus alternativen Designlösungen (z. B. Chip-Scale-Package oder Flip-Chip), der Materialauswahl (für Lote, Underfills, Substrate, Gehäuse etc.), aus unterschiedlichen Integrationsgraden (System-on-Chip, Single- oder Multichipmodule, integrierte passive Strukturen etc.) sowie aus den verfügbaren Fertigungstechnologien (z. B. Löten, Bonden, Kleben, Laserschweißen). Ferner stellen Umweltaspekte wie bleifreie Lote und halogenfreie Substrate und Prozesschemikalien die Systemintegration vor neue Herausforderungen²⁹. Darüber hinaus erfordern neue elektronische Materialien (z. B. halb-/leitenden Polymere) mittel- bis langfristig zum Teil völlig neue Konzepte.

Im Gegensatz zur Mikroelektronik, wo eine weitgehende Standardisierung der Designs, Materialien und Fertigungsverfahren vorliegt, bedürfen die oben genannten zusätzlichen Anforderungen der MST an die Systemintegration vielfach komplexer und größtenteils produktspezifischer AVT-Lösungen. Die AVT ist oftmals ein bedeutenden limitierender Faktor für die Gesamtgröße des Mikrosystems.

Fertigungskonzepte für die Systemintegration von Mikrosystemen, optoelektronischen Komponenten und Systemen sind bisher kaum standardisiert. Höherer Durchsatz, stärkere Miniaturisierung, thermisch stabile und mechanisch reproduzierbare Lage der Funktionselemente (Faser, Spiegel etc.) und Zuverlässigkeit sowie Integration von elektrischen und optischen Komponenten in einem Gehäuse sind dabei zentrale Themen³⁰.

Für den Einsatz in rauen Umgebungen wie z. B. im menschlichen Organismus oder in aggressiven Medien werden spezielle Materialien für das Gehäuse und zum Schutz der aktiven Sensorik- oder Aktuatorikamente bzw. der Umgebung (Biokompatibilität)

²⁸ T.R. Hsu, MEMS Demand New Package Designs, Semiconductor International, April 2001

²⁹ National Electronics Manufacturing Initiative's Roadmap (NEMI) 2000

³⁰ E. Schumann and D. Tracy (SEMI), Equipment and Materials Market Briefing, Präsentation auf der Semicon Europa 2001

benötigt. Auch hier fehlt es noch an zuverlässigen Lösungen und an notwendigen Standards. Mehr als 80 % der Kosten eines Mikrosystems werden durch die Systemintegration bestimmt ³¹.

Die Nutzung von Standard-Mikroelektronik-Systemintegrationstechnologien bietet Kostenvorteile, ist aber in ihrer Anwendung für die MST aufgrund mangelnder Funktionalität beschränkt. Ein besseres Verständnis der Einflussfaktoren für die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Mikrosystemen, die zum großen Teil durch die AVT bestimmt wird, ist darüber hinaus gefragt.

Die Massenfertigung wird zunehmend von neuen Produkten und Anwendungen wie Mobiltelefonen, Bluetooth-Geräten, der Optoelektronik und der Annäherung von Automobil- und Unterhaltungselektronik getrieben. Insbesondere der steigende Bedarf bei passiven Bauelementen (einschließlich integrierter passiver Bauelemente), High-Density-Interconnects (HDI) sowie optoelektronischen und Faserkomponenten wird die Fertigungskapazitäten unter Druck setzen. Die Integration von disruptiven³² Technologien für die MST und die Optoelektronik wird zu komplexeren Fertigungs- und Testprozessen führen ³³.

6.2.1.2. Innovationsbarrieren

Der Mangel an AVT-Standards und Design-Methodiken für Mikrosysteme begründet vielfach Nachbesserungen für nicht in vollem Umfang funktionsgerechte Häusungen von Mikrosystemen und damit zum Teil erhebliche Kostensteigerungen.

Abgesehen von bestimmten Typen von Druck- und Massenträgheitssensoren handelt es sich bei den meisten Mikrosystemen um kundenspezifische Lösungen. Zukünftig ist es erforderlich, dass weltweite Standards für die Entwicklung von Basiskomponenten wie Sensoren, Aktuatoren und Mikrofluidiken adaptiert werden, um die Kosten für die AVT zu reduzieren.³⁴

³¹ T.P. Glenn and S. Webster, Amkor Technology, Designing MEMS into Systems: packaging Issue, 2000

³² Hier im Sinne der Befähigung, mit diesen nicht traditionellen Technologien in eher tradierte Anwendungsumgebungeneinzudringen (Clayton Christensen)

³³ National Electronics Manufacturing Initiative's Roadmap (NEMI) 2000

³⁴ T.R. Hsu, MEMS Demand New Package Designs, Semiconductor International, April 2001

Weitere Erfordernisse sind:

- neue Bonding- und Mikromontagetechniken
- neue Teststrategien und –methoden
- effektive Design-Methoden für die Fertigung und Montage der Schnittstellen zwischen der Mikro- und Mesoebene in einem Mikrosystem.

Weitere Barrieren für die Entwicklung von Systemintegrationstechnologien für die MST sind:

- Mangel an Informationen und Standards zu Materialien, Designmethoden, Herstellungs-, Montage- und Testprozessen,
- Engpass an Ingenieuren mit interdisziplinärem Wissen und Erfahrung,
- mangelnder Informations- und Erfahrungsaustausch in der großen Menge von Konferenzen und Workshops,

6.2.2. Optronics

6.2.2.1. Kurzbeschreibung und Bedeutung

Den Schwerpunkt des Zukunftsfeldes bilden miniaturisierte optische bzw. optoelektronische Komponenten und Subsysteme mit einer hohen funktionalen Integration. Integrierte Elemente können optische Elemente (Linsen, Spiegel, Gitter), optische Lichtwege (planare Wellenleiter) und Kopplungsmodule, aktive und passive optoelektronische Komponenten (Laser-/Fotodioden) oder elektronische Schaltkreise sein.

Die zunehmende Nutzung optischer Technologien insbesondere für die Informationsübertragung und -verarbeitung erfordert die Miniaturisierung und Integration von den heute dominierenden verschiedenartigen Technologien (Elektronik, Optoelektronik, Glasfaser, diskrete optische Elemente). Zentrale Themen sind geeignete Substratmaterialien für die Integration von optischen und elektronischen Funktionen auf einem Chip (Hybridintegration oder monolithisch integriert) sowie die Substitution von heute noch rein elektronischen Funktionen (Verstärkung, Ein- und Auskopplung von Signalen) durch optische Komponenten.

Bei den elektronischen Substratmaterialien konkurrieren auf Silizium basierende Technologien mit den die Optoelektronik dominierenden III-V-Halbleitern wie Galliumarsenid (GaAs), Indiumphosphid (InP) oder Lithiumniobat (LN) mit ihren jeweils spezifischen Vor- und Nachteilen wie Preis, Prozessreife, HF-Tauglichkeit etc. um die Vorherrschaft. Auf Materialseite gibt es ferner Bemühungen, optoelektronische Komponenten (z. B. Laser) auf Basis von

LEPs (light emitting polymers) zu entwickeln³⁵. Weitere Kernfragen sind die rein optische Verarbeitung bzw. Vermittlung von optischen Informationen. Dafür kommen faseroptische Komponenten, dünne Schichten, mikrooptische Komponenten (passive Strukturen z.B. in Glas, Polymeren oder Silizium) sowie MST-Komponenten wie mikromechanische Spiegelarrays als alternative Technologien in Betracht. Effiziente Fertigungsprozesse sind nur für Teilbereiche vorhanden und lassen auch hier einen deutlichen Entwicklungsbedarf erkennen.

Wesentliche Anwendungsbereiche für das Feld Optronics sind:

- optische Telekommunikation,
- optische Sensorik und elektronische Bildverarbeitung (Automobil, Luft- und Raumfahrt, Militär, Messgeräte/-instrumentenbau, Automation, Medizintechnik),
- Bioanalytik und –sensorik (Biotechnologie/Medizin, Umwelttechnik) und
- Displays.

Das Feld Optronics zeichnet sich durch eine Vielzahl divergenter Technologien und Optionen aus, die zur Zeit kaum eindeutige Aussagen zu zukünftigen Entwicklungstendenzen erlauben.

Klar dominiert wird das Feld Optronics durch Anwendungen in der optischen Telekommunikation, primär getrieben durch Multimedia-Anwendungen und das Internet. Hier ist ein stark zunehmender Bedarf an Übertragungskapazitäten (derzeit um den Faktor 2 p.a.)³⁶ zu verzeichnen, der nur auf optischem Wege gedeckt werden kann. Beispiele für Anwendungen im Bereich Optronics in den ausgewählten Branchen sind

35 Stanford University, McGehee Group

36 Lucent Technologies Deutschland

Tabelle 6.3: Anwendungsbeispiele für Optronics

Branche	MST-affine Anwendungsbeispiele
Telekommunikation	Optische Schalter, optische Add-/Drop-Multiplexer, optische Cross-connects, optische Regeneratoren, integrierte elektro-optischen Komponenten (Transmitter, Receiver, Multiplexer etc.)
Automobil	Bildsensoren für fahrerunterstützende Systeme
Informationstechnologie	bildprojizierende Laserdisplays, videofähige Handys, Laser für DVD-Player, integrierte optische Scanner für Displays, Drucker und Barcodeleser
Automation und Inspektion	Bildsensoren für Qualitätskontrolle, Spektroskopie
Medizintechnik	bildgebende Sensoren

6.2.2.2. Innovationsbarrieren

Als Innovationsbarriere im Zukunftsfeld Optronics können die Vielzahl alternativer Technologiekonzepte angesehen werden, was zu einem weltweit hohen Forschungs- und Entwicklungsaufwand für Parallelentwicklungen führt.³⁷

Ferner fehlen in weiten Teilen Standardlösungen für Fertigungs- und Assemblyprozesse, die zur Kostensenkung und damit steigenden Verbreitung von Anwendungen im Zukunftsfeld Optronics beitragen würden.

Als Barriere wirksam wird ebenfalls das enorme und schwer kalkulierbare finanzielle Risiko, was mit Investitionen in neu zu installierende oder auszubauende Netze verbunden ist.

³⁷ Quelle: Experteninterviews

6.2.3. Polytronics

6.2.3.1. Kurzbeschreibung und Bedeutung

Polytronics umfasst Fertigungsprozesse und Anwendungen von verschiedenen Polymermaterialien mit hoher MST-Relevanz. Die verwendeten Polymermaterialien lassen sich grob in drei Gruppen einteilen:

- Elektrisch isolierende Polymere
- Intrinsisch leitende oder halbleitende Polymere
- Gefüllte Polymere (Füllstoffe: Metalle, Halbleiter, Isolatoren, Nanopartikel)

Insbesondere die intrinsisch leitenden Polymere haben, durch die Vergabe des Nobelpreises im Jahr 2000 an Heeger, MacDiarmid und Shirakawa, internationales Aufsehen erregt. Eng verbunden damit war die Entdeckung der Elektrolumineszenz durch die Arbeitsgruppe von Friend und Siringhaus an der Cambridge University, die nach 10 Jahren zu den ersten kommerziellen Produkten (Displays) führten.

Die Technologien zur Polymerverarbeitung sind vielfältig und zum größten Teil unabhängig von der Mikrosystemtechnik entstanden und weichen - aufgrund der unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften von Polymeren und Silizium – z.T. deutlich von der Standardsiliziumtechnik ab. In Abhängigkeit vom Polymermaterial und der Fabrikationstechnik lassen sich Dünnschichtverfahren (z.B. Spincoaten) und Bulktechnologien (z.B. Spritzgießen) unterscheiden. Wichtige Technologien der Polytronics sind u.a.:

- Laminieren
- Spritzgießen
- Drucken
- Heißpressen
- Dispensen
- Spincoaten
- Lithographie (in Anlehnung zur Standardsiliziumtechnik)
- Nanoimprint

Die Technologien sind in Bezug auf Maßtreue, Durchsatz und Miniaturisierung optimierbar. Insbesondere die Fabrikationstechniken für leitende und halbleitende Polymere sind noch nicht standardisiert.

Der Markt für Polytronics ist vielschichtig und findet in zahlreichen Branchen Eingang. Insbesondere der geringe Preis im Vergleich zu anderen Materialien und die – zumindest teilweise – kostengünstige Verarbeitung, die nicht unbedingt Reinraumbedingungen benötigt, sind treibende Kräfte für den zunehmenden Einsatz von Polymermaterialien. Folgende MST-affine Produkte und Produktgruppen sind davon betroffen:

- Mikrofluidiksysteme für die Anwendung in der Pharmazie und Biotechnologie (z.B. Mikrotiterplatten)
- Medizinische Wegwerfkomponenten (Pumpen, Kanülen u.ä.)
- Displays auf LEP (Light Emitting Polymer)-Basis
- Elektronische und sensorische Komponenten auf der Basis von (halb-) leitenden Polymeren
- Smart Cards
- Gehäuse und Verkapselungen für elektronische und MST-Komponenten
- Leiterplatten
- Materialien für die Aufbau- und Verbindungstechnik (Polymerkleber, glob tops)
- Polymerwellenleiter
- Polymerbatterien

Insgesamt war in den vergangenen Jahren – trotz verbesserungswürdiger Fabrikationstechnologien - die Substitution anderer Werkstoffe (z.B. Silizium, Glas) durch Polymere bei MST-affinen Produkten zu beobachten. Das gilt insbesondere für preiskritische MST-Produkte, die vorwiegend in Bereichen mit relativ niedrigen Anforderungen an die Betriebssicherheit eingesetzt werden.

Weitere wichtige Applikationen sind disposables auf der Basis von Kunststoff wie Injektionssysteme, Katheter und Thermometer u.a..

Zahlreiche Applikationen im Bereich der Mikrotiterplatten und des High Throughput Screenings können für viele Applikationen - angefangen von der Pharmaforschung über die Point-of-Care-Diagnostik, über medizinische Analysegeräte bis hin zur Landwirtschaft – eingesetzt werden. Nicht alle Produkte basieren dabei auf Polymeren. Trotzdem kann – aufgrund des Kostendrucks in diesem Bereich – von einer erheblichen Zunahme der Bedeutung der Polytronics ausgegangen werden. Der Markt für Mikrotiterplatten betrug im Jahr 2000 etwa US\$ 226 Millionen und soll mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate (average annual growth rate - AAGR) von 18,9% auf US\$ 535,8 Millionen im Jahr

2005 steigen ³⁸. Der Markt für Mikrofluidiksysteme soll mit einer mittleren jährlichen Wachstumsrate von 45,2% von US\$ 34 Millionen im Jahr 2000 auf etwa US\$ 220 Millionen im Jahr 2005 erheblich wachsen. Dabei wird davon ausgegangen, dass in der Zukunft neue, integrierte MST-Komponenten, die auf der Kombinationen aus Mikrotiterplatten und Mikrofluidik beruhen, am Markt platziert werden können.

Die Polytronics wurden von vielen internationalen Experten als wichtiges Zukunftsfeld eingeschätzt. Zahlreiche Experteninterviews spiegeln das deutlich wider. Man erhofft sich insbesondere durch die vergleichsweise kostengünstigen Ausgangsmaterialien und Fabrikationstechniken preisgünstige Wegwerfprodukte für eine Massenfabrikation.

6.2.3.2. Innovationsbarrieren

Technologische Innovationsbarrieren liegen bei den leitenden und halbleitenden Polymeren in dem Alterungsverhalten, der Lebensdauer und Langzeitstabilität. Für die Umsetzung in elektronische Produkte sind die Stromleitungsmechanismen bisher nur unzureichend verstanden. Ebenso sind Fragen der Aufbau- und Verbindungstechnik inklusive der Kontaktierung für reine Polymerbauelemente bisher nur unzureichend gelöst. Der mögliche Temperaturbereich verschiedenster Polytronik-Produkte liegt – aufgrund des verwendeten Materials - deutlich unterhalb des MIL-Standards, der in einigen relevanten Anwendungsbereichen als Quasi-standard genutzt wird. Dies gilt bspw. für die Nutzung in Automobilen.

³⁸ Business Communicatios Co., Inc, RB-148 The Surging Microarray Biochip Business, Business Communicatios Co., Inc, 25 Van Zant Street, Norwalk, CT 06855, 2001

6.2.4. Micromats

6.2.4.1. Kurzbeschreibung und Bedeutung

Smart Materials passen sich mit Unterstützung integrierter Sensoren, Aktoren und Regelungstechnik selbständig an die Umwelt an. Smart Materials können elektrische, magnetische, Wärme- bzw. Lichtenergie direkt in mechanische Energie und umgekehrt umwandeln. Als Smart Materials finden metallische, keramische, polymere oder Verbundwerkstoffe Verwendung.

Die Entwicklung von intelligenten Materialien, die sich selbständig an ihre Umwelt anpassen, schafft sowohl mikro- als auch makro-ökonomische Nutzenpotenziale: Auf einer makro-ökonomischen Ebene ermöglichen Smart Materials u.a. eine Reduzierung des Treibstoffverbrauchs sowie die Lärmeindämmung. Die Bedeutung

dieses Zukunftsfeldes für Entwicklungspotenziale in der Mikrosystemtechnik liegt am hohen Maß der Verflechtung mit anderen Zukunftsfeldern.

Ein Großteil der Smart Material Technologie basiert auf bekannten Werkstofftechnologien. Die Entwicklung „intelligenter“ Materialien profitiert dabei von Ergebnissen der allgemeinen Materialforschung. Die technischen Herausforderungen für Smart Materials bestehen im Design von applikationsspezifischen Materialien sowie der Entwicklung zuverlässiger und kostengünstiger Produktionsprozesse. Nachfolgend werden einige Aktuatoren und Sensoren aus dem Bereich der Smart Materials aufgelistet:

Aktuatoren

Formgedächtnis-Legierungen

Piezoelektrische Keramiken

Magnetostriktive Werkstoffe

Elektro- und magnetorheologische Flüssigkeiten

Sensoren

Glasfaser

Piezoelektrische Werkstoffe

Produktanwendungen finden sich u.a. in der Verkehrstechnik, der Luft- und Raumfahrtindustrie, dem Maschinenbau, der Mikroelektronik und der Medizintechnik. Hierzu gehören folgende Applikationen:

- die aktive Lärmreduktion im Pkw-Innenraum durch verteilte Sensorik und Aktuatorik in den schwingenden Hautfeldern,
- der adaptive Satelliten-Leichtbauspiegel mit aktiver Formkontrolle durch Einsatz von piezokeramischen Fasern und Folien,
- die adaptive Schwingungs- / Körperschalldämpfung am Drehgestell von Hochgeschwindigkeits-Schienefahrzeugen durch Piezo-Hochlast-Aktorsysteme,
- die Spiegeloptik von Halbleiterlithographie-Anlagen mit höchster Präzision im Nanometerbereich durch adaptronische Spiegelhalterungen sowie adaptronisch geregelte multifunktionale Spiegel und
- die Herstellung von „künstlichen Muskeln“ auf Basis elektro-aktiver Polymere mit Einsatzmöglichkeiten u.a. in der Raumfahrtindustrie.

6.2.4.2. Innovationsbarrieren

Eine entscheidende Innovationsbarriere bilden lange Diffusionszeiten von Ergebnissen der Materialforschung in die Anwendung und den daraus abzuleitenden wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Risiken. Diese Situation stellt sich insbesondere bei kostenintensiven Materialentwicklungen für kleine Mengen mit entsprechend ungünstigen Auswirkungen auf die zu erwartende Rentabilität dar. Die Multidisziplinarität der Aufgabenstellung im Feld Smart Materials erfordert entsprechend umfangreiche Fachkompetenz des FuE-Personals.

6.2.5. UbiComp

6.2.5.1. Kurzbeschreibung und Bedeutung

Dieses Feld umfasst nach Mark Weisers Definition³⁹ Produkte und Methoden, die einen mobilen, ortsunabhängigen Zugriff mit Hilfe einer vernetzten Computerhardware⁴⁰ auf einen stets verfügbaren Content durch einen Nutzer oder eine Nutzergruppe erlauben. Dieser Zugriff soll dabei durch den Nutzer nicht von einer abgesetzten, artifiziellen Basis sondern vielmehr mit Hilfe einer in die natürliche Umgebung des Nutzers vollständig integrierten („embedded“) Computerhardware als „invisible computing“ erfolgen können. Dieser Zugriff soll so erfolgen, dass die Anwender nicht herum laufen müssen „wie Lastesel, vollbeladen mit Informationstechnik. Aber wir [sie] sollten im Sattel sein und nicht darunter“.⁴¹

Es war bereits 1988 Mark Weisers⁴² Vision vom Ubiquitous Computing (UbiComp), die eine unmerkliche und unbemerkte Allgegenwart von Informationstechnologien im täglichen Leben, als wahrhaft ubiquitäre Technologie, beschrieb. Es gilt als Konsens, dass Informationstechnologien erst dann ubiquitär werden (können), wenn ihre Bindung an die jetzt bekannten Standardrechner wie PCs und Notebooks überwunden wird und einer Einbettung in reale Umgebungen und Abläufe weicht. Das muss in einem solchen Maße erfolgen, dass diese Ausrüstung des „digitalen Road Warriors“ nach Meinung von N. Negroponte (MIT) ⁴³ nicht mehr „gerade gut genug ist, ihn ständig zu ärgern ohne ihm wirklich zu helfen“.

Computer, die mit der alltäglichen Umgebungen verschmelzen und den PC heutigen Zuschnitts ablösen, werden seit Anfang der 90er Jahre diskutiert. Die besten Technologien sind danach jene, die in den Hintergrund treten und mit den Abläufen, die sie unterstützen, für den Anwender unsichtbar, verschmelzen. Solche Informationstechnologien werden diesem Anspruch dort gerecht, wo sie für den Anwender unsichtbar in Haushaltsgeräten, Steuerungen oder Leitsystemen wirken.⁴⁴

39 "Ubiquitous Computing - is fundamentally characterized by the connection of things in the world with computation", in: Weiser, Mark & Brown, John Sely. "Designing Calm Technology", PowerGrid Journal, July 1996

40 Weiser, Mark, Nomadic Issues in Ubiquitous Computing, Nomadic '96 – The Nomadic Computing & Communications Conference, San Jose, California, March 13-15, 1996, Fairmont Hotel

41 We walk around like pack horses saddled with information appliances. We should be in the saddle, not under it. in: Negroponte, Nicholas, Neil Gershenfeld, WIRED, Ventures Ltd. Iss. 3, 12. Dezember 1995

42 Weiser, Mark, "The Computer for the 21st Century," Scientific American, Sept. 1991, 94-104

43 Negroponte, Nicholas, Neil Gershenfeld, Wearable Computing, WIRED, Ventures Ltd. Iss. 3, 12. Dezember 1995

44 Norman, D. A., The design of everyday things. New York: Doubleday, 1990

An die Stelle der aktuellen PC-Generationen sollen verstärkt anwendungsspezifische Geräte treten, sog. Information Appliances, die in der Lage sind, Information untereinander und mit dem Nutzer auszutauschen. Als Geräte, die ausschließlich für bestimmte Anwendungen entworfen wurden, fügen sich diese Information Appliances natürlicher in Abläufe ein als Standardrechner. Mit der Fähigkeit, Information untereinander austauschen zu können, leisten Information Appliances gleichzeitig durch ihre Vernetzung eine dezentrale informationstechnische Unterstützung. Der Weg zu diesen vernetzten Information Appliances führt zum einen über „persönliche Technologien“ und zum anderen über eine informationstechnisch erschlossene Infrastruktur, eine Informationsumgebung. Neue persönliche Technologien stehen vor allem für eine neue Qualität der Portabilität von Informationstechnologien, um einen ubiquitären Zugriff auf Informationsdienstleistungen zu erreichen; **ubiquitär** steht hier für die Möglichkeit, diese Technologien überall mitführen können, die Informationsumgebungen steht für den Ansatz, Informationstechnologien in eine reale räumliche Umgebung einzubetten; hier steht **ubiquitär** für eine überall vorhandene Informationstechnologie.

Dieser Trend zum „alles, immer, überall“ wird in zunehmenden Maße dominant. Das Internet wird mobil zugreifbar, die erste Generation der persönlichen Information Appliances, wie drahtlos vernetzte PDAs und WAP-fähige Mobiltelefone, ist am Markt verfügbar.

Der heute schon mögliche mobile Zugriff auf das Internet wird nicht zuletzt durch den weiter anhaltenden Trend zur Miniaturisierung ermöglicht. Auch neue Entwicklungen der Materialwissenschaft (z.B. Miniatursensoren, "leuchtendes Plastik", "elektronische Tinte") und Fortschritte der Kommunikationstechnik (insb. in drahtlosen Applikationen) tragen dazu bei, dass es eine Vielzahl kleinster und spontan miteinander kommunizierende Rechner geben wird, die kaum mehr als solche wahrgenommen werden, da sie in Gebrauchsgegenstände eingebettet werden und so mit der alltäglichen Umgebung zu "smart objects" verschmelzen. Persönliche Information Appliances haben heute den Status von Personal Digital Assistants (PDAs) erreicht, die vom Funktionsumfang noch relativ nah an Standardrechnern sind.

Neue Formen dieser persönlichen Geräte sind Wearable Computers, die so selbstverständlich wie Kleidung getragen werden (sog. Smart Clothing). Wearable Computers sind immer operabel, aus Sicht des Benutzers im Sinne der Bedienbeanspruchung nicht monopolisierend und erlauben, beispielsweise durch Sprachsteuerung, freihändige Benutzung. Die Miniaturisierung von Komponenten erlaubt es, leistungsstarke Rechner als Wearables zu realisieren. Die dafür notwendigen Technologien bauen in hohem Maße auf der MST auf:

- Mikroelektroniktechnologien
- Bulk- und Surface-Mikromachining
- Mikrooptik
- Faseroptik
- Display-Technologien
- Polymerelektronik
- Aufbau- und Verbindungstechnik
- Membrantechnologien
- Batterie- und Brennstoffzellentechnologien

Ergänzt um eine Vielzahl von Sensorfunktionen beispielsweise für

- Position (Lokalisation von Personen, Tracking, Sound, Kommunikation, Info/Entertainment, Sprache als I/O –Schnittstelle)
- Bildgebende Verfahren (Capture and Display, Environment, Tracking, Objekterkennung, Biometrics)
- Taktile Verfahren (Kommunikation und Notifikation, Scriptverarbeitung, Display of sensations)
- Umfelddaten (Meteorologie-Daten, Elektromagnetische Felder, Chemische Detektion)
- Physiologische Daten (Biometrics, Noninvasive Sensors, Biochemical Sensing, Monitoring des persönlichen Zustands)

sind Wearables bis hin zu „IT-Prothesen“ zur Erweiterung menschlicher Wahrnehmungs- und Informationsverarbeitungsfähigkeit entwickelbar.

6.2.5.2. Innovationsbarrieren

Eine nichttechnische Barriere für die Verbreitung von Produkten des Ubiquitous Computing im Bereich privater Nutzung stellen Akzeptanzprobleme dar. Diese beruhen auf der Gefährdung der Datensicherheit und der Privatsphäre jedes Nutzers sowie auf Vorbehalten gegenüber der Durchdringung der privaten Lebenswelt mit Elektrosmog. Auch sind die Wirkungen staatlicher Regelungen, z.B. zum Schutz der Privatsphäre, von entscheidender Bedeutung für die Akzeptanz.

Die Überwindung technischer Innovationsbarrieren für zukünftige erfolgreiche Produktentwicklungen wird in starkem Maße vom Aufbau einer technischen Infrastruktur sowie von der Beherrschung der aus dem Bereich Materialien herrührenden Anforderungen bestimmt werden. Eine ebenso bedeutende Rolle wird der Bewältigung der Herausforderungen durch die (derzeit noch) bedienungsunfreundliche Komplexität der Endgeräte, einer Formatvielfalt in Soft- und Hardware, fehlender Standards und begrenzter Übertragungskapazitäten beigemessen.

6.3. Agile Fabrication

6.3.1. Kurzbeschreibung und Bedeutung

Agile Fabrication befasst sich mit den Methoden zur **Fertigung von Mikrosystemen**. Dies beinhaltet sowohl die Fragestellungen einer **fertigungsgerechten Produktgestaltung** als auch alle mit der Herstellung von Mikrosystemen verbundenen Aspekte der Systemintegration, der Bearbeitung und Verknüpfung unterschiedlicher Materialien, der technischen Fertigung und des Tests einschließlich der dafür benötigten Substrate und Materialien.

Die derzeit eingesetzten Entwicklungs- und Fertigungsverfahren für Mikrosysteme bauen überwiegend auf Verfahren, Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT), Materialien und Testmethoden auf, die für die Belange der Mikroelektronik entwickelt wurden. Für die Fertigung von Mikrosystemen stoßen sie deshalb immer häufiger an Grenzen. Im Zuge der Weiterentwicklung der MST wachsen deren **Anforderungen** auch in Zukunft. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf

- die größere **Funktionsvielfalt und Anwendungsbreite** von Mikrosystemen über die elektrischen Funktionen hinaus,
- die Berücksichtigung einer **höheren Materialvielfalt**,
- die Notwendigkeit zur Realisierung von **komplexen 3-D-Strukturen** und
- den **Schutz von der Umgebung ausgesetzten aktiven Funktionselementen** für Sensorik und Aktuatorik (z.B. bei aggressiven Arbeitsmedien).

Entscheidenden Einfluss auf Entwicklung und Auswahl von MST-spezifischen Entwicklungs-, Fertigungs- und Testverfahren haben die für den Einsatz der Mikrosystemtechnik geltenden technischen und wirtschaftlichen **Randbedingungen**:

- die **Heterogenität** der stark von der Anwendung her bestimmten technischen Funktionsprinzipien und Materialien,
- die Notwendigkeit zur **Verknüpfung** unterschiedlicher technischer Entwicklungs-, Fertigungs- und Testprozesse **in der Wertschöpfungskette**,
- die Nachfrage nach **kundenspezifischen Produkten** bei kurzen Produktlebenszyklen im internationalen Wettbewerb,
- die Anforderungen an **kurze Entwicklungszeiten, niedrige Fertigungskosten und hohe Qualitätsstandards**.

Die Herstellprozesse vieler zukünftiger Mikrosysteme werden in Folge dieser Marktforderungen den Charakter einer „**individualisierten Massenproduktion**“ annehmen müssen: die Verwirklichung individueller Kundenwünsche und der im Wettbewerb steigende Kostendruck erzwingt die Nutzung aller Vorteile einer **batchfähigen Fertigung**. Dies gilt selbst dort, wo es um die Erschließung von potenziellen Massenmärkten geht: die **flexible Fertigung in kleinen Serien** ist hier eine wichtige zeitliche und technische Zwischenstufe zwischen der Laborfertigung und der Bedienung des Zielmarktes, ohne die die Risiken der Einführung zu groß werden.

Charakteristisch für die Probleme der Agile Fabrication in der MST ist die enge gegenseitige **Verzahnung zwischen Design, Fertigung, Test und Anwendung**. Die klassische Entwicklungskette von der Produkt- bzw. Anwendungsidee über die Konstruktion, den Bau eines Prototyps als Demonstrator, die Weiterentwicklung und Optimierung der Fertigungsverfahren bis zur Fertigung und Vermarktung gilt für MST-Anwendungen nicht. Sie sind vielmehr gekennzeichnet durch ständige Rückkopplungen und wechselseitige Anpassungen. Dadurch kommt es im Verlauf der Arbeiten oft zu unerwarteten Veränderungen nicht nur hinsichtlich der Fertigungs-, sondern auch der Anwendungsmöglichkeiten.

Alle Weiterentwicklungen in der Agile Fabrication und Systemintegration haben große Bedeutung für die wirtschaftliche Nutzung der MST in allen künftigen Anwendungsfeldern der MST. Besonders wichtig sind sie in den Feldern, in denen Differenzierung und Individualisierung sowohl wegen der eingesetzten Materialien und deren Bearbeitung als auch wegen der Anforderungen an die Anwendung so groß sind, dass sich Großserienfertigungen auf absehbare Zeit (noch) nicht durchsetzen können. Hierzu gehören vor allem Entwicklungen in den Zukunftsfeldern Life Sciences, Fluidtronics und UbiCom. Umgekehrt werden FuE-Ergebnisse aus den Feldern Polytronics, Micromats und Mikro-Nano-Interface großen Einfluss auch auf Weiterentwicklungen von Agile Fabrication und Systemintegration haben.

Eng verbunden mit Weiterentwicklungen im Bereich Agile Fabrication und Systemintegration ist auch der **Markt für** die dazu gehörigen **Fertigungsanlagen**:

- Experten schätzen, dass ca. 10 – 20 % des Umsatzes mit MST für Ausrüstungen auszugeben sind. Die aktuellen Umsätze bewegen sich weltweit in einer Größenordnung von einigen 100 Mio. €
- Die Equipmenthersteller rechnen mit Steigerungsraten der Umsätze mit Ausrüstungen für die MST-Fertigung in den kommenden 4 – 5 Jahren von jeweils 25 %. Hintergrund der Prognose ist die Einschätzung, dass der aktuelle Bedarf nach Labor- und Kleinserienproduktionsanlagen in wenigen Jahren einen Bedarf nach größeren Serienproduktionsanlagen nach sich ziehen wird.

6.3.2. Künftige Entwicklungslinien

Die künftigen technischen Entwicklungslinien zur Herstellung von Mikrosystemen sind stark von den funktionalen Anforderungen der Anwendungen geprägt. Einheitliche bahnbrechende Technologien sind gegenwärtig nicht erkennbar. Dies hängt mit der anwendungsspezifischen Systemverknüpfung ganz unterschiedlicher Komponenten und Materialien zusammen, die selbst und deren Kombination spezifische Anforderungen an die jeweils geeigneten Design-, Fertigungs- und Testverfahren stellen.

Insgesamt lassen sich **sechs künftige technische Entwicklungslinien** im Bereich Agile Fabrication identifizieren, die zum Teil substituieren, zum Teil komplementären Charakter aufweisen:

1. Weiterentwicklung der aus der Mikroelektronik übernommenen Ansätze

Die zunehmende Funktionalität und wachsende Einsatzvielfalt von Mikrosystemen zwingt zu einer im Vergleich zur Mikroelektronik weitaus größeren Technologie- und Materialbandbreite. Dies führte bereits in der Vergangenheit zu MST-spezifischen Weiterentwicklungen wie der Zweiseitenlithografie, der Tiefenätzung mit extremen Aspektverhältnissen oder den Opferschichttechniken, die z.B. die Fertigung von gut in den Markt eingeführten MST-Produkten wie Tintenstrahl Druckköpfen oder Intertialsensoren für die Automobilindustrie erst möglich werden ließen. Diese Entwicklungen sind gegenwärtig noch keineswegs abgeschlossen.

2. Entwicklung von theoretischen und praktischen Werkzeugen für Design und Systemintegration in der MST

Mit der Weiterentwicklung der Mikrosystemtechnik wachsen die Anforderungen an die Systemintegration. Die in der Mikroelektronik existierende Standardisierung von Design, Materialien und Fertigungsverfahren fehlt in der MST noch weitgehend und ist hier um ein Vielfaches komplexer als in der Mikroelektronik. Gegenwärtig sind Kosten und Zeitbedarf für Entwicklung, Design, Systemintegration und Test oft limitierende Faktoren für die Entwicklung von Mikrosystemen: mehr als 80 % der Kosten eines Mikrosystems entfallen gegenwärtig darauf.⁴⁵ Diese Situation wird sich erst ändern, wenn mehr praktische und ingenieurtheoretische Erfahrungen sowie nachvollziehbare wissenschaftliche Erkenntnisse über Hintergründe und Ursachen vorliegen und entsprechende Werkzeuge Entwicklung und Design von Mikrosystemen vereinfachen.

Fortschritte hier sind zugleich Voraussetzung für Fortschritte in Richtung

- einer integrierten Fertigung (Desktop Manufacturing) sowie
- einer unmittelbaren Fertigung im Kundenauftrag (Factoring on Demand) .

3. Charakterisierung von Materialien und Weiterentwicklung der Bearbeitungsmethoden für MST-Anwendungen

Mit der Nutzung und Verknüpfung unterschiedlicher Materialien zur Herstellung von Mikrosystemen wächst der Bedarf an Fertigungs- und Bearbeitungstechniken sowie die Charakterisierung von Materialien wie Kunststoffe, Glas, Keramik oder Metallen, die künftig vermehrt in der MST Anwendung finden. Auf diesem Gebiet hat es in der Vergangenheit bereits viele Entwicklungen gegeben wie etwa die LIGA-Technologien (Lithographie, Galvanoformung, Abformung), die Implementierung chemisch oder biologisch aktiver Sonderschichten, die Mikrozerspannung und –erosion, die Glasstrukturierung, der Mikrospritzguss oder die SU8-Lithografie. Sie waren allerdings meist nur auf begrenzte Einsatzfelder ausgelegt.

⁴⁵ T.P. Glenn and S. Webster, Amkor Technology, Designing MEMS into Systems: packaging Issue, 2000

Weiterentwicklungen sind vor allem erforderlich im Hinblick auf:

- die breite Einbindung von Forschungsergebnissen aus der Werkstoffentwicklung,
- Fertigungs- bzw. Bearbeitungsverfahren im Mikro- und Nanomaßstab,
- Herstellung und Charakterisierung von geeigneten Polymeren, Nano-Materialien oder OLEDs,
- die Erzeugung hochdifferenzierender aktiver Schichten für Sensoranwendungen,
- die Entwicklung und Spezifizierung neuer Bond- und Mikro-montagetechniken,
- die Entwicklung einer Prozesstechnik für Materialien, die bei höheren Temperaturen, Drücken oder in aggressiven Medien leicht degenerieren und dann nicht mehr funktions-tüchtig sind (biofragile Materialien).

4. Weiterentwicklung der wafer-level-basierten Produktion für Nutzung und Verknüpfung unterschiedlicher Materialien

Mit wachsendem Gewicht von Polymeren, Glas, Keramik oder Metallen für die Herstellung von Mikrosystemen gewinnen Bemühungen an Gewicht, die wafer-level-basierte Produktion über die traditionelle Verwendung von Silizium oder Gallium-Arsenid hinaus auszudehnen (wafer level assembly). Sie wird als Nutzen-Fertigung die auch weiterhin notwendige device-level-Produktion und AVT ergänzen und teilweise ersetzen. Damit werden sich die bisherigen Arbeitsteilungsstrukturen bei der Fertigung von Mikrosystemen verändern. Die gegenwärtig noch dominierende Gegenüberstellung von Si-basierter und nicht-Si-basierter MST wird zu Gunsten der Gegenüberstellung von wafer-level- und device-level-Produktion an Bedeutung verlieren.

5. Weiterentwicklung der modularen Fertigung und Fertigungslogistik durch Entwicklung und Definition geeigneter Schnittstellen

Die Entwicklung und Nutzung von Standards ist die Voraussetzung für weitere Fortschritte zur Modularisierung der Herstellung von Mikrosystemen. Dabei werden zwei Wege parallel verfolgt, die sich vielfach gegenseitig ergänzen:

- der Aufbau von Mikrosystemen aus standardisierten Systemkomponenten bzw. Teilsystemen, die anwendungsspezifisch integriert und miteinander verbunden werden, und
- die modulare Fertigung von Mikrosystemen, bei denen Mikrosysteme in der von den Kunden benötigten Menge und

Qualität auf Basis gut verstandener Fertigungsprozesse individuell hergestellt werden.

In beiden Fällen hängen die Erfolge von der Möglichkeit zur Definition der produkt- bzw. produktionsseitigen Schnittstellen und der Verbesserung von geeigneten Entwurfs-, Design- und Testmethoden bzw. -werkzeugen ab (vgl. oben 2.). Wichtige Entwicklungslinien sind in diesem Zusammenhang:

- die Entwicklung von modular aufgebauten Minifabriken zur engen räumlichen Verknüpfung unterschiedlicher Fertigungsschritte,
- Entwicklung und Definition von Schnittstellen für das Interface zwischen der Nano-, Mikro- und Makroebene,
- die Entwicklung des „Rapid Prototyping“, nicht zuletzt zur Unterstützung der Integration von Mikrosystemen in Makrosysteme,
- Equipment und Standards für das Assembly von Mikrosystemkomponenten, d.h. Handlingsystemen und Logistik.

6. Forschung zur Nutzung der Selbstorganisation für Konstruktion und Herstellung von Mikrosystemen

Noch im Grundlagenbereich anzusiedeln, aber als besonders interessante künftige Technologieoption anzusehen ist die funktionale Erweiterung der Fertigung von Mikrosystemen auf der Ebene von „building blocks“ im Nanometermaßstab durch Nutzung von Selbstorganisationsmechanismen für Konstruktion und Herstellung. Hier sind noch viele Fragen hinsichtlich der Wirkprinzipien und ihrer hard- und softwareseitigen Bewältigung offen. Die notwendigen Entwicklungen in diesem Bereich liegen weitgehend auf der Ebene der Grundlagenforschung.

6.3.3. Innovationsbarrieren

Die Nutzung der MST erzwingt in der Entwicklung, Fertigung, Integration und Anwendung immer wieder die Kombination, Abstimmung und Optimierung von miniaturisierten Teilkomponenten mit ganz unterschiedlicher Funktionalität. Für die Herstellung dieser Komponenten ist jeweils ein anderes meist hoch spezialisiertes Know-how erforderlich, über das in der Regel weder die Hersteller der jeweils anderen zum Gesamtsystem gehörenden Teilkomponenten noch die für die Systemintegration Verantwortlichen und schon gar nicht die eigentlichen Anwender verfügen. Hinzu kommt das nicht minder spezifische Systemwissen zur Herstellung der Mikrosysteme selbst, um produktionsseitig die benötigten Funktionen wirksam kombinieren und anwenderseitig auf die Anforderungen der Nutzer abstimmen zu können.

Engpass: Produzentennetzwerk zur MST-Fertigung

Die größte Innovationsbarriere für die Ausdifferenzierung und Optimierung von Fertigungs- und Montage- bzw. Integrationsverfahren in der MST liegt vor diesem Hintergrund gegenwärtig noch in der Tatsache, dass sich in Deutschland bisher noch **keine** ausreichend differenzierte und zugleich dauerhaft **stabile Struktur aus Betrieben, die einzelne Vorleistungen erbringen können**, außerhalb des bisher dominanten Anwendungsbereichs von Mikrosystemen im Automobilsektor entwickelt hat. In den anderen Bereichen herrscht derzeit die Manufaktur oder Kleinserienfertigung vor und weniger die arbeitsteilig organisierte industrielle Fertigung.

Dabei ist von der technischen Seite her die Fertigung von Mikrosystemen in stark ausdifferenzierten Wertschöpfungsketten optimal: Aus einem Netz von Materiallieferanten könnten viele MST-Komponenten-Hersteller ihre Vorleistungen beziehen und ihre Teilsysteme wieder an MS-Hersteller liefern, die diese wieder auf einer möglichst einheitlichen Plattform für ihre unterschiedlichen Abnehmer entsprechend deren Anforderungen kombinieren, weiterbearbeiten oder ergänzen. An ihnen könnten sich Hersteller von Fertigungsgeräten (Ausrüster) und Fertigungsequipment aber auch Zulieferer von Hilfsmaterialien aller Art orientieren.

Unter vergleichbaren technischen Bedingungen haben sich solche arbeitsteilige Strukturen im Makrobereich erst im Lauf der Zeit gebildet wie z.B. in der Anlagen- oder der Bauwirtschaft. Großes Gewicht gewonnen haben dabei **eigenständige Dienstleistungsanbieter**, die als „**erweiterte Kompetenzzentren**“ oft die Funktion von „**Generalunternehmern**“ übernehmen.

Ihren Kunden bieten sie vielfältige Management- und Integrationsleistungen vom Design über das Engineering, die Qualitätssicherung bis zur Gewährleistung an. Sie stützen sich ihrerseits auf hochspezialisierte und (technisch wie wirtschaftlich) zuverlässige Zulieferer, für die sie selbst wieder unverzichtbare Mittler zu den Anwendern sind.

Erste Anbieter für Systemintegrationsdienstleistungen auf dem Feld der MST gibt es zwar auch in Deutschland. Ausgehend von Erfahrungen in der Mikroelektronik bemühen sie sich, ihr Angebot auf ausgewählte MST-Anwendungen (z.B. Automobil, Biotechnologie, optische Telekommunikation) auszudehnen und z.B. Entwicklungs-, Design-, Fertigungs- und Testdienstleistungen anzubieten bzw. Equipment für bedarfsgerechte AVT bereit zu stellen. Ihr Tätigkeitsfeld beschränkt sich allerdings noch überwiegend auf wafer-level und Silizium-basierte MST-Entwicklungen. Hier können sie auf Wertschöpfungsketten und Industriestandards der Mikroelektronik zurückgreifen.

Jenseits dieses der Mikroelektronik entlehnten Bereichs der MST **fehlen „erweiterte Kompetenzzentren“** in Deutschland. Diese Aufgaben übernehmen in geförderten Verbundprojekten oftmals Vertreter von FuE-Einrichtungen, die eigentlich für die Übernahme der wissenschaftlichen Begleitung eingebunden wurden. Hierdurch sind im Zuge der MST-Förderung zwar einige Netzwerke entstanden, die aber ihrer Natur nach zeitlich begrenzt und entsprechend instabil sind. Dieses Engagement der FuE-Einrichtungen wird von potenziell interessierten Dienstleistungsunternehmen teilweise auch als eine staatlich geförderte Konkurrenz wahrgenommen, die die Entwicklung eines entsprechenden privaten Angebots in Deutschland erschwere.

Gleichzeitig werden dadurch bei den FuE-Einrichtungen personelle und finanzielle Ressourcen gebunden, die diesen wieder für die Bearbeitung von grundlegenden FuE-Arbeiten fehlen.

Ob sich die Funktion der „erweiterten Kompetenzzentren“ als eigens zu vermarktende Dienstleistungsaufgabe durchsetzen wird, ist gegenwärtig offen. Bisher übernahmen solche Aufgaben oft Großunternehmen für ihre eigenen MST-Anwendungen und finanzierten sie aus den verbesserten Erträgen ihrer Endprodukte (z.B. Sensoren). Ein eigenständiger Markt für solche Dienstleistungen wird sich erst entwickeln können, wenn es auf MST-Anwendungen spezialisierten Dienstleistern gelingt, sich durch ihr Know-how eine ausreichende Marge zu sichern.

Am weitesten gediehen erscheinen in dieser Hinsicht die Bemühungen des **VDMA mit der Arbeitsgemeinschaft MATCH-X** als einer Betreibergesellschaft für den MATCH-X-Baukasten.

Dieser war das Ergebnis von entsprechenden Verbundprojekten. Der MATCH-X e.V. bietet interessierten Unternehmen mit der Mitgliedschaft auch die Bereitstellung von Informationen zu den festgelegten Match-X-Schnittstellen, Hilfen beim Zugriff auf Dienstleister- und Zulieferernetzwerke oder Beratungsleistungen z.B. für Gemeinschaftsprojekte an. Mindestens im Ansatz sucht er dadurch selbst die Funktion eines „erweiterten Kompetenzzentrums“ zu übernehmen.

Das bisher noch fehlende Produzentennetzwerk schlägt sich in unterschiedlichen **ökonomischen Innovationsbarrieren** nieder.

- **Nachfrage und Marktvolumen erreichen nicht die kritischen Mengen**

Hochdifferenzierte und leistungsfähige Arbeitsteilungsformen mit Chancen für entsprechend spezialisierte kleine und mittlere Unternehmen können sich erst bilden, wenn das **Marktvolumen** und die **Kontinuität der Nachfrage** ausreichen, um diesen Unternehmen eine stabile Entwicklung zu gewährleisten. Dies ist in Deutschland gegenwärtig nur im Zuliefererbereich für den Automobilbau der Fall. Hier werden nach Schätzungen von Experten heute etwa 80 % aller wirtschaftlich eingesetzten Mikrosysteme genutzt. In den vielen anderen Anwendungsformen werden die kritischen Absatzmengen bisher nicht erreicht.

- **Begrenzte Möglichkeiten zur Auftragsfertigung**

Die im Rahmen von Europractice geförderten **Angebote für eine Auftragsfertigung** sind auch für die absehbare Zukunft noch nicht wirtschaftlich zu betreiben. Sie orientieren sich an dem Foundry-Konzept in der Mikroelektronik, wobei die Anlagenbetreiber ihren Kunden die eigenen Designvorschriften vorgeben. Problematisch ist vor allem, dass mit der Vorgabe der Fertigungsprozesse auch das Spektrum für die **MST-Anwendungen eingeschränkt wird**: Dank der engen und wachsenden Abhängigkeiten zwischen Entwicklung, Fertigung und Anwendung in der MST gelingt es immer weniger, für spezifische Entwicklungen auf bestehende Fertigungskapazitäten zurück zu greifen. Die bisherigen – meist auf Si-Basis arbeitenden – Anbieter nutzen daher die EU-Förderung im Sinne des Network-Gedankens im wesentlichen zur besseren **Auslastung ihrer** bereits anderweitig genutzten **Kapazitäten**, zur **Kundensuche** und zum **Aufbau von Kooperationsbeziehungen** für gemeinsame Produktentwicklungen.

- **Mangel an leistungsfähigen Zulieferern**

Jenseits der Si-basierten MST stoßen MST-Anwender und Hersteller immer häufiger auf **Schwierigkeiten, geeignete Anbieter und Bearbeiter für speziell benötigte Komponenten und Werkstoffe zu finden**. Insbesondere in der MST-device-level Produktion erfordert die Fertigung viele Teilschritte mit entsprechendem Spezial-Know-how (z.B. im Mikrospritzguss). Über dieses Know-how verfügen weder die Entwickler noch die Systemintegratoren. Andererseits stellen sie hohe Anforderungen an die Zulieferer: Diese müssen nicht nur über die notwendigen technischen Anlagen verfügen und die Prozesse beherrschen, sondern auch ein entsprechendes Qualitätsmanagement gewährleisten.

- **Hohe Investitionsrisiken für KMU**

Die potenziell interessierten KMU, die über das spezielle Prozess-Know-how verfügen und in die Entwicklung der MST-Anwendung einbringen könnten, können sich aber angesichts der Investitionskosten und der oft für sie extremen Kosten zur Werkzeugherstellung wirtschaftlich keinen Ausfall leisten. In Folge der nach wie vor bestehenden **technischen Entwicklungs- und Anwendungsrisiken** sind die **wirtschaftlichen Risiken** (Finanzierung von Investitionen, Entwicklungen, Ausgleich von Marktschwankungen, Haftung u.ä.) für spezialisierte KMU zu hoch. Nicht selten stellen sich erst in der Produktion oder Anwendung einzelne Details als kritisch heraus und entwerfen nicht nur die schon gefertigten Teile, sondern auch die ihnen zu Grunde liegenden Entwurfsarbeiten. Mit zunehmender Miniaturisierung bis hin zum Mikro-Nano-Interface gewinnen die **Investitionsrisiken** sogar noch stärkeres Gewicht.⁴⁶

- **Wettbewerbsvorteile für Großunternehmen**

Die Wettbewerbsvorteile der heute in der MST erfolgreichen Großunternehmen in der MST-Anwendung liegen oft weniger im technischen Bereich als bei **Organisations-, Haftungs-, Kooperations- und Finanzierungsvorteilen** oder in der **Sicherstellung des Applikationssupports**. Die vertikale Verknüpfung der MST-Fertigung mit dem Einsatz der Mikrosysteme in eigenen Endprodukten erleichtert nicht nur den Risikoausgleich, sondern gewährleistet auch ausreichende Margen zur Deckung der Entwicklungs- und Produktionskosten. Dagegen sind **KMU**⁴⁷ mit ihrer niedrigen Personal- und Eigenkapitalausstattung auch bei besserem Know-how **im Wettbewerb unterlegen**, sobald sie gegen „Profit Center“ von Großunternehmen antreten, die im Rahmen ihres Firmenverbands mindestens kurz- und mittelfristig abgesichert und damit auch für ihre Kunden und Lieferanten verlässlichere Partner sind. Eigenständige Systemintegratoren als „erweiterte Kompetenzzentren“ konnten sich bisher nicht entwickeln.

⁴⁶ Anto'n (2001) P.S. Anto'n, R. Silberglied, J. Schneider, The global technology revolution: Bio/Nano/Materials Trends and Their Synergies with Information Technology by 2015, National Defense Research Institute, Prepared for the National Intelligence Council, RAND, 2001

⁴⁷ Insbesondere Unternehmen mit weniger als 50 Mitarbeitern.

- **Zu geringe Erfahrungen mit modularen Fertigungsmöglichkeiten auf der Basis klarer Schnittstellen**

Abgesehen von der bereits erwähnten Arbeitsgemeinschaft Match-X durch den VDMA laufen gegenwärtig viele Bemühungen um die Entwicklung von Standards für klar definierte Schnittstellen.

Die Mitarbeit vieler Firmen ist dabei allerdings stärker von kurzfristigen Eigeninteressen als von dem im Grundsatz durchaus akzeptierten Wunsch nach langfristig stabilen Vereinbarungen bestimmt. Sie werden teilweise auch durch die Haltung der Wissenschaftler gestützt, die zwar einheitliche Standards als Voraussetzungen für eine modularisierte und billigere Fertigung akzeptieren, andererseits aber befürchten, dass diese zu früh und zu stark die noch bestehenden **Entwicklungsmöglichkeiten in der MST begrenzen** könnten. Beide Aspekte machen die Arbeiten an Standards schwierig und langwierig. So sind es nicht selten Großunternehmen und Technikführer, die in schnell wachsenden Märkten mit hoher technischer Innovationsrate in der Lage sind, mit ihren Entwicklungen und Produkten analog zum Vorgehen von Unternehmen wie IBM Industriestandards zu setzen.

Neben diesen ökonomischen Hemmnissen zeigen sich inzwischen auch Innovationsbarrieren, die ihre Ursache nicht so sehr in einer noch fehlenden Diffusion der MST in der Wirtschaft haben, sondern vielmehr auf **Entwicklungsengpässe** hinweisen, die eher mit einer zunehmenden Bedeutung der MST zusammenhängen. Dies gilt einerseits hinsichtlich der beobachteten Personal- und Informationsdefizite sowie andererseits hinsichtlich der zunehmenden Anzahl an Fragestellungen, die grundlegenden Forschungsbedarf mit konkretem Anwendungsbezug nach sich ziehen.

- **Personal- und Informationsdefizite**

Die meisten Unternehmen, die sich mit Fragen der Agile Fabrication befassen, weisen auf **Engpässe bei der Rekrutierung von Personal** mit ausreichender Erfahrung für die Herstellung von Mikrosystemen und einem entsprechend breiten interdisziplinären Wissen hin. Zwar haben die in der Vergangenheit gemachten Anstrengungen bereits schon zu einer durchweg anerkannten Entwicklung an entsprechenden Studiengängen und Ausbildungsordnungen geführt, auch hat sich das Personalangebot tendenziell verbessert, doch bleibt dieser Anstieg gegenwärtig noch hinter demjenigen des Bedarfs zurück.

Auch beim **Informations- und Erfahrungsaustausch** gibt es Defizite. Hier wirkt sich vor allem die in den letzten Jahren deutlich gewachsene Differenzierung in den Fertigungs- und Anwendungsmöglichkeiten der MST als hemmend aus, auch

wenn das Angebot an Informationsmöglichkeiten insgesamt deutlich zugenommen hat.

- **Forschungsdefizite bei grundlegenden Projekten mit industriellem Anwendungsbezug**

Der zunehmende Anwendungsbezug in der MST zieht zudem auf der Entwicklungs- und Fertigungsseite erneut einen **Bedarf an grundlegenden Forschungsarbeiten** erkennbar nach sich. Industrievertreter wie Forscher weisen auf die zunehmende Gefahr einer **Ausdünnung der technologischen Basis** hin, die in absehbarer Zeit zu Engpässen bei der Weiterentwicklung von Fertigungs- und Systemintegrationstechniken führen kann, wenn insbesondere die erwähnten grundlegenden Forschungsthemen nicht bearbeitet werden. Die Ursachen dafür liegen insbesondere in

- der zunehmenden Miniaturisierung, durch die in der Fertigung immer häufiger mit anderen, bisher unberücksichtigten und unbekanntem Kräften (z.B. Sticking-Effekte durch atomare Anziehung, Handlingprobleme) gerechnet werden muss,
- der Suche nach Lösungen für Schnittstellen- sowie Aufbau- und Verbindungsprobleme zur Herstellung multifunktionaler Mikrosysteme, die bei Entwurfstechniken, in der AVT, Prüf- und Qualitätstechniken und dem dafür einsetzbaren Equipment neue theoretische und praktische Fragen aufwerfen,
- den wachsenden Anforderungen an Verfügbarkeit, Qualität, Charakterisierung und Zuverlässigkeit der benötigten Materialien und ihrer Verwend- bzw. Kombinierbarkeit in der wafer- bzw. device-level-Produktion. Beispielsweise fehlen für die Polytronik noch weitgehend geeignete Polymerwerkstoffe und Bearbeitungsverfahren.

Generell zeigt sich in der Mikrosystemtechnik eine zunehmende Verzahnung zwischen grundlegender Forschung und industrieller Anwendung.

Der Bearbeitung der grundlegenden Themen steht aus Sicht der befragten Experten entgegen, dass die öffentlichen Mittel für die Beschaffung von Anlagen insbesondere für FuE-Einrichtungen nicht ausreichen. Dies wirkt sich für die Entwicklung neuer Technologien zur Agile Fabrication oft dahingehend aus, dass FuE-Einrichtungen vielversprechende Themen aus Mangel an geeignetem Equipment zur Forschungsarbeit nicht aufgreifen können.

6.3.4. Stärken und Schwächen im internationalen Vergleich

Tabelle 6.4: SWOT-Analyse Agile Fabrication

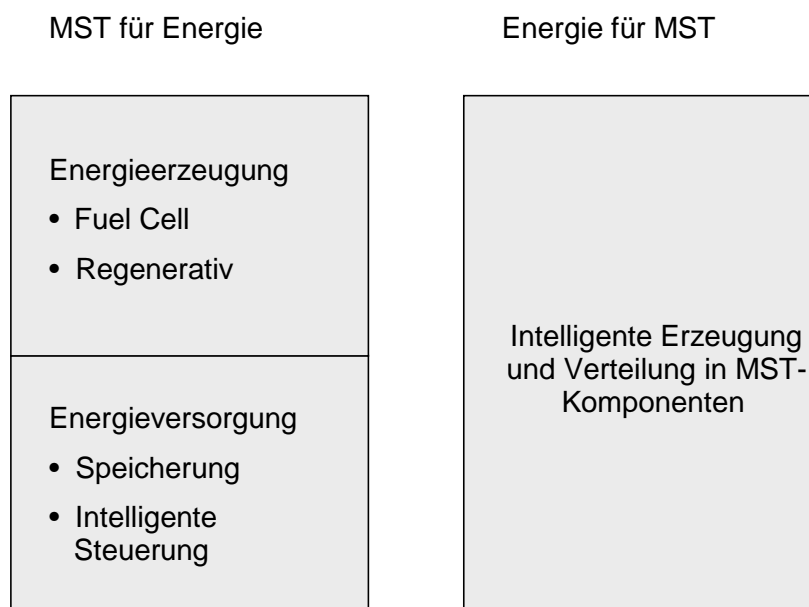
Agile Fabrication	
Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Eine insgesamt hochklassige Forschungslandschaft, insbesondere im Bereich der Systemintegration • Nähe zu potentiellen Anwendern mit praktischer Erfahrung in der Nutzung von Mikrosystemen, insb. im Automobilbau und Gesundheitsbereich • Gut entwickelte industrielle Arbeitsteilungs- und Infrastruktur mit technologisch leistungsfähigen Zulieferern und Anlagenherstellern auch im Bereich der Mikroelektronik • Human Resources durch spezielle Studien- und Ausbildungsgänge, aufbauend auf der vorhandenen guten Ingenieur- und Facharbeitertradition 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringes Produktionsaufkommen und geringe Marktpräsenz bei Produkten, deren Fertigungstechnologie der für die MST-Produktion notwendigen Technologie ähnlich ist (μ-Elektronik), im Vergleich zu Südostasien und USA • Defizite in der Dienstleistungsstruktur für MST-Anwendungen und AVT im Vergleich zu Südostasien und USA • Starke Abhängigkeit von technologischen Anstößen und Produktinitiativen aus nicht europäischen Regionen • Geringere Flexibilität bei der Verzahnung von FuE-Einrichtungen und Unternehmen im Vergleich zur Schweiz (in der Folge des MINOS-Projekts) und den USA (durch Verknüpfung mit der militärischen Nutzung, umfangreicher Support durch DARPA, NSF, DoD, DoE u.a.)
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Profilierung in potenten Marktsegmenten (z.B. Automobil, Biotechnologie, optische Telekommunikation) • Etablierung von führenden Anbietern für Systemintegrationsdienstleistungen, z.B. in den Bereichen Forschung, Design und Fertigung. Herstellung von Equipment für bedarfsgerechte AVT in ausgewählten MST Anwendungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Zu starke Ausrichtung auf Systemanwendungen im Automobil • Teilweise geringe räumliche Nähe zu bedeutenden Marktplayern auf der Abnehmerseite, die zu einem großen Teil im Ausland (insb. USA) sitzen • Aufgrund des Dienstleistungscharakters verspricht die Systemintegration nur geringe Margen für die Industrie • Ausdünnung der technologischen Basis durch geringe Aktivitäten im Bereich grundlegender Forschung mit konkretem Anwendungsbezug

6.4. Smart Energy

Das Zukunftsfeld Smart Energy umfasst zwei Themenkomplexe, die sich beide auf die intelligente Erstellung, Verteilung und Nutzung von Energie beziehen. Der erste Themenkomplex kann unter dem Begriff „**Mikrosystemtechnik für Energie**“ gefasst werden. Hierunter fallen alle Problemstellungen, die den Einsatz von Mikrosystemtechnik für die intelligente Erzeugung und Verteilung von Energie aufgreifen. Zu fassen sind darunter einerseits die Möglichkeiten der Optimierung der **Energieerzeugung** durch integrierte Mikrosystemtechnik, andererseits die Möglichkeiten, durch Lastmanagement die **Versorgung** mit Energie durch mikrosystemtechnische Komponenten zu verbessern.

Der zweite Themenkomplex kann unter dem Begriff „**Energie für Mikrosystemtechnik**“ gefasst werden. Hierunter fallen alle Problemstellungen, die sich mit der **Energieerzeugung** und **Energieversorgung** von mikrosystemtechnischen Produkten beschäftigen. Mit der immer weiteren Verbreitung von mikrosystemtechnischen Anwendungen steigt auch der Anspruch an eine dezentrale Energieerzeugung in diesen Applikationen bzw. an die Energieversorgung von diesen Applikationen. Zu denken ist hierbei zum Beispiel an die Energieversorgung für smart implants oder die Energieversorgung von Sensorik und Aktorik im Rahmen der Gebäudeleittechnik.

Abbildung 6.3: Struktur des Zukunftsfeldes Smart Energy



Diese Trennung in MST für Energie und Energie für MST ist sinnvoll, da die beiden unterschiedlichen Themenstellungen jeweils auch **spezifische Fragen** aufwerfen, die getrennt voneinander zu diskutieren sind. Diese hängen vor allem mit der Rolle der Mikrosystemtechnik im Erzeugungs- und Versorgungsprozess mit Energie zusammen. Zentrale Unterschiede sind hierbei die mit den unterschiedlichen **Größendimensionen** verbundenen Fragestellungen. Während im Bereich der MST für Energie, die Rolle der MST in der Optimierung von relativ großen Einheiten vonstattengeht, liegt das zentrale Problem in der Energie für MST in der Erzeugung und Bereitstellung von Energie in sehr kleinen Einheiten. Dieser Unterschied in den Dimensionen hat, wie im folgenden gezeigt wird, entsprechend große Auswirkung auf die Auswahl der Energieerzeugungstechniken wie auch die Frage der optimalen Energieversorgung.

6.4.1. **MST für Energie - Neue Formen der Energieerzeugung und der Energieversorgung**

Bei der **MST für Energie** stehen einerseits neue Formen der Energieerzeugung andererseits die intelligente Energieversorgung im Zentrum der Entwicklung.

Ziel des Einsatzes von MST in diesem Themengebiet ist es entsprechend, die Energieerzeugung durch den Einsatz von MST zu verbessern und bei der Versorgung mit Energie durch den Einsatz intelligenter Speichermedien eine Optimierung der Energienutzung zu erreichen.

Bei den neuen Formen der **Energieerzeugung** geht es um die Optimierung der Energieerzeugung über drei Wege:

- **Dezentralisierung** durch eine Absenkung der optimalen Losgröße
- Einsatz **neuer Energieerzeugungstechniken** wie der Brennstoffzelle
- **Optimierung** der bestehenden Erzeugungstechniken durch MST

Die **Energieerzeugung** wird derzeit in Deutschland durch unterschiedliche Energieerzeugungstechniken sicher gestellt. Bei einer Optimierung der Energieerzeugung haben verschiedene wirtschaftliche, technische aber auch gesellschaftliche Faktoren Einfluss.

Für die Mikrosystemtechnik bedeutet dies, dass für die verschiedenen Methoden der Energieerzeugung gezeigt werden muss, wie durch den Einsatz von MST die Effektivität und Effizienz der Energieerzeugung verbessert werden kann. Darüber hinaus gilt es zu zeigen, wie es durch den Einsatz von MST gelingen kann, die optimale Produktionsgröße von Energieerzeugungsanlagen zu verändern und somit der dezentralen Energieerzeugung Vorschub zu leisten.

Ein Markt für **dezentrale Energieerzeugung** ist derzeit lediglich im Bereich der regenerativen Energieerzeugungstechnologien vorhanden, nicht bei der Brennstoffzelle. Für diese ist abgesehen von einigen wenigen KMU in Deutschland keine industrielle Basis vorhanden. Akteure wie Siemens und Daimler/Chrysler haben ihre entsprechenden Bereiche nicht in Deutschland angesiedelt bzw. erst kürzlich ausgelagert.

Für das Feld der **Energieerzeugung** ist eine tragfähige industrielle Struktur für dieses wichtige Themengebiet derzeit nicht in Sicht. Dazu kommt, dass im Bereich der **Energieversorgung** die einstmalige Vorreiterrolle deutscher Unternehmen mittlerweile durch asiatische Länder abgelöst wurde, so weist z.B. Japan in der Ionen-Lithium Batterietechnologie einen Weltmarktanteil von 95% auf.

Als besonders zukunftssträchtige MST-affine Applikationen in diesem Zusammenhang erscheinen die Brennstoffzelle und (bedingt) Erzeugungsformen auf der Basis regenerativer Energien (Solar, Wasser, Wind und Biomasse).

Gerade der **Brennstoffzelle** kommt im Rahmen einer dezentralen Energieversorgung neben den regenerativen Energieerzeugungstechniken eine zentrale Rolle zu, weil der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle weitgehend unabhängig von der Anlagengröße ist. Darüber hinaus kann die Brennstoffzelle relativ emissionsarm betrieben werden.

Im Rahmen der **intelligenten Energieversorgung** in der MST für Energie geht es um den Aufbau intelligenter Lastmanagementsysteme, die durch den Einsatz von mikrosystemtechnischen Komponenten gesteuert werden. Mit dem steigenden Anteil dezentral erzeugter Energie und unter Aufrechterhaltung hoher oder höchster Versorgungssicherheit wachsen die Anforderungen an Lastmanagementsysteme, die eben nicht mehr zentral gesteuert werden, sondern durch die aktive Interaktion von Steuer- und Regel-Komponenten flexibel auf sich ändernde Bedarfe und Angebote von Energie reagieren. Diese Probleme können beispielsweise durch den Einsatz von MST-Komponenten angegangen werden.

Die **wissenschaftliche Basis** in der Erforschung dezentraler Energieversorgungstechniken ist in Deutschland vor allem im Bereich der regenerativen Erzeugungstechnologien, aber auch im Brennstoffzellenbereich durchaus beachtlich. Auch wenn noch ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf identifiziert werden kann, so spielt Deutschland in diesem Bereich doch eine wichtige Rolle im globalen Wettbewerb.

Im folgenden werden die Potenziale der MST für die Energieerzeugung umrissen.

6.4.1.1 Energieerzeugung durch die Brennstoffzelle

Die große Chance, die neuen Anforderungen der Energieerzeugung zu gewährleisten, ist in der Brennstoffzelle zu sehen. Diese bildet sowohl aus ökologischer Perspektive als auch aus der Sicht einer Dezentralisierung der Energieerzeugung einen vielversprechenden Ansatz.

Die Wirkungsweise einer Brennstoffzelle unterscheidet sich grundsätzlich von der herkömmlichen Art der Energieerzeugung in thermischen Kraftwerken. In der Brennstoffzelle erfolgt die direkte Umwandlung der chemisch gebundenen Energie des Brennstoffs in elektrische Energie, ohne den Umweg über die thermische und mechanische Energie wie bei herkömmlichen Kraftmaschinen. Brennstoffzellen erzielen daher auch höhere elektrische Wirkungsgrade als diese.

Im Themengebiet „MST für Energie“ ist die Brennstoffzelle je nach gewählter technischer Lösung vor allem für die dezentrale Energieerzeugung interessant. Die Brennstoffzelle erlaubt es, durch Kraft-Wärme-Kopplung bereits bei relativ kleinen Volumina effizient Energie zu generieren. MST-Relevanz ist bei der Brennstoffzelle zum einen im Hinblick auf die einzelne Brennstoffzelle selbst und den elektrochemischen Prozess zu sehen; zum anderen kann jedoch eine MST-Relevanz auch in der Zusammenfassung einzelner Zellen zu Stapeln (stacks) und bei der Peripherie gesehen werden. Im elektro-chemischen Prozess, bei dem Wasserstoff und Sauerstoff miteinander reagieren, muss der Elektrolyt undurchlässig für die Gase H_2 und O_2 jedoch hochleitend für Ionen sein. Laugen und Säuren sowie Feststoffe und Verbindungen mit Säure- oder Laugencharakteristiken sind als Elektrolyten geeignet. Neue Materialien für die Membrantechnologie, einem wichtigen Thema für die MST, sind hier gefragt.

Die Elektroden (Anode und Kathode) müssen eine hohe Porosität aufweisen, damit für die elektro-chemische Umsetzung eine große Oberfläche zur Verfügung steht. Dies ist für die Stromausbeute entscheidend, da die Umsetzungen an der Grenzfläche zwischen gasförmigen Reaktanten, Elektrolyten und Elektroden stattfindet (3 Phasen Reaktionszone). Neue Kohlenstoffstrukturen wie Nanotu-

bes und Nanohorns könnten für eine Oberflächenvergrößerung sorgen und damit die Stromausbeute erhöhen. Im Falle saurer Elektrolyten können nur Edelmetalle wie Platin als Katalysatoren benutzt werden, weil andere Katalysatoren über die Zeit aufgelöst würden. Auch hier könnten Neue Materialien sowie auch die Nanotechnologie für reaktionsfördernde Beschichtungen im Niedrigtemperaturbereich wertvolle Beiträge zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung liefern. Um technisch nutzbare Spannung zu erzeugen, müssen einzelne Zellen bestehend aus Anode und Kathode in Serie zu Stacks, d.h. zu Stapeln zusammengefasst werden. Bipolare Platten sind zwischen den einzelnen Zellen zu integrieren und die im Umwandlungsprozess anfallende Wärme ist mit Hilfe eines geeigneten Kühlsystems abzuführen. Werkzeuge der MST wie die Aufbau- und Verbindungstechnik, die Mikrofluidik und auch die Sensorik könnten hier zum Einsatz kommen.

Im Prinzip können Brennstoffzellen alle Flüssigkeiten konvertieren, die oxidierbar sind. In der Praxis besteht jedoch ein großer Unterschied zwischen Wasserstoff und kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoffen. Die Schwierigkeit, Kohlenwasserstoffe direkt umzuwandeln, beruht auf deren chemischen Eigenschaften, die eine Oxidation nur dann erlauben, wenn die Reaktionstemperaturen hoch genug sind oder eine sehr große katalytische Oberfläche geboten wird, wie es bei der Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) der Fall ist.

Tabelle 6.4: Überblick verschiedener Brennstoffzellen

	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolyt	Protonenleitende Membran	Phosphorsäure in Matrix	Karbonalschmelze in Matrix	Keramischer Festkörper
Betriebs-temperatur	60 – 80°C	200°C	650°C	800 – 1000°C
Reformierung Brennstoff	extern	extern	intern	intern
El. System-wirkungsgrad	36 – 40 %	36 – 40 %	47 – 50 %	50 – 55 %
Entwicklungs-stand	Prototyp	Kleinserie	Demonstration	Demonstration
Breite Markt-einführung	2008	?	2008	2008

Um dennoch die weitaus besser als Wasserstoff in die vorhandene Verteil-Infrastruktur implementierbaren Kohlenwasserstoff-Verbindungen in der Brennstoffzelle nutzen zu können, sind periphere Komponenten erforderlich. Es ist offensichtlich, dass der Gasaufbereitungsprozess neben der Mikroelektronik zur Prozessregelung eine Wasserstoffsensorik und –aktorik erforderlich macht.

Auf der anderen Seite ließe sich auch einiges an Kosten ersparen, wenn durch Vergrößerung der Oberflächen der Elektroden durch neue Materialien eine direkte Umwandlung von Kohlenwasserstoff-Verbindungen ermöglicht würde. Hier liegen nach Meinung der befragten Experten Aufgabenfelder für die MST.

6.4.1.2 Energieerzeugung durch regenerative Technologien

Die MST-Relevanz für die **regenerativen Erzeugungsmethoden** lässt sich überwiegend aus Maßnahmen ableiten, die den Wirkungsgrad der jeweiligen Anlage erhöhen. Eine MST-Relevanz ist bei Windkraftanlagen neben der Steuer- und Regelungstechnik durch die Überwachung der Wartungsintervalle und Wartung der Anlagen, das sogenannte Windkraftmaintaining gegeben. Die Anforderungen an die MST werden in dieser Hinsicht mit dem geplanten Ausbau der Windkraft im off-shore Bereich noch zunehmen.

Solarkomponenten, wie z.B. Wechselrichter, signalisieren ebenso MST-Relevanz für die Photovoltaik wie auch Fortschritte in der MST-getriebenen Dünnschichttechnik, die Verwendung neuer Materialien und Wirkungsmechanismen (Graetz-Zelle) zur Verbesserung der Zelltechnik.

MST-affine Technologien werden dann verstärkt Anwendung finden, wenn regenerative Energieträger zur Wasserstoffproduktion herangezogen werden. Sofern Wasserstoff mittel- und langfristig im wesentlichen Umfang im mobilen und stationären Energiebereich Eingang findet, wird unter umweltspezifischen Gesichtspunkten die Wasserstoffgewinnung durch regenerative Energieträger erfolgen. Im Mittelpunkt steht dabei die sekundärenergetische Erzeugung von Wasserstoff unter Stromeinsatz über die Wasserelektrolyse. Die Wasserelektrolyse ist unabhängig von einem spezifischen Primärenergieträger und wird deshalb langfristig als das wesentliche Standbein einer Wasserstoffenergiewirtschaft gesehen. Technisch betrachtet ist die Wasserelektrolyse der Umkehrprozess der elektro-chemischen Reaktion der Brennstoffzelle und weist daher auch eine ähnliche MST-Relevanz auf.

Regenerative Energieträger (Wasserkraft, Photovoltaik, Windenergie und Biomasse) werden zur Stromerzeugung mit direkter Einspeisung ins Netz genutzt und gefördert. Wegen der Nichtplanbarkeit von Einspeisungsmengen weisen Windenergie und Photovoltaik einen begrenzten energiewirtschaftlichen Wert auf. Bei anhaltend hohen Zuwachsraten und damit zunehmenden Anteil dieser Energieträger an der Stromerzeugung wird das Problem einer intelligenten Einbindung durch Lastmanagement zunehmend akuter. Dabei ist die Lösung des Speicherproblems nicht auszusparen, die nach heutigem Kenntnisstand nur in der Wasserstoffspeicherung liegen kann, sofern das Ziel der CO₂-Reduktion aufrecht erhalten werden soll.

6.4.1.3 Die Energieversorgung

Die Nutzung von MST für die **Energieversorgung** stellt ein zentrales Potenzial im Rahmen der Smart Energy dar. Die Nutzung von Sensorik und Aktorik, die intelligente Kopplung beider sowie die Einbindung solcher mikrosystemtechnischer Lösungen zu einem Gesamtsystem stellen hohe Anforderungen an die Hersteller solcher Systeme.

Insgesamt kann heute davon ausgegangen werden, dass mit der Einführung des Konnex-Standards und des LON-Standards im privaten Hausbereich wie auch des PROFI-Busses bzw. des CAN-BUS-Systems im Bereich der Zweckbauten erste technische Lösungen für die **intelligente Steuerung** in den einzelnen Einheiten verfügbar sind. Folgende Probleme gelten derzeit jedoch als ungelöst:

- Es ist bisher nicht gelungen, ein **Lastmanagementsystem** über die intelligenten Einheiten aufzubauen. Hierbei geht es nicht um das vorhandene traditionelle Lastmanagementsystem sondern um ein intelligentes System, das auch selbständig Steuerungsentscheidungen treffen kann.
- Die Entwicklung von vor allem **kostengünstigen** Sensoren und Aktoren für die Steuerung im Gebäude ist bis heute nicht in umfassendem Maße erreicht.
- Und schließlich fehlt eine **intelligente Software**, die eine möglichst nutzerfreundliche Steuerung der entsprechenden Systeme vornimmt.

Es sind in der Mikrosystemtechnik durch die Förderung von Projekten in der Leitsystemtechnik eine Vielzahl von Entwicklungsschritten bereits eingeleitet worden, die über die nächsten Jahre erfolgsversprechende Ansätze bieten, um ein intelligentes Lastmanagementsystem in den einzelnen Einheiten wie aber auch über die einzelnen Einheiten hinweg realisieren zu können. Unter „Einheit“ kann dabei eine Region, ein Versorgungsgebiet, aber auch eine Energieform („virtuelles Windkraftwerk“) verstanden werden. Hierbei ist allerdings besonders hervorzuheben, dass aufgrund der schwierigen Konstellation bei solchen Systemen, die sich aus dem Zusammenspiel zwischen einem Standard und den einzelnen Anwendungen ergeben, staatliche Unterstützung erforderlich ist, um über die Herausbildung eines möglichst **offenen de facto-Standards** die Entwicklung im Bereich der Anwendungssoftware voranzutreiben.

Insgesamt weist die deutsche Industrie einen guten technischen Stand bei der Entwicklung von Lastmanagementsystemen auf. Jedoch ist es ihr bis heute nicht gelungen, diese technische Fähigkeit in marktliche Produkte und damit in die Entstehung neuer Absatzgebiete umzumünzen.

Drei Ursachen lassen sich hierfür anführen:

- Die **Infrastruktur** in Deutschland bietet kaum Anreize für die Endnutzer, Lastmanagementsysteme einzusetzen.
- Durch die **Rivalität** konkurrierender Systemstandards wurde den Herstellern von Lastmanagementanwendungen kein Anreiz geboten, sich frühzeitig in den Markt zu begeben.
- Das **Fehlen eines Systemführers** hat die Vermarktung der Lastmanagementsysteme über die Wertschöpfungskette verhindert.

Insgesamt ist ein rascher Marktstart für Lastmanagementsysteme in Deutschland nicht zu erwarten. Pessimismus ist durchaus angesagt und eine höhere Nachfrage ist erst im Rahmen einer wachsenden Dezentralisierung der Energieversorgung zu erwarten.

6.4.2 Energie für MST

Energie für MST behandelt die Frage nach der Energieversorgung von mikrosystemtechnischen Anwendungen sowie von miniaturisierten, mobilen Anwendungen, die über den Einsatz von Mikrosystemtechnik funktionieren. Exemplarisch ist hierbei an Cochlea-Hörgeräte zu denken, aber auch an die Brennstoffzelle für den Betrieb von Notebooks oder Mobiltelefonen. Im Gegensatz zu der MST für Energie lässt sich im Bereich der Energie für MST eine strikte Trennung zwischen Energieerzeugung und Energieversorgung nicht aufrecht halten, da mögliche Energieerzeugungstechniken im Miniaturbereich nur sehr begrenzt verfügbar sind. In der Diskussion ist zur Zeit mit einiger Zukunftsaussicht lediglich die Brennstoffzelle. Die zentrale Rolle der Energiegewinnung für die MST-Anwendung basiert darauf, dass gerade im Rahmen der neuen Entwicklung in den Life Sciences mikrosystemtechnische Lösungen verstärkt ins Blickfeld geraten. Hierbei ist es wichtig zu berücksichtigen, dass bei diesen Anwendungen eine traditionelle Energieversorgung in den seltensten Fällen gewährleistet werden kann. Besonders deutlich wird dies an der Stromversorgung für Herzschrittmacher, die so gewährleistet sein muss, dass ohne zusätzliche operative Eingriffe eine gleichmäßige Energieversorgung realisiert werden kann.

Im Rahmen des Themas „Energie für MST“ sind es entsprechend zwei unterschiedliche Energiequellen, die genutzt werden können:⁴⁸

- Akkumulatoren und Batterien sowie
- Brennstoffzellen

Die Mehrzahl der mikrosystemtechnischen Applikationen werden heute, soweit sie nicht im Rahmen größerer Systeme an das Stromnetzwerk der Applikationen angeschlossen sind, durch Batterien betrieben. Bei einem wachsenden Anteil von medizintechnischen Lösungen durch singuläre mikrosystemtechnische Applikationen wächst allerdings die Anforderung an die Sicherung der Energieversorgung vor allem von implantierten mikrosystemtechnischen Lösungen. Die Mikrosystemtechnik ist bei diesen batterietechnischen Herangehensweisen in einer doppelten Weise gefordert. Zum einen muss der Energieverbrauch von mikrosystemtechnischen Applikationen optimiert werden. Hierbei geht es primär darum, den Einsatz der mikrosystemtechnischen Applikationen so zu steuern, dass ein möglichst geringer Verbrauch von Energie gewährleistet ist.

Die zweite Lösung im Rahmen der Batterieversorgung liegt aber in der optimalen Steuerung der Batterie selber. Optimal wäre es, wenn es gelänge, eine optimierte Batterieleistung durch die Implementierung von mikrosystemtechnischen Applikationen in der Batterie selber zu realisieren, die es wiederum ermöglicht, dass die Batterie in all ihren Zellen im optimalen Bereich gefahren werden kann. Dies wird vor allem bei einem wachsenden Energiebedarf mobiler Geräte unausweichlich sein. So zeigen erste Prognosen für die Einführung von UMTS-Geräten, dass der Bedarf an Energie in den Spitzenlasten in einen Bereich wächst, der durch eine weitere Leistungssteigerung im Rahmen des herrschenden Paradigmas nicht zu bewerkstelligen sein wird.

Schließlich werden neue Batterietypen nachgefragt werden, die bspw. im Rahmen von UbiComp zum Einsatz gelangen. Hierbei geht es um Folienbatterien, die es ermöglichen, das kleinste Strommengen zum Beispiel von Kleidertags genutzt werden können.

Alle drei Ansatzpunkte für die Mikrosystemtechnik deuten darauf hin, welches großes Potenzial die MST im Rahmen der Energie für MST bei Batterien zuzuweisen ist.

⁴⁸ Die Nutzung von regenerativen Energieerzeugungsmethoden wird nicht weiter verfolgt, da sie sich im Kern nicht von der Argumentation über Solarenergie von oben unterscheidet.

Mit der Einführung der MST in der Batterietechnologie ist bis heute kaum begonnen worden. Zwar ist bereits seit einiger Zeit bekannt, dass die Verbesserung des Lastmanagements in der Batterie zu einer wesentlichen Steigerung der Leistung und der Lebensdauer einer Batterie führen könnte, jedoch wurden bisher kaum Wege gefunden, dies auch kostengünstig technisch zu realisieren.

Gleichzeitig wächst der Markt für kleinere Batterietypen. Neben den bereits erwähnten Folienbatterien handelt es sich hierbei insgesamt um eine Tendenz zur Verkleinerung der Batterien in Endgeräten. Derzeit spielen für die Versorgung vor allem mobiler Kleinstsysteme Primärelemente und aufladbare Batterien eine hervorragende Rolle. Ultraflache Lithium-Polymer-Systeme erlauben unter Vermeidung von umweltbedenklichen Materialien wie Nickel oder Cadmium kosteneffektive "green technology"-Elemente. Für Primärelemente stellt der Einsatz der Dickschichttechnologie eine interessante Option dar, um mobile, hochintegrierte und kostengünstige Anwendungen zu erschließen und die mittels Folientechnologie gefertigten, auf Lithium als Anodenmaterial basierenden Elemente teilweise mit kostenoptimierten Materialsystemen wie Zn/Ag, Zn/Air u.a. zu substituieren. Hierbei spielt die MST eine zentrale Rolle. Da es nur durch die Entwicklung neuer Technologien möglich sein wird, die entsprechenden Größendegressionen zu erreichen.

Die Brennstoffzelle ist bereits im Detail im Abschnitt 6.4.1.3 behandelt worden. Im folgenden soll entsprechend nur auf die Spezifika eingegangen werden, die sich aus dem Bereich Energie für MST ergeben.

Der Einsatz von Brennstoffzellen in der Energieversorgung von mikrosystemtechnischen Lösungen ist aus mehreren Gründen eine interessante Perspektive. Zum einen kann die Brennstoffzelle über einen sehr langen Zeitraum die Versorgung der mikrosystemtechnischen Applikation mit Energie gewährleisten. Darüber hinaus ist es möglich, dass eine gleichmäßige Spannungsversorgung durch die Brennstoffzelle in einem besseren Maße gewährleistet werden kann als durch die bekannten Alternativen.

Auf der anderen Seite muss man aber auch die Nachteile der Brennstoffzelle im Rahmen der Energieversorgung von mikrosystemtechnischen Applikationen, vor allem im Life Science-Bereich hervorheben. So ist die mit der Brennstoffzelle verbundene Abwärme ein Problem, da sie vor allem bei implantierten mikrosystemtechnischen Applikationen abgeführt werden muss. Zum zweiten muss die mit der Brennstoffzelle einhergehende Speicherung mit einem Energieträger (Wasserstoff oder Methanol) gewährleistet sein. Dies ist nicht unproblematisch, vor allem bei Applikationen im Bereich der Life Sciences, da diese Stoffe in höchstem Maße gefährlich für die menschliche Physiologie sein können.

Miniaturisierte Brennstoffzellen scheinen gut geeignet für die Anwendung von mobilen Geräten, die Mikrosystemtechnik enthalten. Hervorzuheben sind Applikationen wie Notebooks und UMTS-Mobiltelefone, die in einem Maße Energie verbrauchen, wie sie in absehbarer Zeit durch Batterien und Akkumulatoren nicht in einer Form bereitgestellt werden kann, die eine notwendige Operationszeit ermöglichen. Allerdings sollten die damit einhergehenden Probleme auch für diese Anwendungsbereiche nicht übersehen werden. So sind auch bei den mobilen Applikationen die Gefahren, die durch die Energieträger der Brennstoffzelle (Wasserstoff, Methanol) gegeben sind, nicht zu unterschätzen. So muss z. B. bei Reisen mit dem Flugzeug davon ausgegangen werden, dass entsprechende Energietanks für die Brennstoffzelle nicht mitgeführt werden können. Hierfür Lösungen zu bieten, die eine Veränderung in der Nutzung der Brennstoffzelle für mobile Applikationen ermöglicht, ist eine der Aufgaben im Rahmen des Zukunftsfeldes Smart Energy.

Die Brennstoffzelle bietet eines der größten Potenziale für die Nutzung im Bereich der Energie für MST. Auch wenn zur Herstellung mehrheitlich mechanische und feinmechanische Fertigungstechnologien eingesetzt werden, gewinnen MST-affine Technologien wie

- Beschichtungsverfahren (z.B. für Ausbildung der katalytischen Grenzschicht)
- Pulver- und Pastentechnologien (z.B. für Elektrodenaufbau)
- Kompositstechnologien (z.B. für Membrane Electrode Assembly – MEA)
- Polymertechnologien (z.B. für Membrane)
- Mikrofluidik (z.B. für Medienzuführung und -Ableitung)
- Aufbau- und Verbindungstechnik (z.B. für Stacking von Zellelementen)
- Mikroelektroniktechnologie (z.B. für Steuerelektronik)

zunehmend an Bedeutung.

Innovationssprünge werden mittelfristig durch die Nutzung der Potenziale der Nanotechnologie erwartet.

6.4.3 Innovationsbarrieren

Die enge Verzahnung zwischen den in den beiden Ausprägungen des Zukunftsfeldes Smart Energy auftretenden Innovationsbarrieren lässt eine getrennte Betrachtung nach Barrieren bei MST für Energie und Energie für MST als wenig sinnvoll erscheinen.

Sehr deutlich wurden Innovationsbarrieren bei der Entwicklung der **Brennstoffzellen** und den damit zusammenhängenden mikro-systemtechnischen Komponenten gesehen. Die Brennstoffzelle stellt sicherlich eine der zukunftssträchtesten technischen Entwicklungen dar, wobei in der Bundesrepublik Deutschland der Schwerpunkt bei der Nutzung von Brennstoffzellen überwiegend im Bereich der Kraftfahrzeuge gesehen wird. Es wurde seitens aller Experten hervorgehoben, dass die Brennstoffzellenentwicklung in der Bundesrepublik den Nachteil aufweist, dass zwar eine Vielzahl an mikrosystemtechnischem Know-how für die Brennstoffzellen-Peripherie vorhanden ist, jedoch ein originärer Brennstoffhersteller derzeit in der Bundesrepublik Deutschland nicht existiert.

Die Mehrzahl der **Patente** und wirtschaftlichen Anwendungen der Brennstoffzelle liegen heute in den Händen einiger weniger Firmen in Nordamerika und Australien. Entsprechend schwierig ist es auch für die Hersteller von mikrosystemtechnischen Komponenten, in Deutschland Fuß zu fassen.

Hier wird eine große Chance versäumt, da aus einer technischen Perspektive das Grundlagenwissen über die Funktion der Brennstoffzellen in einem hohen Maße in der Bundesrepublik Deutschland verfügbar ist. Dieses kann jedoch aufgrund der strukturellen Frage nicht in Anwendungswissen formiert werden.

Neben der fehlenden wirtschaftlichen Struktur bei den Herstellern der Brennstoffzelle ist darüber hinaus das Problem der **Erzeugung des Energieträgers** für die Brennstoffzelle bei weitem nicht gelöst. Der am meisten wünschenswerte Energieträger Wasserstoff muss zunächst erzeugt werden, was wiederum mit Umweltproblemen verbunden ist, wenn keine regenerativen Energien für die Produktion von Wasserstoff benutzt werden. Hier sind sicherlich noch eine Vielzahl von Forschungsfragen zu lösen, bevor entsprechende Wasserstoffherzeugungstechniken kostengünstig und ökologisch vorhanden sind. Aber auch bei der Nutzung von anderen Energieträgern (Methanol, Erdgas) ist das Problem nicht einfach zu lösen. Je einfacher der Energieträger für den Betrieb der Brennstoffzelle zu erhalten ist, und dies ist in einem besonderen Maße bei Erdgas gegeben, umso höher sind die Anforderungen an die mikrosystemtechnischen Komponenten (stacks) in der Brennstoffzelle zu stellen. Die mit der Nutzung solcher Energieträger einhergehende Verschmutzung der Brennstoffzelle stellt ganz neue Herausforderungen an die Mikrosystemtechnik.

Beim Einsatz der Brennstoffzelle im Rahmen der **Energie für MST** ist eine weitergehende Vielzahl von Innovationsbarrieren festzuhalten. So ist vor allem im Bereich von Life Sciences die Brennstoffzelle mit besonderen Anforderungen konfrontiert. Die physiologischen Anforderungen an einen Betrieb der Brennstoffzelle im Rahmen von Life Sciences machen es notwendig, ganz neue Formen von Sensorik und Aktorik wie auch der stacks zu bewerkstelligen.

Aber auch bei der Nutzung von Brennstoffzellen im Bereich der mobilen Anwendungen außerhalb des Körpers stellen sich noch eine Vielzahl von Problemen. Zwar ist es der Fraunhofer-Gesellschaft zum ersten Mal gelungen, eine integrierte Brennstoffzelle für die Nutzung im Rahmen eines Notebooks als Prototyp zu entwickeln, jedoch ist dieser Prototyp noch weit von einer Serienproduktion entfernt. Probleme des Wassermanagements sind ebenso noch zu lösen wie Fragen der Zufuhr des Energieträgers und Aspekte der Leistungsoptimierung über Spitzen. Bisher sind Brennstoffzellen kaum geeignet Leistungsspitzen zu befriedigen und außerdem sind die Anlaufzeiten für mobile Anwendungen nach wie vor nicht optimal.

Die Entwicklung bei den Batterien kann vor allem im Bereich der miniaturisierten Batterien gesehen werden. Hierbei geht es weniger um die Entwicklung neuer technischer Lösungen sondern vielmehr um die Miniaturisierung bei gleichzeitiger hoher Leistungsdichte in der Batterie. Des weiteren wird die Bemühung bei der Optimierung der Leistung der Batterie über die Lebenszeit wie auch die Herstellung von neuen Batterietypen wie den Folienbatterien und den Polymerbatterien ein wichtiges Forschungsfeld darstellen, das sich bisher nicht eigenständig entwickelt hat. So steht die deutsche Batterieindustrie derzeit vor dem Dilemma, dass sie kaum mehr Perspektiven sieht und nach Aussagen der Batteriehersteller sind die Innovationspotenziale der bestehenden Batterieunternehmen im Jahr 2008 in etwa ausgereizt. Bei den regenerativen Anwendungen sind die Innovationsbarrieren vor allem bei den eingesetzten Materialien und den Wirkungsgraden zu sehen, die durch die Mikrosystemtechnik verbessert werden können.

Bei der **Energieversorgung** liegen zentrale Innovationsbarrieren im Bereich des Zusammenspiels zwischen Steuerungsprozessen in einer Einheit (Wohnung, Gebäude, Anlage) und den einheitsübergreifenden Steuerungsprozessen. Dies beinhaltet primär die Überwindung der mit der Einführung von Netzwerktechniken verbundenen kritischen Masse. Eine Vielzahl von Unternehmen ist derzeit nicht bereit, FuE in Netzsteuerungstechnologien zu finanzieren, da weder ein Systemintegrator noch ein einheitlicher Standard vorhanden ist.

6.4.4 Stärken und Schwächen im internationalen Vergleich

Tabelle 6.6: SWOT-Analyse Smart Energy

Smart Energy	
Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Gesellschaftlicher Konsens für die Implementierung von dezentralen und regenerativen Energieerzeugungstechniken. • Wissenschaftliche Basis in der Erforschung dezentraler Energieerzeugungstechnik ist beachtlich. • Hoher technischen Stand bei der Entwicklung von Lastmanagementsystemen. • Der Entwicklungsstand der MST in diesem Zukunftsfeld ist hoch. • In diesem Bereich gehört Deutschland zu den Marktführern. 	<ul style="list-style-type: none"> • Für das Feld der Energieerzeugung durch Brennstoffzellen und für die zukunfts-trächtige Energieversorgung durch Batterien ist eine tragfähige industrielle Struktur derzeit nicht gegeben. • Starke Abhängigkeit vom technologischen Antrieb aus dem Automotive-Sektor bei der Brennstoffzelle. • Zu geringe FuE Aktivitäten in Schlüsselbereichen wie z.B. Carbon Nanotubes. • Die technische Fähigkeit in der Entwicklung von Lastmanagementsystemen wird nicht im marktlichen Bereich umgesetzt.
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Mobilisierung der MST Kompetenz für wichtige potente Marktsegmente. • Ausnutzung vorhandener Marktpotenziale im Rahmen wachsender Dezentralisierung der Energieversorgung. 	<ul style="list-style-type: none"> • Potenzial neuer Materialien (carbon nanotubes, horns) für industriellen Einsatz noch unklar. • Veränderte politische Einstellung gegenüber dezentralen und regenerativen Energieerzeugungs- und Energieversorgungsstrukturen.

6.5 Mikro-Nano-Interface⁴⁹

6.5.1 Kurzbeschreibung und Bedeutung

Das Zukunftsfeld Mikro-Nano-Interface (MNI) umfasst mit der Sub- μ - und Nanotechnologie "enabling technologies" für die MST. Dem Feld kommt damit eine Schlüsselrolle bei der Implementierung von Funktionalität im Mikrometermaßstab in die Makrowelt ebenso zu wie bei der Einbindung von nanoskaligen Effekten in den Bereich der Mikrosysteme.

Neue und zunehmend engere interdisziplinäre Verknüpfungen ergeben sich damit zur Biotechnologie oder LifeScience. MNI stellt für die Zukunftstechnologien, z.B. für eine technisch überhaupt erst beherrschbare Molekülanalyse, eine praktikable Molekülmanipulation und Synthese oder den Aufbau von Aktorik auf molekularer Basis, die entscheidenden Hardware-Grundlagen bereit.

Das Zukunftsfeld stellt ebenfalls den Technologiepool bereit für die interdisziplinäre Integration von mechanischen, optischen und magnetischen, fluidischen und elektrischen Komponenten in ein Makroumfeld bei gleichzeitiger Beherrschung definierter Interfaces zur nanoskaligen Welt.

Damit ergänzt das Feld vorteilhaft den dem 6. Rahmenprogramm der Europäischen Union zugrundeliegenden Ansatz⁵⁰. Das 6. Rahmenprogramm fokussiert zum einen mit einer top-down-Betrachtung auf die nachhaltige Entwicklung von Integrationstechnologien zur Erschließung des Nanobereichs durch fortschreitendes downscaling von Funktionalitäten im Mikrobereich und zum anderen auf die grundlegende Erforschung und Charakterisierung neuartiger nanobasierter Effekte und die Entwicklung von Komponenten auf dieser Grundlage.

⁴⁹ Der ursprünglich hierfür verwandte Begriff "Sub- μ -Technologien" ist nach Reflexionen aus dem Umfeld der Mikrosystemtechnik/Mikroelektronik bereits zur Charakterisierung des derzeitigen Integrationsniveaus im Strukturbereich unterhalb eines Mikrometers in der Halbleitertechnik belegt. Daher wurde eine neue Bezeichnungen für das Zukunftsfeld gesucht, die folgende Anforderungen genügen sollte: Inhaltlich eindeutige Charakterisierung, Neuheitscharakter, Ausdruck einer Interdisziplinarität, Wiedererkennungswert, förderpolitische Argumentierbarkeit. Die Mehrheit der Experten entschied sich daher für die Bezeichnung des Zukunftsfeldes: Mikro-Nano-Interface (MNI).

⁵⁰ R. Cencioni, D. Beernaert et.al., "The Implementation of Microsystems and [Micro@Nano-Technologies](#) in Framework Programme 6 - IST", Brüssel März 2002

Das Zukunftsfeld MNI orientiert mit seiner anwendungszentrierten Ausrichtung auf das KMU-gerechte Aufgreifen und Nutzen solcher bestehenden Basistechnologien und Schlüsseffekte und auf deren Einbindung in MNI-Applikationen. Es kann damit vorteilhaft auf Vorleistungen zugreifen.

Charakteristikum der Schnittmenge aus Nanotechnologie und MST ist, dass mindestens eine funktionale Komponente des betrachteten Systems auf der Nanotechnologie fußt oder mit ihrer Hilfe hergestellt wurde. Bei Strukturen < 100 nm ändern sich in Abhängigkeit des Materials die Eigenschaften im Vergleich zum makroskopischen Materialsystem. Die Eigenschaften der Materialien verlassen das Kontinuum, die Eigenschaften werden deutlich größenabhängig. Damit treten neue Effekte auf, die bisher nicht genutzt wurden.

Beispielhaft sei hier das vom Partikeldurchmesser abhängige optische Absorptionsverhalten von Materialien erwähnt, dass das Design völlig neuartiger Optosensoren erlaubt oder die Steuerung der Emissionswellenlänge bei Quanten-Dot-Bauelementen, die die Integration neuartiger Bauelemente der optischen Datenübertragung ermöglichen und so die Effizienz des Gesamtsystems steigern.

Mit der Beherrschung des Interface zwischen der Makro-, Mikro- und Nanowelt wird im Zukunftsfeld MNI die entscheidende Grundlage für deutsche Unternehmen geschaffen, die mittel- und langfristigen Miniaturisierungstrends erfolgreich in Produkte umzusetzen und damit neue Marktsegmente zu erschließen bzw. in vorhandene vorzudringen. Beispielhaft seien hier Quanten-Dot-Laser-Bauelemente für die Verwendung in fasergestützten Kommunikationssystemen durch „smart-surface“ antifibros wirkende koronare Stents, neuartige Flat-Panel-Displays auf der Basis von Carbon-Nanotube-Emittern oder auch hochpräzises Handlings- und Fertigungs-Equipment mit Positionier- und Bearbeitungsgenauigkeiten im Nanometerbereich genannt.

Die laut Auswertung der schriftlichen Umfrage mit dem Zukunftsfeld MNI verbundenen "Schlüsselwörter" sind: Nanotechnologie, Neue Werkstoffe, Polytronik, Schichttechnologien, Mikro- und Nanomanipulationstechniken, Mikroelektroniktechnologien und Selbstorganisation.

Die o. g. Begriffe erscheinen "techniklastig". Erweitert man die Betrachtung allerdings auf die dazugehörigen Schlüsselprodukte, so wird die wirtschaftliche Tragweite deutlich.

MNI-Produkte sind eine Schnittmenge aus MST-affinen Komponenten oder Systemen, die die Produktionsverfahren und Materialeigenschaften der Nanotechnologie funktional nutzen oder in denen MST die Schnittstelle zur makroskopischen Welt darstellt. Das ist nicht zuletzt für die Aufbau- und Verbindungstechnik einer zukünftigen Nanoelektronik von Bedeutung.

Ein von Infineon kürzlich publiziertes Beispiel⁵¹ demonstriert das besonders deutlich. Das selektive Wachstum von Carbon Nanotubes (CNTs) kann – in einem voll CMOS-kompatiblen Prozess - zur Verbindung von zwei Leiterbahnebenen eingesetzt werden. Damit würde ein Engpass im Integrationsprozess von Mikroelektronik/Mikrosystemtechnik, nämlich der der Verfügbarkeit von Vias hoher Performance, überwunden.

Die hervorragenden physikalischen Eigenschaften wie die mechanische Festigkeit, der extrem hohe E-Modul, die enorm hohe mögliche Stromdichte, die hohe thermische Leitfähigkeit in Kombination mit dem längenunabhängigen Widerstand prädestinieren Carbon Nanotubes nicht nur als Schlüsselmaterial einer zukünftigen Mikro- und Nanoelektronik.

Weitere exemplarische MST-affine Produkte sind Scanning-Probe-Microscopes (SPM), Festplatten mit GMR-Leseköpfen, GMR-Sensoren, Schichtsysteme in der Biosensorik, Field Emission Displays sowie Teile der Aufbau- und Verbindungstechnik.

Letztendlich ist MNI das "Schlüselfeld", das Nanotechnologie einsetzt und die Mikroelektronik bzw. Mikrosystemtechnik mit der Nanotechnologie verbindet.

Ein sehr anschauliches Beispiel für diese Interface-Funktion ist das "Millipede-Projekt" von IBM, Rüschlikon. Hier werden 1024 AFM⁵²-Cantilever – die mit den üblichen technologischen Verfahren der Mikrosystemtechnik hergestellt werden - als "Schreib-Lesekopf" für einen neuartigen Massenspeicher eingesetzt. Nur durch die damit möglich gewordenen nanometergenauen Schreib- und Lese-Operationen von Einzelbits können Speicherdichten von 1 TBit/in^2 erreicht werden.

Zur Überwindung der derzeit deutlich werdenden physikalisch begründeten Limitierung der beherrschbaren Speicherdichte bei magnetisch basierten Massenspeichern von $60\text{-}70 \text{ Gbit/in}^2$ könnte diese Technik in mobilen und stationären Massenspeichern wesentliche Beiträge leisten. In diesem Beispiel wird deutlich erkennbar eine Technologie eingesetzt, die sowohl als Mikro-

51 F. Kreupl, A. Graham, W. Hönlein, "A status report on technology for carbon nanotube devices", Sol. State Technology, pp. S9-S16, April 2002. (Aktuelle Pressemitteilung unter www.infineon.com).

52 AFM - Atomic Force Microscope

systemtechnik als auch als Nanotechnologie betrachtet werden kann.

Das Zukunftsfeld MNI stellt ein forschungsintensives, stark interdisziplinäres Hybridfeld dar, mit dem das Interface von Mikro- und Nanowelt zur Makrowelt als FuE-Herausforderung aufgegriffen wird. Insbesondere sind in diesem Feld neue Impulse durch die Nanotechnologie in Kombination mit den Smart Materials zu erwarten. Das technologisch einfache Aufbringen einer nanostrukturierten Schicht oder eines Layers aus Carbon Nanotubes – beispielsweise als sensitive Schicht eines Gassensors oder eines OptoArrays – ermöglicht dem Anwender die Nutzung völlig neuer Effekte bei gleichzeitiger Generierung erheblicher Produktvorteile⁵³.

Die **Mikro-Nano-Interface-Technologien** sind gemeinsam mit den **Mikromaterialien** als grundlegende Querschnittstechnologien zu betrachten; Optronics, Fluidtronics und Polytronics stellen die Voraussetzung für funktionale Komponenten der MST dar, die über Systemintegrationstechnologien zu Systemen verschmolzen oder in übergeordnete Systeme integriert werden.

Zur Herstellung solcher Systeme bedarf es passender Fabrikationstechniken (**Agile Fabrication**). **Life Sciences** und **Smart Energy** wird als ein wichtiger und momentan am zukunftsreichsten erscheinender Anwendungsbereich für solche Systeme gesehen.

Das Zukunftsfeld Mikro-Nano-Interface zeichnet sich nach Meinung der befragten Experten aus durch:

- Fortgesetzten Trend weiterer Miniaturisierung
- Implementierung neuartiger (meist) nanobasierter Effekte
- Hohe Interdisziplinarität
- Stetig zunehmende Vielfalt an Materialien und Prozessen
- Hohe Produkt- und Branchen-Vielfalt
- Erheblichen Entwicklungsbedarf

⁵³ Vgl. z.B. K.G. Ong et al., IEEE Sensors Journal, Vol. 2, No. 2, April 2002, pp. 82-88.

6.5.2 Künftige Entwicklungslinien

Eine der hochpotenten Technologieoptionen des Zukunftsfeldes wird übereinstimmend in der Nutzung von leitenden, nicht- und halbleitenden Polymeren für die Herstellung integrierter miniaturisierter Systeme gesehen. Neben der Herstellung von Schichten, die funktionsbedingt eine Schichtdicke von wenigen Nanometern aufweisen müssen, scheint aus heutiger Sicht von besonderer Bedeutung die Möglichkeit zu werden, mittels nanoskaliger Füllpartikel die thermischen, elektrischen oder mechanischen Eigenschaften dieser organischen Basismaterialien in einer immensen Bandbreite zu variieren. Auf diesem Gebiet wurden in den letzten Monaten vielversprechende Ergebnisse publiziert. Dies allerdings auf empirischer Basis, da die Natur der Vorgänge beim Durchlaufen der Perkulationskurve erst in Ansätzen theoretisch erklärt werden kann.

Prädestiniert ist diese Basistechnologie vor allem für "low cost - low performance"-Anwendungen, die von der bisher so erfolgreichen Silizium-Elektronik aus Kostengründen nicht abgedeckt werden können. Schon jetzt zeichnen sich durch die günstigen Materialeigenschaften (Flexibilität, Optische Leitfähigkeit, physiologische Verträglichkeit, große Bandbreite der Leitfähigkeit) Marktsegmente ab, die auch zukünftig von Alternativlösungen nicht oder nur unvollkommen erreicht werden können. Das sind vor allem

- FlexDisplays
- PC/PDA-Peripherik (Tastaturen, Touch-Pads und-Screens)
- Integrierte Sensorik/Aktorik für inkorporale Prothetik
- Disposables
- Drug Delivery Systeme
- Smart cards
- ID-Tags-Anwendungen

und weitere Applikationen mit geringen Anforderungen an Speicherdichte und Arbeitsfrequenz.

Integrierte und miniaturisierte Systeme auf polymerer Basis stellen mit der Nutzung neuer Materialien und neuer Prozesse eine Herausforderung für den FuE-Prozess so unterschiedlicher Disziplinen wie Elektrotechnik, Chemie und Physik dar. So ist idealerweise anzustreben, dass neben dem aktiven Polymer auch alle anderen Komponenten des Systems aus Polymeren (full-polymer-systems) bestehen. Ein voll-polymerer Foliencomputer mit integriertem Display und Folienbatterie rückt in greifbare Nähe. Plastik-Chips könnten als universelle Informationsträger in Kleidungsstücke, Verpackungen, Gepäckstücke oder Medikamentenpackungen eingearbeitet werden. Über Transponder-Technik können Informationen dann drahtlos weitergegeben werden.

International wurden bereits mehrere organische Materialien und Bauelemente entwickelt, die aber die Anforderungen hinsichtlich Langzeitstabilität und Taktfrequenz noch nicht erfüllen. Auffällig ist auch die mangelnde Reproduzierbarkeit durch eine gravierende Abhängigkeit der Qualität der Bauelemente von der Herstellungstechnologie. Für einzelne Bauelemente wurde zwar die Funktionsfähigkeit nachgewiesen, die Erreichung einer Integrationsfähigkeit zur Nutzung in Systemen bedarf noch merklicher Forschungsanstrengungen. Dabei sind Grundlagen der Bauelemente, die Auswahl geeigneter Systemdesigns und Architekturen, ihre Technologie, wie beispielsweise Strukturierung und die Präparation von Leiterbahnen, die Materialcharakterisierung und Materialeigenschaften zu erforschen. Auch sind übergreifende Fragen, wie solche zur Dotierung weitestgehend offen.

Ein außerordentlich hoffnungsvoller Ansatz für die Lösung einer großen Zahl von Herausforderungen auf diesem Gebiet der Materialforschung besteht in der Nutzung von Nanopartikeln als Füllmaterialien in Polymeren. Mit Hilfe dieser Füllmaterialien sind sowohl physikalische Eigenschaften wie die elektrische oder die thermische Leitfähigkeit, der Brechungsindex, die Biegesteifigkeit oder auch chemische Eigenschaften wie Medienresistenzen in einem bisher nicht erreichtem Maße beeinflussbar.

Der prognostizierte Marktanteil von Polymersystemen ist zum einen für die Großindustrie von Interesse wegen der möglichen und sinnfälligen Integration in Systemketten in Bereichen der Logistik, Medizin-, Sicherheits-, Verkehrs- und Informationstechnik. Die zu erwartende Technologie ist aber zum anderen auch und gerade für kleine Betriebe von großem Interesse, weil für die Fertigung der Produkte durch den Verzicht auf investitionsintensive Reinraumtechnik vergleichsweise geringe Initial- und Betriebskosten notwendig sind.

Deutschland besitzt im Bereich der Materialherstellung und des Equipments bei Großunternehmen wie auch im KMU-Bereich eine hervorragende Position und damit gute Startvoraussetzungen, um diese Technologie mit nachhaltigen Markterfolg zu nutzen.

Ähnlich wie in der Mikrosystemtechnik verfügt Deutschland über eine hervorragende Ausgangsposition in der Nanotechnologie, wie wesentliche Technologieindikatoren⁵⁴ belegen. So weist die Anzahl der Veröffentlichungen und Patente im Nanotechnologiesektor darauf hin, dass sich Deutschland in der Rangliste stets unter den ersten vier Ländern befindet. Das gilt sowohl für die absolute

54 R. Compañó and A. Hullmann, "Forecasting the development of nanotechnology with the help of science and technology indicators," *Nanotechnology*, vol. 13, pp. 243-247, 2002.

Anzahl der Patente und Veröffentlichungen als auch für die auf die Anzahl der Einwohner bezogenen Werte.

Die Nanotechnologiefelder lassen sich folgendermaßen aufteilen:

- Nanomaterialien
 - ultradünne Filme
 - Carbon Nanotubes
 - Nanokatalysatoren
- Nanotools
 - Analytische Instrumente
 - Rasterkraftmikroskopie
- Nanodevices
 - GMR Schreib- Leseköpfe
 - Quantum Dot Laser
 - OLEDs
- Nanobiotech
 - (Biochips)
 - DNA Chips
- Elektronik

Aus dieser Kategorisierung wird deutlich, dass einige Bereiche eine hohe MST-Affinität aufweisen. Wirtschaftlich profitieren sowohl Großunternehmen als auch KMUs von diesem Gebiet. So sind beispielsweise die Carbon Nanotube-Vias für den Einsatz in der Mikroelektronik eine Domäne der Großindustrie während der Messtechniksektor (Nanotools) durch den Mittelstand geprägt wird. Der Einsatz der Nanotechnologie in "klassischen Produkten" wie z.B. Sensoren erlaubt eine z.T. deutliche Erhöhung der Performance. Ein Beispiel sind Magnet- oder Biosensoren die durch Nutzung des Giant Magneto Resistive – Effekts (GMR) deutlich bessere, mit anderen Verfahren nicht erreichbare, Sensoreigenschaften aufweisen.

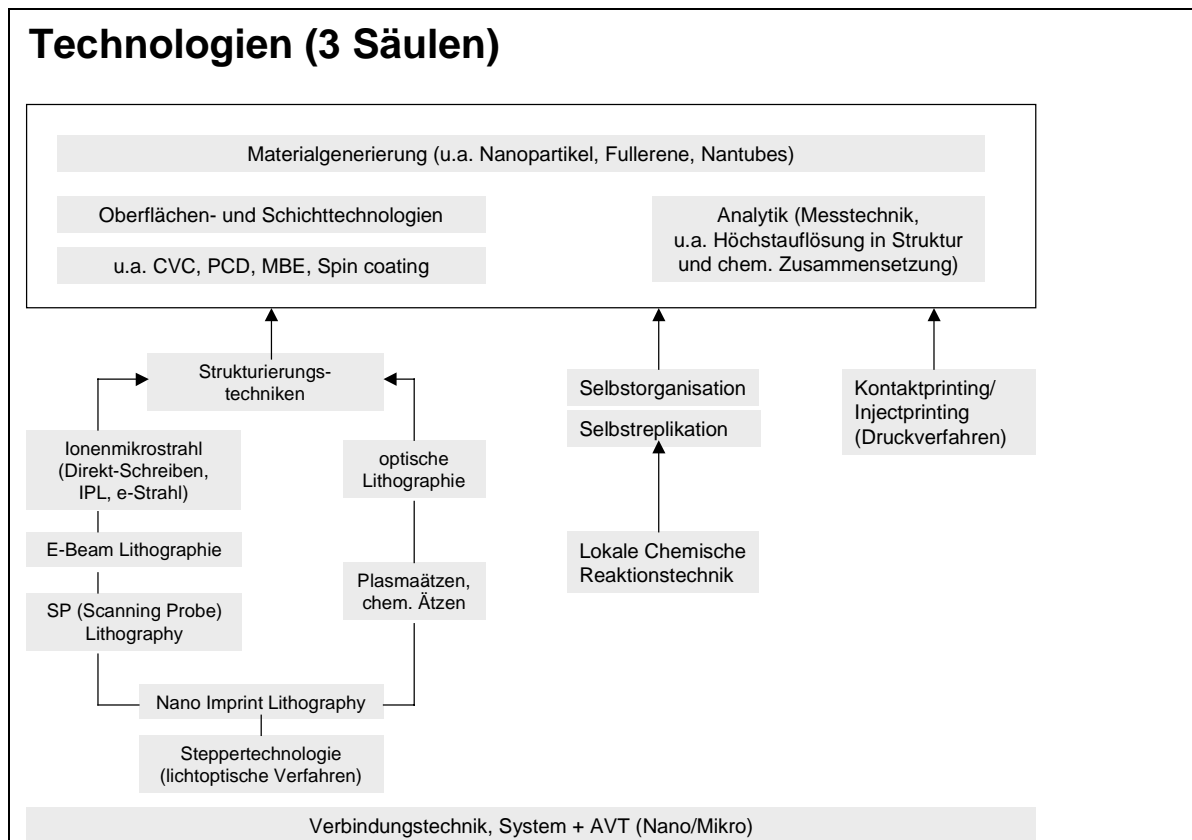
Durch die weitere Material- und Designoptimierung auf diesem Gebiet wurden mit dem CMR und BMR – Effekt in jüngster Zeit weitere Phänomene entdeckt, die auch in Zukunft Performanceverbesserungen erwarten lassen.

Ähnliches wird im Life-Science-Bereich zu erwarten sein. Biokompatible Schichten spielen für aktive und passive Implantate eine fundamentale Rolle. Für den effizienten Einsatz von MST im menschlichen Körper ist das Interface Mensch und Mikrosystem

besonders wichtig. Gerade in diesem Bereich ist ein verstärkter Forschungseinsatz notwendig.

Hinsichtlich einer Strukturierung der Technologien für das Zukunftsfeld MNI wurde eine 3-Säulen-Struktur, bestehend aus Materialgenerierung, Schichttechnologien (incl. Strukturübertragung) und Analytik gefunden (Abb. 6.4).

Abbildung 6.4: Strukturmodell der MNI-Technologien



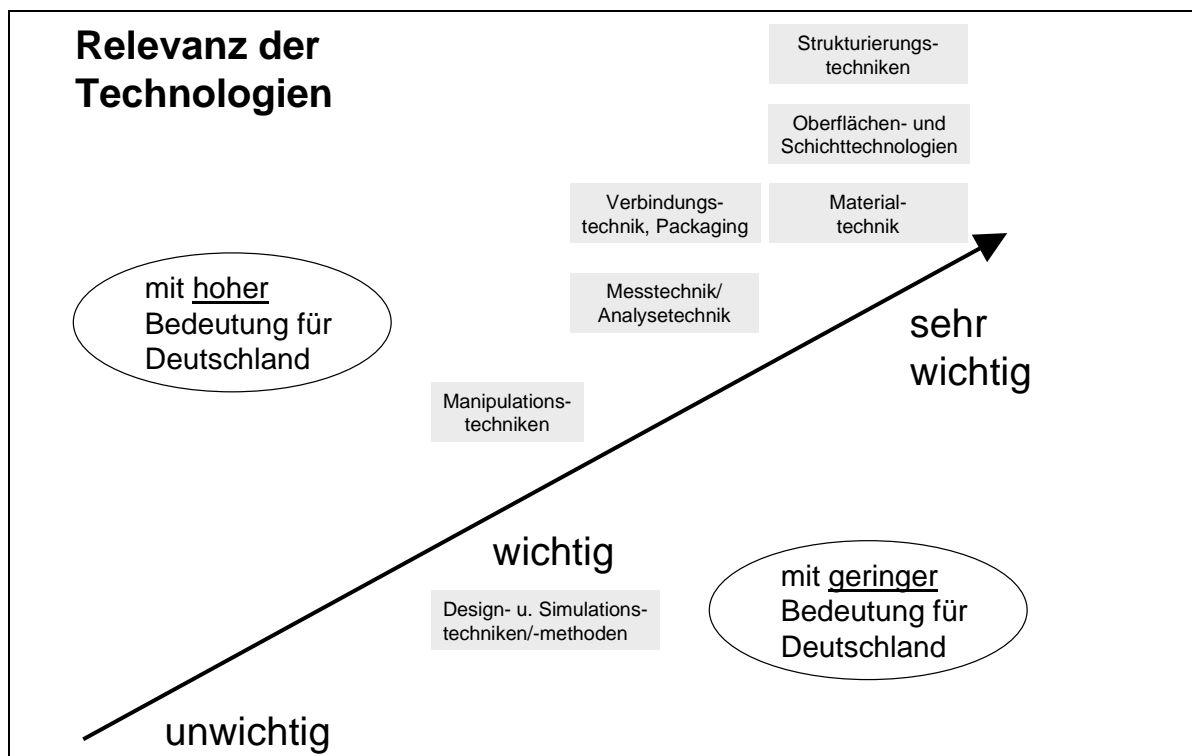
Die Basis für die drei Säulen sind die Materialgenerierung, die Analytik sowie die Oberflächen- und Schichttechnologien. Es handelt sich hierbei um Technologien sehr unterschiedlichen Reifegrads, die der klassischen Halbleitertechnik (z.B. optische Lithographie) zuzurechnen sind und teilweise Technologien, die noch in der Entwicklung sind (z.B. InkJet-Printing) bzw. künftig entwickelt werden könnten (z.B. Selbstreplikationsverfahren).

Im Verlauf der Untersuchung konnten folgende Technologiefelder herausgearbeitet werden, die einem in Abbildung 6.7 dargestellten Ranking unterzogen wurden.:

- Mess- und Analysetechnik,
- Strukturierungstechnik,
- Design- und Simulationstechnik,
- Manipulationstechnik,
- Materialtechnik sowie
- Oberflächen- und Schichttechnologien.

Übereinstimmend wurde für die genannten Technologien fast unabhängig vom momentanen Entwicklungsstand ein erheblicher Entwicklungsbedarf signalisiert. Offenbar besteht zwischen den Technologien ein reflexiver Bezug und somit ist nach Ansicht der Workshop-Teilnehmer eine Einordnung in die Kategorien "nicht wichtig" bis "sehr wichtig" schwer bzw. unmöglich.

Abbildung 6.5: Versuch eines Technologie-Rankings im Zukunftsfeld MNI



So wird insbesondere die Entwicklung der Messtechnik, vor allem die der integrativen Verfahren, die mehrere Techniken der Messwerterfassung kombiniert anwenden, als bedeutend für die Material- und Oberflächentechnologien eingeschätzt. Festzuhalten bleibt, dass eine Weiterentwicklung aller benannten Technologien und Technologiefelder als wichtig bzw. sehr wichtig eingeschätzt wird.

Unabhängig voneinander wurde von den Experten festgestellt, dass die Aufbau- und Verbindungstechnik – inklusive der Systemintegration – einen signifikanten Einfluss auf alle anderen Technologien ausübt und somit eine übergreifende Funktion hat. Von einem Expertenpanel wurde für das Feld die besondere Bedeutung der folgenden Technologien herausgehoben:

- Strukturierungstechniken
- Materialgenerierung
- Mess- und Analysetechniken
- Oberflächen- und Schichttechnologien

Entsprechend der breiten technologischen Basis des Zukunftsfeldes ergeben sich sehr umfangreiche und stark heterogene Anwendungsfelder und Produkte, die den Querschnittscharakter des Feldes unterstreichen.

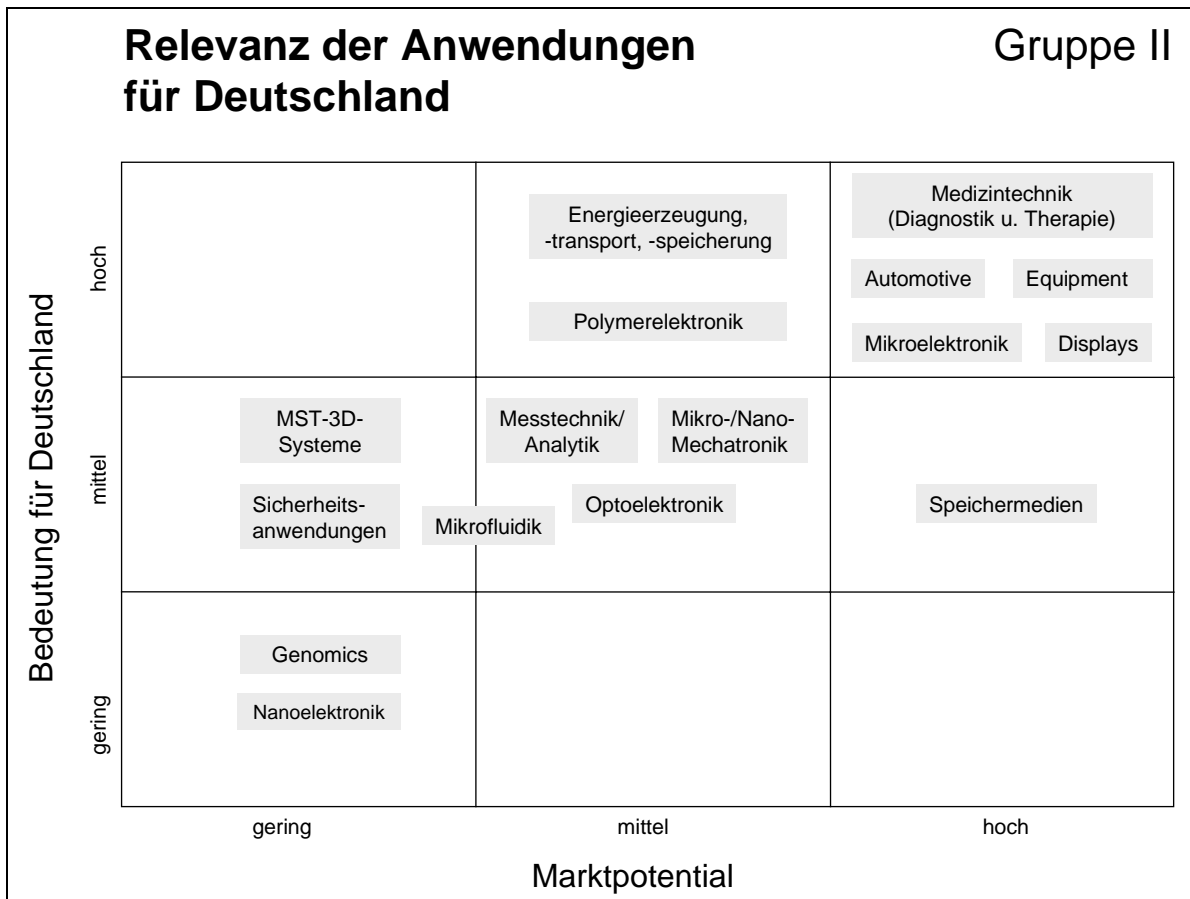
Es konnte im Verlauf der Erhebung gezeigt werden, dass einzelne für das Feld präferierte Produkte (mikroelektronische Bauelemente, Massenspeicher) weltweit erhebliche Marktvolumina aufweisen, aber Deutschland in dem spezifischen Gebiet nicht zwangsläufig über eine starke industrielle Basis oder die notwendige Industriestruktur verfügt.

Ein anderes Beispiel dafür sind Schreib-Leseköpfe von Festplatten, die fast ausnahmslos auf dem GMR (giant magnetoresistive) Effekt beruhen, der ein typischer nanotechnologischer Effekt ist, während Festplatten von den Marktanalysten zu den MST-Produkten gezählt werden. Es handelt sich hierbei um ein erfolgreiches Beispiel der MNI-Technologie, das allerdings für Deutschland aufgrund der fehlenden Fertigungsbasis keine Bedeutung im Hinblick auf den Umsatz, Export oder gar Arbeitsplätze hat.

Als Untersuchungsergebnis ist hervorzuheben, dass Einigkeit darüber erzielt wurde, dass nicht zwangsläufig Produkte mit einem geringen oder mittleren Marktpotenzial uninteressant sind. Hier bietet sich insbesondere eine Chance für KMUs, einen z.T. hochspezialisierten Nischenmarkt in einem Hochtechnologiefeld erfolgreich zu bedienen, der aufgrund der geringen Marktgröße für Großunternehmen eher uninteressant sein dürfte.

Abbildung 6.6 verdeutlicht die Klassifizierung der Anwendungen im Zukunftsfeld. Zu den Anwendungsgebieten der MNI-Technologie mit der erwarteten größten Bedeutung für Deutschland und mit dem höchsten Marktpotenzial zählen die Medizintechnik, Automotive und Equipment.

Abbildung 6.6: MNI-Anwendungs-Ranking



Die Klassifizierung der Produkte und Anwendungen lassen eine Vielzahl an Gemeinsamkeiten erkennen.

Dem Bereich Mikroelektronik (hier als Produkt: ICs) wird als Anwendung übereinstimmend eine hohe bzw. sehr hohe Bedeutung beigemessen. Zum einen ist eine erhebliche Anzahl von hochqualifizierten Arbeitsplätzen durch die Mikroelektronikindustrie und ihre Zulieferer (z.B. Equipment) in Deutschland entstanden und zum anderen ist durch die hohen Anforderungen im Equipment- und Analysebereich sowie der Aufbau- und Verbindungstechnik eine hohe MNI-Relevanz nachvollziehbar. Der Equipmentbereich und die Analytik sind eine klassische Domäne von durchaus erfolgreichen KMUs in Deutschland.

6.5.3 Innovationsbarrieren

Aus der Vielzahl der im Analyseprozess genannten Innovationsbarrieren wurden die folgenden als **wesentliche zukunftsfeldübergreifende Barrieren** ermittelt:

- Fachpersonal
- Finanzierung
- Investitionen
- Forschung und Entwicklung
- Gesetzgebung und Regulierung

Fachpersonal

Die Innovationsbarrieren beim Fachpersonal liegen insbesondere in **Art und Inhalt** und dem zeitlichen Ablauf der Ausbildung und in der Flexibilität von qualifiziertem Personal.

In der "**Green-Card-Aktion**" wird kein geeignetes Mittel gesehen, um dem Fachkräftemangel in Deutschland entgegenzuwirken.

Finanzierung

Innovationsbarrieren in der Finanzierung bestehen in der Struktur des Risikokapitals. So wurde bemängelt, das Risikokapital in Deutschland kein Risikokapital im eigentlichen Sinne ist. Das ist u.a. im kulturellen Unterschied zwischen USA und Deutschland im Bezug auf die Bewertung des Charakters von Wagniskapital begründet (Akzeptanz eines Totalverlusts). Die Ausrichtung des Wagniskapitals in Deutschland tendiert verstärkt in Richtung einer konservativen Investmententscheidung.

Investitionen

Die Investitionsrisiken für KMU sind z.T. erheblich hoch, da ein für eine Marktumsetzung von MNI-Applikationen erforderlicher Aufbau von Fertigungseinrichtungen z.T. erhebliches Kapital bindet.

In der Neubelebung von Instrumenten zur Unterstützung von Unternehmensgründungen (TOU) wird von Forschungs- und Industrievertretern gleichermaßen ein gutes Instrument zur Umsetzung von Innovationen gesehen.

Forschung und Entwicklung

Vornehmlich von KMU(!) wurde eingeschätzt, dass der Auffüllung der Innovationspipeline mehr Aufmerksamkeit zu widmen ist. Hier wird ein "Austrocknungseffekt" gesehen, der die Verfügbarkeit von Innovationen in der Mittelfrist vermindert bzw. verhindert. Angeregt wurde dazu eine "Grundfinanzierung für Hochschulen für gezielte Themen" oder die Gewährung von steuerlichen Anreizen für Forschungsaufträge an Forschungseinrichtungen/Hochschulen.

Diese grundlagenorientierten Forschungen sollten dann unter Einfluss eines Industriekonsortiums stehen. Die Ausschreibung könnte unter Industriedefinition stehen (Uni als Problemlöser).

Gesetzgebung und Regulierung

Die Barrieren in der Gesetzgebung und Regulierung werden insbesondere im Arbeitsrecht sowie den Genehmigungs- und Verwaltungsverfahren (u.a. Zulassungen, Patentverfahren) gesehen. Beispielsweise ist die Zellgängigkeit der Materialien und Produkte, erst recht der Abprodukte mit ihrer momentan nicht abgeschätzten physiologischen Bedenklichkeit ein Diskussionsgegenstand.

6.5.4 Stärken und Schwächen im internationalen Vergleich

Tabelle 6.7: SWOT-Analyse Mikro-Nano-Interface

Mikro-Nano-Interface	
Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Gute KMU-Infrastruktur • Gute Forschungsinfrastruktur • Starke deutsche Firmen im Bereich Materialherstellung und Equipment • Etablierte Schnittstellen zu Material-, Bio-, Chemiewissenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> • Lange Time-to-Market-Spanne • Wenig grundlagenorientierte Forschung in Deutschland • Wenig marktorientierte Aktivitäten bei den magnetischen Speichermedien, Displays und anderen Schlüsselapplikationen
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Gute Ausgangslage im interdisziplinären Bereich Biotechnologie/MST • Dominant für Märkte mit hohem Miniaturisierungspotenzial • Neue Applikationen mit großen Marktpotenzialen • Link zum Nanotechnologieprogramm 	<ul style="list-style-type: none"> • Z. T. großer technologischer Vorsprung im Ausland • Finden eines eigenen Weges ohne bloße Imitation amerikanischer Aktivitäten • Wesentliche Fragestellungen unklar (Messtechnische Erfassung, Sicherung von Zuverlässigkeit und Lebensdauer) • Derzeit nicht vollständig verifizierbare Aspekte der Nachhaltigkeit • Zunehmender Wettbewerb innereuropäisch/weltweit

6.6 Life Sciences und Fluidtronics

Die Kombination von Life Sciences, Fluidtronics und Mikrosystemtechnik wird übereinstimmend als ein Zukunftsfeld mit sehr hohem Entwicklungspotenzial gesehen. Die Integration von Mikrosystemtechnik in die Medizintechnik ist schon seit längerer Zeit etabliert. Dazu kommt, dass in den letzten Jahren die Kombination von Mikrosystemtechnik mit der molekularen und zellularen Biotechnologie und hier insbesondere mit der Entschlüsselung des Humangenoms, noch weitere Möglichkeiten des Einsatzes von Mikrosystemtechnik in der Biomedizin geschaffen hat. Dieses Feld steht weitgehend noch am Anfang seiner Entwicklung.

Life Sciences ist die Anwendung wissenschaftlicher und ingenieurwissenschaftlicher Prinzipien, um Stoffe und Materialien mit Hilfe biologischer Wirkstoffe und Organismen herzustellen und gezielt zu verändern. Gegenstand der Mikro- und Nanofluidik sind Vorrichtungen, die kleinste Mengen von flüssigen und gasförmigen Medien führen, pumpen, separieren, fraktionieren, mixen bzw. kontrollieren können. Industrielle Anwendungen finden Fluidtronics derzeit in der IT- Branche (insbesondere Inkjet-Druckköpfe), in unterschiedlichen Segmenten der Biotechnologie sowie in den Industriebereichen Automotive, Raumfahrt und Umweltmonitoring. Wegen der biotechnischen Anwendungen liegt dieses Feld sehr nahe am Zukunftsfeld Life Sciences. Die Fluidtronics kann als ein Zulieferbereich der MST in den Life Sciences gesehen werden. Verbesserungsbedarf gibt es noch im Bereich des Handlings von Flüssigkeiten sowie auf dem Gebiet der Biokompatibilität. Aufgrund der engen Verbindungen zwischen beiden Gebieten werden Fluidtronik und Life Science in diesem Artikel zusammen betrachtet.

6.6.1 Kurzbeschreibung und Bedeutung

Der Einsatz von MST im Bereich der Life Sciences ist in verschiedenen Bereichen zu erwarten:

Nahrungs- und Lebensmittel (Agro-food): Hier liegen die Anwendungen insbesondere im Bereich der Analytik, der Qualitätsprüfung und der Prozesssteuerung.

Umwelt: Die Hauptanwendungsgebiete sind abermals die Analytik, und – soweit es sich um Prozesstechnologien im Umweltbereich handelt – Prozesssteuerung.

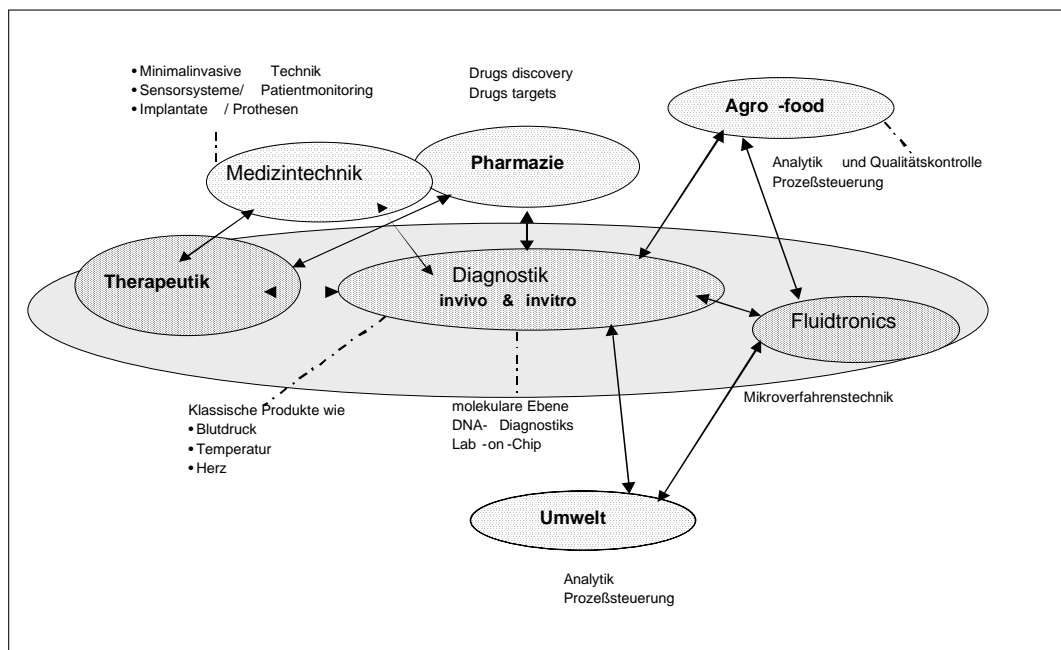
Medical care, dazu gehören

- Diagnostik (einschließlich Früherkennung von Krankheiten, präventive Diagnostik, Point-of-Care Diagnostik). Anwendungen, die sich schon am Markt bewiesen haben sind DNA-Chips, und Proteinchips.
- Pharmakologie und Wirkstoffforschung (Verträglichkeit von Medikamenten, Hormonen, Enzymen, besonders wichtig in Notfallsituationen)
- Teile der Medizintechnik, insbesondere minimal-invasive Therapie (Nervenstecker, Insulinpumpe)
- Therapeutik
- Implantate
- Bioinformatik

Aktivitäten zur Verbesserung der Qualität von Nahrungs- und Lebensmitteln und der Umwelt stehen im Vergleich zu medizintechnischen Anwendungen noch am Anfang ihrer Entwicklung.

Die folgende Abb. 6.7 zeigt die Aufgliederung des Zukunftsfeldes "MST in den Life Sciences" sowie die wichtigsten Teilbereiche für die Zukunft.

Abbildung 6.7: Das Zukunftsfeld "MST in den Life Sciences"



Die Bereiche Lebensmitteltechnologie und Agrartechnik bieten ein weites Feld für mikrosystemtechnische Lösungen, sind allerdings bisher im Programm MST nur schwach vertreten. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass bisher wenige Kontakte zwischen der "klassischen" MST-Szene und diesen Feldern bestehen. Ursachen sind einerseits die konservative Einstellung der Mehrzahl der Akteure insbesondere aus der Industrie und andererseits die niedrigen Gewinnspannen, so dass trotz großer Umsätze nur wenig Mittel für Forschung und Entwicklung zur Verfügung stehen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass besonders im Umweltbereich eine Reihe von MST-Anwendungen existieren, beispielsweise diverse Wasser- und Gasanalysesensoren, deren breite Durchsetzung auf dem Markt mindestens vorübergehend und kurzfristig mit Umstellungs- und ggf. auch höheren laufenden Kosten für die entsprechenden Firmen verbunden wäre und daher erst mit einer Verschärfung der bestehenden Auflagen zu erwarten ist.

In der **Lebensmittelindustrie** hängt die Realisierung der Vorteile beim Einsatz von MST-Sensoren für die Lebensmittelqualität und –sicherheit, wie sie tragbare einfache Testsysteme, Sensorik für die Lagerungs- und Transportüberwachung sowie Systeme zur Prozessautomatisierung und Qualitätskontrolle erwarten lassen, in aller erster Linie vom Interesse und der Zahlungsbereitschaft des Verbrauchers ab. Für ihn sind diese **Vorteile** aber **sehr viel schwerer sichtbar** als die unterschiedlichen Preishöhen, so dass sich MST-Anwendungen auch hier vermutlich erst im Zusammenhang mit einer verbesserten staatlichen Lebensmittelkontrolle durchsetzen können.

In der Analytik und Qualitätskontrolle steht die Bestimmung des Zustandes bzw. der Zusammensetzung/Verunreinigung von Lebensmitteln im Vordergrund, insbesondere zum Schutz der Verbraucher (toxische Substanzen, Erreger, Keime) und zur Qualitätskontrolle bei Zwischenhändlern und Verarbeitern. Problematisch sind hier die derzeit langen Analyse- und Diagnosezeiten beim Einsatz klassischer Off-line-Analytik, z.B. bei der Bestimmung von Salmonellen. Die Analytik in Bezug auf Zellkulturen – also Anlegen, Inkubation und Auswertung - ist arbeitsaufwendig und dauert mehrere Tage. Gleichzeitig muss jedoch bereits die Weiterverarbeitung der untersuchten Erzeugnisse erfolgen (z.B. bei Fleischprodukten). Durch schnell durchführbare, vor Ort integrierte Analytik lassen sich hier erhebliche Verbesserungen erzielen, z.B. mit Biosensoren oder sog. elektronischen Nasen. Hier sind deutliche Synergien mit medizintechnischen und umwelttechnischen Lösungen zu erwarten.

Neben der off-line arbeitenden Laboranalytik ist die direkte Steuerung von Prozessen bei der Lebensmittelverarbeitung von besonderem Interesse, da sich hier neue Qualitätsmaßstäbe realisieren lassen.⁵⁵

Die in der letzten Zeit bekannt gewordenen Skandale im Lebensmittelbereich haben die Nachfrage nach strengeren Sicherheitskontrollen bei Nahrungsmitteln verstärkt. Die durch MST-Technologien möglich gemachte Dezentralisierung und Beschleunigung von Tests ist hier von großem Nutzen.

Der Bereich **Medizintechnik** ist heute die treibende Kraft im Zukunftsfeld Life Science/Fluidtronic und reicht, was seine Entwicklung und Ausbreitung betrifft, in das abgelaufene MST-Programm zurück. Eine von der EU beauftragte Studie über Mikro- und Nanotechnologien in der Medizintechnik nennt drei Anwendungen, die der großen Vielfalt an in der Entwicklung begriffenen Produkten zugrunde liegen. Dies sind Sensoren, Lab-on-the-chip Vorrichtungen sowie Mikrostrukturen.⁵⁶ Verschiedene medizinische Sensoren sowie fortgeschrittene Biosensoren befinden sich bereits auf dem Markt. Von allen Lab-on-Chip Produkten wird besonders beim DNA-Chip eine besonders hohe Anwendungsbreite erwartet.

Die Unternehmen, die in den genannten Bereichen tätig sind, sind durch folgende Merkmale charakterisiert:

- Oftmals junge technologie-basierte Unternehmen, die ein einziges oder einige wenige Produkte entwickeln und/oder schon auf den Markt gebracht haben.
- Thematisch befinden sie sich in der Regel in einer bestimmte Nische des Life Science-Bereichs.
- Abteilungen von Großunternehmen, meist im Mikrosystembereich, mit einem speziellen Interesse an Technologieplattformen. Beispiele hierfür sind Bio-Chips, Lab-on-Chips, Analytik.

Da im Gesundheitsbereich die Entwicklungen am weitesten fortgeschritten sind und für das Zukunftsfeld als repräsentativ angesehen werden können, werden sich die folgenden Ausführungen ausschließlich mit diesem Bereich beschäftigen.

⁵⁵ VDI/VDE-IT, Anwendungsfeld Lebensmittel-/Agrartechnik, Internes Papier

⁵⁶ Felten, R., Hussla I., Microsystem Technology in medicine; Microsystem- and nanotechnologies applied for health: A 15 year perspective, TechnologieZentrum Itzehoe mbH, 2000

Die Bedeutung dieses Zukunftsfelds für die weitere Entwicklung der Mikrosystemtechnik wird von Experten übereinstimmend als stark steigend beurteilt. Dies wird auch von einschlägigen Studien untermauert. So wird in einer Branchenanalyse für Mikro- und Nanotechnologie der WZG-Bank festgestellt: "*Insbesondere Telekommunikation und Life Sciences sind die Anwendungsfelder mit besonders vielen neu entstehenden Produkten ('emerging products'), sie gelten auch als 'Killer Applications'*".⁵⁷

Die besondere Bedeutung dieses Zukunftsfeldes liegt in der dadurch ermöglichten Individualisierung und Dezentralisierung besonders von medizinischen Anwendungsmöglichkeiten (Stichwort: point-of-care, lab-on-the-chip). Die Individualisierung erlaubt eine rasche und personengerechte Diagnose und die Erstellung und Überwachung einer entsprechenden Therapie. Dies ist besonders im Bereich der Medikamentendosierung sowie der Verträglichkeitsprüfung von Medikamenten wesentlich (z.B. Antibiotika). Die durch die MST ermöglichte Dezentralisierung geht in eine ähnliche Richtung: Das point-of-care Modell erlaubt eine wesentlich schnellere Diagnose/Therapie als der herkömmliche Weg über ein Zentrallabor. Dies kann neben einer besseren Versorgung des Patienten auch zu erheblichen Einsparungen im Gesundheitsbereich führen.

In einer Schätzung durch den VDE für das Jahr 2001 beläuft sich der Weltmarkt für Medizintechnik auf EUR 190 Mrd. Der deutsche Markt wird in der Schätzung mit etwa EUR 10 Mrd. angegeben. Der Anteil der KMU (<500 Beschäftigte) am Gesamtumsatz wird auf größer als 50% geschätzt, wobei die 'klassische' Medizintechnik in dieser Betrachtung gegenüber Life Sciences dominiert.

6.6.2 Künftige Entwicklungslinien

Die treibenden Kräfte für dieses Feld sind unterschiedlicher Art:

Entwicklung der Gesellschaft

- Demographischer Wandel und daraus resultierend eine veränderte Alterspyramide
- Beherrschung der Kosten der Gesundheitsversorgung

⁵⁷ WZG-Bank, Ernst & Young, IVAM, Micro Venture, Mikro- und Nanotechnologie, Branchenreport aus Sicht des Kapitalmarktes, April 2002. Eine „Killerapplikationen“ ist eine Anwendung, die einer bestimmten Technologie zum Durchbruch verhilft (z.B. e-mail für das Internet).

Veränderungen in der Medizin- bzw. Gesundheitsversorgung

- Diagnostik, personalisierte Gesundheitsversorgung, Patienten-Monitoring-Systeme (point-of-care)
- Pharmacogenomics: Abtesten von negativen Prädispositionen, (Nahe-Echtzeit-) Überwachung von Therapie
- individualisierte Medikamente, abgestimmt auf persönliche Prädisposition und Wirkung
- Killerapplikationen (etwa im Bereich der Präventionsmedizin, z.B. Blutdruckmessgeräte, Monitoringsysteme für Sportler, Schwangerschaftstests)
- zwei Richtungen: Hochpreis-/Leistungsanwendungen, Niedrigpreis-Massenanwendungen

Technologische Potenziale

Diese erschließen sich aus mehreren Quellen:

- **Weiterentwicklung der Wissenschaft im Bereich der Genomics.** Durch den raschen Fortschritt in den Grundlagenbereichen sind zahlreiche technologische Potenziale zu erwarten. Dies liegt vornehmlich in der Vorgehensweise in diesem Feld der Grundlagenforschung, die direkt auf technologische Umsetzung zielt. Aus diesem Grund sind erstens kurze Fristen zwischen Bekanntgabe von Forschungsergebnissen und technologischer Verfügbarkeit zu erwarten, zweitens aber ein Überangebot an technologischen Optionen ohne nennenswertes ökonomisches Potenzial.
- **Chancen aus organischer Diversifikation bestehender Kompetenzen.** Unternehmen, die diese Strategie einschlagen, sind auf der sicheren Seite, weil 'mitgebrachte' Kompetenzen ihnen spezifische Vorteile in der Einschätzung der Potenziale von Innovationen und deren Umsetzung am Markt ermöglichen.
- **Kombinationen von Technologien aus verschiedenen Bereichen** (chemische Industrie, Medizin / Diagnostik, Biotechnologie, Gentechnik, IT). Auch hier gilt, dass durch die Erfahrung in den etablierten Sektoren bzw. Technologien ein erhebliches Risiko in der Entwicklung und Anwendung abgebaut werden kann. Außerdem ist es einfacher, die relative Überlegenheit einer neuen Lösung zu demonstrieren.

Ökonomische Entwicklung / Unternehmenssektor

- großes Potenzial für Start-ups und Spin-offs⁵⁸
- Chancen für KMUs, eigene Entwicklungen durchzuführen und darauf Wachstum zu gründen, und als Zulieferer für Großunternehmen
- Perspektive: eher strategische Allianzen als Fusionen

Es gibt in bestimmten Bereichen schon Produkte am Markt, darunter DNA-Chips, Produkte im Bereich der minimal-invasiven Chirurgie, Patienten-Monitoring-Systeme, Mikro-Arrays, Lab-on-Chip. Obgleich sich einzelne Technologien rasch entwickeln, haben die meisten Anwendungen noch keine Marktreife erzielt.

Experten erwarten, dass Patienten-Monitoring-Systeme einen wachsenden Markt darstellen, in dem kleine flexible und portable Monitoring-Systeme eine Alternative für die Überwachung der Patienten in Klinik oder Krankenhaus sein könnten.

Technologische Optionen und Engpässe

Neben gewissen Schwierigkeiten, die sich vom Markt her definieren, gibt es auch noch eine Reihe technischer Engpässe, zum Beispiel das Problem der Biokompatibilität. Ein weiterer Engpass ergibt sich aus den Grenzen der Sub-Mikron-Technologie sowie aus den **hohen Ansprüchen an Zuverlässigkeit** in der Diagnostik, die noch nicht hinreichend erfüllt werden können.

Neben der Miniaturisierung stößt die Siliziumtechnologie auch auf einige zusätzliche Grenzen: Transparenz, Temperaturbeständigkeit bzw. die Eigenschaft, chemisch inert zu sein. Da Silizium diese Eigenschaften nur in begrenztem Maße erfüllen kann, werden Fluidtronics zunehmend aus Polymeren hergestellt – wiewohl auch Polymere nicht in jeder Hinsicht überlegen sind, etwa in der Temperaturstabilität. Gleichzeitig gibt es aber Beispiele von Unternehmen, die versuchen, die traditionelle Siliziumtechnologie zu verbessern um die anwendungsspezifischen Eigenschaften, vor allem der Biokompatibilität zu erfüllen. Schließlich ist die (Weiter-)Entwicklung von funktionalen Materialoberflächen mit neuen Eigenschaften in der biochemischen Analytik und Optik zu erwähnen, wo allerdings noch ein längeres Stück Entwicklungsarbeit zu leisten ist.

⁵⁸ Das hier diskutierte Technologiefeld zeichnet sich dadurch aus, dass es in hohem Maße forschungs- und technologiegetrieben ist. Entsprechende Innovationen entstehen sowohl im akademischen bzw. öffentlichen als auch im privaten Forschungssektor und stellen insofern ein erhebliches Potenzial für Spin-offs aus diesen beiden Sektoren dar. Eine Option, diese Spin-offs zu nutzen, besteht in der Gründung von Unternehmen. Gleichwohl ist anzumerken, dass dieser Option eine Reihe von Widerständen entgegenstehen (vgl. Abschnitt 6.6.3).

6.6.3 Innovationsbarrieren

Das Zusammengehen von Life Sciences und MST eröffnet zahlreiche neue Perspektiven. Gleichzeitig ist aber auch davon auszugehen, dass Innovationsbarrieren existieren, die nicht allein im wissenschaftlich-technischen Bereich liegen, sondern auch in den ökonomischen und nicht zuletzt in den regulativen Rahmenbedingungen zu suchen sind. Auf diese wird im Folgenden eingegangen.

Ökonomische Barrieren

Eine wesentliche Innovationsbarriere ist die Konkurrenz der etablierten Firmen und Technologien, die wegen der starken Regulierung der Märkte eigenen Gesetzmäßigkeiten folgt, die darin bestehen, dass der Zugang zu den Märkten im Diagnose-/Therapie-Bereich über Zulassungsverfahren und über Entscheidungen der Krankenkasse über die Aufnahme als jeweils anerkanntes und in der Folge von der Krankenkasse auch bezahltes Verfahren reguliert ist

In vielen Fällen liegt ein Substitutionswettbewerb vor, wo neue Analysemethoden gegen etablierte Methoden antreten. Dort kommt die Marktmacht der etablierten Firmen und die von diesen vermarkteten Technologien zum Tragen. Dies zwingt die neu eintretenden Firmen zu einem strategischen Verhalten, solche Nischen zu finden, in denen die neuen Konzepte deutlich überlegen sind. Es wird jedoch erwartet, dass auch große Firmen die Vorteile der MST nach und nach anerkennen. Im Biochip-Bereich ist dies bereits eingetreten.

Kostensenkung ist zwar ein wichtiger, in vielen Fällen sogar der wichtigste Anreiz für technologische Neuentwicklungen. Dieser Perspektive stehen aber **lange Entwicklungszeiten** (> 5 Jahre) sowie **hohe Produktionskosten** der jeweiligen Komponenten gegenüber, insbesondere dann, wenn sie aus dem Bereich der Mikroelektronik kommen (Chips, Lab-on-Chip). Ungünstig für die neuen Technologien und die darauf aufbauenden Produkte ist die selektive Betrachtung der (höheren) Komponentenkosten gegenüber den (geringeren) Diagnose- bzw. Therapiezykluskosten durch die unterschiedlichen Akteure im Gesundheitssystem (insb. niedergelassene Ärzte, Krankenhausärzte, Krankenhausmanager, Krankenkassen, Gesundheitsbehörden bzw. die Anbieter entsprechender Produkte und Verfahren). Diese aversive Situation verhindert systematisch den Einstieg in Massenmärkte.

Darüber hinaus gibt es ein **relatives Überangebot an Technologien und Produkten** ("Vieles ist in der Pipeline!"). Viele Technologien und Produkte sind noch nicht ausgereift und marktfähig, sondern befinden sich noch im Stadium des Prototypen bzw. der Kleinserie. Tatsächlich ist die Ausbreitung der neuen Konzepte noch von zahlreichen marktseitigen Problemen begleitet, etwa die – für sich gut begründete – Distanz von Krankenkassen hinsichtlich der Aufnahme neuer Diagnose- bzw. Behandlungsmethoden und –werkzeuge (s.u.). Aus diesem Grund brauchen die einschlägigen Unternehmen Unterstützung in diesen entscheidenden letzten Phasen – nämlich in der Entwicklung vom Demonstrator über den Prototypen zum fertigen Produkt.

Bei einer Aufzählung der ökonomischen Innovationsbarrieren darf das **System der Krankenkassen**, soweit es sich um Medizintechnik handelt, nicht unerwähnt bleiben. Es hat sich im Verlauf der Untersuchungen gezeigt, dass Krankenkassen nicht per se innovationsavers sind. Vielmehr gibt es in diesem komplexen System der Krankenkassen und im korrespondierenden System der Ärzteschaft bzw. der Krankenhäuser zahlreiche lokale Anreize und damit einhergehende Gründe, eher **etablierte** Technologien bzw. Produkte auf darauf aufbauenden Dienstleistungen einzusetzen bzw. anzubieten als entsprechend neue Entwicklungen aufzugreifen. Dieses Verhalten ist über weite Strecken rational, insofern Fragen der Lieferkontinuität oder der Finanzkraft etablierte und größere Firmen begünstigt. Desgleichen führen Kriterien wie Sicherheit auf Basis von Vertrautheit mit der Anwendung und der erzielbaren Wirkung, Routine im Umgang und damit hohe Effizienz und abermals Sicherheit und nicht zuletzt erprobte Lieferanten-Kunden-Beziehungen zu einem tendenziell innovationsaversen Verhalten. Diese bedeutet, dass bei den Anwendern ein grundlegendes Umdenken in den verwendeten Modellen, Routinen, Anreizen bzw. in den Kriterien von Relevanz, Wirksamkeit, Effizienz usw. erforderlich wäre.

Ein Lösungsansatz zur Überwindung dieser Patt-Situation wäre hier die Durchführung von gut abgegrenzten Pilotversuchen. In diesen müsste ein Perspektivwechsel vollzogen werden: Von der Betrachtung der einzelnen Komponenten bzw. den darauf begründeten Diagnose- bzw. Therapiekosten zur Betrachtung der Kosten des gesamten Zyklus, von der Gesundheitsvorsorge, der allfälligen Diagnose und nachfolgenden Therapie und der damit verbundenen Kosten. Schwierigkeiten entstehen dort, wo erhöhte Diagnosekosten mit deutlich niedrigeren Therapiekosten verbunden einhergehen und dies zu einem Verhalten führt, dass als Diskontierung der Zukunft in Planungsprozessen hinlänglich bekannt ist.

Ein zweiter Lösungsansatz besteht darin, ein spezifisches Technology Assessment durchzuführen, um auf diese Weise so früh wie möglich die entsprechenden 'Systemimponderabilien' einzuschätzen.

Technologische Barrieren

Selbstverständlich existieren noch zahlreiche technologische Barrieren. Manche existieren deshalb, weil es Barrieren auf der Marktseite gibt, etwa Langzeitversuche. Dementsprechend sind die im folgenden dargestellten Barrieren als 'überwiegend technologisch' zu interpretieren.

Eine technische Innovationsbarriere ist sicherlich der **mangelnde Nachschub aus der Grundlagenforschung und Technologietransfer**. Dies hat damit zu tun, dass die Arbeitsteilung zwischen angewandten Forschungsinstituten, Universitäten und der Industrie zunehmend verwischt wird, indem in Teilen oder zur Gänze öffentlich finanzierte Forschungsinstitute bzw. Universitäten als Quasi-Unternehmen auftreten und dadurch in Wettbewerb zu Unternehmen treten, anstatt komplementär zum Unternehmenssektor zu wirken und ihre Forschungstätigkeiten auf Grund- bzw. Vorfeldforschung zu konzentrieren.

Außerdem bestehen **Lücken zwischen MST-Know-how und anderen Bereichen**. Im Besonderen trifft dies für weite Bereiche der chemischen Industrie bzw. der Medizin / Diagnostik zu. Dies drückt sich auch darin aus, dass die jeweiligen Anwendungsbereiche im Verhältnis von Anbieter, Anwender und allfälliger Drittpartei (vgl. Krankenkassen) häufig nur schlecht verstanden werden, was wiederum damit zu tun hat, dass der größere Teil der neuen Technologien angebots- bzw. chancengetrieben sind ('technology push').

Eng damit verbunden ist der Mangel an **Know-how-Trägern interdisziplinären Ingenieurwissens** in den Bereichen Chemie, Pharma, IT, Life Sciences.

Das Problem der **fehlenden Standards** wird weiter unten einer eingehenderen Betrachtung unterzogen.

Barrieren im Technologietransfer

Die Probleme des Technologietransfers sind vielfältig. Am gravierendsten sind sie zwischen dem Forschungssektor und dem Unternehmenssektor und zwischen technologischen Bereichen mit unterschiedlichen Kulturen.

Insbesondere bestehen Defizite in der **Arbeitsteilung zwischen dem Forschungssektor** (Institute, Universitäten) **und dem Unternehmenssektor**. Institute nehmen vielfach die ihnen von der öffentlichen Hand als Eigentümer bzw. Finanzier zugeordneten Rollen nicht ein, indem sie einerseits zu wenig Grundlagenforschung betreiben und andererseits sich unternehmerisch betätigen und Routineproduktion (in der Regel unter Marktpreisen) durchführen und damit den seinerseits verletzbaren Unternehmenssektor beeinträchtigen. Ebenso fehlen leistungsorientierte Kriterien in der Forschung. Deshalb sollte mehr Aufmerksamkeit auf die Arbeitsteilung zwischen den einzelnen Partnern (KMU, große Unternehmen, Universitätsinstitute, angewandte Forschungsinstitute, Behörden, z.B. etwa im Bereich der Normung) und dem Projektmanagement gerichtet werden.

Dem **Netzwerksmanagement** kommt eine besondere Rolle zu.

Von besonderer Bedeutung sind **Projekte zur Standardisierung und zur Unterstützung des Technologietransfers**. Hier ist die (leitende) Rolle der Industrie wichtig, weil dort das Know-how über Anwendungsprobleme und Schnittstellen vorliegt. Entsprechend handelt es sich bei der Mehrzahl der Standardisierungsfragen um de facto Standards. Ein spezifischer Aspekt des Problems der Standards ist der Übergang zu Technologieplattformen. Durch die Entwicklung solcher Plattformen, die etwa aus der Automobilindustrie oder dem IT-Sektor gut bekannt sind und sich bewährt haben, sollte es gelingen, spezifische Probleme der Systemkompatibilität, der Weiterentwickelbarkeit, der Kontinuität, der Effizienz von Normensetzungen zu begegnen. Dieses Problem wurde im Experten-Workshop als besonders wichtig betont. Dies stellt zugleich eine große Chance dar, Grundlagenforschung, Standardisierung und industrielle FuE zu verknüpfen, ohne zugleich in Rollenkonflikte zu geraten.

Standards und Patente

Bei der **Entwicklung von Standards** sollte die Rolle der öffentlichen Hand darin bestehen, sicher zu stellen, dass Standards zustande kommen, nicht aber darin, selbst Standards zu setzen. Die Modi des staatlichen Handelns wären hier, wie bereits oben ausgeführt, die **Förderung einschlägiger Projekte zur Standardsetzung** und im Besonderen die **Unterstützung des Zustandekommens und der Entwicklung von Technologieplattformen**, mit einem starken Akzent auf Standardsetzung und Durchgängigkeit.

Abstimmung mit anderen Politik- bzw. Regulierungsfeldern.

Dies geht weit über Förderpolitik hinaus, ist aber für die langfristige Integration von Life Sciences und MST entscheidend wichtig. Erste Politikadresse ist hier der Gesundheitssektor.

Im Verlauf der Untersuchungen wurde auch die **Patentproblematik** hervorgehoben: Ein wesentlicher Punkt ist, dass bereits viele etablierte Firmen in diesem Bereich Patente für einzelne technische Lösungen angemeldet haben. Da für MST-Entwicklungen typischerweise mehrere unterschiedliche technische Lösungsansätze verknüpft werden müssen, stoßen die notwendigen Entwicklungen schnell auf kaum überwindbare Schwierigkeiten, wenn auch nur eine der benötigten Komponenten bzw. Lösungswege patentrechtlich geschützt ist. Dies macht es insbesondere kleinen Firmen besonders schwierig, eine Lücke oder eine für sie finanziell verkraftbare Vereinbarung mit den Patentinhabern zu finden.

Ebenso haben kleine Unternehmen selten die Zeit und das Geld, sich umfassend über bereits existierende Patente zu informieren. Dazu kommt die Tatsache, dass große Firmen oft kleinere, innovative Firmen durch Patentklagen unter Druck setzen (Beispiel Affimetrix). Unklar ist die Situation oft auch bei einem Transfer von Personal zwischen Universitäten und Firmen (z.B. in Verbundprojekten oder im Rahmen einer Diplom- oder Doktorarbeit) in Bezug auf die Frage des geistigen Eigentums. Das gleiche gilt für den umgekehrten Fall, wenn Mitarbeiter von Firmen an Unis arbeiten. In solchen Fällen müssen die Schnittstellen genau definiert und die Patentrechte sauber geklärt werden.

6.6.4 Stärken und Schwächen im internationalen Vergleich

Deutschland wird von die meisten Experten als europäischer Spitzenreiter in diesem Zukunftsfeld gesehen. Im globalen Wettbewerb sind allerdings die USA in den meisten Bereiche führend.

Tabelle 6.8: SWOT-Analyse Life Science und Fluidtronics

Life Science und Fluidtronics	
Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Chemie und Pharmazie als traditionell starke und international wettbewerbsfähige Branchen. • Hohes Niveau von Wissenschaft und Forschung. • Hoher Standard der akademischen Ausbildung. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ungünstiges Klima für Gründung von technologieorientierten Unternehmen (hoher administrativer Aufwand). • Mangel an qualifizierten akademischen Fachkräften (Chemie, Informatik) mit interdisziplinärer Ausrichtung. Ausnahme: Bioinformatik. • Kurze Laufzeiten bzw. Befristung der Arbeitsverträge in wissenschaftlichen Einrichtungen. Dadurch: Geringe Effizienz des personellen Ressourceneinsatzes in der Forschung. • Mangel an technisch-ausgebildeten Fachkräften.
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Zahlreiche innovative, junge Unternehmen im Feld Life Science bilden Wachstumspotenzial. 	<ul style="list-style-type: none"> • Forschung nicht ausreichend leistungsorientiert. • Im internationalen Vergleich (USA) geringe start-up Quote. Risikoaversion gegenüber Gründungen bei wissenschaftlich qualifiziertem Personal. • Internationale Wettbewerber bringen Produkte schneller an den Markt. • Problematische Situation in der Bereitstellung von (Risiko-) Kapital.

7. Chancen und Herausforderungen für die MST der Zukunft

Die ex-ante Evaluation hat sich mit der Identifikation von Zukunftsfeldern der MST beschäftigt. Als Zukunftsfelder werden Felder definiert, in denen eine erfolgreiche Verbindung von zukunfts-trächtiger Technologieentwicklung und zukünftigen hohen Anwendungspotenzialen zu vermuten ist. Um solche Zukunftsfelder zu erheben, wurde auf Ansätze der evolutionären Innovationsforschung zurückgegriffen. Mittels dieser Ansätze wird ein technologischer Determinismus vermieden, der unterstellt, dass sich technologische Entwicklung in einem one-best way vollzieht, der ausschließlich naturwissenschaftlich-technologischen Kriterien folgt. Zentrale Elemente der evolutionären Ansätze sind:

- die Analyse des kommunikativen Prozesses zwischen den beteiligten Akteuren aus Industrie, Wissenschaft und Intermediären, der auf eine gemeinsame Problemdefinition abzielt,
- die Betonung der Bedeutung von Paradigmata und Trajektorien, die sowohl naturwissenschaftlich-technologische als auch gesellschaftlich-wirtschaftliche Parameter enthalten und den Problemlösungshorizont beschreiben sowie
- die Thematisierung von kritischen Ereignissen, die während des Technikgeneseprozesses auftreten und entweder die Problemdefinition oder das verwandte Paradigma erschüttern.

Um diesen Ansatz auf die Mikrosystemtechnik zu übertragen, wurde ein zweistufiges methodisches Verfahren genutzt. In der ersten Stufe wurde durch quantitative und qualitative Erhebungen, die durch eine technology & market study unterfüttert wurden, ein Überblick über die Entwicklungsstränge der MST erzielt.

In der zweiten Stufe wurden vier Zukunftsfelder vertiefend untersucht und mit Experten aus Unternehmen, Wissenschaft und Intermediären im Hinblick auf ihre Entwicklungspotenziale diskutiert und konkretisiert.

Die gewählte Methode hat sich in der Untersuchung bewährt. Die Auswertung der Ergebnisse der ersten Stufe hat 10 potentielle Zukunftsfelder hervortreten lassen. Hierbei handelt es sich um:

- Systemintegration
- Optronics
- Life Science
- Mikro-Nano-Interface
- Fluidtronics
- Polytronics
- Micromats
- Agile Fabrication
- Smart Energy
- Ubicomp

In der zweiten Stufe wurden die folgenden vier Zukunftsfelder - untersucht:

Agile Fabrication. Dieses Zukunftsfeld verkörpert exemplarisch den Charakter der MST als Querschnittstechnologie und deckt die Themen Standards und Schnittstellenbedarf ab. Im Vordergrund der Analyse standen hierbei die Produktion von MST sowie die damit einhergehenden Probleme der Austauschstandards und der Werkzeugkastenidee.

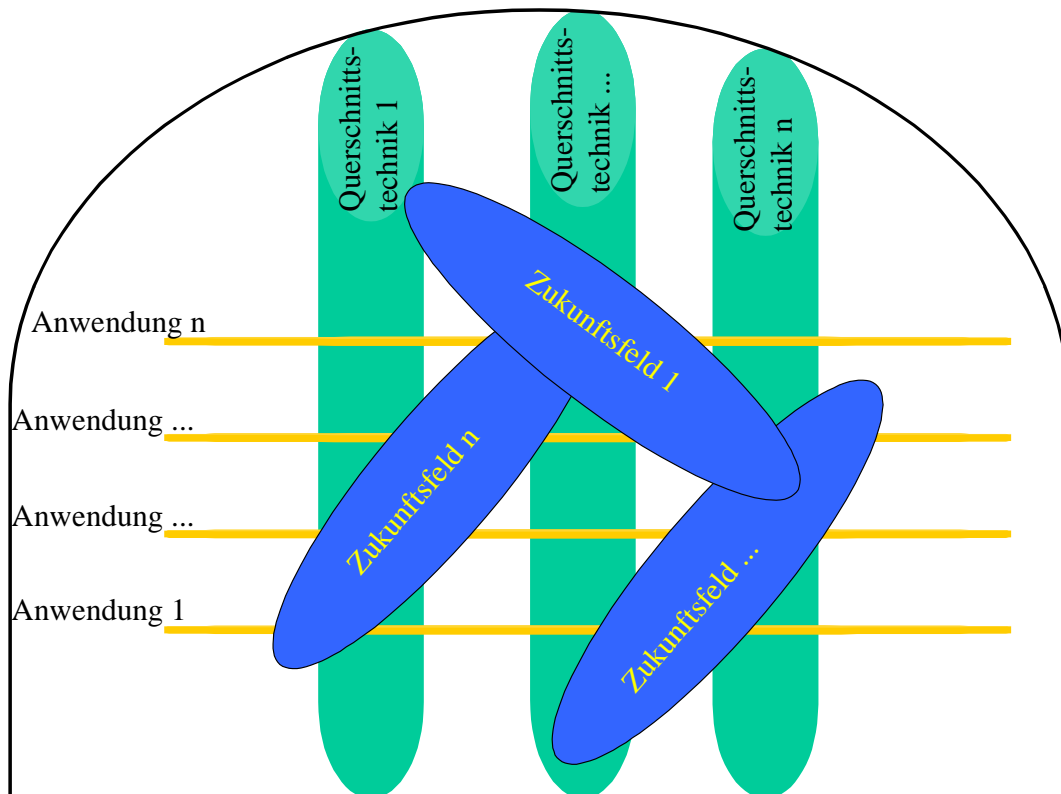
Mikro-Nano-Interface - MNI beschreibt ein forschungsintensives Hybridfeld, das sich durch die Verknüpfung von Mikro- und Nanowelt auszeichnet. Insbesondere die aus der Verknüpfung von Mikro- und Nanoeffekten resultierenden Anwendungen wurden im Rahmen dieses Zukunftsfeldes thematisiert.

Life Science und Fluidtronics bilden ebenfalls ein Anwendungsfeld, das sich durch ein hohes Maß an Anwendungsorientierung auszeichnet. Konkrete Einsatzmöglichkeiten finden MST-Produkte sowohl in Applikationen (z.B. Insulinpumpe) als auch bei Verfahren zur Herstellung von Pharmazeutika.

Smart Energy beschreibt exemplarisch ein Anwendungsfeld mit einem hohen Grad der Verflechtung von Mikro- und Makrowelt. Dieses Zukunftsfeld umfasst sowohl die Energieversorgung von MST-Anwendungen als auch die Nutzung der MST für die Prozessbeeinflussung in der Energieversorgung.

Die Diskussion der potentiellen Zukunftsfelder der MST hat gezeigt, dass sich die identifizierten Felder der MST sowohl über ein breites Spektrum von Anwendungsfeldern als auch über die Nutzung einer Vielzahl Querschnittstechnologien erstrecken (siehe Abbildung 7.1).

Abbildung 7.1: Zukunftsfelder der MST



Dies gilt hinsichtlich der **Anwendungsvielfalt** der mikrosystemtechnischen Komponenten und Produkte. Wie die Analyse detailliert gezeigt hat, finden sich Mikrosysteme, um nur einige Beispiele zu nennen, in Automobilen, in der Medizintechnik und in chemischen Produkten. Eine Parallele beispielsweise zur Mikroelektronik lässt sich somit in bezug auf das Spektrum der Anwendungsfelder nicht ziehen. Vielmehr bilden die vielfältigen Anwendungskontexte umfassende Anforderungen an die Ausgestaltung und das Design der Mikrosystemtechnik. Dies hat sich auch deutlich in den Ergebnissen der Befragung und der vertiefenden Analysen in den vier Zukunftsfeldern widerspiegelt. Die Nutzung von Sensor-Aktornestern in der Automobilindustrie unterscheidet sich von der in der Medizintechnik fundamental in Ausführung und Anforderung, auch wenn die dahinterliegende Technologie im Prinzip gleich ist.

Gleichzeitig unterscheidet sich die Mikrosystemtechnik von anderen Technologien aber auch hinsichtlich der Vielfalt zur Anwendung gelangender **Querschnittstechnologien**. So finden sich beispielsweise in den Anwendungen im Rahmen des Zukunftsfeldes Smart Energy unterschiedlichste Techniken im Einsatz, die u.a. aus den Bereichen

- der Nanotechnologie (Nanotubes zur Gasspeicherung),
- der neuen Materialien (Polymerlösungen für Folienbatterien),
- der Mikroelektronik (Chips in Anwendungen der Signalverarbeitung)
- der Chemie (Semi-permeable Membrane bei Brennstoffzellen)

stammen. Eine ähnliche Vielfalt konnte auch für die anderen potenziellen Zukunftsfeldern festgestellt werden und ist als ein Charakteristikum der Mikrosystemtechnik hervorzuheben, das im Rahmen der Frage nach einem neuen Förderprogramm zu berücksichtigen ist.

Ausgehend von dieser Vielfalt stellt sich die Frage nach dem **roten Faden**, der die verschiedenen Strömungen der Mikrosystemtechnik der Zukunft verbindet. In der Vergangenheit wurde dieser über die vier Eigenschaften der Mikrosystemtechnik

- Miniaturisierung
- technisches System
- Aktorik, Sensorik und Signalverarbeitung
- branchenorientierte Anwendungsförderung

definiert. Die Ergebnisse der Analysen der ex-ante Evaluation (vgl. Kapitel 6) haben gezeigt, dass eine solche Definition der Mikrosystemtechnik zukünftig zu kurz greifen dürfte. Die Entwicklungen in der Mikrosystemtechnik haben dazu geführt, dass weitere Eigenschaften zur Bestimmung der MST hinzugefügt werden müssen, da sich die Paradigmata in der MST in Zukunft breiter aufstellen. Diese weiteren Eigenschaften in den Paradigmata umfassen neben dem technischen Systemgedanken, der Kombination von Aktorik-Sensorik und Signalverarbeitung und der Miniaturisierung

- Nutzungsmöglichkeiten in diversifizierten Anwendungskontexten, d.h. es geht nicht mehr um die inkrementelle Verbesserung innerhalb einer Branche, sondern um die Herausbildung branchenübergreifender Anwendungen der MST,
- kombinatorische Verbindung von vielfältigen Funktionalitäten, wie sie sich beispielsweise bei den Carbon-Nano-Tubes zeigen, die in der Energiespeicherung bei Brennstoffzellen, der intelligenten Reifentechnologie wie auch im Rahmen des ubiquitous computing in der Textilbranche zum Einsatz gelangen könnten,

- enorm diversifizierte Einsatzmaterialien,
- Mittlerfunktion zwischen Nano-, Mikro- und Makrowelt,
- Mittlerfunktion zwischen organischer und anorganischer Welt.

Die **Nutzungsmöglichkeiten in diversifizierten Anwendungskontexten** wurden im Kapitel 6 bereits beschrieben. Mikrosystemtechnische Komponenten finden zukünftig ihre Abnehmer nicht mehr in klar zuordenbaren Branchen, sondern bedienen die Anforderungen und Nachfrage unterschiedlichster Abnehmer aus unterschiedlichsten Branchen. Ein gutes Beispiel hierfür sind die Carbon-Nano-Tubes. Diese werden beispielsweise im Rahmen der MST für die Steigerung der Volumen-Oberflächenverhältnisse bei Energiespeichern, bei bio- und chemoreaktiven Sensoroberflächen oder bei Emissionskathoden für Field-Emission-Displays wie auch als Füllmaterialien in der Polytronik eingesetzt. Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass der MST damit eine **Brückenfunktion** zu anderen Technologien, sei es Biotechnologie oder Nanotechnologie, zukommen wird.

Dies stellt natürlich neue Anforderungen an die Hersteller von Mikrosystemtechnikprodukten. Sie müssen zukünftig ein wesentlich breiteres Wissen über die Besonderheiten der jeweiligen Anwendungskontexte besitzen und sich mit den besonderen Anforderungen an die Nutzung ihrer Produkte in dem jeweiligen Kontext auseinandersetzen.

Die **kombinatorische Verbindung von vielfältigen Funktionalitäten** erstreckt sich auf die systemimmanente Fähigkeit der jeweiligen mikrosystemtechnischen Produkte und Komponenten, flexibel und intelligent die dem System innenliegende Funktionalitäten zum Einsatz gelangen zu lassen. Mit der Erhöhung der Funktionsvielfalt wird damit auch die Anforderung an die Intelligenz der Systeme steigen. Nur wenn sich die Systeme flexibel und intelligent auf sich verändernde Funktionsanforderungen anpassen können, wird die Mikrosystemtechnik ihr volles Potenzial ausschöpfen können.

Die Nutzung und der Bedarf an neuen **Einsatzmaterialien** ergibt sich aus den Anforderungen an mikrosystemtechnische Produkte und Komponenten und stellt eine der grundlegenden Aufgaben für die Zukunft dar.

Die Materialanforderungen in der Brennstoffzelle, bei den Mikro-Nano-Interfaces wie auch bei den Fertigungstechnologien belegen die zentrale Rolle der neuen Materialien. Nur wenn hier große Fortschritte gemacht werden, kann das Potenzial der MST voll zur Wirkung gelangen.

Die **Mittlerfunktion zwischen der Nano-, Mikro- und Makrowelt** wird ein zentrales Element mikrosystemtechnischer Anwendungen ausmachen. Alle Ergebnisse der Nanotechnologie werden kaum anwendbar sein, wenn die Anbindung und Nutzung dieser im Rahmen von Makrosystemen nicht möglich wird. Hier kommt der Mikrosystemtechnik eine Schlüsselrolle zu. Sie bietet das Potenzial, Ergebnisse der nanotechnologischen Entwicklung in makrosystemische Anwendungen zu ermöglichen und damit neuartige Produktideen zu realisieren. Besonders deutlich wird dies bereits heute im Rahmen der Smart Energy. Die Nutzung von Nanotubes zur Speicherung des Energieträgers H_2 für die Brennstoffzelle wird sinnvoll nur machbar sein, wenn es über die Mikrosystemtechnik gelingt, die Zu- und Abfuhr des Wasserstoffs verbrauchsadäquat zu regeln. Die ausschließliche Speicherfähigkeit an sich hat also wenig Wert.

Die **Mittlerfunktion zwischen organischer und anorganischer Welt** wird einen zentralen Stellenwert in der Mikrosystemtechnik einnehmen. Hierunter ist die Nutzung der Mikrosystemtechnik in den Life Sciences zu fassen. Die Möglichkeiten dieser Kombination werden anschaulich sowohl in der Implantationstechnik als auch im Rahmen intelligenten Prothesenbaus. Hier wird es zukünftig die Aufgabe der Mikrosystemtechnik sein, organische Informationen in elektrische zu transformieren und vice versa. Dieser Transformationsprozess beinhaltet neben der reinen Umsetzung von organischen in elektrische Informationen auch deren Verarbeitung und die Einleitung von Maßnahmen. Exemplarisch wird dies im Bereich der Mikrofluidik sowie den Smart Implants, die beispielsweise im Rahmen von Maßnahmen zur Knochenrestrukturierung neben der Stabilisierungsfunktion auch gleichzeitig den Knochenbildungsprozess stimulieren. Hierbei könnte, geknüpft an den Einsatz von mikrofluidischen Komponenten, auch an das Auffüllen von fehlenden Knochenstücken durch Ersatzstoffe gedacht werden.

7.1 Innovationsbarrieren auf dem Weg zu erfolgreichen Zukunftsfeldern

Die Analyse in den möglichen Zukunftsfeldern hat aber auch eine Reihe von Hürden und Schwächen offensichtlich werden lassen. Diese setzen teilweise bei bekannten Innovationsbarrieren aus der Vergangenheit an; zum Teil haben sich aus der Entwicklung der letzten Jahre jedoch neue Innovationsbarrieren gebildet. In der Diskussion von Innovationsbarrieren haben die Experten vielfach zwischen anwendungsfeldübergreifenden und anwendungsfeldspezifischen Innovationsbarrieren unterschieden. Für die Entwicklung der Handlungsempfehlungen sind vor allem die anwendungsfeldübergreifenden Innovationsbarrieren von besonderem Interesse. Folgende konnten identifiziert werden:

7.1.1 **Netzwerkbildung**

Die Innovationsbarriere bei der Netzwerkbildung ergibt sich aus der **Neugestaltung des Innovationsprozesses**. In den Zukunftsfeldern Agile Fabrication und Smart Energy wurde von den Experten hervorgehoben, dass man für eine erfolgreiche Innovation eine Vielzahl von Akteuren in das Netzwerk einbinden muss, die aus den unterschiedlichsten Bereichen kommen. Innovationen werden also verstärkt durch interdisziplinäre Teams entwickelt, was an der Brennstoffzellenentwicklung besonders deutlich wird. Hinzu kommt die Notwendigkeit, auch frühzeitig bereits Finanzdienstleister einzubinden, um die hohen Finanzbedarfe von Forschung und Entwicklung in dem Zukunftsfeld abdecken zu können. Dies lässt es vielfach als sinnvoll erscheinen, die Finanzdienstleister bereits im Forschungsstadium hinzuziehen, damit die von diesen erkennbaren Markt- und Anwendungstrends in die Problemdefinition eingebunden werden können.

Durch die anwendungsfeld- und technologieübergreifende Zusammenarbeit werden die Anforderungen an die Akteure bei der Netzwerkbildung jedoch immer anspruchsvoller. Gerade KMU haben hier Probleme mitzuhalten.

7.1.2 Infrastruktur

Die Anforderungen an eine geeignete Infrastruktur steigen. Nach Aussagen der Experten hat sich ein Foundry-Konzept bis heute nicht erfolgreich etablieren können. Entsprechend harren die Probleme bei der Produktion gerade durch KMU immer noch einer Lösung. Hier müssen in naher Zukunft Lösungen erarbeitet werden, um den KMU das Erreichen von wettbewerbsfähigen Kosten in der Produktion zu ermöglichen.

7.1.3 Innovationsphasen

Die Vorstellung eines **sequentiellen** Innovationsprozesses von der Grundlage hin zu Markteinführung wurde von den Experten als wenig hilfreich angesehen. Vielmehr wurde betont, dass Innovationen heute eher in Schleifen verlaufen. Besonders deutlich wurde dies am Beispiel der MicroMats, bei der die Phase der Marktetablierung parallel zur Phase der Forschung betrieben wird. Dies stellt neue Anforderungen an die beteiligten Akteure, da die Komplexität des Forschungs- und Entwicklungsprozesses dadurch erhöht wird.

7.1.4 Standardisierung

Je umfassender die Reichweite der Mikrosystemtechnik wird, um so zentraler wird die Herausbildung einer Designstruktur, die durch die Herausbildung von Standards zu einer Vereinheitlichung der verwendeten Tools gelangt. Gerade in den schnittstellenaffinen Bereichen in Life Science, Smart Energy aber auch der Agilen Fabrication müssen verstärkt Standards erarbeitet werden. Hierbei wurde von den Experten ergänzend hervorgehoben, dass mit der Standardsetzung auch ein marktlicher Erfolg eng verknüpft sei. Dieser Zusammenhang ergibt sich aus dem Phänomen der kritischen Masse⁵⁹, das eng mit der Standardisierung verknüpft ist.

⁵⁹ Unter der kritischen Masse wird ein Marktvolumen verstanden, das bei Märkten mit steigenden Erträgen notwendig ist, um den Markt zu etablieren.

7.1.5 Grundlegende Forschung

Es wurden in der Diskussion von den Experten immer wieder darauf hingewiesen, dass im Bereich der Erfindungen und grundlegenden Forschung Defizite anzutreffen seien. Offensichtlich hat sich die Entwicklung in jüngster Zeit zu stark den marktnahen Themen zugewandt und der grundlegende Nachschub an Wissen wurde vernachlässigt. Hier muss gegengesteuert werden.

7.1.6 Personal

Die Verfügbarkeit von Personal bildet offensichtlich auch heute noch eine Innovationsbarriere. Dies scheint darauf zurück zu führen zu sein, dass die Anforderungen an die disziplinübergreifenden Wissensbestände immer weiter steigen. Wer im Bereich der Mikro-Nano-Interfaces arbeiten will, muss neben einem umfassenden Ingenieurwissen auch chemische und physikalische Wissensselemente aufweisen.

7.1.7 Finanzierung

Mit der Finanzkrise ist nach Meinung der Experten ein altes Dilemma wieder aufgebrochen. Glaubte man Ende der 90er Jahre, das Problem der Innovationsfinanzierung durch Private Equity und den Neuen Markt gelöst zu haben, so wurde gerade in der Phase der vertiefenden Analyse von den Experten dieses Thema erneut zur Sprache gebracht. Offenbar ist hier mehr Substanz „weggebrochen“ als sichtbar ist.

8. Politische Handlungsoptionen für eine Förderung von MST in der Zukunft

Das abschließende 8. Kapitel des Evaluationsberichts führt die Ergebnisse der ex-post und ex-ante Evaluation zusammen und formuliert auf dieser Grundlage Handlungsempfehlungen zur Neuausrichtung einer zukünftigen MST-Förderung. Die Neukonzeption und organisatorische und instrumentelle Ausgestaltung eines solchen Programms lag nicht im Aufgabenbereich der Evaluatoren. Dennoch werden die vorliegenden Erkenntnisse im Hinblick auf die Anforderungen, die sich an eine zukünftige Förderung stellen, kritisch reflektiert.

Um den Argumentationsgang nachvollziehbar zu gestalten, werden im ersten Abschnitt die Evaluationsergebnisse im Überblick zusammengefasst, so dass dieses Kapitel auch zur eigenständigen Lektüre geeignet ist. Daran anknüpfend werden die Leitkriterien als Maßstab einer zukunftsorientierten Förderpolitik formuliert und vier umsetzungsorientierte Programmmodule in ihren Grundzügen skizziert. Die zehn in der ex-ante Evaluation entwickelten Zukunftsfelder umreißen und charakterisieren zugleich die Besonderheit der Mikrosystemtechnik, deren gemeinsame Basis die anwendungsorientierte Systemintegration von unterschiedlichen Techniken im Mikromaßstab ist. Sie bilden auch die thematischen, forschungs- und anwendungsorientierten Entwicklungskorridore, die nach dem derzeitigen Stand der Analysen die wichtigsten Entwicklungspotenziale der MST in der näheren Zukunft erfassen.

8.1 Chancen für eine Neuausrichtung der MST-Förderung

Die ex-post Evaluation kommt in der Wirkungsanalyse des „Förderkonzept MST 2000+“ zu einer eindeutigen Aussage: Die MST-Förderung hat ihre wichtigsten Ziele erreicht, die Zielsetzungen selbst waren dem Gegenstand angemessen und die Projektförderung war insgesamt wirksam. Eine solche positive Bewertung wirft unmittelbar die Fragen auf, ob angesichts des bisher Erreichten noch eine weitere MST-Förderung in Deutschland zweckmäßig ist und welche Schwerpunkte, Maßnahmen und Instrumente den Kern einer neuen MST-Förderung bilden müssten.

Entscheidend für die Beantwortung dieser Fragen ist zum Einen die Einschätzung der Wahrscheinlichkeit, mit der sich die MST auch ohne eine öffentliche Förderung in Deutschland weiter etablieren wird, und zum Anderen der Stellenwert, der der weiteren Entwicklung und Diffusion der MST für die wirtschaftliche Entwicklung in Deutschland eingeräumt werden kann. Auf der Grundlage einer solchen Bilanzierung sind die entsprechenden förderpolitischen Entscheidungen zu treffen. Diesen soll vereinbarungsgemäß nicht im Rahmen der Evaluation vorgegriffen werden. Argumente jedoch, die eine Neuausrichtung der MST-Förderung rechtfertigen, ergeben sich aus der ex-ante Evaluation, die auch eine Beantwortung der nach der Diffusionsanalyse noch offenen Fragen erlaubt. Darauf wird im Folgenden eingegangen.

Charakterisierung der MST als systemische Integrationstechnologie

Beide Evaluationsansätze ergänzen sich in einem zentralen Punkt: Die Mikrosystemtechnik lässt sich weder von der technischen (wie z.B. die Mikroelektronik oder Lasertechnik) noch von der Anwendungsseite (wie z.B. die Umwelt- oder Energietechnik) her erfassen oder eingrenzen. Ihre Besonderheit liegt vielmehr in der Vermittlung beider Ansätze, nämlich in der Entwicklung technischer Systeme im Mikromaßstab, die es durch Verknüpfung unterschiedlicher technischer Ansätze erlauben, spezifische Funktionen und Anforderungen für ganz unterschiedliche Anwendungsfelder zu erfüllen. Die MST ist damit eine **systemische Integrations-technologie**. Sie erfordert eine spezifische Art und Weise im Denkansatz und Problemlösungsalgorithmus, der sich von der gerichteten Suche nach Anwendungsfeldern für neue Techniken (technology-push) ebenso unterscheidet wie von derjenigen nach technischen Lösungen für bestimmte wirtschaftliche oder gesellschaftliche Probleme (demand-pull).

Das besondere Kennzeichen der MST als systemische Integrationstechnologie ist die **evolutorische Entwicklung entlang von Entwicklungspfaden** („trajectories“). Sie verlaufen in enger Verknüpfung von technischen und Anwendungsgesichtspunkten zeitweilig parallel zu einander, ergänzen und befruchten sich dann aber auch wieder gegenseitig. Viele zunächst getrennt laufende Entwicklungspfade stoßen in der MST immer wieder auf ähnliche Teilprobleme und Lösungswege, ohne dass dies im Voraus, d.h. in der FuE-Planung immer mit der wünschenswerten Genauigkeit vorhersagt werden kann. Viele kritische Forschungsfragen und Anwendungsverzweigungen werden sogar erst im Zuge der Entwicklungs- und Erprobungsarbeiten erkennbar.

Dies erschwert einerseits die Projektdefinition und -planung, weil sich die erfolversprechenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten noch am ehesten auf bestimmte Funktionalitäten, nicht aber bzw. nur im ersten Ansatz an einzelnen Techniken bzw. spezifischen Anwendungsformen ausrichten lassen. Andererseits liefern Neuentwicklungen in der MST oft Innovationsanstöße für ganz unterschiedliche Anwendungs- und Marktfelder, wie z.B. die Medizin, die Automation und den Verkehr, in denen sich MST-Hersteller parallel engagieren und im Erfolgsfall Absatzpotenziale erschließen können.⁶⁰

Erfolgsfaktoren der bisherigen MST-Förderung

Die bisherige MST-Förderung des BMBF hat die Besonderheiten der MST in vielen Punkten berücksichtigt. Dies erklärt ihren Erfolg, der durch die ex-post Evaluation aufgezeigt werden konnte:

- Die MST-Förderung setzte zu einem **Zeitpunkt** ein, in dem mit der wachsenden Anwendung der Mikroelektronik das Tor zur Miniaturisierung und zur Fertigung miniaturisierter Systeme geöffnet war. Gleichzeitig stieß die Mikroelektronik immer häufiger dort an Grenzen, wo es um ihre Integration in marktgängige Produkte ging. Dem entsprach die Schwerpunktsetzung im MST-Förderprogramm mit der Verknüpfung von Sensorik, Signalverarbeitung und Aktorik.

⁶⁰ Vgl. oben Kapitel 3.2.2

- Die **Konzentration der Förderung auf Verbundprojekte** mit bewusster Einbeziehung von KMU „passte“ zu dem systemisch integrativen Charakter der MST. Eine Projektförderung, die sich neben der vorhandenen institutionellen Förderung vor allem auf bestehende, singulär arbeitende FuE-Einheiten konzentriert hätte, wäre dem Charakter der MST weniger gerecht geworden.
- Die MST-Förderung knüpfte schließlich mit ihrer Ausrichtung und ihren Instrumenten an die **relativen Innovationsstärken der in Deutschland gewachsenen Wirtschaftsstruktur** an. Diese erleichtert es allen Anbietern von Produktsystemen (z.B. im IuK- oder Energiesektor) und Systemprodukten (z.B. im Automobil- oder Maschinenbau), ihre Innovationsstrategien auf hochspezialisierte Hersteller von Vor- oder Komplementärprodukten zu stützen. Dadurch profitierten auch viele nicht geförderte (Groß-)Unternehmen von der MST-Förderung über Innovationsanstöße aus dem Zulieferbereich.

Vor diesem Hintergrund und mit dieser Ausrichtung der MST-Förderung gelang es,

- in Deutschland im Verlaufe des Förderzeitraums immer neue Gruppen von potenziellen MST-Anbietern bzw. MST-Anwendern für die MST zu interessieren,
- die FuE-Kapazitäten und die FuE-Kompetenz in Deutschland maßgeblich auszubauen,
- die Einstiegsbarrieren für teilnehmende KMU durch finanzielle Hilfe und Vermittlung von Kooperationsmöglichkeiten zu verringern,
- die Wirkung der Förderung durch die Verbindung der Projektförderung mit innovationsbegleitenden Maßnahmen deutlich über den Kreis der Teilnehmer an Förderprojekten auszudehnen und
- damit auch wichtige gesamtwirtschaftliche Innovationsimpulse bis in nicht direkt geförderte Bereiche hinein auszulösen.

Die Diffusion von MST und ihre Probleme

In einigen Anwendungsfeldern kann von einem Durchbruch der MST gesprochen werden. Dass dies weltweit im IuK-Bereich und in Deutschland vor allem im Automobilbau eintrat, ist sicher kein Zufall: Die bisher wichtigsten Schlüsselanwendungen für MST-Produkte oder –Komponenten profitierten einerseits stark von Erfahrungen aus der Mikroelektronik (z.B. bei Entwicklung, Fertigung und Qualitätssicherung) und ergänzten andererseits hervorragend die in beiden Feldern bereits unabhängig von MST-Entwicklungen

laufenden Innovationsprozesse. Dabei konnte Deutschland aufgrund seiner traditionellen Stärke im Automobilbau profitieren, während die MST in den IuK-Anwendungen vor allem die Innovationsprozesse im Ausland (besonders in den USA) unterstützte.

In allen anderen potenziellen Anwendungsfeldern vom Maschinen- und Anlagenbau über Chemie und Pharmazie bis zu den Messgeräteherstellern und der Bauwirtschaft gelang es zwar, **die MST als eine vielversprechende Chance für Innovationen** zu etablieren und in erste Produkte zu implantieren, doch kam die kommerzielle Anwendung bislang kaum über das Anfangsstadium hinaus. Eine Ausnahme hiervon bildet die Medizintechnik, sofern es um die minimalinvasive Chirurgie geht.

Die Diffusionsstudie deckte **typische Probleme** auf, die ihre Ursache nicht zuletzt in den Besonderheiten der MST, d.h. ihrem systemisch integrativen Charakter und den sich daraus ergebenden Anforderungen an die FuE-Prozesse, die Möglichkeiten zur Nutzung der Ergebnisse in der wirtschaftlichen Praxis und deren Abhängigkeit von den jeweils vorherrschenden Marktstrukturen haben:

- Die Entwicklung von MST-basierten Produkten stößt immer wieder auf **anwendungs- und technologiespezifische Abhängigkeiten**, die nicht nur Konsequenzen für die MST-Entwicklungen und die dafür hinzuzuziehenden FuE-Einrichtungen haben, sondern für den Fall der Anwendung auch ein entsprechendes Innovationsgeschehen in den vor- oder nachgelagerten Unternehmen in der Wertschöpfungskette erfordern.
- Die Konsequenz daraus sind **hohe und für KMU kaum kalkulierbare Entwicklungszeiten und –kosten**. Für sie stellt sich immer wieder das Problem, kritische Mengen und Absatzpreise zu erreichen, die ein Engagement in MST angesichts der Entwicklungs-, Fertigungs- und Gewährleistungskosten und –risiken rechtfertigen können. KMU geraten in solchen Situationen schnell in Schwierigkeiten, weil sie nur über begrenzte personelle und finanzielle Ressourcen verfügen und von sich aus nicht die Kraft haben, ihre Ideen und Angebote in die Innovationsstrategien ihrer wirtschaftlich meist stärkeren Kunden einzubringen.
- Als besonders kritisch hat sich in diesem Zusammenhang die Tatsache erwiesen, dass es bisher noch **an einer industriell anwendbaren Fertigungstechnik mangelt** und zwar insbesondere für Anwendungen mit geringen Stückzahlen. Dies zeigt die Vertiefungsstudie zur „Agile Fabrication“ im Rahmen der ex-ante Evaluation. Die bisherigen Bemühungen zur Entwicklung von Designwerkzeugen, MST-Baukästen und generellen Testmöglichkeiten einschließlich der Bestrebungen zur

Standardisierung und dem von der EU unterstützten Aufbau von „Manufacturing Clusters“ erscheinen gegenwärtig ohne eine öffentliche Förderung noch nicht tragfähig.

Vor diesem Hintergrund erwarten die befragten Unternehmen insgesamt ein sich **nur langsam und evolutorisch entwickelndes Geschäft** mit MST-basierten Produkten und Komponenten. Zwar stößt die Anwendung der Technologie auf viele Interessenten, doch engagieren sich außerhalb der erwähnten Bereiche noch zu wenig Kunden. Eine **allein auf die Wirksamkeit von Marktkräften sich selbst tragende Entwicklung** als Basis für branchenübergreifende Innovationsanstöße ist im Bereich der MST unter solchen Bedingungen **kaum zu erwarten**.

Ansatzpunkte aus der ex-ante Evaluation: künftiger FuE-Bedarf

Die schon in der ex-post Evaluation erkennbar gewordene Vielfalt von Anwendungs- und Technikfeldern der MST wird in der ex-ante Evaluation und den darauf aufbauenden Vertiefungsstudien inhaltlich weiter konkretisiert und zwar sowohl von ihrem technologischen Gehalt wie auch von ihren Anwendungspotenzialen her. Dabei wurde die folgende grundsätzliche Beschreibung für ein Zukunftsfeld zugrunde gelegt: Ein MST-Zukunftsfeld ist ein Cluster von vorhandenen oder zukünftig verfügbaren Technologien, deren funktionales Zusammenspiel ein hohes Anwendungspotenzial für Deutschland erwarten lässt. Das Anwendungspotenzial ergibt sich dabei in der Regel aus der jeweiligen Funktionalität der in den Zukunftsfeldern zusammen gefassten Entwicklungen, die ihrerseits Innovationsprozesse in unterschiedlichen Anwendungsfeldern und Branchen gleichzeitig anstoßen können.

In der ex-ante Evaluation wurden insgesamt **zehn MST-Zukunftsfelder** identifiziert:

- Die **Systemintegration** ist auf allen Ebenen (Chip, Häusung, Leiterplatte, ..., System) von einer zunehmenden Miniaturisierung und einer steigenden Integration geprägt. Durch stetig wachsende Anforderungen der Systeme z.B. an die Zahl der Gehäusepins, die abzuführenden Verlustleistungen oder die zu übertragenden Taktfrequenzen werden ständig neue Konzepte benötigt.
- **Optronics:** Die zunehmende Nutzung optischer Technologien insbesondere für die Informationsübertragung und -verarbeitung erfordert die Miniaturisierung und verstärkte Integration der heute noch dominierenden verschiedenartigen Technologien (Elektronik, Optoelektronik, Glasfaser, diskrete optische Elemente).

- Die Zukunftsfelder **MST in Life Sciences** und **Fluidtronics** hängen thematisch sehr eng zusammen und werden deshalb hier und in Kap. 6.6 gemeinsam diskutiert. Im Bereich der Life Sciences geht es um die Anwendung wissenschaftlicher und ingenieurwissenschaftlicher Prinzipien, um Stoffe und Materialien mit Hilfe biologischer Wirkstoffe und Organismen herzustellen und gezielt zu verändern. Gegenstand der Mikro- und Nanofluidik sind Vorrichtungen, die kleinste Mengen von flüssigen und gasförmigen Medien führen, pumpen, separieren, fraktionieren, mixen bzw. kontrollieren können.
- Das Zukunftsfeld **Mikro-Nano-Interface** (MNI) umfasst mit der Sub- μ - und Nanotechnologie "enabling technologies" für die MST. Dem Feld kommt eine Schlüsselrolle bei der Implementierung von Funktionalität im Mikrometermaßstab in die Makrowelt ebenso wie bei der Einbindung von nanoskaligen Effekten in den Bereich der Mikrosysteme zu.
- Das Zukunftsfeld der **Polytronics** bezieht sich auf Fertigungsprozesse und Anwendungen von Polymermaterialien mit hoher MST-Relevanz, d.h. insbesondere von elektrisch isolierenden, intrinsisch leitenden oder halbleitenden und gefüllten Polymeren (Füllstoffe: Metalle, Halbleiter, Isolatoren, Nanopartikel).
- Im Zukunftsfeld **Micromats** geht es um die Entwicklung von „intelligenten“ Materialien (smart materials), die sich mit Unterstützung integrierter Sensoren, Aktoren und Regelungstechnik selbständig an die Umwelt anzupassen vermögen. Sie wandeln elektrische, magnetische, Wärme- bzw. Lichtenergie direkt in mechanische Energie um und können metallische, keramische, polymere oder Verbundwerkstoffe sein.
- **Agile Fabrication** befasst sich mit den Fertigungsmethoden von Mikrosystemen von der fertigungsgerechten Produktgestaltung über alle mit der Herstellung von Mikrosystemen verbundenen Aspekte der Systemintegration, der Bearbeitung und Verknüpfung unterschiedlicher Materialien bis hin zu den notwendigen Qualitätstests.
- Das Zukunftsfeld **Smart Energy** umfasst zum einen die Nutzung der MST zur Verbesserung von Energieerzeugung, -verteilung und -nutzung und zum anderen alle Fragen, die mit Energieerzeugung und Energieversorgung in bzw. von mikrosystemtechnischen Produkten verbunden sind.
- Das Zukunftsfeld **UbiComp** (Ubiquitous Computing) beinhaltet alle Produkte und Methoden, die einen mobilen, ortsunabhängigen Zugriff mit Hilfe einer vernetzten Computerhardware auf einen stets verfügbaren Content erlauben.

Alle zehn in der ex-ante Evaluation identifizierten MST-Zukunftsfelder lassen den MST-typischen „Mittler-“ und Systemcharakter zwischen unterschiedlichen Techniken und Anwendungsanforderungen erkennen: Sie beschreiben einerseits Problemfelder, die für viele Anwendungsfelder und Branchen gleichzeitig relevant sind und für die andererseits die systemische Verknüpfung verschiedener Techniken unverzichtbar ist. Zugleich werden die Parallelität und Interdependenz der verschiedenen Entwicklungspfade („trajectories“) sowie die akteursbezogenen Abhängigkeiten erkennbar, deren Bedeutung die moderne evolutionäre Innovationsforschung besonders betont.⁶¹

Die identifizierten Zukunftsfelder sind entsprechend keineswegs überschneidungsfrei. So stellen sich die Fragen der Fertigung und Systemintegration (Agile Fabrication, Systemintegration), der Energieversorgung in und von Mikrosystemen (im Bereich Smart Energy), der Verknüpfung von Nano- mit Mikro- und von Mikro- mit Makrostrukturen (Mikro-Nano-Interface) oder der Entwicklung spezifischer Materialien (Micromats) in nahezu allen Anwendungsfeldern der MST. Andererseits sind die spezifischen Anforderungen für verschiedene Anwendungen (z.B. im Bereich Life Sciences oder zur Optimierung im Energiebereich) durchaus unterschiedlich und erfordern eine jeweils anwendungsgerechte Kombination und Integration von unterschiedlichen technischen Lösungswegen. Dies wird in einigen Feldern beeinflusst von institutionellen oder politischen Rahmenbedingungen, wie dies besonders in den Fallstudien zu „Smart Energy“ (z.B. über die Energiepolitik) oder „MST in Life Sciences“ (z.B. über die Gesundheitspolitik) deutlich wurde.⁶²

Spezifizierung von MST für eine Neuausrichtung

Angesichts der Vielfalt und Unterschiedlichkeit der mit den Zukunftsfeldern jeweils verknüpften Techniken, Anwendungsmöglichkeiten und Überschneidungen fällt es schwer, eine Spezifizierung von Aufgaben der MST zu finden, die den Gegenstand für ein Förderprogramm eindeutig genug umschreibt. Als nicht ausreichend hat sich dabei die Verknüpfung von Miniaturisierung, technischer Systembildung und dem Dreiklang aus Sensorik, Signalverarbeitung und Aktorik erwiesen, die daher nicht zu Unrecht im laufenden dritten Förderkonzept nicht wieder aufgenommen wurde.

61 Vgl. im Einzelnen Kapitel 5 und 6

62 Vgl. Kapitel 6.4 und 6.6

Die bisherigen Erfahrungen in der Programmdurchführung und die Analysen der ex-ante Evaluation haben gezeigt, dass weitere Eigenschaften zur Bestimmung der MST notwendig sind. Diese weiteren Eigenschaften umfassen neben dem **technischen Systemgedanken** und der **Miniaturisierung** besonders die folgenden Punkte:

- **Nutzungsmöglichkeiten in diversifizierten Anwendungskontexten:** Hersteller von Mikrosystemen finden künftig ihre Abnehmer immer weniger in klar zuordenbaren Branchen, sondern bedienen die Anforderungen und Nachfrage unterschiedlicher Abnehmer aus unterschiedlichen Branchen.
- **Kombination von vielfältigen Funktionalitäten:** Sie wird immer mehr zur Voraussetzung, um das volle Potenzial der MST ausschöpfen zu können. Damit steigen zugleich die Anforderungen an die Intelligenz der Systeme.
- **Einsatz von enorm diversifizierten Einsatzmaterialien:** Hierdurch kommt der Verknüpfung von Forschungen im Bereich der Materialwissenschaften zunehmende Bedeutung für die MST zu.
- **Mittlerfunktion zwischen Nano- und Makrowelt:** Der MST fällt eine Schlüsselfunktion zu, um Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Nanotechnologie mit Mikro- und Makrosystemen zu verbinden und damit wirtschaftlich nutzbar zu machen.
- **Mittlerfunktion zwischen organischer und anorganischer Welt:** Die Erfüllung dieser Aufgabe entpuppt sich immer klarer als besonders kritisch im Hinblick auf die Nutzung der MST im weiten Bereich der Life Sciences.

Die MST – typischen Innovationsbarrieren ...

Die von den technischen und Anwendungsmöglichkeiten her vorstellbare Weiterentwicklung der MST stößt in allen oben genannten Zukunftsfeldern auf **Innovationsbarrieren**. Diese hängen einerseits stark von den jeweils relevanten Techniken und Anwendungsanforderungen ab, führen aber andererseits im Kern immer wieder auf dieselben Einflüsse, die nach den Ergebnissen der ex-post Evaluation auch bisher schon die Diffusion der MST hemmen: **die hohen Entwicklungszeiten, -risiken und -kosten in der MST.**

Die einzelnen Innovationsbarrieren, wie sie in den Fallstudien beobachtet bzw. von den befragten Experten genannt wurden, ergeben sich dabei vor allem aus den **Schwierigkeiten der zeitlich und sachlich notwendigen Verknüpfung zwischen technischen und anwendungsspezifischen Problemfeldern**, die für alle MST-Entwicklungen typisch und damit entscheidend sind:

- Schwierigkeiten zum Aufbau **innovativer Netzwerke** zwischen potenziellen Anwendern und notwendigen FuE-Einrichtungen,
- vorherrschend **einseitige technik- bzw. anwendungs-zentrierte Denkansätze** in vielen FuE-Einrichtungen und Unternehmen, die bei MST-Entwicklungen vor- bzw. nachgelagert sind und für die diese bisher erst selten einen eigenständigen Innovationswert besitzen,
- eng begrenzte **Entwicklungs- und Fertigungsstrukturen** für eine leistungsfähige und kostengünstige Produktion von MST-Produkten und –Komponenten nicht nur in Deutschland,
- fehlende praxisnahe und erprobte **Schnittstellen und Standards** zur modularen Entwicklung, Verknüpfung oder Fertigung von MST-Produkten und –Komponenten,
- neue und teilweise erst jetzt erkennbar gewordene Defizite bei **grundlegenden FuE-Entwicklungen** mit konkretem Anwendungsbezug,
- anhaltende Engpässe bei der Beschaffung von **ausreichend qualifiziertem Personal** zur Entwicklung und Fertigung von MST-Produkten und –Komponenten angesichts einer steigenden Personalnachfrage und
- eine angesichts der jüngsten Entwicklungen am Kapitalmarkt wieder schwieriger gewordene Situation zur **Innovationsfinanzierung**.

Dabei ist es schon für einzelnen Zukunftsfelder kaum möglich, eine Rangfolge hinsichtlich des Gewichts der jeweils relevanten Innovationsbarrieren festzulegen; für den Bereich der MST-Entwicklungen insgesamt wäre sie vollends aussagelos. Zu stark wirken bei diesen Barrieren die technik- und anwendungsseitigen Aspekte zusammen und verstärken sich gegenseitig.

... sind eine forschungspolitische Herausforderung ...

Ganz unabhängig aber von einer möglichen Rangfolge der erkennbar gewordenen Innovationsbarrieren lassen die ex-ante Analysen nach wie vor ihre forschungspolitische Relevanz erkennen:

- Aufgrund der Systeminterdependenz treten bei MST-Entwicklungen häufig – auch im Rahmen der bisherigen MST-Förderung – neue bisher unerwartete technische wie anwendungsbedingte Probleme auf, die nicht selten **grundlegende Forschungsfragen** zu ganz unterschiedlichen Themen aufwerfen, wie etwa zu den Materialeigenschaften im Mikro- und Nanobereich, zum Strömungsverhalten von Flüssigkeiten, zur Verknüpfung von Komponenten oder zum Schutz vor spezifischen Einflüssen aus der Umgebung.
- Der Zwang zur Systemintegration auf der Mikroebene macht bisher nachträgliche Fehlerkorrekturen an und von Teilprozessen und –komponenten während oder nach Abschluss der Entwicklungsarbeiten außerordentlich schwierig, wenn nicht unmöglich. Dies wäre leichter und billiger, wenn **ausreichend modularisierbare Systeme** sowohl **für Entwicklung, Fertigung und Test** von MST-Komponenten als auch **für anwendungsspezifische Verknüpfungen** zur Verfügung ständen. Bisher werden die technischen Probleme meist erst in einer späten Phase des Innovationsprozesses erkannt und entwerfen damit zugleich die gesamten bisherigen Entwicklungs- und Fertigungsanstrengungen.
- Der systemische Integrationscharakter der MST erfordert bei der Definition der Forschungsfragen, bei der Durchführung der FuE-Arbeiten und der Produktion der MST-Produkte und -Komponenten eine **enge Kooperation zwischen den Mitarbeitern aus Forschungsinstituten, Anwender- und Herstellerunternehmen** möglichst **in der gesamten Wertschöpfungskette**, um Anforderungen, Design- und Entwicklungsvorbereitungen, technische Fertigungsmöglichkeiten und Qualitätstests immer wieder mit einander in Einklang zu bringen. Die bisherige Förderung unterstützte die Entwicklung solcher Kooperationsstrukturen, doch kann gegenwärtig noch kaum von einer selbsttragenden Situation ausgegangen werden.

Die oben genannten forschungspolitischen Probleme wirken sich direkt auf die **wirtschaftlich-organisatorischen Innovationsbarrieren** aus, wie sie gleichermaßen in der Diffusionsanalyse und in den verschiedenen Zukunftsfeldern der ex-ante Evaluation erkennbar wurden: Entwicklungskosten, Netzwerkbildung, Fertigungsinfrastruktur, Standardisierung, Personal und Finanzierung.

Sie kumulieren besonders bei KMU, die in Deutschland die Rolle eines wichtigen Impulsgebers im Innovationssystem einnehmen. Jede MST-Entwicklung wirft bei ihnen das **Problem der kritischen Menge** auf, wenn die Schlüsselanwendungen ihnen kein kostendeckendes Absatzpotenzial erlauben, sie sich geeignete Märkte für Parallelanwendungen erst noch erschließen müssen oder sie sich auf die ihrer eigenen Produktion vor- wie nachgelagerten Kooperationsstrukturen nicht ausreichend verlassen können.

Dies wirkt sich besonders dort innovationshemmend aus, wo es sich, wie bei den meisten heute noch nicht marktgängigen MST-Produkten oder –Komponenten, um Anwendungsfelder handelt, die mit gleichen oder ähnlichen funktionalen Eigenschaften (Sensoren, Pumpen etc.) zu Produkt- oder Prozessinnovationen in verschiedenen marktgängigen Produktionsfeldern, d.h. unterschiedlichen Branchen und Unternehmen führen könnten. Jedes einzelne potenzielle Anwendungsfeld reicht hier vom Marktvolumen her nicht aus, um eine Eigenfertigung und die wirtschaftliche Basis für ein KMU aus Kosten- wie Qualitätsgründen zu tragen. Die Verknüpfung mehrerer Anwendungsfelder, um die sich schon bisher viele Firmen nach den Ergebnissen der Diffusionsanalyse bemühen, überfordert andererseits schnell die personelle wie finanzielle Kapazität von KMU.

... und bieten den Ansatz für eine Neuausrichtung der MST-Förderung

Bei einer Neuausrichtung der MST-Förderung wird es darauf ankommen, die technischen Besonderheiten der MST und die sich daraus ergebenden FuE-Probleme mit dem Abbau der oben beschriebenen wirtschaftlich-organisatorischen Innovationsbarrieren vor allem für KMU zu verbinden. Eine Durchdringung **branchen- und technologieübergreifender Anwendungsfelder** mit MST-basierten Innovationen kann dabei umso besser angestoßen und unterstützt werden, je mehr es gelingt, die MST-Förderung auf möglichst breitenwirksame Zukunftsfelder zu konzentrieren.

Aufzugreifen sind damit vorrangig **funktionale Querschnittsthemen**, in denen technische Entwicklungs- und Integrationsprobleme so bearbeitet und gelöst werden, dass die gefundenen Lösungen zugleich als Basis für marktgängige Anwendungen in unterschiedlichen Branchen dienen können. Die im Einzelfall nötige, ggf. auch kundenspezifische Ausdifferenzierung kann dann den Entwicklungen im Unternehmenssektor überlassen werden.

Die **Potenziale** für solche MST-Entwicklungen sind nach den Ergebnissen der ex-ante Evaluation **in allen identifizierten Zukunftsfeldern** durchaus gegeben. Dies machen insbesondere die vier Vertiefungsstudien deutlich:

- In diesen Zukunftsfeldern können wirtschaftliche Anwendungspotenziale bisher noch nicht erschlossen werden, weil **applikationsnahe Entwicklungen** ebenso fehlen wie die für die Weiterentwicklung nötigen **branchenübergreifenden und interdisziplinären Netzwerke**. Dies ist besonders ausgeprägt im Zukunftsfeld Mikro-Nano-Interface.
- Applikationsnahe Entwicklungen stoßen immer wieder auf **grundlegende Forschungsprobleme** (besonders in Agile Fabrication, Smart Energy, MST in Life Science). Sie stehen meist im Zusammenhang mit technischen Schnittstellen, deren Problematik erst im Zuge der Forschungsarbeiten erkennbar wurde. Dies erhöht nicht nur die wirtschaftlichen Entwicklungsrisiken und –kosten, es unterstützt vor allem bei den beteiligten bzw. interessierten Unternehmen die teilweise zurückhaltende Einstellung gegenüber MST-basierten Innovationen.
- In den Zukunftsfeldern „MST in Life Sciences“ und „Smart Energy“ können MST-Entwicklungen künftig wichtige Beiträge zur **Sicherung von staatlichen Vorsorgeaufgaben** liefern (z.B. Gesundheit, Lebensmittelsicherheit, Umwelt, Energiesicherung), die aus sich heraus ein Engagement des BMBF bei der Finanzierung von Forschungsprojekten ggf. in Abstimmung mit den zuständigen Ressorts rechtfertigen.⁶³

Die Erschließung dieser MST-Entwicklungspotenziale würde in jedem Fall eine Neuausrichtung einer MST-Förderung durch das BMBF rechtfertigen. Sie müsste sich dafür allerdings stärker noch als in der Vergangenheit an den in der Evaluation erkennbar gewordenen Charakteristika der MST als einer systemischen Integrationstechnologie orientieren.

⁶³ Es zeigte sich, dass die im Rahmen der ex-ante Evaluation thematisierten Zukunftsfelder unter die durch den (noch laufenden) FUTUR-Prozess herausgearbeiteten Leitvisionen subsummierbar sind.

Leitkriterien für die Neuausrichtung der MST-Förderung

Die Neuausrichtung der MST-Förderung in Deutschland sollte sich an einem „**ganzheitlichen**“ **Innovationsverständnis** ausrichten, das sich auf die evolutionstheoretischen und akteursbezogenen Überlegungen der aktuellen Innovationsforschung stützt und dessen Übertragbarkeit auf die MST in der ex-ante Evaluation deutlich geworden ist.

Wichtiges Element der Problemdefinition bildet die **Organisation und Unterstützung der Zusammenarbeit** zwischen allen für eine erfolgreiche Entwicklung und Nutzung zusammenwirkenden Akteure. Rückkopplungsprozesse mit Anwendern und Nutzern der MST sind sowohl in der Vorbereitung von FuE-Vorhaben als auch im Verlauf der Arbeiten sicherzustellen: Die Anforderungen an MST-Produkte lassen sich nur bestimmen und im Erkenntnisprozess konkretisieren, wenn die verschiedenen Akteure in der Wertschöpfungskette, somit auch Endabnehmer bzw. Genehmigungsbehörden, in die Vorhaben einbezogen werden.

Dieser Ansatz wird nur dann von Erfolg gekrönt sein, wenn die zu beteiligenden Akteure sich **in den gemeinsamen Vorhaben engagieren** und dort ihre wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Interessen verfolgt sehen. Dies zu erreichen, ist aufwändig und scheitert leicht an den Interessenunterschieden der zu Beteiligten. Mögliche Interessendivergenzen bzw. die Unkenntnis relevanter Akteure aus anderen Fachgebieten und Branchen lassen sich nur dann überwinden, wenn hierfür entsprechend geeignete Anreize, z.B. im Rahmen einer FuE-Förderung, bestehen. Sie ist auch ordnungspolitisch gerechtfertigt, wenn dadurch, wie in der bisherigen MST Förderung, gesamtwirtschaftliche Innovationsanstöße ausgelöst werden.

Um unter den spezifischen Bedingungen der MST die Wirksamkeit der Förderung durch die Anpassung an den evolutorischen Charakter von MST zu verbessern, ohne die Risiken der „Selbstbedienung“ einzugehen, erscheint die Berücksichtigung der folgenden drei Leitideen zweckmäßig:

- Eine stärkere **Fokussierung auf FuE-Schwerpunkte** unter Beachtung der für alle MST-Entwicklungen entscheidenden Kriterien von Funktionalität, Anwendungsorientierung und technischem Entwicklungsbedarf. Angesichts der Vielfalt der MST-Entwicklungspfade und der Schwierigkeit zum Aufbau der notwendigen Akteurs- und Produzentennetzwerken läuft jede zu breit angelegte Förderung Gefahr, sich entweder aus Mangel an finanziellen und organisatorischen Kapazitäten zu überfordern oder die verschiedenen Zukunftsfelder bzw. MST-Entwicklungspfade nicht in der notwendigen Tiefe verfolgen und zum wirtschaftlichen Erfolg führen zu können.

- Eine Fokussierung öffentlicher Mittel ist nur vertretbar, wenn das Engagement für die MST-Entwicklungen auch durch ein starkes **Commitment aller Beteiligten** im Hinblick auf die praktische Nutzung gestützt wird. Dies verlangt eine systematische Vorbereitung der jeweiligen Entwicklungsvorhaben mit dem Ziel, schon im Vorfeld der eigentlichen Forschungsarbeiten die ggf. einzubeziehende grundlegende wie angewandte Forschung, die parallel anzusprechenden Anwendungsfelder und die benötigten Entwicklungs- und Fertigungsmöglichkeiten einschließlich der dafür geeigneten Akteure zu identifizieren und einzubeziehen.
- Bei der Durchführung der MST-Entwicklungsvorhaben muss dem dynamischen Charakter der Innovationsprozesse möglichst weitgehend entsprochen werden. Dies erfordert eine **hohe Flexibilität** hinsichtlich der Anpassung der FuE-Arbeiten und ggf. des Instrumenteneinsatzes an neue Erkenntnisse im Laufe des Entwicklungsprozesses. Hierbei können sowohl grundlegende als auch anwendungsnahe Forschungsaspekte im Lauf der Förderung eine unterschiedliche Priorität (z.B. auch durch Änderung der Förderquote) einnehmen. Darüber hinaus sollte die Möglichkeit bestehen, die Förderinstrumente formativ zu evaluieren und ggf. aufgrund neuer Erkenntnisse während der Arbeiten den veränderten Anforderungen anzupassen.

Die Konkretisierung dieser von dem systemischen Integrationscharakter der MST her abgeleiteten Leitkriterien muss im Rahmen der künftigen Programmplanung erfolgen. Dies ist Aufgabe der sich an die Evaluation anschließenden forschungspolitischen Diskussion zur Ausgestaltung einer potenziellen Neuausrichtung der MST-Förderung. Das folgende Kapitel formuliert auf der Basis der vorliegenden Evaluationsergebnisse einige wesentliche bei der Programmkonzeption zu berücksichtigende Diskussionspunkte.

8.2 Anregungen für die Ausgestaltung einer neu ausgerichteten MST-Förderung

Es ist explizit nicht Aufgabe dieser Untersuchung, auf der Basis der durchgeführten Evaluation Empfehlungen für die Ausgestaltung einer künftigen MST-Förderung zu geben und die Strategie zur Umsetzung modifizierter Zielsetzungen vorzulegen. Auf der anderen Seite haben die ex-post wie die ex-ante Evaluation eine Fülle von Informationen und Erkenntnissen erbracht, die bei der Planung und Ausgestaltung eines potenziellen MST-Forschungsprogramms in Betracht gezogen werden können. Sie werden im Folgenden kurz skizziert und sollen zugleich helfen, die Vorstellungen modellhaft zu konkretisieren, die dem oben entwickelten ganzheitlichen Ansatz zugrunde liegen. Dabei bleiben alle ggf. aus politischen, institutionellen und nicht zuletzt finanziellen Gründen zu berücksichtigenden Aspekte unberücksichtigt.

Eine den Erfordernissen **MST-spezifischer Innovationsprozesse** entsprechende Vorgehensweise sollte die Veränderungsdynamik in den Technologien und den Nutzungs- und Anwendungskontexten positiv aufgreifen. Geeignet erscheinen Verfahren, die durch ihre prozessorientierte Ausgestaltung immer wieder neue anwendungsrelevante MST-Entwicklungen in einem **offenen und flexibel gehaltenen Lernprozess** anzuregen, aufzugreifen, zu unterstützen und zu begleiten in der Lage sind. Die bisher schon erfolgreich eingesetzten Instrumente (wie z.B. die Verbundförderung u.ä.) sollten beibehalten werden. Sie wären jedoch zu ergänzen um eine systematischere Vorbereitung und Einbindung der Projekte. Ihr Ziel wäre die Vernetzung von MST-Entwicklungen mit vor- und nachgelagerten Innovationsprozessen, von denen der wirtschaftliche Erfolg der MST entscheidend abhängt.

Dieser Ansatz könnte sich in einem **Verfahren** niederschlagen, das sich aus vier Programmmodulen zusammensetzt (vgl. Abbildung 8.1). Es beginnt mit einer **systematischen Vorbereitung** durch Suche nach wichtigen Zukunftsfeldern für zielführende FuE-Arbeitsprogramme in der MST. Ihm folgt die Entwicklung des notwendigen Netzwerkes und die **Einbindung** der Akteure sowie die **Durchführung** der eigentlichen Forschungsarbeiten. Begleitet werden diese Schritte durch Maßnahmen zur Unterstützung des **Technologietransfers** .

Module zur Neuausrichtung der MST-Förderung

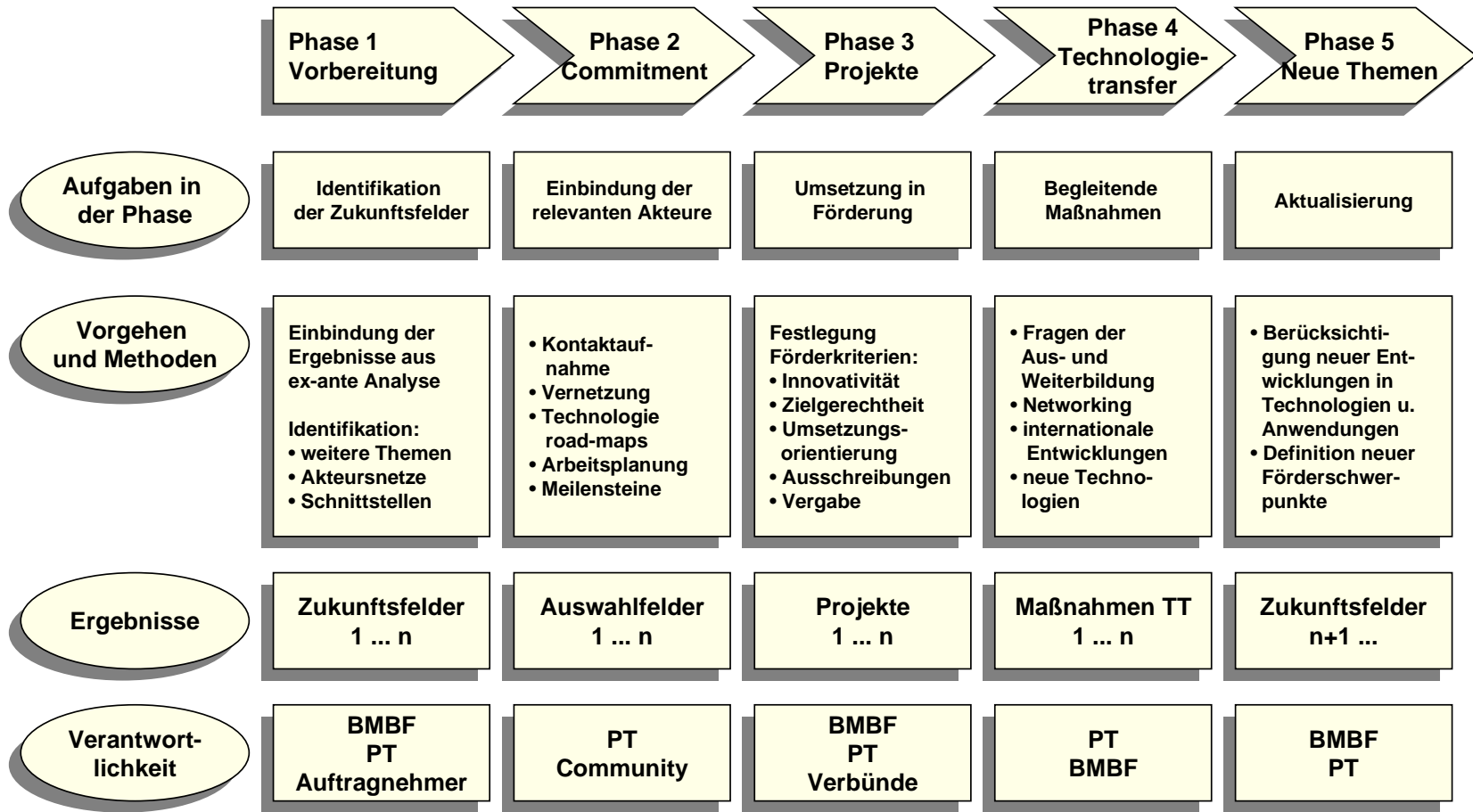


Abbildung 8.1: Übersicht über die Programmmodule zur Neuausrichtung der MST-Förderung

1. Vorbereitung zielführender FuE-Arbeitsprogramme

Die hier abgeschlossene Evaluierung hat eine Vielzahl von Akteuren entlang der Wertschöpfungskette und der unterschiedlichen Phasen des Innovationsprozesses einbezogen. In einem ähnlichen Verfahren sollten auch in Zukunft die potenziell relevanten Akteure bei der Suche nach Zukunftsfeldern für Forschungsprogramme in der MST Berücksichtigung finden. Gleichzeitig sind diese Prozesse so zu gestalten, dass Misserfolgsrisiken und die Gefahr der „Selbstbedienung“ vermieden werden. Ziel muss die **Identifizierung und Fokussierung auf besonders MST-relevante Zukunftsfelder** und entsprechende **Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte** sein. Dafür erscheinen die folgenden Teilschritte zweckmäßig:

- Identifizierung aussichtsreicher potenzieller **Zukunftsfelder** für MST-spezifische Querschnittsfragen unter den Gesichtspunkten der Funktionalität, der Anwendbarkeit und der technischen Anforderungen. Dieser Schritt wurde im wesentlichen bereits in der ex-ante Evaluation mit der Beschreibung der Zukunftsfelder und den vier Vertiefungsstudien gemacht. Ggf. notwendige Vertiefungen oder Ergänzungen könnten mit dem Ziel der Vergabe von FuE-vorbereitenden Untersuchungen ausgeschrieben werden.
- Identifizieren der voraussichtlich relevanten problemorientierten, **interindustriellen und interdisziplinären Akteursnetze** ggf. auch über den nationalen Rahmen hinaus und eruieren ihrer potenziellen Bereitschaft zur Mitarbeit bzw. der dafür entscheidenden Bedingungen (z.B. hinsichtlich anderer Partner, Kooperationsstrukturen, Finanzierungsbedingungen, Verwertungsmöglichkeiten etc.).
- Identifizieren der ggf. zu lösenden **Schnittstellenprobleme** und der dafür zu entwickelnden bzw. zu beachtenden technischen Standards sowie der zu berücksichtigenden institutionellen Rahmenbedingungen bzw. der potenziellen Konflikte (Umwelt- und Gesundheitsauflagen, Gewährleistungs- und Haftungsfragen), die für die Anwendung der Ergebnisse wesentlich sind oder werden könnten.
- Bei Themen, in denen Entwicklungen für staatliche Vorsorgeaufgaben im Vordergrund stehen (Gesundheit, Sicherheit, Umwelt etc.) bzw. eine Verzahnung mit anderen FuE-Schwerpunkten der Bundesregierung zweckmäßig erscheint (z.B. Nanotechnologie, Materialforschung, Life Science, Energieforschung), sind **Rückkopplungsprozesse** mit den zuständigen Ressorts bzw. Referaten vorzusehen.

Am Anfang der die eigentlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vorbereitenden Stufe steht die **Übernahme der Zukunftsfelder aus der ex-ante Evaluation**, ggf. ergänzt um eine Ausschreibung, die es allen potenziellen Akteuren aus dem FuE-Bereich ebenso wie aus der Wirtschaft ermöglicht, weitere einschlägige Zukunftsfelder vorzuschlagen.

Aufbauend auf den vorliegenden Evaluationsergebnissen ist es nötig, für die noch nicht vertieft untersuchten Zukunftsfelder entsprechend ergänzende Voruntersuchungen durchzuführen. Dies gilt entsprechend auch, wenn über die genannten Zukunftsfelder hinaus noch andere Themen in die vorbereitenden Arbeiten einbezogen werden sollen. In jedem Fall erscheint es zweckmäßig, Voruntersuchungen für mehr Ansätze durchzuführen, als voraussichtlich in den weiteren Programmmodulen aufgegriffen werden können.

Auf der Basis der Voruntersuchungen sollte das BMBF über die **Auswahl der weiter zu verfolgenden Zukunftsfelder** entscheiden, für die es Anstöße und Möglichkeiten zur Entwicklung geeigneter Netzwerke sowie ggf. Budgets für die Unterstützung notwendiger FuE-Vorhaben zur Verfügung stellen kann bzw. will. Bei der Auswahl ist darauf zu achten, dass diese die Entwicklung einer breiteren, von KMU getragenen Zulieferstruktur auf der Basis von MST und die Gründung neuer KMU zu unterstützen vermögen.

Die Auswahl ist die Basis für eine ggf. weitere zukunftsfeldspezifische Ausschreibung, deren Ziel die Suche nach potenziellen Partnern ist. Sie sollen interessiert und bereit sein, sich an der **Bildung eines Netzwerkes** zu beteiligen, in dem die inhaltliche Vertiefung und Konkretisierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs zur Überwindung von Innovationsbarrieren angegangen werden kann.

2. Organisation und Sicherung der Einbindung der relevanten Akteure (Commitment)

Das Ziel des 2. Programmmoduls ist es, die aufgrund der Auswahl zu beteiligenden Akteure einzubinden und das **notwendige Netzwerk** für die in Aussicht genommenen Vorhaben **aufzubauen**, ggf. zu ergänzen und vertraglich abzusichern. Dabei können und sollten auch ausländische Partner (z.B. Patentinhaber oder FuE-Stellen) einbezogen werden, wenn sie über ein entsprechendes Know-how verfügen oder für die spätere Vermarktung ausschlaggebend werden können.

Inhaltlich geht es in erster Linie um die Erzielung eines **gemeinsamen Problemverständnisses** der beteiligten Akteure und die frühzeitige Verknüpfung der zu berücksichtigenden naturwissenschaftlich-technischen sowie wirtschaftlich-gesellschaftlichen Parameter. Bereits im laufenden und in den vorigen MST-Förderphasen hat sich hier die Arbeit des bisherigen Projektträgers VDI/VDE-IT GmbH bewährt. So wurden in der letzten, noch laufenden Förderphase ca. 50 % der Verbundpartner vom Projektträger empfohlen. Dieses Verfahren wurde auch von den Programmteilnehmern durchweg positiv bewertet.⁶⁴ Im Einzelnen geht es um die folgenden Punkte:

- Die ggf. notwendige Suche, Kontaktierung und Integration von zusätzlichen KMU, GU und anderen Organisationen, die bisher noch nicht einbezogen wurden oder werden konnten, deren Beteiligung aber auch nach Ansicht der bereits interessierten Partner für die Innovation von Bedeutung ist (z.B. Vertreter von einschlägigen Verwaltungen u.ä.). Ausschlaggebend sollte sein, dass sich **ökonomisch tragfähige Netzwerke mit entsprechend leistungsfähigen und –willigen Partnern** bilden, die unter anderem ggf. auch die Entwicklung von verwendbaren Industriestandards und Schnittstellendefinitionen ermöglichen.
- Die Organisation der Verbünde aus Wirtschaftsunternehmen und FuE-Einrichtungen sollte erweitert werden um **Dienstleistungsunternehmen**, die nicht nur einschlägige Entwicklungs- und Designarbeiten sondern z.B. auch Aufgaben der Koordination oder die Erarbeitung der notwendigen vorbereitenden und begleitenden Unterlagen (z.B. für Road-maps für spezifische Anwendungsfelder) übernehmen können. Ihre Finanzierung müsste im Rahmen des Programms ggf. unter einer angemessenen Beteiligung der eingebundenen Partner gewährleistet werden.
- Gemeinsame Erstellung von **Technologie Road-maps** unter Berücksichtigung von Entwicklungen im Ausland und der Patentsituation im Rahmen der FuE-Vorbereitung. In diesem Zusammenhang kann auf die Ergebnisse der NEXUS Road-maps, die user-supplier groups erarbeitet haben, oder andere bereits vorliegende Untersuchungen zurückgegriffen werden.⁶⁵

⁶⁴ Vgl. Kapitel 4.2.

⁶⁵ Vgl. El Fatatry (Hg.): The NEXUS Technology Road-Map, 1st Report, August 2000.

- **Festlegung eines gemeinsamen Arbeitsprogramms** zur Beschleunigung der Innovationsprozesse, zur Überwindung von Innovationsbarrieren und zur Schließung von erkennbar werdenden FuE-Defiziten. Dabei ist insbesondere zu klären, welche Lösungswege eingeschlagen und welche Entwicklungsanstrengungen in Angriff genommen werden können und sollen. Die Zielsetzung sollte nicht in erster Linie die Definition von FuE-Projekten mit öffentlicher Förderung, sondern die Kompetenzentwicklung und gegenseitige Ergänzung der Projektpartner im Rahmen ihrer jeweiligen Innovationsstrategien sein.
- Bestimmung des **Kostenrahmens für ggf. notwendige künftige FuE-Vorhaben**. Dies ist die Basis zur Definition und Einbettung von wissenschaftlichen Vorprojekten und FuE-Vorhaben in das gemeinsame Arbeitsprogramm.
- **Vereinbarung von Meilensteinen** im Arbeitsprogramm, zu denen die in den Road-maps und bei den Problemdefinitionen zugrunde gelegten Entwicklungsziele und Annahmen zu überprüfen sind. Dafür sind insbesondere die Ergebnisse von wissenschaftlichen Vorprojekten oder gemeinsam durchgeführten FuE-Vorhaben (mit oder ohne öffentliche Förderung) in die bisherige Arbeitsplanung zu integrieren und diese ggf. den neuen Erkenntnissen entsprechend zu revidieren.
- Aufzeigen von Wegen zur **Zusammenarbeit mit interessierten Risiko-Kapitalgebern** und Ergänzung des Förderinstrumentariums, um **technologieorientierte Unternehmensgründungen** unterstützen zu können, die im Zuge der gemeinsamen Arbeiten z.B. als Ausgründungen von FuE-Einrichtungen erkennbar werden.

Das Engagement des BMBF sollte sich in diesem Programmmodul vor allem auf die organisatorische Unterstützung und Erleichterung der Bildung von tragfähigen Netzwerken konzentrieren. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist einerseits die Leistungsfähigkeit des Projektträgers und andererseits die Bereitschaft des BMBF, für ergänzende Arbeiten (z.B. zur Road-map-Erstellung u.ä.) und für FuE-Vorhaben zur Schließung von Forschungslücken Budgetmittel zur Verfügung zu stellen.

Wenn es in diesem Rahmen nicht zur Bildung tragfähiger Netze kommt, muss konsequenterweise das entsprechende Thema neu bearbeitet, anders zugeschnitten oder aufgegeben werden. Damit entfielen auch der Grund für eine weitere Projektförderung.

In diesem Zusammenhang kann auf die vorliegenden Erfahrungen aus den GAMST- (Gestaltungsspielräume bei der Anwendung von Mikrosystemtechnik)⁶⁶ und MENTOR-Prozessen (Mikrosystemtechnik-Entwicklung und Optionen der Realisierung)⁶⁷ zurückgegriffen werden, wo jeweils die ganze Wertschöpfungskette mit ihren Akteuren und Anforderungen berücksichtigt werden sollte und auch Kooperationsoptionen diskutiert wurden.

3. Auswahl und Durchführung von geförderten FuE-Projekten

Die Bewilligung von Budgetmitteln zur Unterstützung wissenschaftlicher Vorprojekte und zur Durchführung von FuE-Verbundprojekten sind an Kriterien der Qualität, der Innovativität, der Zielgerechtigkeit der Vorhaben, des Verhältnisses von Leistungsfähigkeit und der Bereitschaft der Antragsteller zur Übernahme von Kosten und Risiken (insbes. bei der Beteiligung von KMU) und ggf. am gemeinwirtschaftlichen Interesse an bestimmten Entwicklungen auszurichten. Vor diesem Hintergrund darf die Mitwirkung in Netzwerken keine Garantie für den Erhalt öffentlicher Mittel für FuE-Vorhaben beinhalten. Gleichzeitig ist es aber im Bereich der MST sehr viel leichter, die genannten Kriterien zu erfüllen, wenn die Vorhaben, für die öffentliche Mittel beantragt werden, in entsprechende Entwicklungspläne eingebunden sind.

Die langen Zeiträume von der Produktentwicklung über Entwicklungen zur Kostenreduzierung und industriellen Fertigung bis hin zur Kommerzialisierung von MST-Produkten bzw. -Komponenten von 4 bis 10 oder mehr Jahren sind in den Projektlaufzeiten mit zu berücksichtigen. Dieses Problem lässt sich reduzieren, wenn für die Förderung von FuE-Vorhaben nicht mehr wie bisher die unmittelbare Anwendung nachgewiesen werden muss, sondern an dessen Stelle die **Einbettung des geplanten FuE-Vorhabens in einen auch über die Projektlaufzeiten hinausgehenden Verwertungsplan** mit einem entsprechenden Engagement der beteiligten Akteure tritt. Die Verwertungsplanung muss, wie auch bei sonstigen längerfristigen Industrieprojekten üblich, Meilensteine für notwendige Rückkopplungen enthalten, d.h. Zeitpunkte, zu denen die FuE-Planung, die Technologie Road-maps sowie die Verwertungsinteressen kritisch überprüft und ggf. angepasst werden können.

⁶⁶ GAMST-Projekte, wie „Kooperationsmöglichkeiten bei der Entwicklung und Anwendung von Analyse-, Pumpen- und Dosiersystemen“ oder „Schadstoffanalyse Wasser als Einsatzfeld für die Mikrosystemtechnik“, fanden bereits im Rahmen des ersten MST-Programms (1990 – 1993) statt.

⁶⁷ Die MENTOR-Studien, wie „Mikrosysteme im betrieblichen Arbeitsschutz“ oder „Nachfrageorientierte Anforderungen an intelligente Haussysteme“ im Verlaufe des zweiten MST-Programms erarbeitet (1994 – 1999).

4. Unterstützung des Technologietransfers

Die vierte und letzte Stufe dient in erster Linie dem Erfahrungsaustausch und der Diffusion von Erkenntnissen aus FuE-Vorhaben der MST im Bereich der MST-affinen Unternehmen und Organisationen ganz unabhängig von ihrer bisherigen Einbeziehung in die Förderung. Gerade die Differenzierung, die mit der Weiterentwicklung und dem Einschlagen neuer Entwicklungspfade in der MST verbunden ist, führt zu wachsenden **Informations- und Kommunikationsbedürfnissen**. Sie sollten unter drei unterschiedlichen Gesichtspunkten aufgegriffen und befriedigt werden:

1. zur Stärkung von Ausstrahlungseffekten über die **Verbreitung von neuen Erkenntnissen** unabhängig davon, ob diese im Rahmen von finanziell geförderten FuE-Vorhaben entstanden sind oder nicht;
2. zur **Formierung eines groben und offenen Netzwerkes**, über das auch Neueinsteiger bzw. Interessierte angesprochen werden und das es ihnen erleichtert, sich über Chancen und Risiken der MST-Anwendung zu informieren und selber engere Netzwerkkontakte zu knüpfen;
3. zur **Identifizierung von neuen MST-Entwicklungspfaden**, deren vertiefte Analyse zweckmäßig erscheint und die ggf. mit oder ohne eine öffentliche Förderung aufgegriffen werden könnten.

Auch wenn die bisherigen innovationsbegleitenden Maßnahmen nicht explizit Gegenstand der Evaluation waren, weisen sowohl die Ergebnisse der Diffusionsstudie als auch die in der ex-ante Evaluation immer wieder erwähnten Informationsdefizite auf die Zweckmäßigkeit solcher Maßnahmen hin. Hinzu kommt, dass die Beobachtung der „Szene“ und die damit verbundene und von laufenden FuE-Vorhaben unabhängige Suche nach sich neu abzeichnenden Entwicklungspfaden ein wichtiges Instrument ist, um den auch FuE-Vorhaben stets innewohnenden Beharrungstendenzen entgegenzuwirken.

Einstieg in die Programmmodule kurzfristig möglich

Die oben genannten Programmmodule für die Projektidentifizierung und -bearbeitung legen zwar einen gewissen zeitlichen Ablauf fest, der jedoch nicht für die Neuausrichtung des MST-Förderung selbst gilt. Bei mehreren unterschiedlichen Zukunftsfeldern ist es nicht nur möglich, sondern sogar sinnvoll, die unterschiedlichen Themen teils parallel, teils aber auch sequenziell, d.h. nacheinander anzugehen. So ließe sich z.B. kurzfristig die Erstellung von entsprechenden vorbereitenden Untersuchungen auf der Basis der in der ex-ante Evaluation identifizierten Zukunftsfeldern aus-schreiben.

Ein solches **zeitlich gestuftes Vorgehen** erlaubt es, das finanzielle Engagement den Budgetgegebenheiten anzupassen. Gleichzeitig können die zunächst nicht für diesen Zweck erarbeiteten Vertiefungsstudien als Einstieg genutzt und die Neuausrichtung der MST-Förderung parallel zum noch laufenden Förderkonzept MST 2000+ eingeleitet werden.

In jedem Fall sollte das Procedere sicher stellen, dass Zukunftsfelder, die zunächst nicht weiter verfolgt werden, ggf. zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgegriffen werden können. Voraussetzung dafür aber wäre stets eine **Aktualisierung der bisher erarbeiteten Ergebnisse**. Dies ergibt sich allein aus den ständigen, gleichwohl schwer prognostizierbaren Differenzierungen bei MST-Entwicklungen.

Komplementarität zu anderen Förderaktivitäten

Die Neuausrichtung der deutschen MST-Förderung tangiert in vielen Bereichen die Schnittstellen zu anderen Förderaktivitäten etwa des BMBF (z.B. institutionelle Förderung, Nanotechnologie, Materialtechnologie) oder des BMWA (z.B. Energieforschung). Dabei sollte aber die **MST ein eigenständiges Schwerpunktthema für die Forschungsförderung** bleiben, weil nur so dem Systemcharakter und den für die Anregung der Innovationsprozesse zentralen Vernetzungsbedingungen gezielt Rechnung getragen werden kann.

Die Neubestimmung der Schnittstellen ist insbesondere wichtig, um die sich mit der Neuausrichtung ergebenden **Synergiepotenziale** zu suchen und zu nutzen. Dies ist eine Aufgabe der forschungspolitischen Diskussion mit den verschiedenen politischen Partnern und Projektträgern, zu deren Ergebnis hier keine Aussagen gemacht werden können.

- Die stärksten Überschneidungen scheinen sich auf den ersten Blick mit der **MST-Förderung der EU** zu ergeben. Dieser Eindruck entsteht leicht, wenn man nur die inhaltliche Ausrichtung der EU-Förderung im 6. Forschungsrahmenprogramm⁶⁸ mit den in der ex-ante Evaluation identifizierten Zukunftsfeldern vergleicht. Konkret finden sich in den Programmunterlagen der EU bei der Auflistung der „Thematic Priorities“ die folgenden Bezüge zur MST: „Life sciences, genomics and biotechnology for health“ – die Nähe zum Zukunftsfeld „MST in Life Sciences“ ist offenkundig.
- „Information society technologies (IST)“ – hier wird explizit auf ambient intelligence mit deutlichem Bezug zu „UbiComp“ hingewiesen sowie im Zusammenhang mit FuE-Aktivitäten zu „communication and computing infrastructures“ das Feld „Optronics“ als „all-optical technologies“ erwähnt.
- Nicht explizit aber doch denkbar und durch die Konsultationen zu Micro-Nano-Technologies⁶⁹ nahegelegt sind Bezüge zum Zukunftsfeld „Micro-Nano-Interfaces“ im Unterpunkt „nanotechnologies and nanosciences“.
- Wiederum Verknüpfungen zum Feld „MST in Life Sciences“ zeigen sich unter dem Punkt „Food quality and safety“, wenn Produktions- und Prozessmethoden sowie Methoden der Analyse, Detektion und Kontrolle von chemischen Belastungen und pathogener Mikroorganismen erwähnt werden.
- Das Feld „Sustainable development, global change and ecosystems“ hat über die dort zusammengestellten Themen „fuel cells“, „integration of renewable energy sources in the energy system“, „energy efficiency“ enge inhaltliche Verbindungen zum Zukunftsfeld „Smart Energy“.

Die thematische Nähe des EU-Programms zu vielen, wenn auch nicht allen in der ex-ante Evaluation identifizierten Zukunftsfeldern ist allerdings in einem sich dynamisch entwickelnden Forschungsfeld kaum überraschend und bestätigt insoweit eher deren Richtigkeit. Auch eine KMU-Orientierung ist in der EU-Förderung vorgesehen und zwar mit dem Ziel, KMU stärker einzubinden, um die europäische Wettbewerbsfähigkeit über die Steigerung der technologischen Kompetenzen der KMU zu fördern.

⁶⁸ Vgl. Decision of the European Parliament and of the council concerning the sixth Framework Programme of the European Community for research, technological development and demonstration activities, contributing to the creation of the European Research Area and to innovation (2002 – 2006) und Beernaert, D.: Minutes of the Programme Consultation Meeting on Micro-Nano-Technologies, Brussels 06. Juni 2001.

⁶⁹ Vgl. Beernaert, D.: Minutes of the Programme Consultation Meeting on Micro-Nano-Technologies, Brussels 06. Juni 2001.

Trotz dieser Überschneidungen sehen wir in der **EU-Förderung** eher eine **sinnvolle Ergänzung**, als eine Alternative zu **einer eigenständigen deutschen MST-Förderung**. Dies hängt unmittelbar mit dem besonderen Charakter der MST als einer systemischen Integrationstechnologie, den unterschiedlichen regionalen Bezügen der EU- bzw. deutschen Förderung und dem hohen Gewicht von engen persönlichen und räumlichen Kontakten insbesondere bei der hohen Beteiligung von KMU zusammen: Der Erfolg in der MST-Förderung ist nach den Ergebnissen der Evaluation entscheidend von einer Verknüpfung der FuE-Förderung mit der Entstehung stabiler Netzwerke, d.h. regelmäßiger und intensiver Kontakte zwischen den FuE-Einrichtungen sowie den verschiedenen Herstellern bzw. Anwendern abhängig. Dies setzt Vertrauensbeziehungen zwischen deren Mitarbeitern voraus, die sich sehr viel leichter in einem einheitlichen kulturellen und industriellen Umfeld bilden. Vor allem KMU tun sich nicht zuletzt aus diesen Gründen mit der EU-Förderung schwer.⁷⁰

Eine eigenständige deutsche MST-Förderung kann im Unterschied zur EU-Förderung unmittelbar auf die **Wirtschaftsstruktur in Deutschland** und die hier herrschenden Bedingungen für die Entwicklung stabiler Kooperations- und Produzentennetze eingehen. Die EU-Förderung ist demgegenüber EU-weit angelegt und hat auch das Ziel, EU-weite Innovations- und Integrationsprozesse anzuregen. Sie kann dabei nach allen bisherigen Erfahrungen gerade in einem auf breite Vernetzungsstrukturen angewiesenen Gebiet wie der MST umso erfolgreicher sein, je mehr sie ihrerseits an nationale Netze anknüpfen und diese EU-weit ausbauen kann. Die Ergänzung beider Förderungsansätze könnte daher die gegenseitige Erfolgswahrscheinlichkeit eher steigern als stören.

⁷⁰ Vgl. Kapitel 2.6.1. Nur 15 % der geförderten Unternehmen beabsichtigen, sich an europäischen Forschungsprogrammen zu beteiligen. Bei den geförderten wissenschaftlichen Einrichtungen liegt der Prozentsatz mit 27 % etwas höher.

Hinweise zur Instrumentierung aufgrund der Ergebnisse der ex-post Evaluation

Für die Weiterführung der MST-Förderung kann bei der beschriebenen Neuausrichtung in weiten Bereichen auf die in der Vergangenheit überwiegend **erfolgreich eingesetzten Förderinstrumente zurückgegriffen** werden. Dies schließt nicht aus, dass auch in der Förderorganisation noch Verbesserungsmöglichkeiten für die Bearbeitung der Projektauswahl und im Bewilligungsverfahren gegeben sind.⁷¹ Die Förderorganisation war jedoch nicht Gegenstandsbereich dieser Evaluation.

Dabei liegt es in der Natur der Sache, dass die Ausgestaltung dem neuen Ansatz und den gemachten Erfahrungen entsprechend anzupassen wäre:

- Das Instrument der **Verbundprojekte** hat sich bewährt. Die Projekte zeichnen sich durch hohe Additionalität aus. Die Projektarbeiten im Rahmen der Verbünde verliefen in der Regel reibungslos. Der Anteil derjenigen geförderten Unternehmen, die hier größere Probleme hatten, war mit 8 % sehr gering⁷² und spricht nicht gegen das Instrument. Gleichzeitig zeigt die Diffusionsstudie die große Bedeutung von Kooperationen für den Erfolg der Unternehmen bei ihrem MST-Engagement.⁷³
- Die **Orientierung auf KMU** sollte insbesondere durch die entsprechende Differenzierung der Förderanteile erhalten bleiben, gleichzeitig kann eine **Ergänzung um die Förderung von technologieorientierten Unternehmensgründungen** zweckmäßig sein, mit der auch im Projektverlauf (z.B. an bestimmten Meilensteinen) auf erkennbar gewordene Gründungschancen reagiert werden kann.
- Zu überdenken ist die Möglichkeit zur systematischen **Einbeziehung von Großunternehmen** überall dort, wo sie sowohl für die Definition der Anforderungen als auch für die Integration und endgültige Vermarktung von zugelieferten Mikrosystemen unverzichtbar sind.
- Zu ergänzen wäre die Bereitstellung von Budgetmitteln für **vorbereitende bzw. die Netzworkebildung begleitende Maßnahmen** (Module 1 und 2) sowie die ggf. notwendigen Aktualisierungen von Technologie Road-maps und Anwendungsmöglichkeiten bei Erreichen bestimmter Meilensteine.

⁷¹ Vgl. Abschnitt 2.5.5.

⁷² Vgl. Abschnitt 2.5.4.

⁷³ Vgl. Abschnitt 3.2.2.

- Wieder stärker in den Vordergrund gestellt werden sollte die Möglichkeit zur Bereitstellung von Mitteln für **wissenschaftliche Vorprojekte** für die Bearbeitung von grundlegenden Themen, soweit diese im Rahmen der vorbereitenden Maßnahmen als wesentlich erkannt worden sind und von den Industriepartnern begleitet werden. Hierbei ist zu prüfen, inwieweit für solche Vorprojekte eine 100 %ige Förderung und die Bereitstellung von Mitteln zur Anschaffung von Fertigungsequipment möglich ist, das gerade zur Entwicklung neuer Fertigungsverfahren unverzichtbar ist und ggf. später von Unternehmen im Projektkonsortium übernommen werden kann.
- Im Grundsatz beibehalten, aber entsprechend neu ausgerichtet werden sollten die **bisherigen innovationsbegleitenden Maßnahmen**. Ihre Bedeutung sollte bei einer stärkeren Fokussierung der Projektförderung und dem höheren Gewicht sowohl der vorbereitenden wie der transferorientierten Maßnahmen noch wachsen. Von ihnen gingen schon in der Vergangenheit wichtige Impulse für die Überwindung von Personalengpässen und die Awareness für MST bei nicht geförderten Unternehmen aus. Hinzu kommt, dass es sich um wichtige Instrumente handelt, mit denen auch die FuE-Politik zu einer **Senkung der** immer wieder erwähnten **außertechnischen Innovationsbarrieren** beitragen kann:
 - Die **Personalknappheit** wird noch immer von Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen als ein großes Problem im Zusammenhang mit der Entwicklung und Anwendung der MST gesehen. Viele sprechen in den Zukunftsfeldstudien in diesem Zusammenhang von einem „entwicklungsbedingten Innovationsengpass“, der mit zunehmendem Erfolg von MST-Anwendungen vorübergehend noch an Bedeutung gewinnen könnte.⁷⁴
 - Mit der Differenzierung in der MST wird die Förderung der **Kommunikation** zwischen **den MST-Akteuren** und darüber hinaus sowie die **internationale Vernetzung** tendenziell schwieriger und damit wichtiger. Hinzu kommt die vorgeschlagene Fokussierung auf funktionale Querschnittsprobleme. Beides macht die Organisation von Informations- und Kommunikationsebenen von Internetportalen bis zu Kongressveranstaltungen unverzichtbar.

⁷⁴ Vgl. Abschnitt 6.

- Wichtig sind schließlich auch laufende Kontakte zu **Risikokapitalgebern bei der Vermarktung von MST-Vorhaben**. Dies ist zwar nach Einschätzung vieler Experten grundsätzlich vorhanden; für technisch anspruchsvolle MST-Produkte oder –Komponenten aber vor dem Hintergrund der Schwierigkeiten am „Neuen Markt“ nur schwer erreichbar. MST-Anwendungen finden sich fast immer im Verdrängungswettbewerb gegenüber anderen etablierten Techniken.

Schlussüberlegungen

Die am Beginn der Evaluation der MST-Förderung durch das BMBF stehende Frage nach Notwendigkeit bzw. Zweckmäßigkeit einer weiteren Förderung der MST in Deutschland lässt sich aufgrund der durchgeführten Arbeiten eindeutig beantworten: Aussagen zu der Förderung alternativer Technologiepfade bzw. zu alternativen Mittelverwendungen sind damit allerdings nicht verbunden. Fragen dieser Art waren nicht Gegenstand der Evaluation.

Die MST- Förderung konzentrierte sich auf ein Technologiegebiet, in dem schnelle, bahnbrechende Erfolge in einem Förderzeitraum von etwa 10 Jahren auf breiter Front nicht erwartet werden konnten. Dies hängt unmittelbar mit der Heterogenität der möglichen Anwendungsformen, dem „Mittlercharakter“ der Mikrosystemtechnik und den sich daraus ergebenden Schwierigkeiten zusammen, unterschiedliche Erkenntnisse und Techniken anforderungsgerecht in stabil funktionsfähige Systeme im Mikromaßstab zu integrieren.

Die bisherige Förderung hat sich dabei als erfolgreich und als ein wichtiger Schritt erwiesen, um die erfolgreiche, d.h. wirtschafts- und beschäftigungspolitisch relevante Nutzung der MST und ihrer Innovationspotenziale für die deutsche Industrie zu beschleunigen. Die Art der nach wie vor bestehenden bzw. teilweise erst offensichtlich gewordenen Forschungslücken und Innovationsbarrieren zeigt aber auch, dass auf absehbare Zeit noch nicht mit ausreichend starken Marktkräften zur Aufnahme und Weiterentwicklung der Innovationsprozesse mit und im Umfeld der MST gerechnet werden kann. Gleichzeitig haben sich im Verlauf der Förderung und in der ex-ante Evaluation die Ausgangsthese bestätigt, dass die MST mit ihren stark anwendungsorientierten High-Tech-Entwicklungen ein wichtiger Motor in arbeitsteilig organisierten Innovationsprozessen ist und diese Rolle, die der deutschen Industriestruktur traditionell stark entgegen kommt, in der Zukunft noch ausbauen kann.

Zur Stärkung der technologischen Leistungsfähigkeit Deutschlands bildet eine zukünftige MST-Förderung eine wesentliche Basis. Mögliche Elemente und Instrumente der erforderlichen Neuausrichtung sind in diesem Kapitel beschrieben worden.