

Abschlussbericht für das  
wissenschaftliche Vorprojekt

## **Individuelle monolithische Mikrosysteme aus dem 3D-Multi-Drucker ( $\mu$ Prod@Home)**

Programm: Schwerpunkt Mikrosystemtechnik im Förderprogramm „IKT 2020 –  
Forschung für Innovationen“ des Bundesministeriums fürs Bildung und  
Forschung (BMBF)

Einzelprojekt:  $\mu$ Prod@Home

Förderkennzeichen: 16SV5010

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung  
e.V. für ihr Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisie-  
rung IPA

Berichtszeitraum: 1. Mai 2010 – 31. März 2011

Berichter: Dipl.-Ing. Raphael Adamietz  
Dipl.-Des. (FH) Jannis Breuninger  
Dipl.-Ing. (FH) Dirk Schlenker  
Dipl.-Ing. Andrzej Grzesiak  
Dr.-Ing. Nabih Othman

Stuttgart, 31. Dezember 2011

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Ausgangssituation	4
1.1 Thema des wissenschaftlichen Vorprojektes	4
1.2 Zielsetzung	5
1.3 Stand der Technik	6
1.4 Projektinhalte und Vorgehensweise	8
2. Technologieatlas	9
2.1 Übersicht der projektrelevanten Technologien	9
2.2 Erstellung von Technologiesteckbriefen	9
3. Technologieanalyse	11
3.1 Recherche- und Bewertungsverfahren	11
3.2 Technologiebewertung	13
3.3 Diskussion der Ergebnisse	16
3.4 Fazit	21
4. Anwenderbefragung	22
4.1 Übersicht	22
4.2 Allgemeine Ergebnisse	23
4.3 Auswertung der Angaben der Entwickler und Fertiger	27
4.4 Ermittelter Handlungsbedarf und Potenziale in den befragten Gruppen	31
4.5 Diskussion ausgewählter Umfrageergebnisse	39
5. Konzeption und experimentelle Untersuchung	41
5.1 Übersicht	41
5.2 Kreative Konzeptplanung	41
5.3 Demonstratorkonzept	45
5.4 Realisierung des $\mu$ Prod@home-Demonstrators	46
6. Forschungs- und Entwicklungspotenzial	54
6.1 Diskussion der Ergebnisse	54

6.2	Ableitung von Handlungsbedarf	55
7.	Verwertung der Ergebnisse	57
8.	Zusammenfassung und Ausblick	58

# 1. Ausgangssituation

## 1.1 Thema des wissenschaftlichen Vorprojektes

Mit der Entwicklung innovativer Mikrosysteme in den letzten Jahren und der dadurch möglichen Erschließung einer Vielzahl an Anwendungsgebieten wird die Mikrosystemtechnik in der Öffentlichkeit als Schlüsseltechnologie wahrgenommen. Gleichzeitig steigt das Interesse am Einsatz mikrotechnischer Lösungsansätze u. a. zur Leistungssteigerung und Funktionalisierung von Produkten. Während heute Mikrosysteme meist hybrid aufgebaut sind, sollen zukünftige Lösungen einen kompakten monolithischen Aufbau mit integrierter höchster Funktionalität aufweisen (Abb. 1-1). Unter monolithisch wird hier ein Aufbau als Ganzes mit einem Minimum integrierter separater Elemente verstanden.

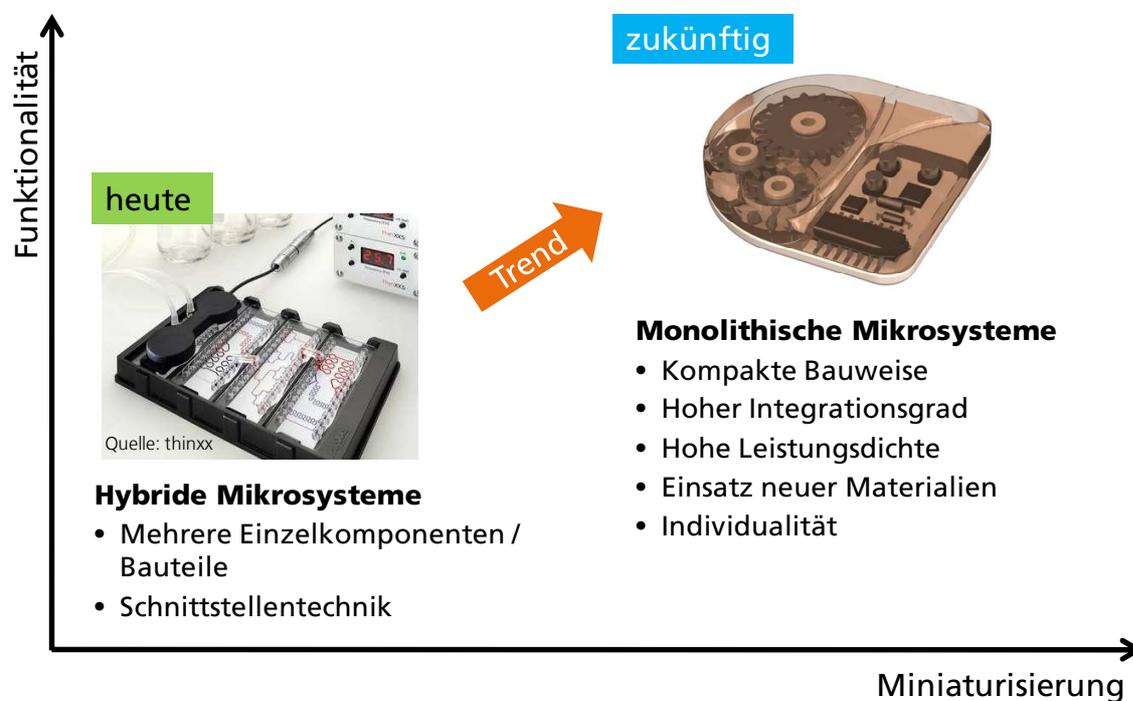


Abb. 1-1: Entwicklungstrend hochintegrierte Systeme

Produktionstechnisch gehen die Visionen soweit, dass sich zukünftig jeder sein mikrotechnisches Produkt angepasst auf seine Applikation anfertigen kann. So wie heute Bilder ausgedruckt werden, sollen zukünftig Mikrokomponenten und Komplettsysteme sowohl im klein- und mittelständischen Unternehmen als auch im heimischen Büro mit entsprechender Gerätetechnik aufgebaut werden können.

Deutschland und Europa sind in vielen Bereichen der Mikrosystemtechnik, wie z.B. in der Medizintechnik und der Mikrooptik, und der Mikroproduktionstechnik weltweit führend. Zu nennen sind beispielsweise die Gebiete Rapid Prototyping / Manufacturing und die Aufbau- und Verbindungstechnik / Mikromontage. Hinzu kommt eine hervorragende Infrastruktur bei den Forschungsinstituten mit Schwerpunkten in der Nano- und Mikrotechnologie.

Inwieweit jedoch eine Realisierung individueller monolithische Mikrosysteme alternativ zu heutigen hybriden Lösungen in Zukunft möglich ist und welche technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen damit verbunden sind, war Thema des durchgeführten Projektes  $\mu$ Prod@home.

## **1.2 Zielsetzung**

Primäres Ziel des Projektes war die Erkenntnis über die Machbarkeit der Herstellung individueller monolithischer Mikrosysteme durch neue integrierte Produktionsansätze basierend auf vorhandenen bzw. in Entwicklung befindlichen mikro-/nanotechnischen Aufbau-, Funktionalisierungs- und Integrationstechnologien (Abb. 1-2l.). Das zukünftig Machbare sollte anhand repräsentativer Demonstratoren mit u.a. mikrooptischer und mikrofluidischer Funktionalität aufgezeigt werden. Mit dem Projekt sollten relevante Forschungs- und Entwicklungsthemen identifiziert und so die Definition zukünftiger Förderungsaktivitäten unterstützen werden. Insgesamt sollte ein Beitrag zur schrittweisen Verwirklichung der genannten Vision geleistet werden (Abb. 1-2r.).

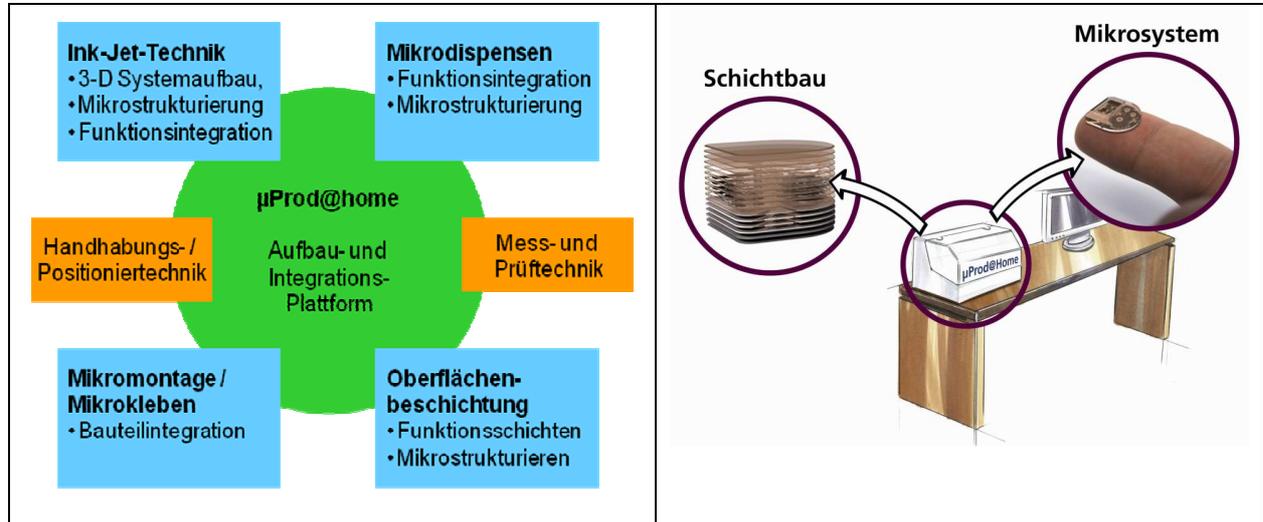


Abb. 1-2: Basistechnologien (l.), Vision 3D-Multi-Drucker (r.)

### 1.3 Stand der Technik

Grundsätzlich lassen sich individuelle dreidimensionale Produkte bereits heute mit den bekannten Techniken des Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing herstellen. Auch andere Techniken, wie z.B. die spritzgussbasierte MID Technik, machen dies für eher größere Stückzahlen möglich. Jedoch lassen die bisherigen Ansätze technisch bedingt die angestrebte Funktionalisierung, Individualisierung und Miniaturisierung nur begrenzt zu und / oder die Wirtschaftlichkeit für kleine und mittlere Stückzahlen ist aufgrund der Komplexität der Prozesse nicht gegeben. Bei den meisten der bekannten Verfahren ist eine gleichzeitige Integration von Funktionalitäten nicht vorgesehen bzw. technisch nicht möglich. Hinzu kommt eine für die Zielstellung oft unzureichende Auflösung und Genauigkeit.

Ein Beispiel stellt das RMPD-Verfahren (Rapid Micro Product Development) der Firma microTEC Gesellschaft für Mikrotechnologie mbH in Duisburg dar. RMPD ist eine von microTEC entwickelte Fertigungstechnologie für die Mikrotechnik und ist dem Gebiet der Mikrostereolithographie zuzuordnen. Die RMPD®-Technologien der Firma Microtec ermöglichen die werkzeuglose Produktion von Mikrobauanteilen, Fluidik und Mikrosystemen im parallelen Batchverfahren auf Substraten bis 14 Zoll (Abb. 2-1). Über Fotopolymerisation werden auf Kunststoffen basierte Mikrobauanteile hergestellt. Metallische und andere funktionelle Schichten werden direkt strukturiert und schicht-

übergreifend integriert. Elektronische Bauelemente, wie Prozessoren, Speicherelemente, Sensoren, passive Bauteile und Energiespeicher werden im Stack oder lateral eingebaut und parallel kontaktiert. Das Verfahren ist ausgelegt für industrielle Anwendungen in mittlerer bis großer Stückzahl ist daher für  $\mu\text{Prod@home}$  nur bedingt anwendbar.

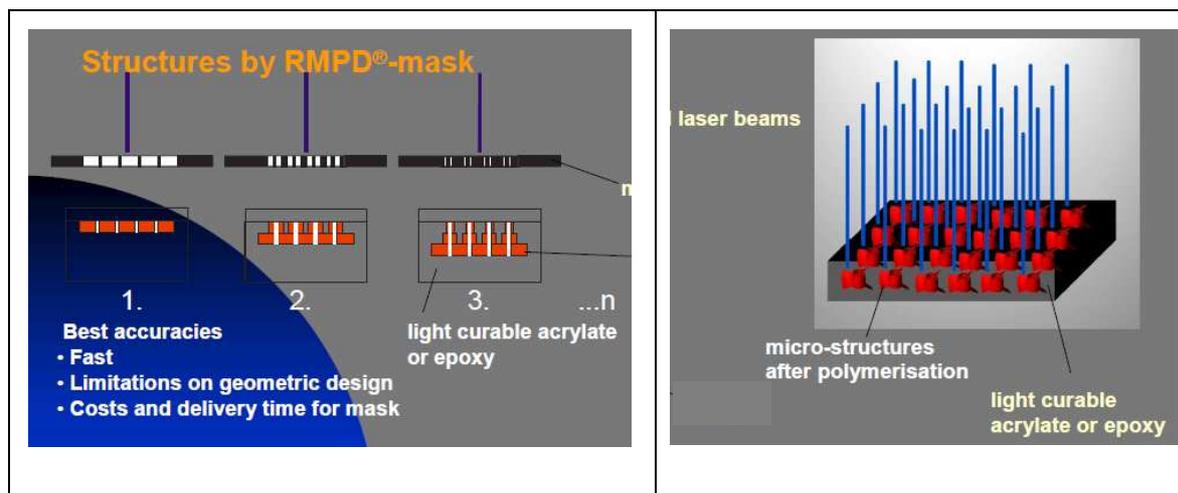


Abb. 2-1: RMPD Strukturierung mittels Maske (l.), Parallel Laser-Strukturierung (r.)  
 [Quelle: microTEC Gesellschaft für Mikrotechnologie mbH]

Die heutigen Entwicklungsaktivitäten hinsichtlich integrierter mikrotechnischer Systemlösungen beschränken sich meist auf das Drucken elektronischer Funktionalitäten, z. B. im Bereich der Polymerelektronik. Im Fokus dabei liegt die zukünftige industrielle Serienfertigung derartiger Systeme. Die Komplexität der Prozesse und die meist hohen Investitionskosten für Werkzeuge und Maschinen machen sie zur Umsetzung der oben genannten Vision nur bedingt geeignet. Dies gilt auch für die Herstellung von Produkten in MID-Technik. Die Integration zusätzlicher Funktionalitäten, z. B. optische oder fluidische, sind bei den heutigen Produktionslösungen nur bedingt möglich. Meist ist hier eine hybride Integration auf der Bauteiloberfläche vorgesehen.

Derzeit nicht bekannt sind Aktivitäten, die eine monolithische Integration und Kombination unterschiedlichster Funktionalitäten vorsehen.

#### **1.4 Projektinhalte und Vorgehensweise**

Der erste Schritt in diesem Projekt war die Erstellung eines Technologieatlas. Anschließend wurde eine Technologieanalyse des momentanen Stands der Technik durchgeführt. Dabei wurden generative Technologien, Technologien zur hybriden Integration und zum Verbinden von Bauteilen untersucht. Zusammen mit den Basistechnologien bildet diese Übersicht die Grundlage für die weitere Arbeit des Projekts. Als nächster Schritt wurde eine Anwenderbefragung durchgeführt. Hierzu wurde ein Fragebogen erstellt, der online ausgefüllt werden konnte. Neben allgemeinen Informationen zu Nutzung von momentan vorhandenen Technologien wurden auch Probleme und Wünsche abgefragt. Zusätzlich wurden Trends und Szenarien für die Zukunft erläutert und auf ihr Potential hin abgefragt. Auf der Grundlage des Bedarfs aus Sicht der Anwender, den momentanen technischen Möglichkeiten und den Trends in der Anlagentechnik wurden experimentelle Untersuchungen an einem Demonstrator durchgeführt. Zur Herstellung dieses Demonstrators wurden verschiedene generative Verfahren mit Verfahren aus der Mikromontage kombiniert. Diese Kombination entstand jedoch aufgrund der finanziellen Rahmenbedingungen noch in mehreren Anlagen und nicht, wie für die Zukunft geplant, in einer Anlage.

Anhand der durch die experimentelle Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse wurde ein komplexes Mikrosystem entworfen, welches die heutigen technischen Möglichkeiten der Kombination von generativen Verfahren und Verfahren der Mikromontage widerspiegeln soll.

Während sich die produktionstechnische Seite im Rahmen des geplanten Projekts beleuchten ließ, konnten material- und entwurfstechnische Fragestellungen aufgrund der zeitlichen und finanziellen Rahmenbedingungen nur eingeschränkt behandelt werden.

Die Erkenntnisse und Ergebnissen wurden bereits während der Laufzeit eingesetzt technische Fragestellungen der Industrie zu bearbeiten und neue Projekte aufzusetzen.

## 2. Technologieatlas

### 2.1 Übersicht der projektrelevanten Technologien

Es wurden die für den Ansatz relevanten Technologien recherchiert und kategorisiert. Die verwendeten Begriffe werden im Kontext dieses Projekts wie folgt verstanden:

Basistechnologien	Komplexe Technologien, die zur Herstellung von Mikrosystemen eingesetzt werden
Generieren	Generative Verfahren, damit urformende Verfahren, die aus formlosen oder formneutralen Material durch physikalische und chemische Prozesse Bauteile erzeugen ohne dass Werkzeuge nötig sind, welche die „Form gespeichert haben“. Durch die Aufgabenstellung des Projektes wurden hier vornehmlich Rapid-Prototyping-Verfahren erfasst. Es wird unterschieden zwischen additiven Verfahren und kombinierten Verfahren, bei denen eine Schicht aufgebaut und anschließend zur Formgebung wieder entfernt wird.
Integrieren	Unter Integrieren wurden mit Hybridmontage und Modifikation Verfahren eingeordnet, die eine Integration von Funktionalität ermöglichen. Hybridmontage ist ein sehr komplexes Gebiet, das diverse Unterverfahren benötigt. Unter Modifikation wird die Veränderung der Eigenschaften zur Erzielung funktionaler Effekte verstanden.
Verbinden	Unter Verbinden wurden Technologien eingeordnet, die zum Fügen von Bauteilen angewendet werden.
Prüfen / Testen	Hier werden Prüfverfahren zur Bestimmung von Funktion, Maßhaltigkeit, usw. erfasst. Bislang wurden unter diesem Punkt keine Verfahren gesammelt und recherchiert, da entsprechende Verfahren sehr vielfältig sind und stark produktabhängig eingesetzt werden.

### 2.2 Erstellung von Technologiesteckbriefen

Für jede relevante Technologie und Verfahren wurde ein Technologiesteckbrief erstellt. Die Technologiesteckbriefe stellen ein Werkzeug dar, das zu jeder Technologie entsprechend die Samm-

lung von Informationen unterstützt und einen Vergleich ermöglicht. Die beispielsweise im Bereich der Mikromontage für die unterschiedlichen Greiftechniken erfassten Daten sind:

- Name
- Alternative Bezeichnungen
- Beschreibung
- Art des Verfahrens
- Erreichbare Genauigkeit
- Kleinstes greifbares Objekt
- Anschaffungskosten
- Betriebskosten
- Besonderheiten
- Serientauglichkeit
- Anbieter
- Trend
- Bilder, Zeichnungen

Die Steckbriefe wurden ausgewertet und für die weitere Projektbearbeitung erforderliche Informationen abgeleitet. Desweiteren wurden sie zur Aus- und Weiterbildung eingesetzt.

## 3. Technologieanalyse

### 3.1 Recherche- und Bewertungsverfahren

Nach der Erfassung wurde die Eignung der einzelnen Technologien für ein zukünftiges  $\mu$ Prod@Home-System ermittelt und bewertet.

Ein mikrotechnisches Produktionssystem integriert eine Vielzahl an technologischen Funktionen, für die es jeweils unterschiedliche Realisierungsmöglichkeiten gibt. Jedoch sind nicht alle Realisierungsmöglichkeiten im Hinblick auf die speziellen Rahmenbedingungen einer kleinen, kostengünstigen Fertigungsanlage gleich gut geeignet.

Um prozessverträgliche und einfach integrierbare Ausführungsvarianten einer bestimmten Funktionalität zu ermitteln, ist eine umfassende Technologieanalyse angefertigt worden. Ziel der Analyse ist es, für jede technologische Funktion eines Mikroproduktionssystems die beste verfügbare Realisierung zu finden, unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen.

Die Technologieanalyse wurde mit Hilfe formaler Methoden durchgeführt, angelehnt an das Standardverfahren zur Bewertung von technischen Wertigkeiten von Produkten. Dadurch wird sichergestellt, dass die Ergebnisse vollständig und objektiv sind.

Die einzelnen ausgewählten Bewertungsgruppen sind wie folgt:

- Generative Technologien
- Drucktechnik
- Positioniertechnik
- Zuführtechnik
- Greifertechnik
- Kontaktierungstechnik
- Messtechnik
- Verbindungstechnik

Als zweiter Schritt wurde für jede dieser Technologiegruppen ein Satz von Bewertungskriterien ermittelt, mit dem die einzelnen Realisierungsmöglichkeiten einer Technologie bewertet werden können. Ein Beispiel für ein Bewertungskriterium für die Gruppe Vermessen von Bauteilen ist Genauigkeit. Im letzten Schritt bewerteten Fachexperten die einzelnen Technologierealisierungen. So konnte für jede in einem Mikrosystem erforderliche Technologie eine optimale Realisierungsmöglichkeit ermittelt werden. Dieses aufwendige Bottom-up Verfahren stellt sicher, dass keine Realisierungsmöglichkeit zu früh ausgeschlossen wurde und die Ergebnisse frei von subjektiven Meinungen sind. Es kann auch jederzeit um neue Ausführungsvarianten oder Bewertungskriterien erweitert werden. Eine Neubewertung im Falle eines signifikanten technischen Fortschritts bei einer Technologierealisierung ist ohne großen Aufwand möglich.

Zur Bewertung der konkurrierenden Technologien in den einzelnen Bereichen wird ein Standardverfahren eingesetzt, mit dem technische Wertigkeiten ermittelt werden können. Für jeden Bereich werden Bewertungskriterien festgelegt. Es gibt Kriterien, die in allen Bereichen benutzt werden sowie für jeden Bereich zusätzlich spezielle Kriterien. Jede Technologie kann bei einem Bewertungskriterium zwischen null und vier Punkten erreichen. Vier Punkte bedeuteten dabei, dass die Technologie bei diesem Kriterium optimal abschneidet, null Punkte bedeutet, dass das Kriterium nicht erfüllt wird. Die (ungewichtete) Gesamtwertigkeit einer Technologie ergibt sich aus der Summe der erreichten Punkte in den einzelnen Bewertungskriterien. Das Verfahren ist der Vorlesung „Grundlagen der Maschinenkonstruktion I/II“ von Prof. Maier entnommen. Die Vorlesung ist Teil der Lehre am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design der Uni Stuttgart.

Jedes Kriterium kann eine Gewichtung bekommen. Eine höhere Gewichtung bedeutet, dass dieses Kriterium eine größere Rolle bei der Auswahl des Verfahrens spielt. Die erreichten Punkte der einzelnen Technologien in den Kriterien werden mit der Gewichtung des Kriteriums multipliziert und ergeben die gewichtete Punktzahl. Die Summe aller gewichteten Punkte einer Technologie ergibt die gewichtete Gesamtwertigkeit der Technologie. Anhand dieser Gesamtwertigkeit werden die Technologien verglichen. Kriterien, bei denen alle Technologien die gleiche Anzahl von Punkten bekommen (zum Beispiel vier) erhalten die Gewichtung null. Dadurch wird das „Feld der

Technologien“ stärker differenziert. In der vorliegenden Bewertung wurden nur die Gewichtungen null und eins vergeben.

## 3.2 Technologiebewertung

### 3.2.1 Generative Technologien

Auf Grundlage des beschriebenen Bewertungsverfahrens wurden generative Fertigungsverfahren auf ihre Kompatibilität für ein  $\mu$ Prod@Home-System überprüft. Das beste Ergebnis lieferte dabei das PolyJet™ Verfahren (Abbildung 3-1). Dieses Verfahren ist zwar von der Genauigkeit nicht mit der Multiphotonenpolymerisation zu vergleichen, jedoch genauer als das selektives Lasersintern. Es ist ein Verfahren, das sehr „bürotauglich“ ist. Es stellt keine hohen Ansprüche an die Umgebung und ist bezüglich der Materialeigenschaften mit der Stereolithografie zu vergleichen. Ein Nachteil des Verfahrens ist das Supportmaterial. Dies müsste vor der Weiterverarbeitung entfernt, oder die Konstruktion so angepasst werden, dass kein Supportmaterial notwendig ist. Ein weiteres geeignetes Verfahren ist die Mikrostereolithografie. Dieses sehr genaue Verfahren findet allerdings im flüssigen Harzbad statt. In einer kombinierten Maschine ist dies um einiges schwerer zu handhaben. Die Multiphotonenpolymerisation wäre eine Alternative wenn sehr kleine und sehr genaue Teile gefordert sind. Allerdings befindet sich das Verfahren noch im Forschungsstadium und ist noch nicht kommerziell verfügbar.

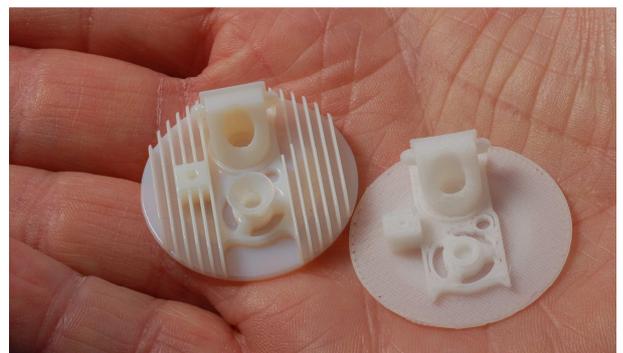
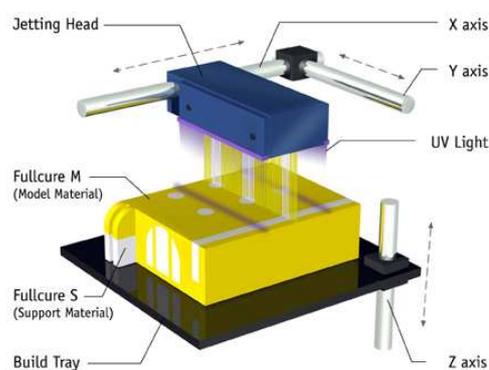


Abb. 3-1: PolyJet™ Verfahren (l.); mit dem PolJet Verfahren hergestellte Teile (r.)

[Quelle: [www.objet.com](http://www.objet.com) und [www.3dscanningservices.net](http://www.3dscanningservices.net)]

### 3.2.2 Drucktechnik

Diese Auswertung zeigt, dass sich die Tintenstrahl-Drucktechniken am ehesten eignen (Abb. 3-2). Dabei liegt der thermische Tintendrucker leicht vor dem Piezo-Drucker. Zwar sind beide Drucktechniken von der Genauigkeit eher schlechter als andere Druckverfahren, allerdings stellen sie keine hohen Ansprüche an die Umgebungsbedingungen, was in einer kombinierten Anlage deutlich schwerer zu erreichen ist. Zudem können viele verschiedene Materialien für den Druck genutzt werden, was wiederum vorteilhaft ist. Da es sich um ein ausgereiftes Verfahren handelt, das auch in kleinen Maschinen eingebaut werden kann, bildet dies eine gute Grundlage für den Einsatz in einer kombinierten Anlage.

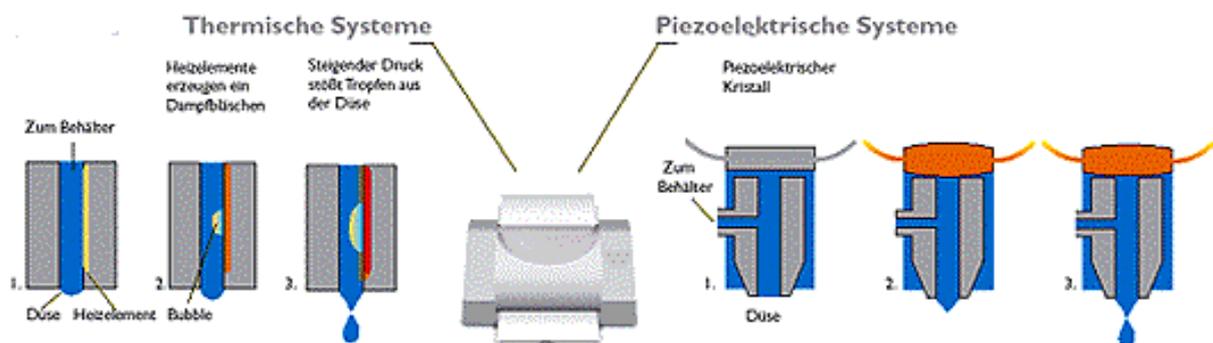


Abb. 3-2: Tintenstrahl-Drucktechniken [Quelle: [www.raflatac.com](http://www.raflatac.com)]

### 3.2.3 Positioniertechnik

Die Verfahren teilen sich auf in lineare Stellantriebe und rotative Stellantriebe. Bei den rotativen Stellantrieben wurden lediglich Gleichstrommotoren und Schrittmotoren miteinander verglichen, wobei die Unterschiede bei den vorliegenden Kriterien sehr gering sind.

Bei den linearen Stellantrieben hat der Piezoaktor die höchste Punktzahl erzielt. Die einfache Ansteuerung und die Genauigkeit sind exzellent, jedoch verhindert der sehr geringe Stellbereich einen Einsatz in den meisten Anwendungen. Für die meisten Mikromontage-Anwendungen werden daher Linearmotoren bevorzugt, da diese bei moderaten Kosten eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit und exzellente Dynamik bieten.

### **3.2.4 Zuführtechnik**

Die Bewertung der Zuführsysteme ergab, dass Magazinlösungen, wie das Gel-Pak oder das Waffle-Pack am ehesten geeignet sind. Rollenzuführverfahren und Verfahren zur Förderung von Schüttgut sind für die vorliegenden Aufgaben weniger geeignet. Das Auerboat ist ein Zuführverfahren, welches die Bauteile direkt mit einer hohen Positioniergenauigkeit bereitstellt. Dies stellt für Mikromontageaufgaben einen großen Vorteil dar, da man dadurch auf aufwändige Messverfahren wie beispielsweise Bildverarbeitung verzichten kann und das Bauteil ohne Korrekturen von der Bereitstellungsposition abholen und weiterverwenden kann.

### **3.2.5 Greifertechnik**

Die üblicherweise eingesetzten Verfahren des pneumatischen und mechanischen Greifens entsprechen den Anforderungen am besten, während spezielle Verfahren, wie das flüssigadhäsive Greifen oder das thermisch-adhäsive Greifen weniger geeignet sind. Die hohe erreichbare Präzision, die Kompaktheit, die Realisierung ohne mechanische Bauteile oder Flüssigkeiten und letztlich die geringen Anschaffungs- und Wartungskosten sprechen für den Einsatz pneumatischer Greifer.

### **3.2.6 Verbindungstechnik**

Wie beim Kontaktieren zeigt sich, dass mechanisches Verbinden am ehesten geeignet wäre. Sofern sich dies nicht realisieren lässt, sind Klebverfahren zu bevorzugen.

### **3.2.7 Kontaktierungstechnik**

Bei den Kontaktierungsverfahren lässt sich feststellen, dass mechanisches Kontaktieren unter den gegebenen Voraussetzungen am ehesten geeignet sind. Die Anwendung von mechanischen Kontakten ist in einem  $\mu$ Prod@Home-System am ehesten zu realisieren. Das Lötten, das Schweißen und das Wire Bonding sind aufgrund der Temperaturentwicklung und der aufwändigen Anlagentechnik für ein integriertes System nicht geeignet. Leitkleben ist eine geeignete Alternative, wenn das mechanische Kontaktieren nicht angewendet werden kann, da mittels Dosiersystemen im Vergleich zu den konkurrierenden Technologien mit vergleichsweise geringem Aufwand eine elektrische Kontaktierung realisiert werden kann.

### **3.2.8 Messtechnik**

Die Bewertung der Messverfahren zeigt nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren. Ob ein Messverfahren geeignet ist oder nicht hängt stark von der Applikation und den Randbedingungen ab. Faktoren wie Auflösung, Messgenauigkeit und Messbereich müssen von Fall zu Fall separat betrachtet werden. Eine allgemeine Eignung einer bestimmten Lösung besteht aus diesem Grund bei keinem der Verfahren.

Kapazitive und induktive Sensoren benötigen nur einen geringen Bauraum und sind weitgehend unempfindlich gegen mechanische Einflüsse. Bildverarbeitung ist recht breit einsetzbar und kann für viele Anwendungsfälle angepasst werden.

Für eine spezifische Auswahl eines Messsystems müsste der Anwendungsfall genauer bekannt sein, die Anforderungen gewichtet und gegebenenfalls erweitert werden.

## **3.3 Diskussion der Ergebnisse**

### **3.3.1 Genauigkeit und Auflösung**

Die generativen Fertigungsverfahren entstammen ursprünglich dem Prototypenbau. Es wurden damit bis vor wenigen Jahren nur Anschauungs- und Funktionsmodelle erstellt. Die Genauigkeit spielt bei diesen Modellen zumeist eine untergeordnete Rolle. Erst in den letzten 5-7 Jahren wurden die Verfahren verstärkt auch im Bereich der direkten Herstellung von Funktionsbauteilen eingesetzt. Dadurch steigen auch die Anforderungen an die Verfahren im Bereich der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit. Die etablierten Verfahren (Stereolithografie, PolyJet, Lasersintern, etc.) haben in diesen Bereichen in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Allerdings sind diese Verfahren bisher noch nicht in der Lage Strukturen mit einer Genauigkeit im  $\mu\text{m}$ -Bereich herzustellen. Vielversprechend hingegen sind Mikrostereolithografie (Auflösung ca.  $10\ \mu\text{m}$ , Schichtstärke  $1\ \mu\text{m}$ ), Mikrolasersintern von Metall (Auflösung ca.  $32\text{-}50\ \mu\text{m}$ , Schichtstärke  $2\text{-}4\ \mu\text{m}$ ) und Multiphotonen-Polymerisation (Auflösung ca.  $70\ \text{nm}$ ).

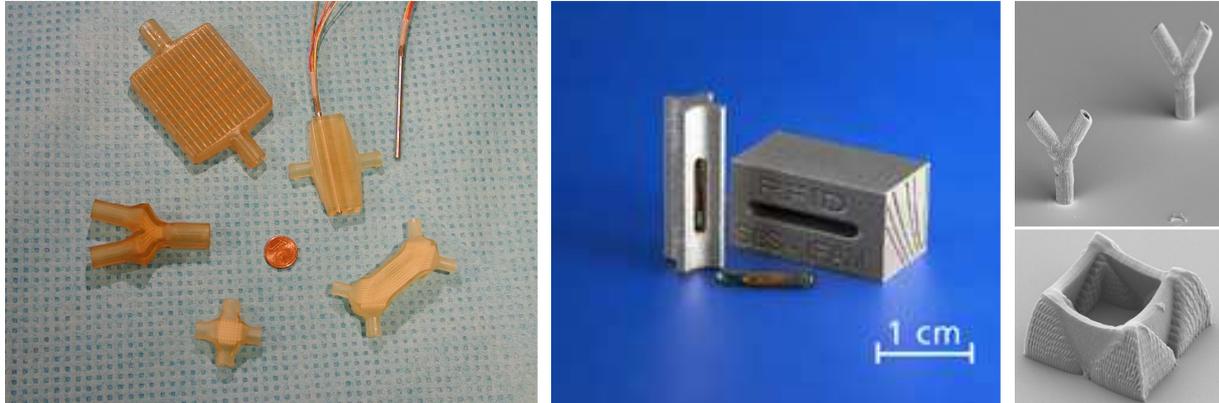


Abb. 3-3: Mittels Mikro-Stereolithographie (l), Metall-Mikrolasersintern und Multiphotonen-Polymerisation hergestellte Teile (r.)

[Quelle: Karlsruher Institut für Technologie, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT]

### 3.3.2 Oberflächengüte

Hierbei ist zu unterscheiden ob es sich um einen pulverförmigen oder einen flüssigen Ausgangsstoff handelt. Anders als bei flüssigen Ausgangsstoffen ist bei pulverförmigen Ausgangsstoffen nicht nur die Lasergenauigkeit und die Schichtstärke, sondern auch die Korngröße des Pulvers ausschlaggebend für die Oberflächengüte. Generell kommen für Mikrobauteile eher die Verfahren mit flüssigen Ausgangsstoffen wie Mikrosterolithografie und Multiphotonen-Polymerisation in Frage.

### 3.3.3 Geschwindigkeit

Bei vielen Maschinen kann die Schichtstärke, die beim Bauprozess verwendet wird, eingestellt werden. Da die Herstellung jeder Schicht Zeit benötigt, ist die Baugeschwindigkeit direkt von der Schichtstärke abhängig. Durch höhere Schichtstärken wird jedoch die Auflösung in Z-Richtung herab gesetzt und das Bauteil wird somit gröber. Dadurch gibt es eine direkte Abhängigkeit zwischen Genauigkeit und Baugeschwindigkeit. Dieser Zusammenhang ist qualitativ in Abbildung 4-8 dargestellt. Mit einer Steigerung der Genauigkeit nimmt die Geschwindigkeit bei heutigen Verfahren stark ab. Aus diesem Grund wäre eine Kombination eines schnellen, ungenauen Verfahrens

mit einem hochgenauen, langsamen Verfahren denkbar. Bei einer solchen Kombination wird der Großteil mit dem schnellen, ungenauen Verfahren hergestellt. Volumina die eine hohe Genauigkeit benötigen werden mit dem langsamen, aber genauen Verfahren gefertigt. Hierfür eignen sich besonders Verfahrenskombinationen, die das gleiche Material verwenden. Denkbar wäre hier die Kombination Mikrostereolithografie und Stereolithografie.

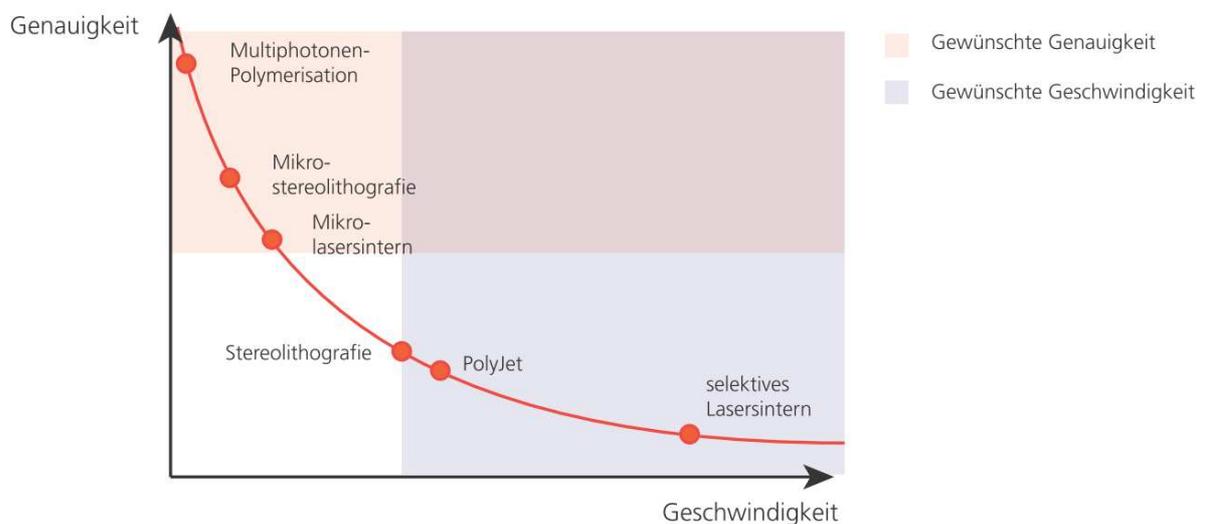


Abb. 3-4 – Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Genauigkeit

### 3.3.4 Montage von Bauteilen während des Druckprozesses

Grundsätzlich ist das Einsetzen von Teilen und anschließendes Weiterdrucken beim generativen Prozess möglich. Allerdings gibt es einige Hürden, die die praktische Umsetzung, gerade in einer Maschine mit mehreren Prozessschritten, schwieriger gestalten. Die mit gängigen generativen Verfahren im Einzelnen mögliche Kombination ist im weiteren Verlauf beschrieben.

➤ **Selektives Lasersintern und Mikrolasersintern**

Bei der Verwendung von Metall ist eine Montage bei angehaltenem Bauprozess grundsätzlich möglich. Erprobt wurde dies beispielsweise durch das Fraunhofer ILT. Hierbei wurden RFID-Chips im Bauobjekt platziert und anschließend mit Metall komplett umschlossen. Der Prozess findet bei Zimmertemperatur statt. Das Metall wird nur lokal durch einen Laser aufgeschmolzen.

Wird Kunststoff verwendet, wird der komplette Bauraum erhitzt. Ein Stoppen des Bauprozesses und ein Öffnen der Maschine führt zu schlagartigem Abkühlen. Dies verursacht Materialspannungen und Risse. Ein Einsetzen von separaten Bauteilen ist daher nur im auf ca. 170°C erhitzten Bauraum zu empfehlen.

Grundsätzlich handelt es sich um einen pulverbasierten Ausgangswerkstoff. Es kann hier nicht sichergestellt werden, dass sich kein Pulver im Bauraum verteilt. Gerade für die Mikromontage ist jedoch eine reine Umgebung notwendig. Aufgrund des Pulvers, sowie den Temperaturschwankungen sind die pulverbasierten Verfahren für eine Anlage, die 3D-Druck und Montage kombiniert ungeeignet.

➤ **Stereolithografie und Mikrosterolithografie**

Da der Bauprozess im Harzbad stattfindet sollte das Objekt herausgenommen werden, um externe Teile zu platzieren. Bevor das Teil eingesetzt wird, sollte es von flüssigem Harz gereinigt werden. Generell ist dies jedoch problemlos möglich. Bei der Stereolithografie werden zusätzlich Stützstrukturen gebaut um Überhänge zu stabilisieren. Daher muss die Konstruktion so ausgelegt sein, dass keine Stützstrukturen notwendig sind, oder diese vor dem Einsetzen des zusätzlichen Teils entfernt werden. Zusätzlich ist das Teil bevor der Bauprozess vollständig abgeschlossen ist vor UV-Licht zu schützen. Der zusätzliche Arbeitsschritt der Nachbelichtung nach dem Bauprozess ist außerdem zu beachten.

➤ **PolyJet**

Hierbei bildet das Supportmaterial das größte Problem. Dies füllt Leerräume und Überhänge aus, und bildet zusätzlich eine Umhüllung des Objekts um die Randschärfe zu erhalten. Dieses wachsartige Material muss zum Platzieren des externen Teils entfernt werden. Zusätzlich muss das Teil sehr genau platziert werden, um ein Einfließen von Harz zu verhindern.

### ➤ **Multiphotonen-Polymerisation**

Grundsätzlich ist bei der Multiphotonen-Polymerisation ein Stoppen des Bauprozesses sowie eine Platzierung von Objekten in das generativ gefertigte Teil möglich. MPP arbeitet jedoch zumeist ohne Bauraum. Dabei wird auf ein Glasplättchen ein Tropfen Harz gegeben, in dem die Polymerisation stattfindet. Da das Verfahren Strukturen im Nanobereich (Auflösung ca. 70 nm) herstellen kann ist hier die Genauigkeit problematisch: Nach dem Anhalten des Bauprozesses muss das Objekt wieder auf 0,1 µm genau platziert werden.

### **3.3.5 Druck und Montage im selben Bauraum**

Mikromontageprozesse sind stark abhängig von den Umgebungsbedingungen. Einflüsse, wie Kontamination durch Partikel, Temperaturschwankungen, ESD oder Luftfeuchtigkeit, entscheiden über das Gelingen einer einzelnen Montage und der Zuverlässigkeit in Serie. Die für die Druckverfahren notwendigen Supportmaterialien und Reinigungsschritte erschweren bei jedem der betrachteten Verfahren ein kombiniertes Druck- und Montageverfahren im selben Bauraum. Eine Kombination dieser Schritte im selben Bauraum ist kaum möglich.

### **3.3.6 Prozesskettenkonzept**

In Abb. 3-5 ist ein erstes Prozesskettenkonzept für die Kombination von Generierung und Mikromontage dargestellt. Die generierten Bauteile sind aufgrund der hohen Anforderungen der Mikromontage an Reinheit und Oberflächengüte nur nach einem Reinigungsprozess für diesen Bearbeitungsschritt zu verwenden.

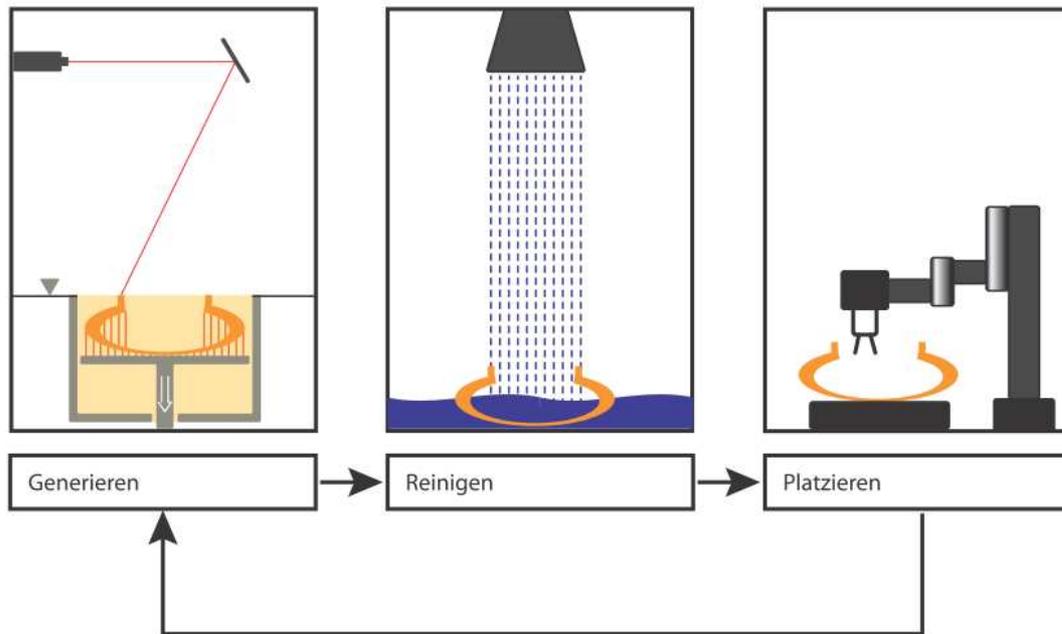


Abb. 3-5 – Prozesskettenkonzept

### 3.4 Fazit

Die im Rahmen der Erfassung und der Analyse der ausgewählten Technologie gewonnenen Erkenntnissen und den Ergebnissen können zur Diskussion mit potenziellen Anwendern und Technologieanbietern sowie der Ausbildung von Schülern und Studenten herangezogen werden. Weiterhin bilden sie die Grundlage für zukünftige technologische Entwicklungen auf Prozess- und Anlagenebene. Mit den identifizierten technologischen Defiziten kann zur Auswahl und Definition zukünftiger Handlungsfelder beigetragen werden.

## 4. Anwenderbefragung

### 4.1 Übersicht

Um zu erkennen, für welche Anwenderkreise individuelle Mikrosysteme aus dem 3D-Drucker im Schichtaufbau interessant wären, wurde eine Umfrage durchgeführt. Anschließend wurde die Umfrage ausgewertet und entsprechende Anforderungen beschrieben. Abschließend wurden Konzepte für Musterteile und Demonstratoren erarbeitet. Der Fragebogen wurde an 1451 Personen versandt. 188 Personen haben dabei Fragen beantwortet von denen 143 den Fragebogen komplett ausgefüllt haben.

Der Fragebogen richtete sich an Personen und Firmen, die Mikrosysteme herstellen, einsetzen oder Bedarf an mikrosystemtechnischen Produkten haben. Neben allgemeinen, die Firmen betreffende Fragen, wurden vor allem der momentane Bedarf der Firmen, sowie der mögliche zukünftige Bedarf erfragt. Zudem wurden Schwächen bestehender Systeme erfragt, sowie mögliche Zukunftsszenarien nach deren Relevanz geordnet.

Der Fragebogen gibt somit Informationen über den momentanen Stand wieder, ermittelt welche Systeme eingesetzt werden und erörtert den Bedarf der einzelnen Branchen. Zudem bildet der Fragebogen den Bedarf und die Wünsche der Personen und Branchen für die Zukunft der Mikrosystemtechnik ab.

Die Relevanz für das Projekt bildet sich in der Verknüpfung dieser zwei zeitlichen Themenschwerpunkte: Was wird im Moment eingesetzt - Was wird in Zukunft benötigt? Diese Fragestellung bildet einen zentralen Punkt des Projektes. Die Beantwortung dieser Fragen bildet den Schlüssel für eine Prognose, wie eine Fertigungslösung für Mikrosysteme der Zukunft aussieht.

Somit sollen auf Grundlage des Fragebogens folgende Fragen geklärt werden:

- Welches Anwendungspotential besteht in verschiedenen Branchen?

- Wie ist heute und zukünftig der Bedarf an individuell gedruckten 3D-Mikrosystemen?
- Welche Art von Produkten käme für individuell gedruckte 3D-Mikrosysteme in Frage?
- Welche Trends gibt es zur Zeit in der Mikrosystemtechnik?
- Welche technologischen Bedürfnisse gibt es zur Zeit und in näherer Zukunft in der Mikrosystemtechnik?

## 4.2 Allgemeine Ergebnisse

Im der folgenden Auswertung werden die Personen in vier Kategorien unterteilt. Dies Unterteilung bezieht sich auf die jeweilige Antwort der Befragten auf die Frage 3. Der Einfachheit halber werden in der Auswertung folgende Bezeichnungen verwendet:

Wir entwickeln und fertigen Mikrosysteme	=	Entwickler und Fertiger
Wir entwickeln und fertigen Anlagen für die Herstellung mikrotechnischer Produkte	=	Anlagenhersteller
Wir sind Anwender von Mikrosystemen	=	Anwender
Wir nutzen Mikrosysteme nicht	=	Nicht-Anwender

### 4.2.1 Bezug zur Mikrosystemtechnik

Zu Anfang der Befragung wurde der **Bezug des Unternehmens zur Mikrosystemtechnik** abgefragt. Die diesbezügliche Filterfrage lautete: „Wie ist Ihr Bezug zur Mikrosystemtechnik?“. Abhängig von ihrem Bezug zur Mikrosystemtechnik bekamen die Befragten unterschiedliche Fragen gestellt. Neben der in Abb. 4-1 gezeigten überwiegenden Anzahl an Firmen mit Bezug, setzen 36% der 175 befragten Unternehmen mikrotechnische Lösungen bisher nicht ein bzw. haben zu diesem Thema bisher keine Anknüpfungspunkte gesehen. Hieraus lässt sich ein großes Potenzial für zukünftige mikrotechnische Lösungsansätze ableiten.

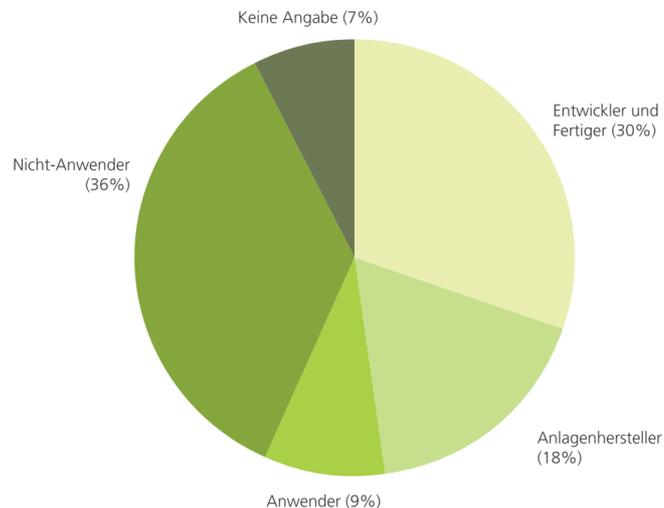


Abb. 4-1 – Bezug zur Mikrosystemtechnik (Antworten n=175)

Insgesamt 57% der Befragten zusammengesetzt aus Entwickler und Fertiger, Anwender und Anlagenhersteller bilden auf Grund ihres direkten Bezugs zur Mikrosystemtechnik die für das Projekt relevante Gruppe. Die wichtigste Gruppe sind dabei Entwickler und Fertiger mit 30%. Sie setzen Trends und führen Entwicklungen durch. Dabei orientieren sie sich aber auch immer an den Wünschen der Anwender. Die Anwender geben das Ziel vor. Daher sind diese die zweitwichtigste Gruppe.

#### 4.2.2 Mitarbeiterzahl und jeweiliger Bezug zur Mikrosystemtechnik

Abb. 4-2 zeigt die **Mitarbeiterzahl der befragten Unternehmen**. Die Stichprobe enthielt vor allem mittelständische und kleine Unternehmen. Nur 35% der Befragten gaben an, ihr Unternehmen habe mehr als 250 Mitarbeiter. Eine Mehrfachnennung war nicht möglich.

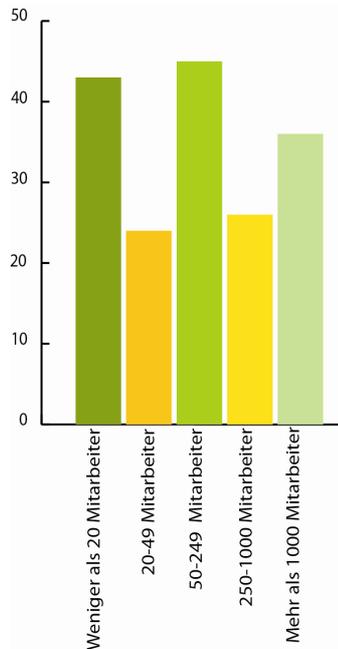


Abb. 4-2 – Mitarbeiterzahl der insgesamt befragten Unternehmen (n=184)

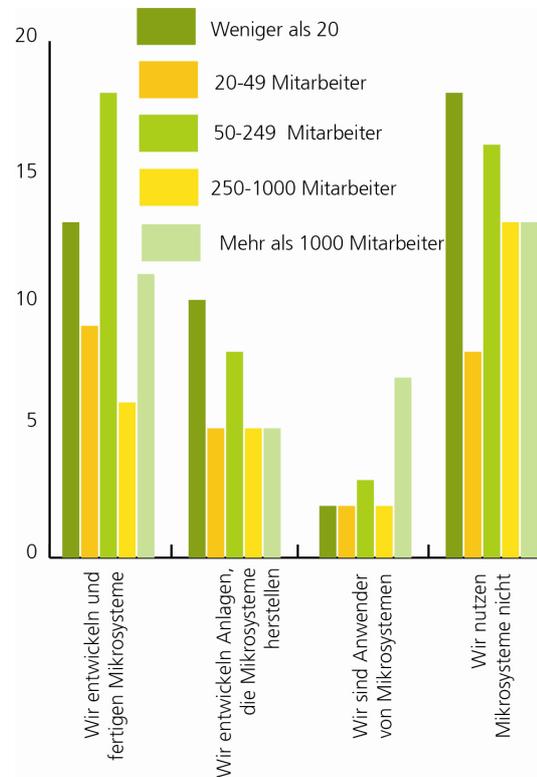


Abb. 4-3 – Mitarbeiterzahl und Bezug zur Mikrosystemtechnik (n=175)

In Abb. 4-3 wurde die **Mitarbeiterzahl in Abhängigkeit zum Bezug zur Mikrosystemtechnik** gesetzt. Die Balkenhöhe gibt an, wie viele der Befragten diesen Bezug zur Mikrosystemtechnik haben. Die Farbe gibt Aufschluss über die Unternehmensgröße. Eine Mehrfachnennung war nicht möglich.

Es fällt auf, dass die Antworten sehr ausgeglichen sind und keine Unternehmensgröße heraussteicht. Wichtig war hier vor allem zu überprüfen, in welcher Unternehmensgröße die Nutzer und Entwickler von Mikrosystemtechnik vornehmlich Unternehmen mit 50-249 Mitarbeitern. Potenzial steckt in den kleinen Unternehmen, die vielfach Mikrosystemtechnik noch nicht nutzen, aber sich dies für die Zukunft vorstellen könnten. Anwender sind vor allem große Unternehmen mit mehr als 1000 Mitarbeitern.

### 4.2.3 Branchen der Befragten

Abb. 4-4 zeigt die **Zuordnung der Befragten ausgewählten Branchen**. Es waren Mehrfachnennungen möglich. Diese Frage wurde allen Befragten unabhängig von ihrem Bezug zur Mikrosystemtechnik gestellt. 79 aller 186 Befragten gaben an, in der Mikrosystemtechnik zu arbeiten. Zweitgrößter Bereich war mit 64 Antworten der Bereich Maschinenbau. An dritter Stelle folgte die Mechatronik. Es gaben 40 der Befragten an dort tätig zu sein. Die meistgenannten Branchen im Feld ‚Sonstiges‘ waren die Elektronik, die Automobilbranche, die Spritzgusstechnik und der Formenbau.

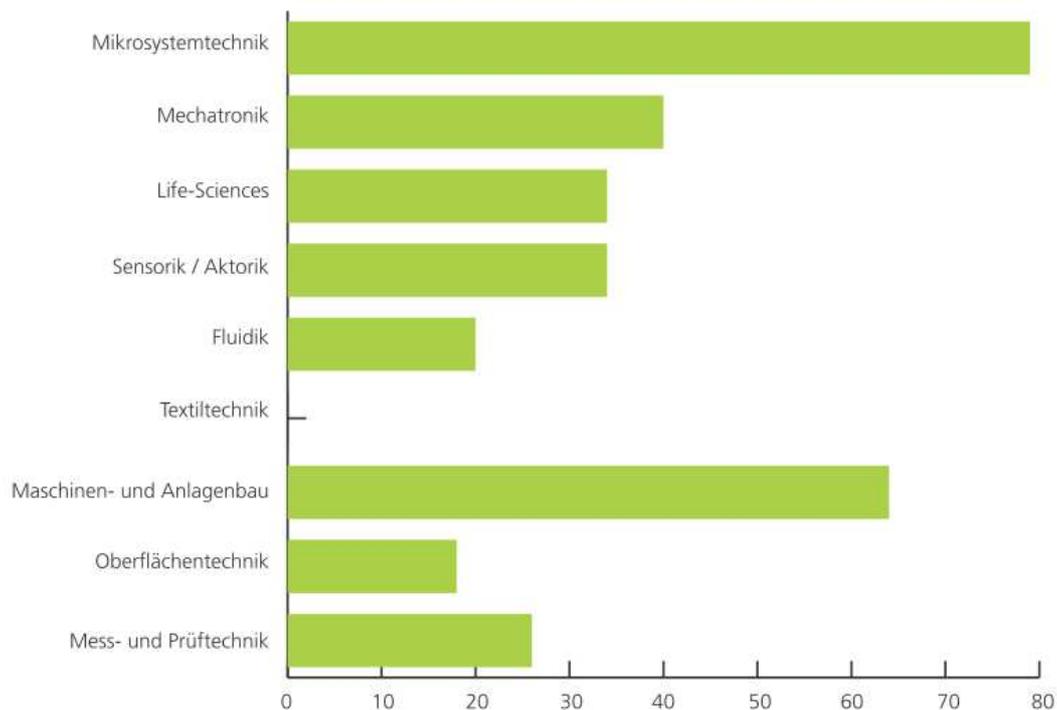


Abb. 4-4 – Branchen der Befragten (n=186)

Dass der größte Teil der Befragten aus der Mikrosystemtechnik und dem Maschinenbau kommt, ist in der Stichprobenziehung begründet: Es wurden vornehmlich Unternehmen angeschrieben, die in diesen Feldern tätig sind. Interessante Bereiche für das Projekt sind vor allem auch die Life-Sciences und die Sensorik, da diese Branchen für die Mikrosystemtechnik von besonderer Bedeutung sind.

### 4.3 Auswertung der Angaben der Entwickler und Fertiger

Die folgende Auswertung berücksichtigt die Angaben der Befragten, die Mikrosysteme entwickeln und / oder fertigen. Diese stellt für die Studie als potenzielle Anwender die relevante Zielgruppe dar.

#### 4.3.1 Zugrundliegende mikrotechnische Produkte

Welche **Art von Mikrosystemen** von 55 antwortenden Entwicklern und Fertiger im Wesentlichen angeboten werden, wurde durch die Frage „Welcher Gruppe lassen sich Ihre Produkte zuordnen?“ ermittelt und ist in Abb. 4-5 dargestellt.

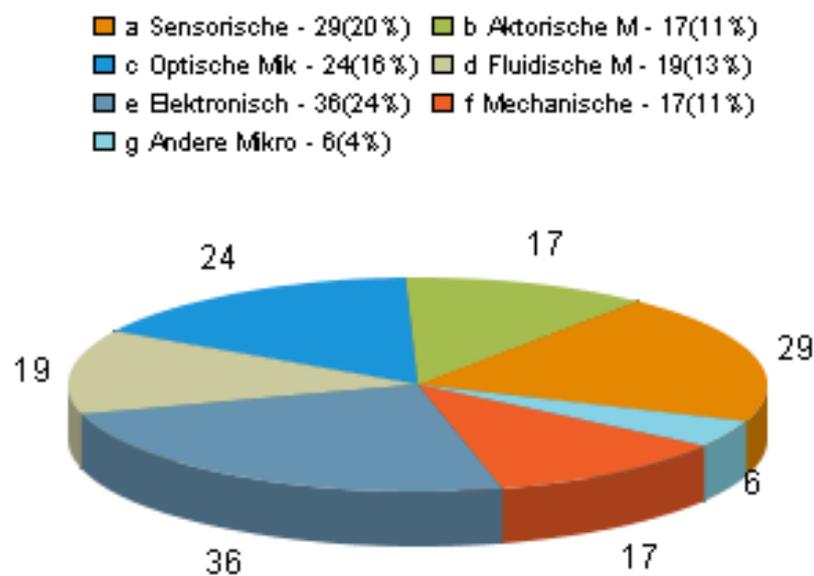


Abb. 4-5 – Häufigkeit der von Entwicklern und Fertiger genannten Mikrosystemart (n=55)

Die am häufigsten genannten Systemart sind elektronische Mikrosysteme und Mikrosensoren. Gefolgt von den optischen und aktorischen Mikrosystemen.

### 4.3.2 Für die Mikrosysteme relevanten Einzelfunktionalitäten

Mit der Frage: „Welche wesentlichen Einzelfunktionalitäten integrieren Ihre Produkte?“ wurden die derzeit **auf Systemebene relevanten Funktionen** ermittelt. Eine Mehrfachnennung war möglich. Diese Frage beantwortet haben 47 Teilnehmer.

	Ihr Produktbeispiel 1	Ihr Produktbeispiel 2	Ihr Produktbeispiel 3	Ihr Produktbeispiel 4	
mikroSENSORISCHE	19 79.2%  67.9% 	5 20.8%  17.9% 	3 12.5%  10.7% 	1 4.2%  3.6% 	Total: 24 Total Antworten: 28 x: 1.25, std: 0.52
mikroAKTORISCHE	7 63.6%  43.8% 	6 54.5%  37.5% 	2 18.2%  12.5% 	1 9.1%  6.3% 	Total: 11 Total Antworten: 16 x: 1.36, std: 0.48
mikroOPTISCHE	15 78.9%  62.5% 	3 15.8%  12.5% 	3 15.8%  12.5% 	3 15.8%  12.5% 	Total: 19 Total Antworten: 24 x: 1.37, std: 0.81
mikroFLUIDISCHE	10 58.8%  52.6% 	5 29.4%  26.3% 	4 23.5%  21.1% 		Total: 17 Total Antworten: 19 x: 1.59, std: 0.77
mikroELEKTRONISCHE	19 88.4%  67.9% 	5 22.7%  17.9% 	3 13.6%  10.7% 	1 4.5%  3.6% 	Total: 22 Total Antworten: 28 x: 1.23, std: 0.6
mikroMECHANISCHE	11 68.8%  57.9% 	8 50%  42.1% 			Total: 16 Total Antworten: 19 x: 1.31, std: 0.46

Abb. 4-6 – Häufigkeit der systemintegrierten Funktionalitäten (n=47)

Mikroelektronische und mikrosensorische Funktionalitäten waren die am häufigsten genannten. Dies entspricht der Verteilung bei der Systemart (Abb. 4-5). Gefolgt von mikrooptischer Funktionalität. Damit ableiten lässt sich ein hoher Bedarf an drucktechnisch zu integrierenden Leiterbahnen und auch der Integration von sensitiven Schichten sowie gegebenenfalls optischen Funktionselementen.

### 4.3.3 Verwendete Substratmaterialien und Techniken

Die für die Produktumsetzung im Wesentlichen **eingesetzten Substratmaterialien** wurden mit der Frage: „Auf welchem Substratmaterial basieren Ihre Mikrosysteme?“ ermittelt. Desweiteren wurde die **Relevanz einzelner Techniken** durch die Frage „Welche Techniken sind zur Herstellung Ihrer Produkte relevant?“ abgefragt.

	Ihr Produktbeispiel 1	Ihr Produktbeispiel 2	Ihr Produktbeispiel 3	Ihr Produktbeispiel 4	
Silizium	21 91.3%  66.6% 	8 34.8%  25% 	1 4.3%  3.1% 	2 8.7%  6.3% 	Total: 23 Total Antworten: 32 x: 1.09, std: 0.28
anderer Halbleiter	1 33.3%  33.3% 			2 66.7%  66.7% 	Total: 3 Total Antworten: 3 x: 3, std: 1.41
Keramik	10 62.5%  58.8% 	6 37.5%  35.3% 	1 6.3%  5.9% 		Total: 16 Total Antworten: 17 x: 1.44, std: 0.61
Metall	10 62.5%  41.7% 	10 62.5%  41.7% 	3 18.8%  12.5% 	1 6.3%  4.2% 	Total: 16 Total Antworten: 24 x: 1.5, std: 0.71
Kunststoff	22 73.3%  55% 	9 30%  22.5% 	8 26.7%  20% 	1 3.3%  2.5% 	Total: 30 Total Antworten: 40 x: 1.5, std: 0.89

Abb. 4-7 – Häufigkeit der verwendeten Substratmaterialien (n=46)

Hierbei zeigte sich in Abb. 4-7, dass bei vielen Produkten der 46 Antwortenden Silizium die Basis bildet. Interessant für den dem Projekt zugrundeliegenden Fertigungsansatz ist jedoch der große Anteil der auf Kunststoff basierenden Produkte. Bei der Frage nach den bei diesen dahinterliegenden Techniken zeigt sich bei den 45 Antwortenden eine breite Streuung. Bisher jedoch eine untergeordnete Rolle spielen generative Fertigungsverfahren. Die aktuell gängigsten Techniken sind die Abformtechniken. Unabhängig vom zugrundeliegenden Material für alle von großer Bedeutung sind die Aufbau- und Verbindungstechnik sowie die Hybridmontage, wie aus Abb. 4-8 ersichtlich.

	Ihr Produktbeispiel 1	Ihr Produktbeispiel 2	Ihr Produktbeispiel 3	Ihr Produktbeispiel 4	
Siliziumtechnik	18 94.7% 75%	5 26.3% 20.8%		1 5.3% 4.2%	Total: 19 Total Antworten: 24 x: 1.05, std: 0.22
Mikrozerspanung	6 75% 46.2%	3 37.5% 23.1%	3 37.5% 23.1%	1 12.5% 7.7%	Total: 8 Total Antworten: 13 x: 1.38, std: 0.7
Mikroabformtechnik	11 64.7% 47.8%	8 47.1% 34.8%	4 23.5% 17.4%		Total: 17 Total Antworten: 23 x: 1.47, std: 0.7
MD-Technik	3 100% 100%				Total: 3 Total Antworten: 3 x: 1, std: 0
Generative Fertigungsverfahren	2 100% 66.7%	1 50% 33.3%			Total: 2 Total Antworten: 3 x: 1, std: 0
Folientechnik	6 60% 54.5%	3 30% 27.3%	2 20% 18.2%		Total: 10 Total Antworten: 11 x: 1.6, std: 0.8
Multilayertechnik (Folien / LTCC)	10 62.5% 58.8%	5 31.3% 29.4%	2 12.5% 11.8%		Total: 16 Total Antworten: 17 x: 1.5, std: 0.71
Oberflächenschichttechnik	9 90% 75%	2 20% 16.7%	1 10% 8.3%		Total: 10 Total Antworten: 12 x: 1.1, std: 0.3
Aufbau- und Verbindungstechnik	26 86.7% 66%	7 23.3% 17.5%	7 23.3% 17.5%		Total: 30 Total Antworten: 40 x: 1.27, std: 0.68
Hybridmontage	11 64.7% 50%	7 41.2% 31.8%	2 11.8% 9.1%	2 11.8% 9.1%	Total: 17 Total Antworten: 22 x: 1.59, std: 0.97

Abb. 4-8 – Relevante Technologien (n=45)

#### 4.3.4 Integration verschiedener Funktionalitäten

Abb. 4-9 zeigt, **wie viele Funktionalitäten** die Entwickler bereits in ihren Produkten integrieren. Zumeist integrieren sie nur eine Funktionalität in ihre Produkte. Auf dem zweiten Platz sind drei Funktionalitäten. Hier war eine Antwort möglich.

Bei der ergänzenden Frage nach dem Handlungsbedarf, gab ein großer Teil an, mehrere Funktionalitäten in ein Produkt integrieren zu wollen.

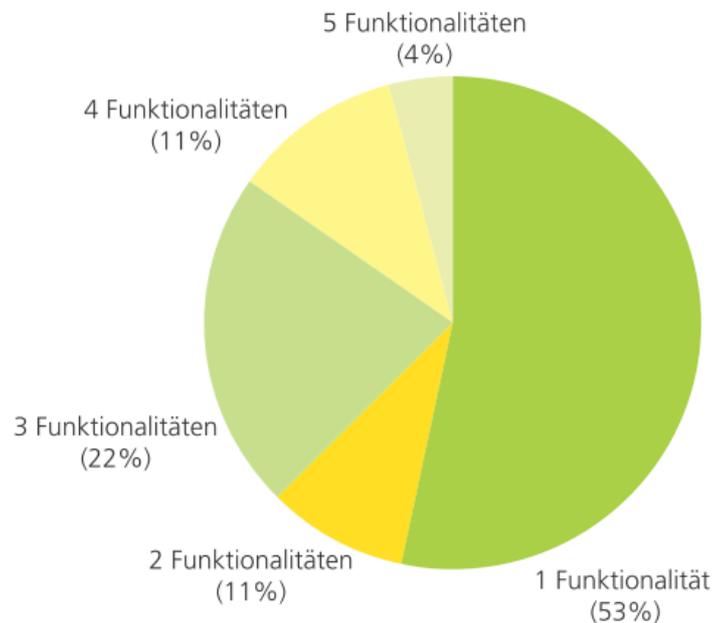


Abb. 4-9 – Anzahl integrierter verschiedener Funktionalitäten

#### 4.4 Ermittelter Handlungsbedarf und Potenziale in den befragten Gruppen

##### 4.4.1 Handlungsbedarf aus Sicht der Entwickler und Fertiger

Die auswertbaren 44 Entwickler und Fertiger sehen Handlungsbedarf vor allem im Bereich der Erhöhung des Funktionalisierungsgrades bzw. Integrationsgrades (Abb. 4-10). Gefolgt von einem gewünschten höheren Miniaturisierung und der Reduzierung von Schnittstellen. Die Balkenlänge gibt an, wie viele Befragten diesen Bedarf auf Platz eins oder zwei in ihrer Rangliste positionierten. Die Reduzierung der Montageschritte, als ein dem Projekt zugrundeliegender Aspekt, wird als weniger Vordringlich angesehen.

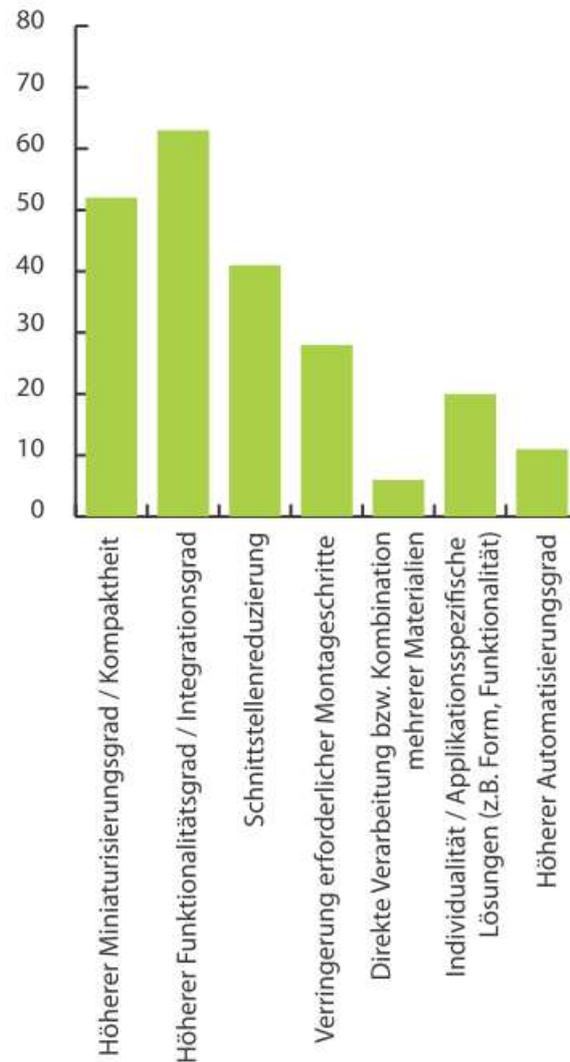


Abb. 4-10 - Handlungsbedarf aus Sicht der Entwickler und Fertiger (n= 44)

#### 4.4.2 Wichtigste Trends bei den Entwicklern und Fertiger abhängig der Branche

In Abb. 4-11 wird die **Branche in Bezug zu den Ansichten der Entwickler und Fertiger über Trends** gesetzt. Der Auswertung liegen 47 auswertbare Antworten zugrunde. Bei der Frage nach den Trends sollten sie eine Rangliste erstellen. Die Balkenlänge gibt an, wie viele der Befragten diesen Trend auf Platz eins oder zwei in ihrer Rangliste positionierten. Die Grafik zeigt diese ers-

ten und zweiten Plätze aufgeteilt nach den Branchen, in denen die befragten Entwickler und Fertiger tätig sind. Bei der Frage nach der Branche waren Mehrfachnennungen möglich.

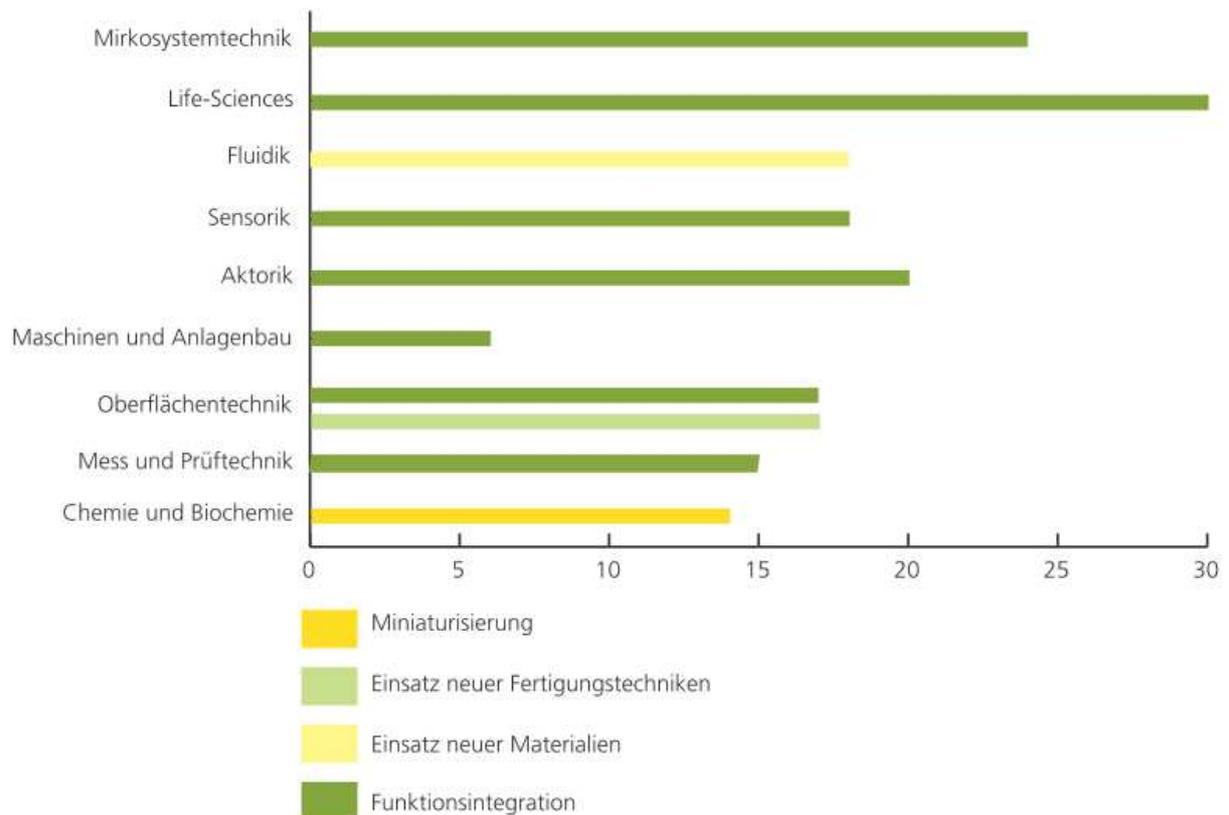


Abb. 4-11 – Wichtigster Trend in den einzelnen Branchen (n=47)

Je nach Branche variieren die als wichtig eingeschätzten Trends bei den Entwicklern. In den meisten Branchen wird Funktionsintegration als wichtigster Trend gesehen. Dies besonders in den Bereichen Mikrosystemtechnik und Life-Science. Der Einsatz neuer Materialien wird insbesondere im Bereich der Fluidik gesehen. Der Einsatz neuer Fertigungstechniken spielt insbesondere in der Oberflächentechnik eine wichtige Rolle. Miniaturisierung wird vor allem im Bereich der Chemie und Biochemie als wichtigster Trend eingeschätzt.

#### 4.4.3 Was würden Entwickler und Hersteller nutzen, wenn es technisch möglich wäre?

Die Grafik zeigt, was Entwickler und Fertiger nutzen würden, wenn es technisch möglich wäre (Abb. 4-12). Hier sollten die Befragten eine Rangliste erstellen. Die Grafik zeigt ein sehr ausgeglichenes Ergebnis. Einzig der Wunsch nach individueller Formgebung liegt etwas zurück.

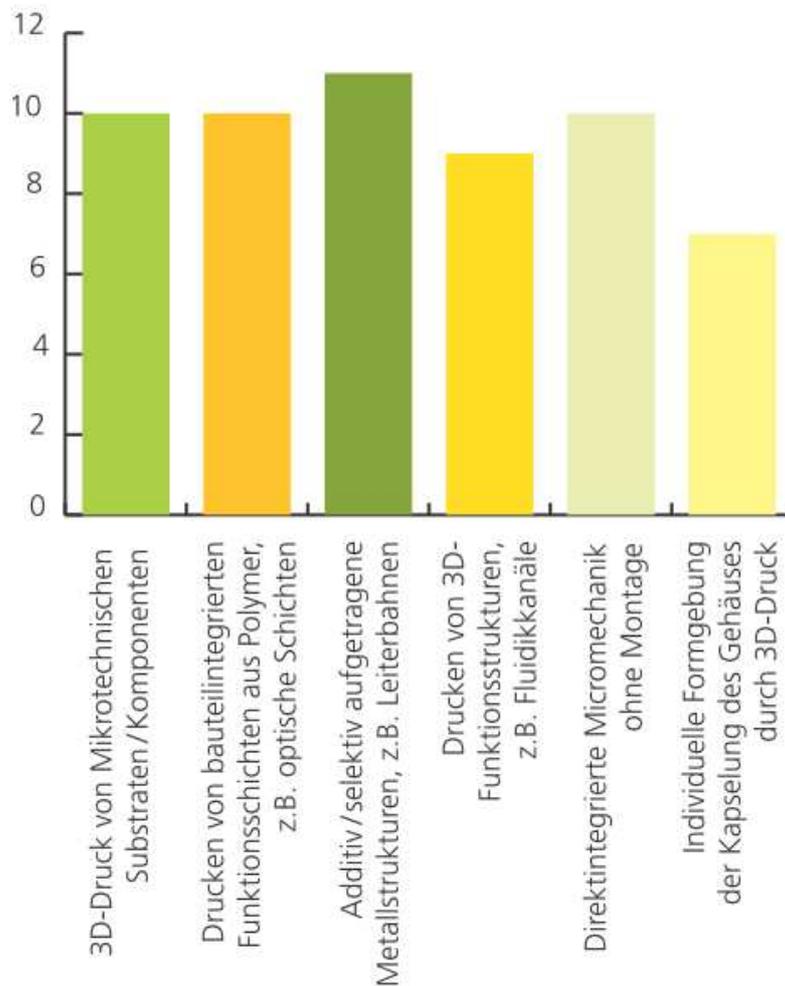


Abb. 4-12 – Was würden Entwickler und Fertiger nutzen, wenn es technisch möglich wäre?

#### 4.4.4 Handlungsbedarf aus Sicht der Anwender von Mikrosystemen

Bei 11 auswertbaren Anwenderangaben steht vor allem der Bedarf an einer Verringerung der erforderlichen Montageschritte und einer Erhöhung des Miniaturisierungsgrades im Vordergrund (Abb. 4-13). Die Balkenlänge gibt an, wie viele Befragte diesen Trend auf Platz eins oder zwei in ihrer Rangliste positionierten. Weniger priorisiert werden ein erhöhter Funktionalisierungsgrad und eine Schnittstellenreduzierung.

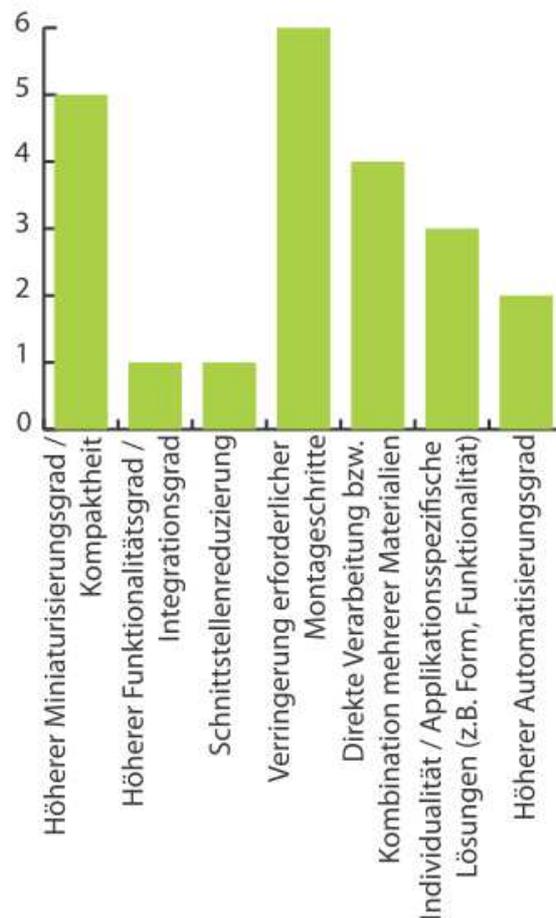


Abb. 4-13 – Handlungsbedarf aus Sicht der Anwender (n=11)

#### 4.4.5 Handlungsbedarf aus Sicht der Anwender nach Systemart differenziert

Die Anwender sehen bei fast allen Systemarten gleichen Handlungsbedarf (Abb. 4-14). Hier waren Mehrfachnennungen bei der Frage nach den Systemen möglich.

Miniaturisierung und Integration stehen auch bei den Anwendern an erster Stelle. Nur bei den Sensoren überwiegt der Wunsch nach der Verringerung der Montageschritte deutlich.

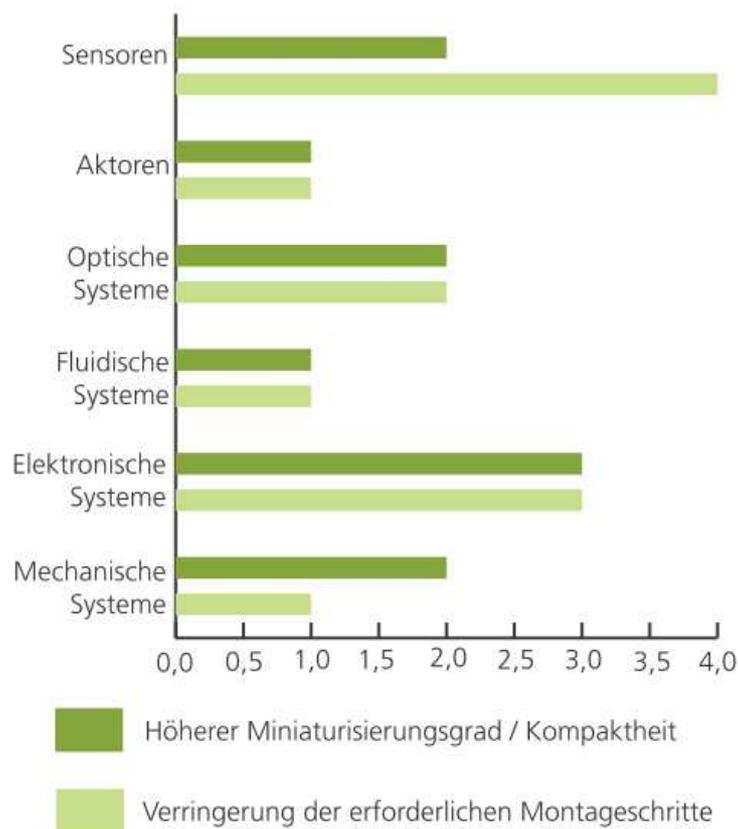


Abb. 4-14 - Handlungsbedarf aus Sicht der Anwender nach Systemart differenziert

#### 4.4.6 Was würden Anwender nutzen, wenn es technisch möglich wäre?

Die Befragten sollten eine Rangliste erstellen. Die Möglichkeit der direkten Einarbeitung von mikrotechnischen Lösungen in den Herstellungsprozess wird von den 28 Anwender am nützlichsten angesehen (Abb. 4-15). Additiv / selektiv aufgetragene Metallstrukturen befinden sich auf dem letzten Platz. Bei den Zukunftswünschen auf dem zweiten Platz ist das Drucken von 3D-Funktionsstrukturen. Direkt integrierte Mikromechanik ohne Montage wurde am dritthäufigsten von den Anwendern gewünscht.

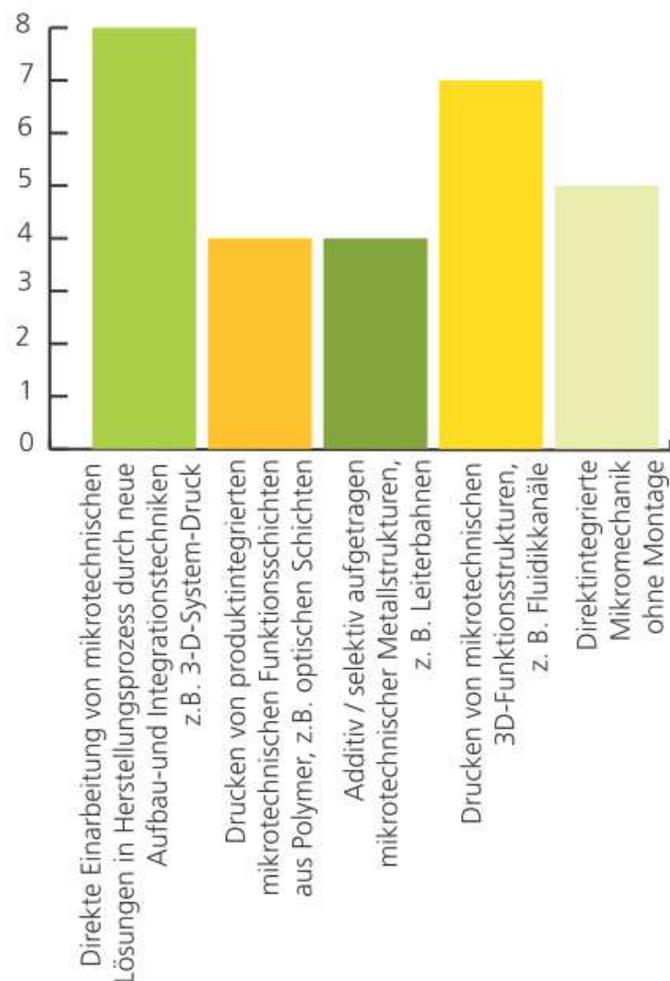


Abb. 4-15 – Was würden Anwender nutzen, wenn es technisch möglich wäre? (n=28)

#### 4.4.7 Entwicklungsbedarf bei den Anlagenherstellern

Abb. 4-14 zeigt, wo 31 Anlagenhersteller den Entwicklungsbedarf sehen. Am wichtigsten ist ihnen die Schnittstellentechnik auf Anlagenebene und die Verfügbarkeit neuer Materialien / Werkstoffe. Die Befragten sollten hier eine Rangliste erstellen. Die Balkenlänge gibt an, wie viele der Befragten diesen Entwicklungsbedarf auf Platz eins oder zwei in ihrer Rangliste positionierten.

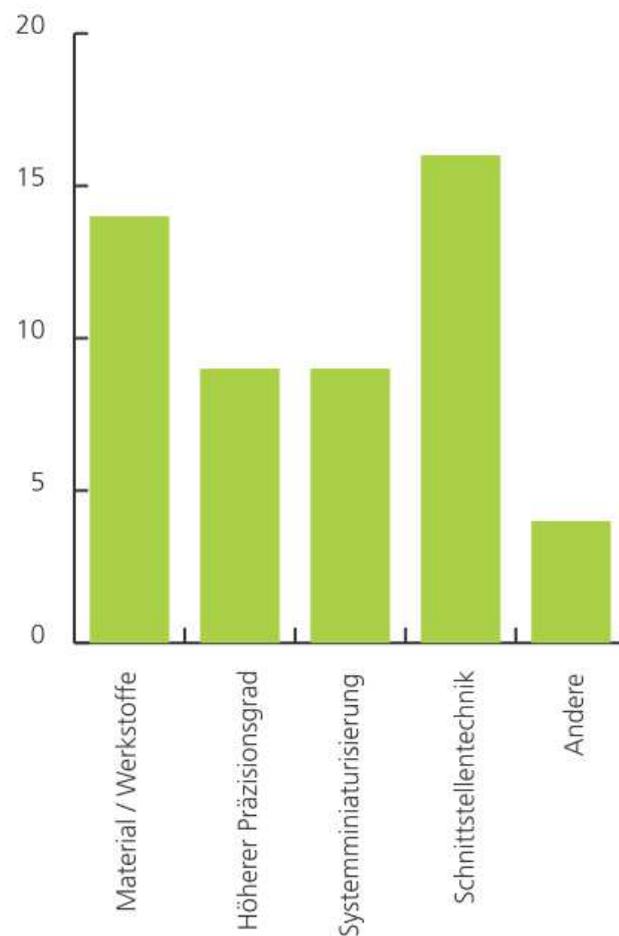


Abb. 4-14 – Entwicklungsbedarf der Anlagenhersteller (n=31)

## **4.5 Diskussion ausgewählter Umfrageergebnisse**

### **4.5.1 Bezug der Unternehmen zu Mikrosystemen in Abhängigkeit der Unternehmensgröße**

Mikrosystemtechnische Produkte werden eher in mittelständischen Unternehmen entwickelt, während es eher große Unternehmen sind, die diese anwenden. Gerade in kleinen Unternehmen gibt es noch viel Potential für den Einsatz mikrosystemtechnischer Produkte.

### **4.5.2 Anwenderspektrum**

Mit der Befragung konnten potenzielle Anwender aus unterschiedlicher Branchen erreicht werden.

### **4.5.3 Produktspektrum**

Die Anteile der zugrundeliegenden Mikrosysteme spiegelt die typische Verteilung im Bereich der Mikrosystemtechnik wider. Entsprechendes gilt für die Relevanz der Funktionalitäten und eingesetzte Substrattechnik.

### **4.5.4 Technologiespektrum**

Hier zeigt sich die neben der die Siliziumtechnik besondere Wichtigkeit der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie der Montagetechnik wieder. Neue Verfahren wie die MID und generative Fertigungsverfahren spielen aktuell noch eine eher untergeordnete Rolle.

### **4.5.5 Funktionsintegration**

Die Befragten sahen Funktionsintegration als wichtigsten Trend. Es besteht noch erhebliches Potential in dieser Hinsicht, da bisher in ein Produkt meist nur eine einzelne Funktionalität integriert wird. Bei Sensoren ist die Funktionsintegration bislang am weitesten fortgeschritten. Es besteht ein großer Bedarf der weiteren Funktionsintegration in der Mikrosystemtechnik allgemein und insbesondere im Bereich Life Science.

#### **4.5.6 Schnittstellen**

Ein Bedarf in der Reduzierung von Schnittstellen wird als ein wichtiger Punkt eingestuft.

#### **4.5.7 Materialien**

Es werden viele verschiedene Materialien verwendet, aber diese nur selten kombiniert. Typisch ist die Kombination von Silizium und Metall, die meist für Halbleiterbauelemente verwendet wird. Kunststoffe finden zunehmend Anwendung.

#### **4.5.8 Bedarf an Drucktechnik für mikrotechnische Lösungen**

Während sich bei den Entwicklern kein deutlicher Bedarf an gedruckten mikrosystemtechnischen Komponenten ableiten ließ, wurde bei den Anwendern der Bedarf an direkt eingearbeiteter mikrotechnischer Funktionalität durch 3D-Druck und gedruckten Mikrostrukturen (z.B. Fluidikkanäle) ermittelt. Für die Drucktechnik als Verfahren zur Herstellung von Funktionsschichten zeigt sich ein erhebliches Anwendungspotenzial.

#### **4.5.9 Integration von Mikrotechnik bei der Produktherstellung**

Das direkte Einarbeiten mikrotechnischer Funktionalität in das Produkt im Zuge der Herstellung wird als Vorrangig eingestuft. Hierbei von besonderem Interesse sind dreidimensionale Funktionsstrukturen. Hintergrund ist hier insbesondere der geäußerte Wunsch der Anwender den Montageaufwand zu reduzieren.

#### **4.5.10 Fazit bezüglich des $\mu$ Prod@home Ansatzes**

Die Ergebnisse bestätigen im Wesentlichen den Bedarf an neuen Aufbau- und Integrationstechniken zur Realisierung mikrotechnischer Funktionalitäten im Produktentstehungsprozess, wie es  $\mu$ Prod@home vorsieht.

## 5. Konzeption und experimentelle Untersuchung

### 5.1 Übersicht

Innerhalb dieses Kapitels sollen innovative Produktansätze und deren prinzipielle Machbarkeit bei einer Kombination von konventionellen generativen Verfahren und Mikromontageverfahren diskutiert werden. Insbesondere soll auf die mögliche Vereinfachung bzw. Vermeidung aufwändiger Fertigungsprozesse hingewiesen werden.

### 5.2 Kreative Konzeptplanung

Im Rahmen eines Workshops wurden unter Anwendung der Brainstorming-Methode für die ein Mikrosystem beschreibenden Systemtechniken typischen Funktionalitäten bzw. Funktionselemente gesammelt. Abbildung 5-1 zeigt die Ergebnisse dieser Ideensammlung. Die Ideen wurden den Systemtechniken Elektronik (gelb), Fluidik (blau), Optik (weiß), Aktorik (rot), Sensorik (grün), Mechanik (orange) zugeordnet. Die Stichworte auf den viereckigen Schildern waren systemunabhängige bzw. themenübergreifende Nennungen.

Im nächsten Schritt wurden dann die einzelnen Punkte unter dem Aspekt der schichtweisen Fertigung zur Ableitung zukünftiger potenzieller  $\mu$ Prod@home-Produkte analysiert. Die verschiedenen Ideen unterscheiden sich im Punkt der Komplexität und auch im Hinblick auf die Funktionalität. Während einige Ideen nur eine oder zwei Systemtechniken wie beispielsweise die Aktorik beinhalten, wiesen andere Ideen Kombinationen aus vielen verschiedenen Systemtechniken auf. Im folgenden sind Beispiele hierfür aufgeführt.

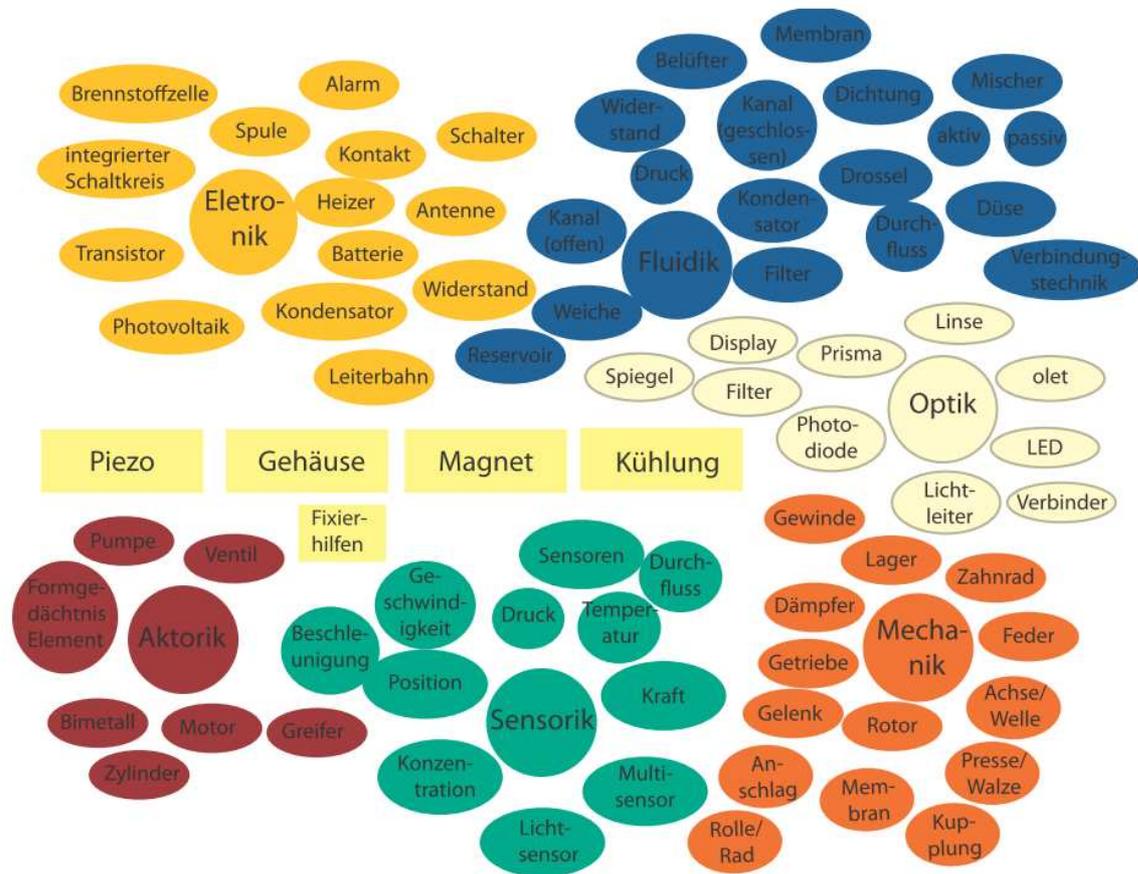


Abb. 5-1: Typische mikrosystemtechnische Funktionalitäten bzw. Funktionselemente aus Brainstorming

### 5.2.1 Konzept 1: $\mu$ Prod@home – Bimetallgreifer

Das erste Konzept (Abb. 5-2) kombiniert elektronischen, mechanischen und aktorischen Systemtechnik. Der Greifer besteht neben dem generativ hergestellten Gehäuse im wesentlichen aus einer direkt integrierten und schichtweise aufgebautem Bimaterial-Greifelement (mechanischer Aktor), das sich bei Erwärmung unterschiedlich stark ausdehnt und so einen definierten Hub bzw. Bewegung der Greiferbacke erzeugt. Die erforderliche Wärme wird durch die Bestromung der direkt im Aufbauprozess aufgetragene und integrierten Leiterbahnen (Heizer) erzeugt. Erreichbar ist so ein hoher Miniaturisierungsgrad.



Abb. 5-2:  $\mu$ Prod@home – Bimetallgreifer

### 5.2.2 Konzept 2: $\mu$ Prod@home - Fluidikdruckkopf

Eine weiteres Konzept eines monolithisch aufgebauten Mikrosystems könnte ein Druckkopf sein (Abb. 5-3). Dabei könnten die Gehäuse, Halterungen, Reservoirs und Kanäle durch generative Technologien gedruckt werden. Desweiteren könnten Sensorstrukturen aufgetragen werden. Erforderliche Aktoren, wie Piezokristalle und Pumpen, werden hybrid montiert und mit den gedruckten Teilen verbunden. Es könnte so die Anzahl an störanfälligen Schnittstellen reduziert werden.

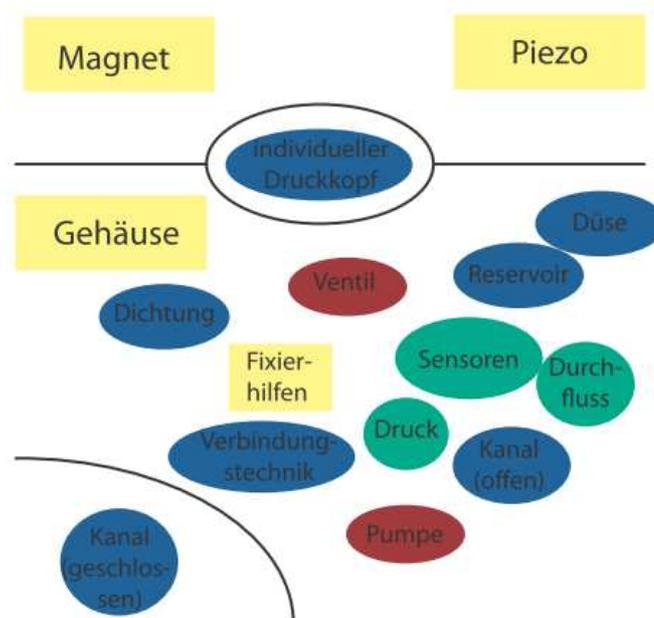


Abb. 5-3:  $\mu$ Prod@home - Fluidikdruckkopf

### 5.2.3 Konzept 3: $\mu$ Prod@home – Beleuchtungseinheit

Der große Vorteil des monolithischen Aufbaus von Beleuchtungseinheiten könnte die integrierte Kühlung sein (Abb. 5-4). Dabei werden Kanäle und Reservoirs direkt gedruckt. Auch ein direkter Druck von Linsen könnte in naher Zukunft möglich sein. Die Integration der Lichtquelle erfolgt hybrid mittels Montagetechnik parallel zum schichtweisen Aufbauprozess.

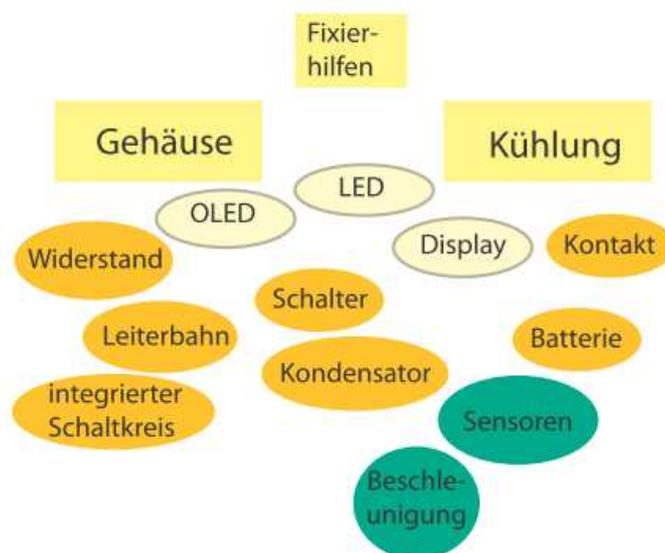


Abb. 5-4:  $\mu$ Prod@home - Beleuchtungseinheit

### 5.2.4 Konzept 4: $\mu$ Prod@home – Lab-On-A-Chip

Gerade in der Medizintechnik werden in naher Zukunft vermehrt sogenannte Lab-on-a-Chip-Systeme (Abb. 5-5). Parallel zum schichtweisen Drucken dreidimensionaler Kanäle werden sensorische und aktorische Funktionsschichten direkt mit eingearbeitet. Die Deckelung erfolgt ebenfalls durch aufgetragene Schichten.

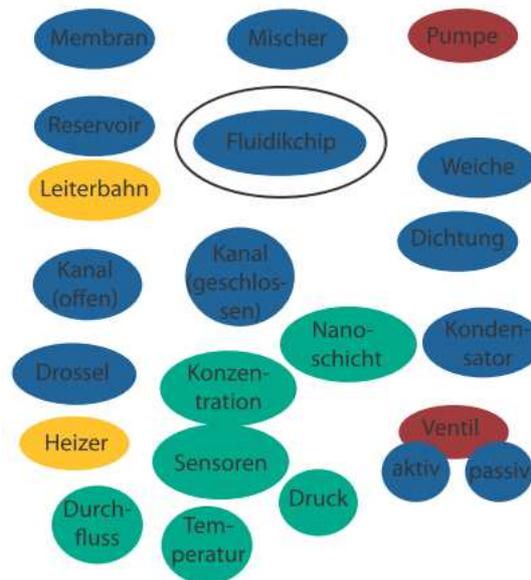


Abb. 5-5:  $\mu$ Prod@home – Lab-On-A-Chip

### 5.3 Demonstratorkonzept

Ausgehend der erarbeiteten Konzepte wurde für die Untersuchungen eine Beispielapplikation konzipiert, bei dem insbesondere die Schnittstellenvorteile verdeutlicht werden sollen (Abb. 5-6). Als wesentliche monolithische und hybride Funktionalitäten bzw. Funktionselemente sind berücksichtigt:

- Generatives Gehäusesubstrat
- Eingearbeitete Fluidkanäle
- Aufgetragene Leiterbahnen
- Montierte LEDs und Pumpenmodul

Das Konzept sieht vor, das durch die integrierten fluidischen Kanäle im  $\mu$ Prod@home-Fluidbaustein eine Flüssigkeit gepumpt wird. Durch entlang des Kanals an definierter Stelle im

Rahmen des Aufbauprozesses des Bausteins eingesetzte LEDs soll die Flüssigkeit beleuchtet werden, wodurch beispielhaft ein leuchtendes Fraunhofer-Logo dargestellt wird (Abb. 5-6). Das Fördern der Flüssigkeit durch den Baustein und die Kanäle soll mittels einer Mikropumpe erfolgen. Für die Stromversorgung und Steuerung der Pumpe und der Beleuchtung sind eine Batterie und entsprechende Steuerungskomponenten vorgesehen. Im ersten Konzept sollen die Leiterbahnen durch das Drucken von Leitklebstoff erzeugt werden.

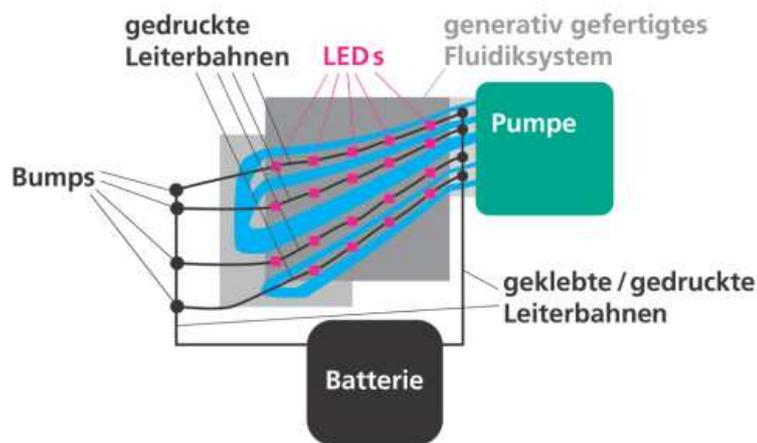


Abb. 5-6 – Konzept des  $\mu$ Prod@home Demonstrators

## 5.4 Realisierung des $\mu$ Prod@home-Demonstrators

### 5.4.1 Gestaltung und Konstruktion des Demonstrators

Ausgehend von dem erarbeiteten Konzept wurde zunächst ein Baugruppe konstruiert, welcher zum einen die vorgesehene elektrische und zum anderen die fluidische Funktionalität aufweist (Abb. 5-7). Die Versorgung sollte von extern erfolgen, da eine direkte Integration aufwandsbedingt nicht möglich war.

Bei hochintegrierten Mikrosystemen, wie auch in diesem Fall, immer wieder geforderte Funktionselemente sind bauteilintegrierte elektrische Verbindungen. Die Konstruktion sieht diesbezüglich vor, leitfähigen Klebstoff in die erzeugten Kanäle zu spritzen. Auf diese Weise lassen sich

dreidimensionale Leiterbahnen erzeugen. Wie in Abb. 5-8 dargestellt, ist das untere Element der Baugruppe mit quaderförmigen Aussparungen versehen. Ausgehend von jeder dieser Aussparungen führen zwei Kanäle zum Rand des Bauteils. Es wird leitfähiger Klebstoff solange vom Rand aus in den Kanal gespritzt, bis er die Aussparung erreicht hat. Dies wird für den gegenüberliegenden Kanal wiederholt. Die Enden der Leiterbahnraupen dienen dann als Kontaktflächen für die LEDs.

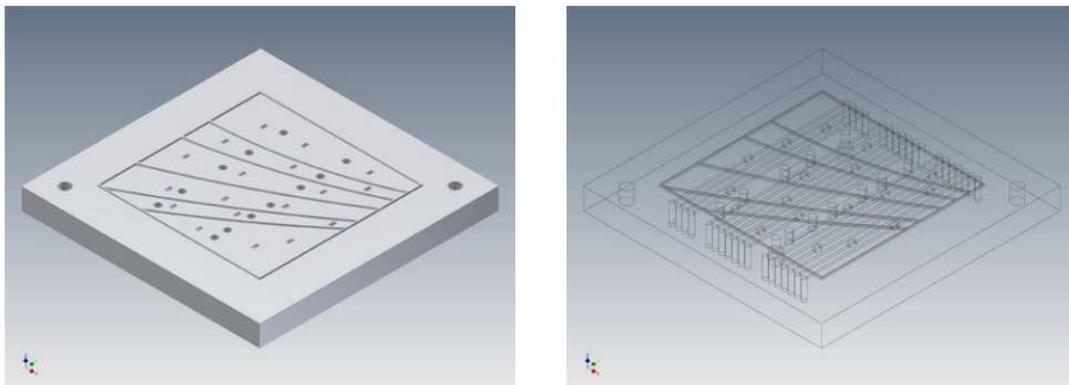


Abb. 5-7 – Baugruppe mit elektrischer und fluidischer Funktionalität

Für das Einbringen der vorgesehenen Fluidik gibt es auf der Unterseite der Baugruppe eine Gewindebohrung zum Einschrauben eines Fittings. Durch diese Öffnung wird die erste von sechs Kammern mit der Flüssigkeit gefüllt. Über das in Abb. 5-9 dargestellte Kanalsystem fließt die Flüssigkeit dann durch die folgenden Kammern bis hin zum Auslass in der sechsten Kammer.

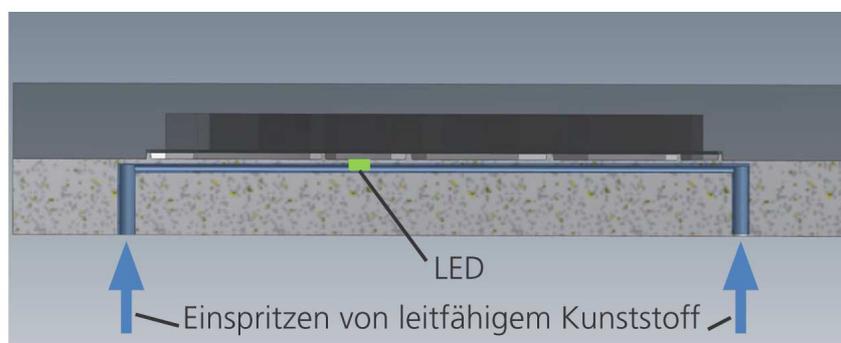


Abb. 5-8 – Schnittdarstellung der Baugruppe

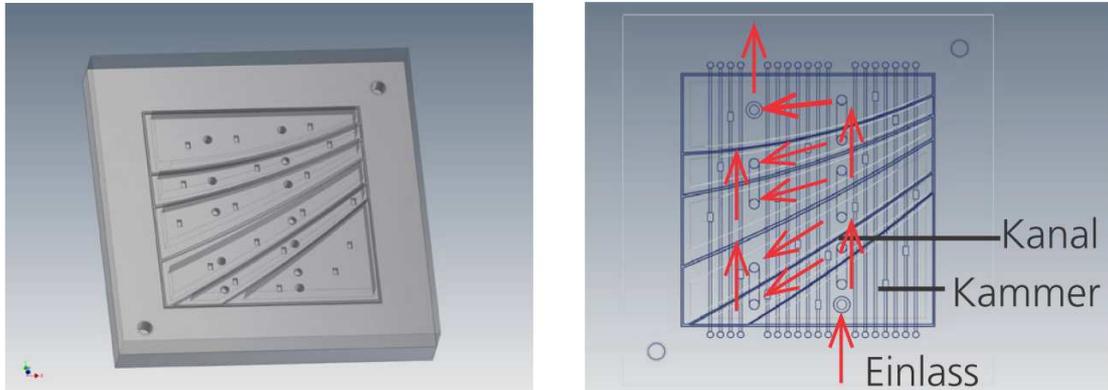


Abb. 5-9 – Fluidik des Baugruppe

Da aufwandsbedingt die Integration weiterer Funktionalitäten nicht möglich war, wurde zur Realisierung des Gesamtsystems zusätzlich ein Gehäuse konstruiert. Darin vorgesehen ist eine Aufnahme für die Baugruppe aus Abb. 5-9 links. Die Grundfläche beträgt 100x100 mm. Die Grundplatte des Gehäuses ist in Abbildung 5-10 rechts dargestellt. Auf diese werden das Netzteil, das Reservoir und die Pumpe inklusive Steuerung befestigt.

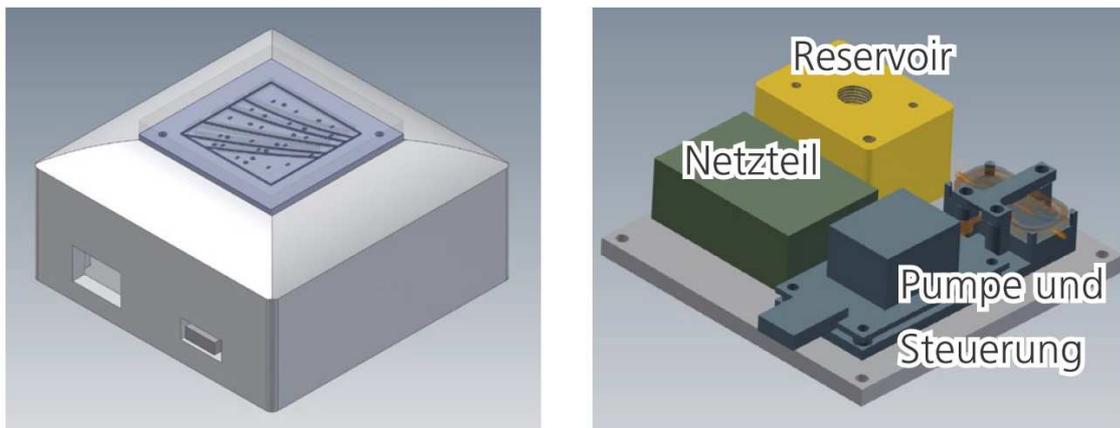


Abb. 5-10 – Demonstratorgehäuse und Gehäusegrundplatte

### 5.4.2 Fertigung der Bauteile durch 3-D Aufbautechniken

Die Möglichkeiten beim Stand der Technik bei generativen Aufbautechniken zu bestimmen wurden die einzelnen Komponenten unter Anwendung ausgewählter Techniken umgesetzt.

Die Herstellung des unteren Elements der Baugruppe und der Gehäusegrundplatte erfolgte durch das bekannte **PolyJet-Verfahren**. Die verwendete Gerätetechnik Objet Eden 330 weist eine Auflösung von 42  $\mu\text{m}$  in x-Richtung, 84  $\mu\text{m}$  in y-Richtung und 16  $\mu\text{m}$  in z-Richtung auf. Als Material wurde VeroWhite verarbeitet.

Das Deckelelement der Baugruppe wurde mittels **Stereolithografie** von einem externen Dienstleister mit einer 3D Systems SLA 5000 hergestellt. Die weist eine Positioniergenauigkeit von 13  $\mu\text{m}$  und eine vertikale Auflösung von 1,7  $\mu\text{m}$  auf. Es wurde das transparente Material Watershed verwendet.

Die Herstellung des Gehäuses erfolgte durch **Lasersintern** mit der Lasersinteranlage P100 der Firma EOS. Die Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm ist für die Erstellung des Gehäuses ausreichend. Das verwendete Material PA 2200 basiert auf dem Werkstoff Polyamid 12. Der pulverförmige Ausgangswerkstoff wird schichtweise verschmolzen und hat nach diesem Prozess sehr gute mechanische Eigenschaften im Vergleich zu anderen generativen Verfahren.

### 5.4.3 Voruntersuchungen zur Integration elektrischer Funktionalität

#### Erzeugung von Leiterbahnen auf gedruckten Substraten mittels Dispenstechnik

Es wurde untersucht, inwieweit durch ein gängiges berührendes Dispensverfahren elektrisch leitfähiger Klebstoff auf ein mit dem PolyJet-Verfahren gedrucktes Teil als Linie aufgebracht werden kann. Bei berührenden Dispensverfahren wird das aus der Düse austretende Medium über Adhäsion kontinuierlich auf das Substrat aufgetragen. Dabei spielt der Düsenabstand eine entscheidende Rolle. Versucht man sehr feine Bahnen zu dosieren, mit einer Breite beispielsweise im Bereich von 100  $\mu\text{m}$ , so haben diese eine Höhe von ca. 30  $\mu\text{m}$ . Versucht man auf eine raue Oberfläche ( $R_z > 30$   $\mu\text{m}$ ) eine solche 100  $\mu\text{m}$ -Linien zu dispensen kommt es zwangsweise zu einem Abriss des Kontakts zwischen Nadel und Material oder die Nadel kollidiert mit dem Substrat. Beides führt dazu, dass das Ergebnis nicht ausfällt wie gefordert. Im Falle von verschiedenen mit der Objet Eden 330 hergestellten Substraten wurde festgestellt, dass ein berührendes Dispensverfahren nicht geeignet zum Auftrag von den spezifizierten Leiterbahnen ist.

Die Anwendung von berührungslosen Verfahren wurde nicht untersucht, da diese einen geometrisch definierten und homogenen Linienauftrag nur eingeschränkt möglich machen. Eine diesbezügliche Optimierung erfolgt aktuell in unterschiedlichen Forschungsprojekten.

### **Erzeugung von innenliegenden Leiterbahnen durch das nachträgliche Einspritzen von leitfähigem Klebstoff in eingebrachte Kanalstrukturen**

Anhand eines Testbauteils wurde alternativ zum Auftragen das Einspritzen von leitfähigem Klebstoff in Kanäle untersucht. Dabei wurden diverse Bauteile durch Stereolithografie und das PolyJet Verfahren hergestellt, wie in Abb. 5-11 dargestellt. Kanäle mit einem angestrebten Durchmesser von 500  $\mu\text{m}$  konnten durch das verwendete Stereolithografie-Verfahren nicht hergestellt werden. Dieses war nicht in der Lage die benötigten Überhänge herzustellen, so dass die Kanäle letztendlich offen waren. Mit der Objet Eden konnten Kanäle mit einem Durchmesser von 400  $\mu\text{m}$  zuverlässig hergestellt werden. Da beim PolyJet-Verfahren von Objet jedoch ein Supportmaterial verwendet wird, muss dieses nach dem Druck gelöst werden. Zwar spielt dies für die Testteile keine Rolle, jedoch lässt sich dieser Vorgang mit dem Gedanken von  $\mu\text{Prod@home}$  nur bedingt vereinbaren.

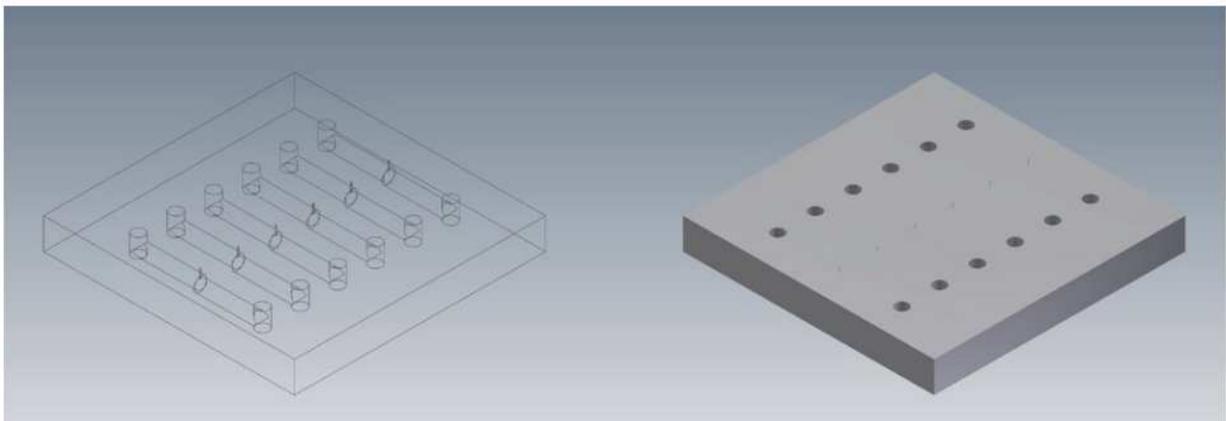


Abb. 5-11 – Testträger für Experimente mit eingespritzten Leiterbahnen

Nach dem Reinigen konnte der leitfähige Klebstoff durch die Kanäle mittels eines Zeit-Druck-Dosiersystems gespritzt werden. Nach dem Durchlaufen der Kanäle tritt der Klebstoff an der

Oberfläche aus. Das an definierter Stelle herausstehende Material dient dann als Kontaktfläche für die Montage der LED.

### **Integration von LEDs mittels Mikromontagetechnik**

Die Montage der LEDs wurde mittels vorhandener Gerätetechnik manuell gesteuert ausgeführt. Dazu wurde ein Mikro-Vakuumgreifer verwendet und die LED auf dem unausgehärteten, herausstehenden Leitkleber platziert. Anschließend wurde die Baugruppe bei 80°C für 2 Stunden in einen Ofen gelegt um den Klebstoff auszuhärten. Der anschließende Funktionstest zeigte bei einer Kanalbreite von mindestens 250 µm die Funktionsfähigkeit der elektrischen Verbindung. Bei kleineren Kanälen bestand keine elektrische Verbindung. Es wird vermutet, dass sich der Klebstoff in schmalen Kanälen entmischt, da die enthaltenen Silberpartikel an den rauen, gedruckten Wänden hängen bleiben und Agglomerate bilden. Nach der Montage wurden die LEDs mit einem Silikonkleber bedeckt und der Kleber ausgehärtet, wodurch die LEDs gegenüber der Flüssigkeit geschützt werden.

#### **5.4.4 Umsetzung des Demonstrators**

Der Aufbau wurde weitestgehend entsprechend dem beschriebenen Konzept realisiert. Der Grundkörper der Fluidik-Baugruppe wurde durch die Objet Eden 330 hergestellt und in einem Ultraschallbad in Natronlauge gereinigt bis alle Kanäle frei waren. Dann wurde der leitfähige Klebstoff eingespritzt und die LEDs auf den nicht ausgehärteten Klebstoff platziert. Anschließend wurde das Bauteil bei 80 °C für 2 h in den Ofen gelegt um den Klebstoff auszuhärten. Nun konnten die LEDs mit einem Silikonkleber verkapselt werden. Dieser wurde an der Luft für 48 Stunden ausgehärtet. Abschließend wurde der Deckel mittels des Silikonklebers aufgebracht und dieser unter Druckeinwirkung an der Luft für 48 Stunden ausgehärtet. Daraufhin wurde das System erfolgreich getestet. Der Baustein wurde dann in das Gehäuse eingebracht und angeschlossen, so dass die Fluidikkanäle mit durch Tinte gefärbtem Wasser aufgefüllt werden konnten. Die Bestandteile und der fertige Demonstrator sind in den Abbildungen 5-12 bis 5-15 gezeigt.

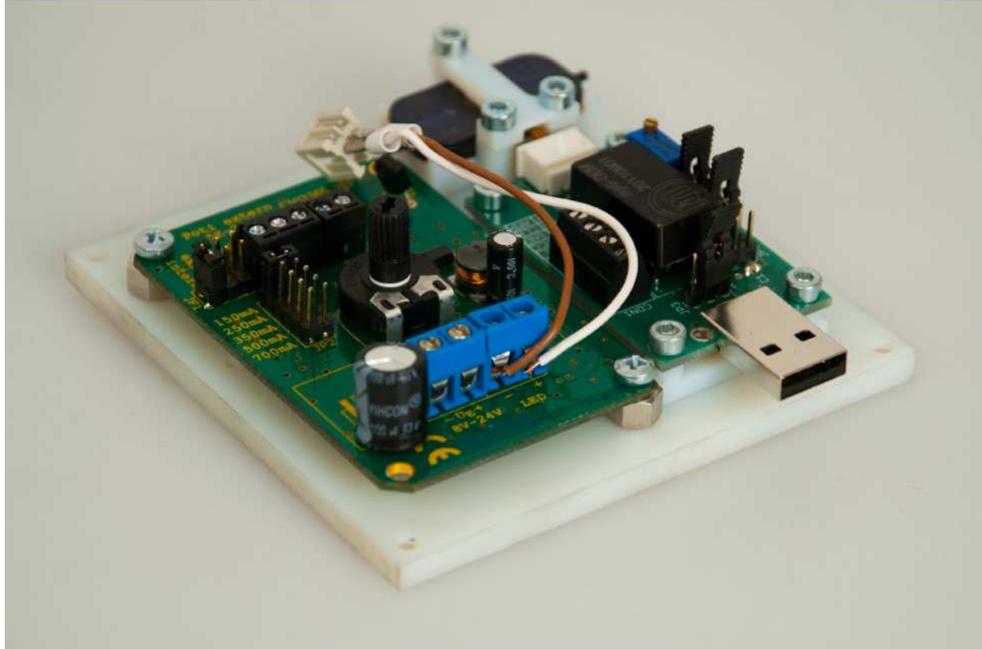


Abb. 5-12 – Grundplatte mit Elektronik



Abb. 5-13 – Aufnahme und Grundbaustein



Abb. 5-14 – Elektrisch angesteuertes Komplettsystem ohne Kühlung

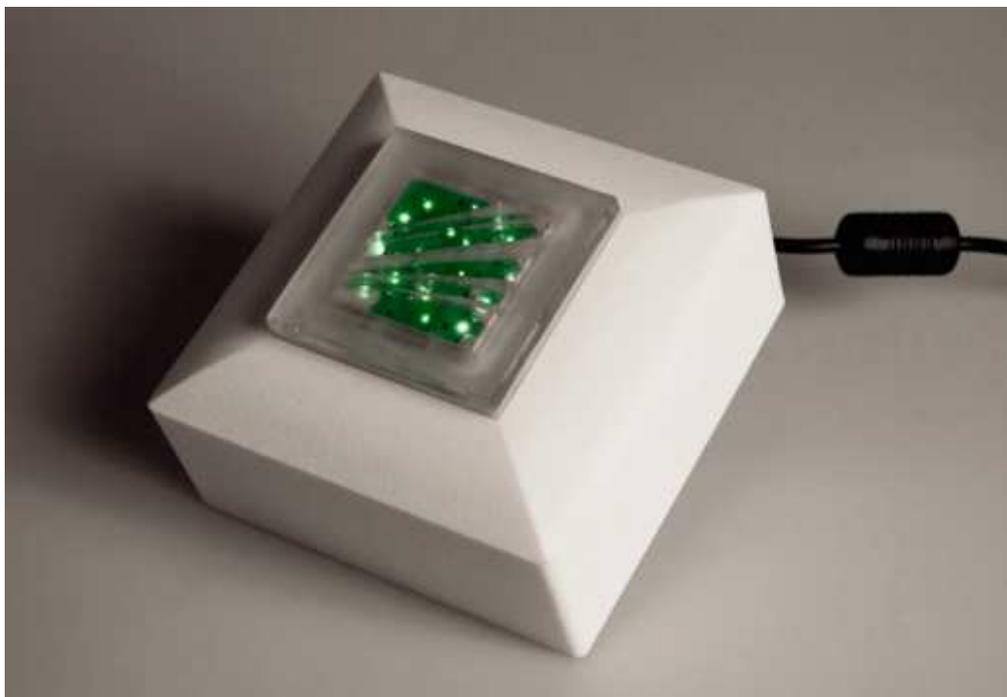


Abb. 5-15 – Komplettsystem mit angewandter Kühlung

## 6. Forschungs- und Entwicklungspotenzial

### 6.1 Diskussion der Ergebnisse

Die Kreativitätsphase und die erarbeiteten Konzept verdeutlichen das verbunden mit der Verfügbarkeit von  $\mu$ Prod@home resultierende Potenzial für innovative Produkte. Zwar sind heute bereits hochintegrierte Systeme machbar, jedoch könnten mit der neuen Herstellungstechnik fertigungstechnische und funktionelle Vorteile erreicht werden. Dem Konstrukteur stehen durch den Einsatz generativer Verfahren deutlich mehr Möglichkeiten zur Verfügung. Hinterschnitte und Freiformoberflächen sind im Gegensatz zu den üblicherweise verwendeten Verfahren ohne Probleme zu realisieren. Dies eröffnet neue Möglichkeiten in der Produktentwicklung und der Fertigung.

Wie die Realisierung des Demonstrators zeigt, ist es prinzipiell möglich generative Fertigungsverfahren mit Verfahren des Mikrodispensen und der Mikromontage zur Herstellung hochintegrierter Baugruppen zu kombinieren. Es wurde gezeigt, dass durch die Kombination der Fertigungsverfahren die Integration von hybriden Komponenten in generativ hergestellte Bauteile machbar ist. Dadurch könnten hochintegrierte Systeme hergestellt werden.

Bezüglich der direkten Integration elektrischer Funktionalität zeigte sich jedoch, dass dieses nicht ohne weiteres möglich ist. So kollidieren beim Stand der Technik häufig das technisch Mögliche mit den hohen mikrotechnischen Anforderungen hinsichtlich Auflösung und Genauigkeit. Beispielsweise können keine minimalen Kanaldurchmesser im Bereich  $100\mu\text{m}$  erzeugt werden. Die erzeugten Mikrokanäle mit einem Durchmesser von  $400\mu\text{m}$  waren technologisch bedingt das Minimum. Weiterhin sind die Oberflächen aufgrund der sehr hohen Rauheit für eine zuverlässige Mikromontage oder Mikrodispensen nicht geeignet. Hier wäre beim aktuellen Entwicklungsstand ein Nacharbeiten erforderlich.

Ein Problem stellt auch der derzeit für bestimmte Strukturen erforderliche Einsatz von Supportmaterial dar. Die Reinigung der Bauteile ist sehr aufwändig. Insbesondere die Reinigung der Mikrokanäle ist zu zeitaufwändig. An dieser Stelle wäre leichter lösliches Supportmaterial besser geeignet.

net. Ideal, jedoch technologisch momentan nicht zu realisieren, wäre ein generatives Verfahren welches kein Supportmaterial benötigt.

Bezüglich der Integration von hybriden, zu montierenden Funktionalitäten wäre es sehr vorteilhaft, wenn man den Druckprozess unterbrechen, die Bauteile montieren und anschließend den Druckvorgang fortsetzen könnte. Dies ist durch den Einsatz von Supportmaterial leider jedoch auch nicht möglich. Hinzu kommen unterschiedliche Prozesszeiten, die eine Serienbearbeitung nur eingeschränkt möglich machen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kombination von Mikromontage und generativen Verfahren zwar möglich ist, aber dies mit sehr deutlichen Einschränkungen verbunden ist. Um eine wirtschaftlich und technologisch attraktive Lösung zu erhalten, sind noch viele technologische Hindernisse im Einzelprozess und bei der Kombination von Prozessen zu überwinden. Dann kommen auch die enormen Vorteile der generativen Fertigung zum Tragen, die unter anderem in der Freiheit der Gestaltung und der Individualität der Bauteile liegen.

## **6.2 Ableitung von Handlungsbedarf**

Abbildung 6-1 zeigt den aus der Studie und den Untersuchungen abgeleiteten Handlungsbedarf auf. Dieser lässt sich in die Handlungsfelder generative Fertigungsverfahren, Prozess, Montage und Konstruktion und Design einteilen. Alle Handlungsfelder sind dabei gleichwertig zu beachten. Die Komplexität des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs erfordert die Kooperation von spezialisierten Forschungsinstituten und der Industrie.

Mit dem Projekt  $\mu$ Prod@home gelang es, orientiert an den Erwartungen und Forderungen der Industrie, grundlegende Fragestellungen zu bearbeiten und erste Lösungsansätze hinsichtlich einem zukünftigen Drucken von hochintegrierten mikrotechnischen Baugruppen zu entwickeln. Damit wurde der Einstieg in ein interessantes und potenzialreiches Forschungs- und Entwicklungsfeld getätigt. Das Ziel jedoch Deutschland zum Technologieführer für gedruckte Mikrosysteme zu ma-

chen, erfordert gemeinsame Anstrengungen von Industrie und Wissenschaft. Bei den zu erwartenden technologischen Risiken wird eine öffentliche Förderung als erforderlich angesehen.

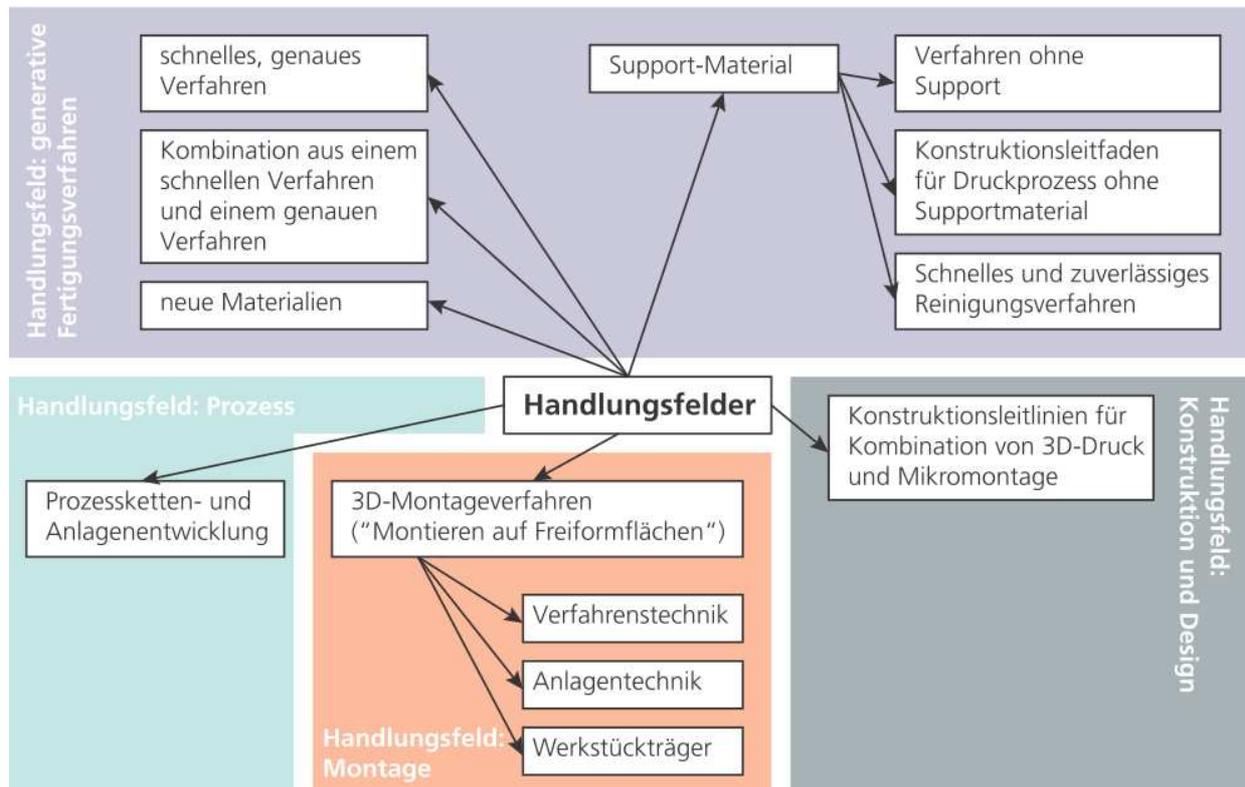


Abb. 6-1 – Abgeleitete Handlungsfelder

## 7. Verwertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Umfrage wurden zur strategischen Ausrichtung der Forschungsarbeiten und der Generierung neuer Projektansätze genutzt. So wurden beispielsweise die Fachgebiete Rapid Manufacturing und Mikromontage des Fraunhofer IPA zu einer kooperierenden Einheit zusammengefasst.

Ausgehend von den Erkenntnissen und Ergebnissen wurden neben internen Entwicklungsaktivitäten auch Kooperationsprojekte mit der Industrie zur Bearbeitung technologischer Fragestellungen sowohl in den Einzelprozessen als auch im Gesamtprozess gestartet und durchgeführt. Beispiele hierfür sind das hochpräzise 3-D Auftragen von Silikon zur Bauteilverkapselung oder das dreidimensionale Drucken von künstlichen mikrobiologischen Systemen mit feinsten Blutgefäßen.

Desweiteren wurden entsprechend den in 7.1 dargestellten Handlungsfeldern Förderprojekte auf nationaler und internationaler Ebene angestoßen.

Die erstmalige Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgte auf dem am 25.11.2011 in Berlin stattgefundenen Statustreffen MST-Vision. Die Umfrageergebnisse wurden im Anschluss an die Befragung an Interessenten auf Anfrage als Studie ausgegeben. Der  $\mu$ Prod@home Ansatz und der realisierte Demonstrator wurde am 7. Juli 2011 im Rahmen der Einweihung des neuen Reinraums des Fraunhofer IPA einem breiten Publikum vorgestellt und mit Experten diskutiert.

## 8. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine strukturierte Technologieanalyse nach einer Bottom-up-Methode durchgeführt. Dabei wurde herausgearbeitet in welchem Maße die betrachteten Technologien und Verfahren sich für eine integrierte Fertigungslösung eignen.

Dies stellte die Basis für spätere Untersuchungen und Konzepte einer solchen  $\mu$ Prod@Home-Fertigungslösung dar. Es zeigt sich, dass potenziell geeignete Verfahren vorhanden sind. Diese funktionieren einzeln, jedoch zeichnen sich technologische Hürden bei der Kombination dieser Verfahren ab. Eine freie Kombination ist sicherlich nicht möglich, da beispielsweise die Umgebung beim Lasersintern nicht geeignet ist, um darin eine Mikromontage durchzuführen. Es ist durch die Technologieanalyse möglich festzustellen, welche Verfahren tendenziell geeignet sind, es kann jedoch noch keine Aussage über die tatsächliche Eignung getroffen werden.

Anschließend wurde eine Umfrage durchgeführt, die sich speziell an Firmen richtet, die der Mikrosystemtechnik oder den generativen Fertigungsverfahren zuzuordnen sind. Dabei wurde festgestellt, dass kleine Unternehmen noch großes Potential für den Einsatz von Mikrotechnik haben. Eine Fertigungslösung, die zwar keine hohen Durchsätze, aber hohe Qualität und Individualität bieten kann passt zu den Bedürfnissen der kleinen und mittelständischen Unternehmen. Weiterhin wurde ein deutlicher Bedarf an weiterer Miniaturisierung und Integration von Funktionalität ermittelt.

Im nächsten Schritt wurde ein Demonstrator konzipiert, anhand dessen experimentell die Eignung einer Kombination heute verfügbarer Verfahren untersucht werden soll. Dieser Demonstrator kombiniert drei generative Verfahren mit Verfahren der Mikromontage. Es wurde festgestellt, dass die Kombination möglich, jedoch noch mit erheblichen technologischen Hürden versehen ist. Auf der anderen Seite stehen neue konstruktive und fertigungstechnische Möglichkeiten zur Verfügung. Mit neuen generativen Verfahren, ohne Supportmaterial und höheren Auflösungen wäre die Ausgangslage für eine Kombination von Prozessen für eine integrierte Fertigungslösung deutlich besser und damit hochintegrierte 3D-Mikrobauteile eher zu realisieren.

Die erarbeiteten Ergebnisse aus dieser Studie indizieren die potenzielle Möglichkeit und den Bedarf einer Fertigungslösung die generative Verfahren mit Verfahren der Mikromontage kombiniert. Prinzipiell ist eine Kombination möglich und neue Technologien wie beispielsweise MPP versprechen weitere Möglichkeiten der 3D-Fertigung. Untersuchungen im Bereich der Verfahren, der Kombination dieser und einer integrierten Fertigung würden weitere Erkenntnisse liefern und neue Möglichkeiten der Fertigung eröffnen.

Mit dem Erkenntnissen und Ergebnissen ist es dem Fraunhofer IPA möglich innovative Ansätze zu entwickeln und die Industrie bei produktseitigen und verfahrenstechnischen Fragestellungen zu unterstützen zur Steigerung der Innovationsfähigkeit und Wettbewerbsfähigkeit deutscher und europäischer Unternehmen.

### **Danksagung**

Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Unterstützung und dem Projektträger vdivde-IT für die Betreuung bei der Durchführung des Projektes.