

# Ein Blick in die Zukunft der Mikrofertigungstechnologien

OST Coffee Lectures 20.10.2021

Dr.-Ing. Tobias Müller, KIT IAI



# Überblick

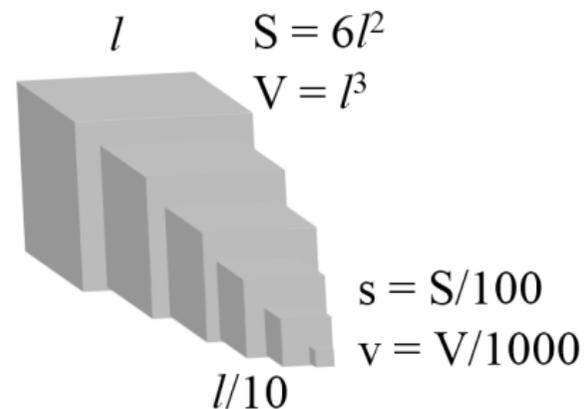
- Skalierungseffekte
  - Einfluss der Miniaturisierung auf Materialien, Prozesse und Produktionsmethoden
  
- Technologien der Polymer-Mikrofertigung
  - Mikrospritzgießen
  - Mikro-Additive Fertigungstechniken
  - Weitere Technologien
  
- Ausblick auf künftige Entwicklungen

# Miniaturisierung

Miniaturisierung ist weit mehr als Downscaling bzw. die Verkleinerung von Systemen und Technologien!

Skalierungsgesetze helfen, Phänomene im Mikrobereich zu erklären

Sehr unterschiedliche Skalierungsgesetze für Geometrie, Mechanik, Dynamik, Mikrofluidik, Van der Waals-Kräfte, Elektromagnetismus, Thermodynamik u.a.



# Materialieigenschaften auf der Mikroskala

Zunehmende Heterogenität auf der Mikroebene → interaktive Wirkung zwischen Probendimension und Korngröße

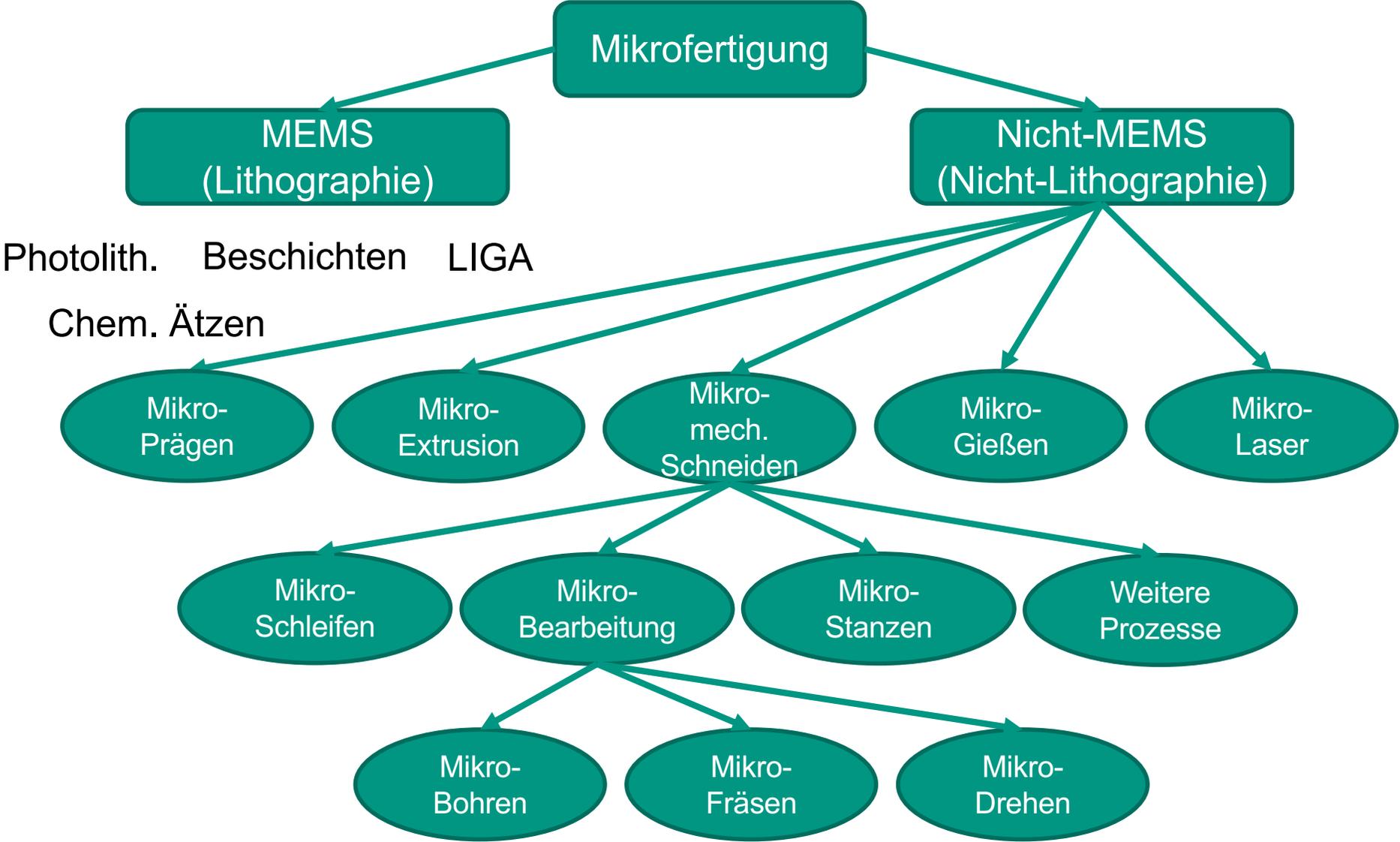
Probendimension beeinflusst die Eigenschaften des Materials und infolgedessen die Materialbearbeitung, z.B. Beeinflussung magnetischer Eigenschaften werden durch die Korngröße beeinflusst

Ursprüngliche Mikro-Fertigungstechnologien: Silicium (planar)

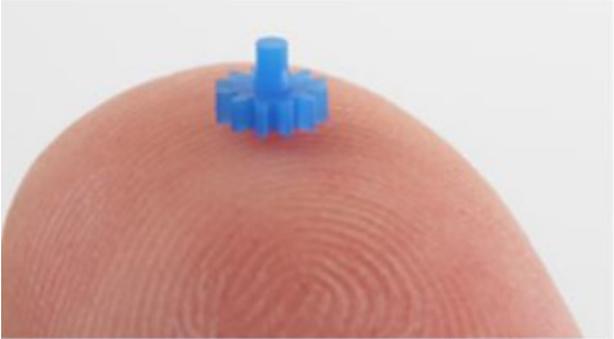
Neue Prozesse ermöglichen Materialvielfalt

Polymere Materialien können größere Vielfalt von Eigenschaften und Teilfunktionalitäten bieten (intelligente oder funktionalisierte Teile)

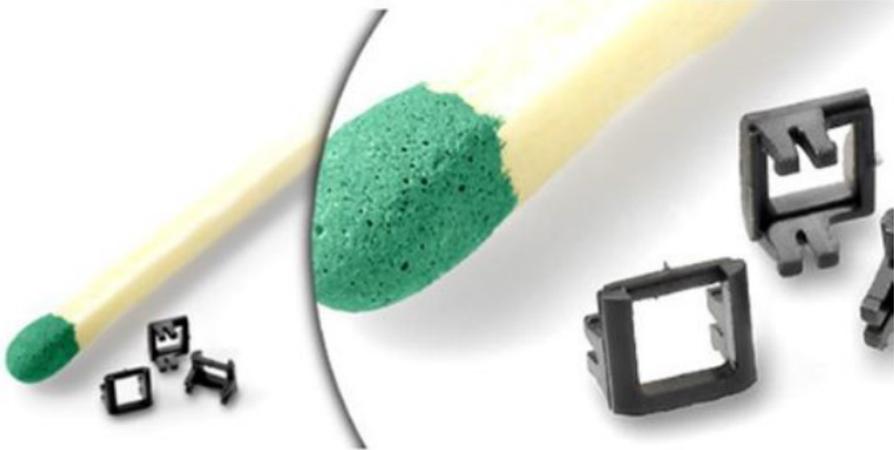
# Technologien der Mikrofertigung



# Mikro-Spritzgiessen



Micro-gear  
[Mold Hotrunner Solutions]



Micro-clamping frames  
[Arburg]



Micro-gears and micro-encoders  
[Makuta]



Micro-mechanical components  
[U moulding]

# Mikro-Spritzgiessen

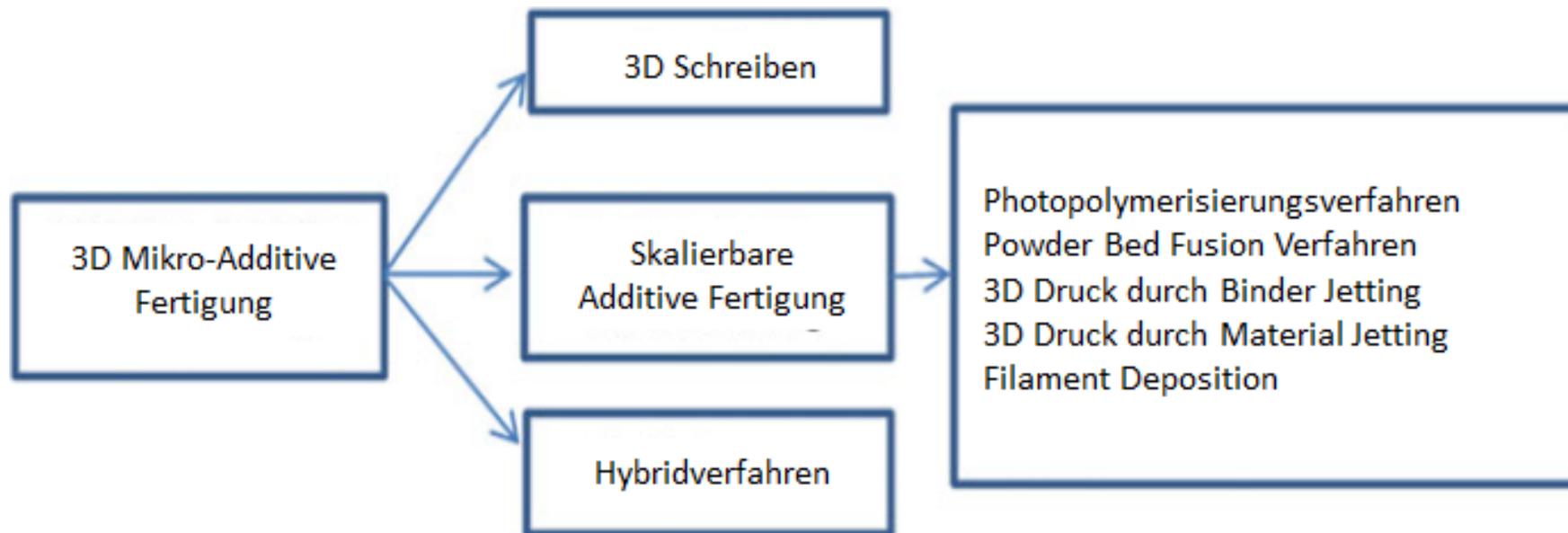
- Großes Entwicklungspotenzial für die kommenden Jahre
- Massenproduktion von Kunststoffkomponenten mit weniger als 1 Gramm und Toleranzen von 10 bis 100 Mikrometer
- Ermöglicht komplexe Geometrien und eine hohe Oberflächenqualität
- Man unterscheidet:
  - Mikrospitzgießteile: Komponenten mit sehr geringem Gewicht, kleinen Abmessungen (wenige Millimeter) und Details im Mikrometerbereich
  - Mikrostrukturteile: Komponenten mit Standardabmessungen, aber mit Bereichen mit Mikrostrukturdetails
  - Mikropräzisionsteile: Teile jeder Größe, jedoch mit Toleranzen in der Größenordnung von einem Mikrometer

# Parameter beim Mikro-Spritzgießen

- Thermoplaste verhalten sich anders auf der Mikroskala:
  - Einspritzgeschwindigkeiten sind höher
  - Schergeschwindigkeit ist höher
  - die Kühlgeschwindigkeiten sind extrem schnell aufgrund des hohen Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses
- Charakterisierung durch Mikrorheologie
- Simulation erfordert spezielle mathematische Modelle und hohe Auflösung
- Mikrospritzgießmaschinen erfordern spezielle Pellets mit einem Durchmesser von 0,05 bis 0,5 mm
- Entlüftung muss durch Vakuum unterstützt werden
- Herstellung der Mikrospritzformen durch spezielle Verfahren wie Mikrofräsen, Laserablation, Mikro-Elektroerosion, RIE, DRIE, LIGA

# Mikro-Additive Fertigungstechniken

- Mikro-Stereolithographie und 2-Photonen-Polymerisation (2PP)
- Pulverbett-Fusionstechniken
- Dreidimensionaler Druck über Binder Jetting
- Dreidimensionaler Druck über Material-Jetting
- Filament-Deposition



# Mikro-Additive Fertigungstechniken

## ■ Vorteile

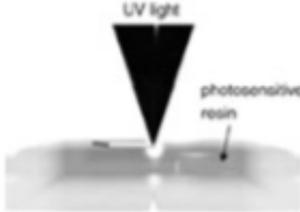
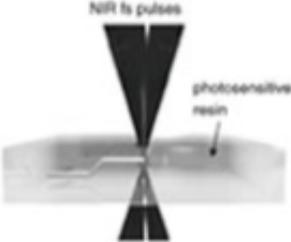
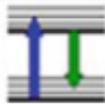
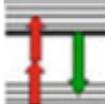
- Herstellung von Komponenten ohne geometrische Einschränkungen
- Produktion kleiner Mengen maßgeschneiderter Produkte zu niedrigen Kosten pro Einheit
- Geometriefreiheit und komplexe Bauformen
- Dedizierte Technologien für verschiedene Bereiche
- Flexibilität bei Produktänderungen
- Nachfrage nach Miniaturteilen wird in der Zukunft stark ansteigen

## ■ Beschränkungen

- Begrenzte Auswahl an Materialien und Eigenschaften
- Relativ geringe Prozessproduktivität, hohe Kosten pro Einheit
- Geringe Genauigkeit der Produktabmessungen und Oberflächenqualität
- Anforderung an die Nachbearbeitung
- begrenzte Wiederholgenauigkeit

# Vergleich von MSL und 2PP

## ■ Mikro-Stereolithographie und 2-Photonen-Polymerisation (2PP)

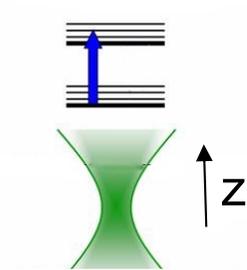
	<b>Mikrostereolithography</b>	<b>Zwei-Photonen Polymerisierung</b>
		
Wesentliche Elemente	CAD design, 2D Schichtvorbereitungsfunktionen, Laser Scannen- & Steuerungssystem mit Überwachungsgeräten	
Mechanismus für Polymerisierung	<b>Ein-Photon Absorption</b> (lineare Absorption) 	<b>Multi-photon Absorption</b> (Non-lineare Absorption) 
Lasertyp	UV Laser	NIR Femtosekunden Laser
Auflösung	~ 1 µm	~100nm
Strategie für 3D Herstellung	Polymerisierung auf der Oberfläche -> Schicht für Schicht Ansatz	Polymerisierung an jeder gewünschten Stelle -> 3D-Strukturen, durch "Aufnahme" der Strahlbewegung

■ Quelle: University of Nottingham

# 2-Photonen-Polymerisation

## 1 Photon Absorption (klassische Lithography):

Energie des Photons führt zur photochemischen Reaktion im Resist Material



## 2 Photon Absorption (2PP):

Energie **eines einzelnen** Photons ist nicht hoch genug um zu einer photochemischen Reaktion im Resist Material zu führen

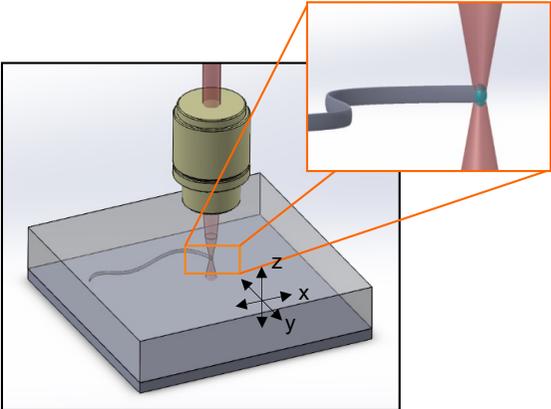
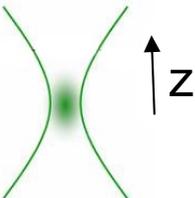
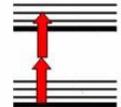


Hohe Energie (fs-laser)



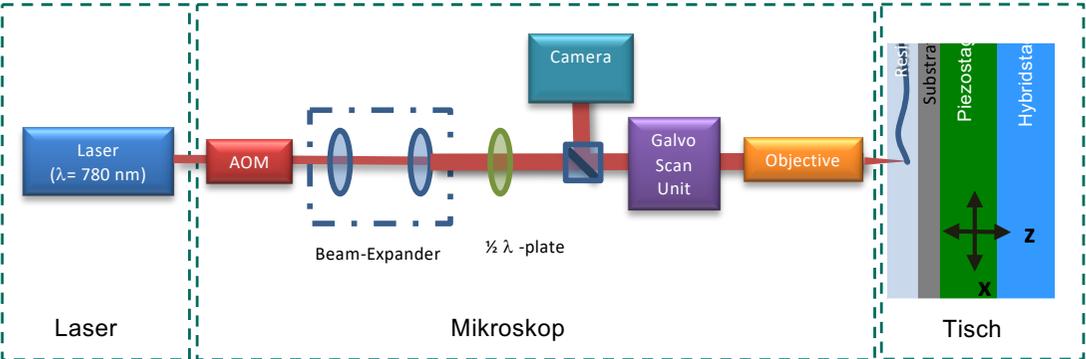
Wahrscheinlichkeit, dass **zwei Photonen** zur selben Zeit am Fokuspunkt sind steigt

Enge Fokussierung (Mikroskop Objektiv)



Strukturierung durch Bewegung der Probe

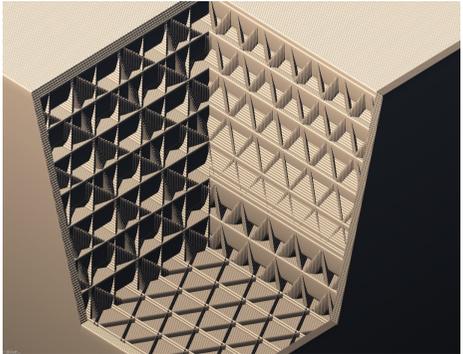
# 2-Photonen-Polymerisation



Photonic Professional GT2 Plus; Nanoscribe GmbH

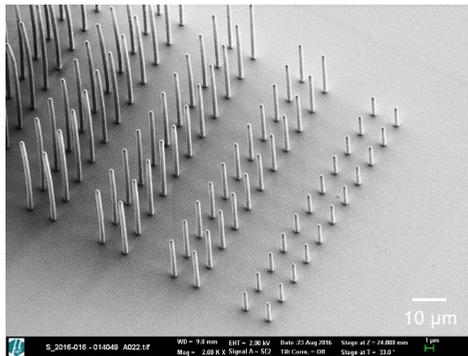
Fertigungsdauer für einen 1 mm<sup>3</sup> Würfel

Objektiv	Auflösung X,Y [µm]	Auflösung Z [µm]	ø Schreibfeld [µm]	Schreibzeit für 1 mm <sup>3</sup> [h:min]	
				Solid	Hülle+Gerüst
100xDip NA 1.3	0,2	0,3	200	25108:55	-
63xGT NA 1.4	0,2	0,3	200	110:15	13:25
25xGT NA 0.8	0,5	1	400	09:38	01:27
10xGT NA 0.3	1	5	1000	00:38	00:19

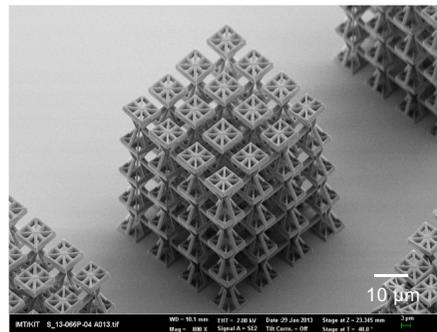


\*bei 100 mm/s Schreibgeschwindigkeit

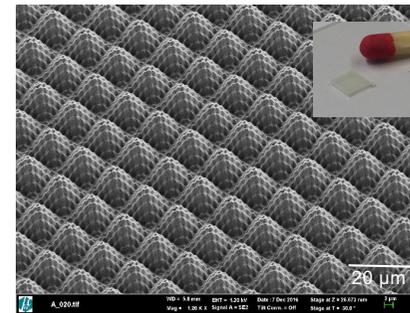
# 2-Photonen-Polymerisation



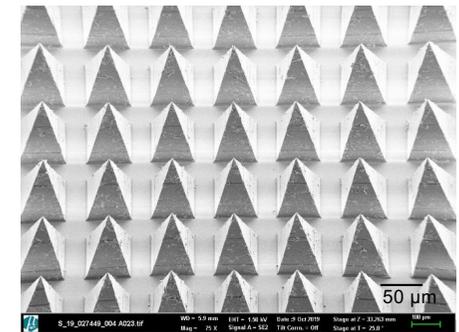
Säulen mit hohem Aspektverhältnis



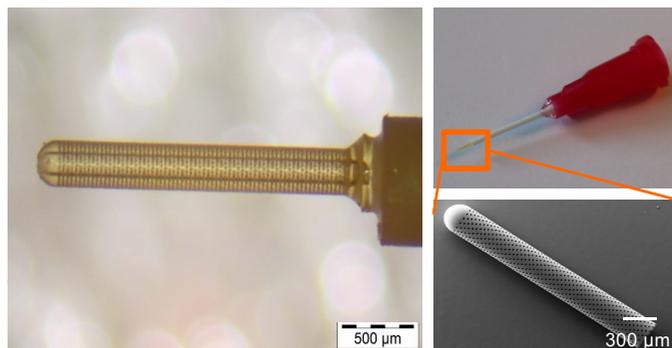
Auxetische Struktur (40 µm x 40 µm x 60 µm)  
Smart Mater. Struct. 23 8 (2014) 085033



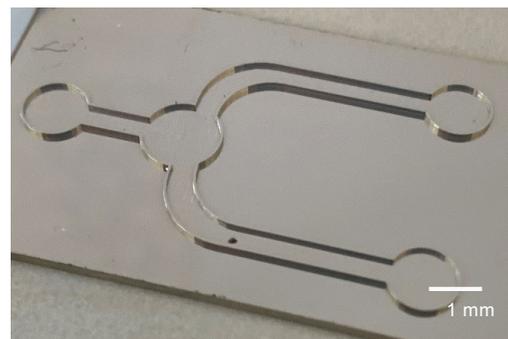
Lotus-Struktur auf einer  
4 mm x 4 mm Fläche  
Bioinspir. Biomim. 12 (2017)  
066004



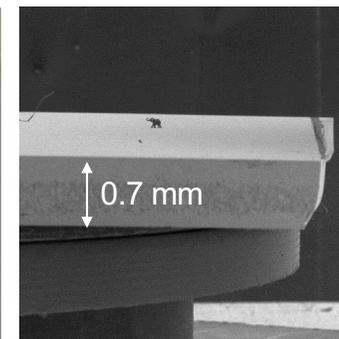
Pyramidenstrukturen für  
medizinische Anwendungen



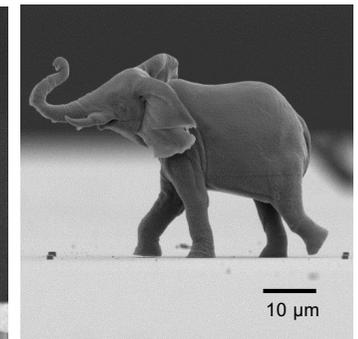
Sonde zur Analyse von belastetem Wasser (Länge 2.3 mm) Sonde ist mit 20 µm Löchern perforiert



Große mikrofluidische Struktur 20 mm x 30 mm



100 µm Elefant (Rüssel bis Schwanz) auf einem 0.7 mm Glas-Substrat für einen Werbespot im japanischen Fernsehen



# Mikro-Stereolithographie

Aktueller Stand der Technik:

Optische Auflösung:	2 $\mu\text{m}$
Schichtdicke:	5 $\mu\text{m}$ – 20 $\mu\text{m}$
Oberflächengüte (Seite):	1,5 $\mu\text{m}$ – 2,5 $\mu\text{m}$
Oberflächengüte (Oben):	0,4 $\mu\text{m}$ – 0,8 $\mu\text{m}$
Baugröße:	max. 50 x 50 x 50 mm
Materialien:	lichtempfindliche Harze (405 nm), Keramik



Glaucoma-Stents



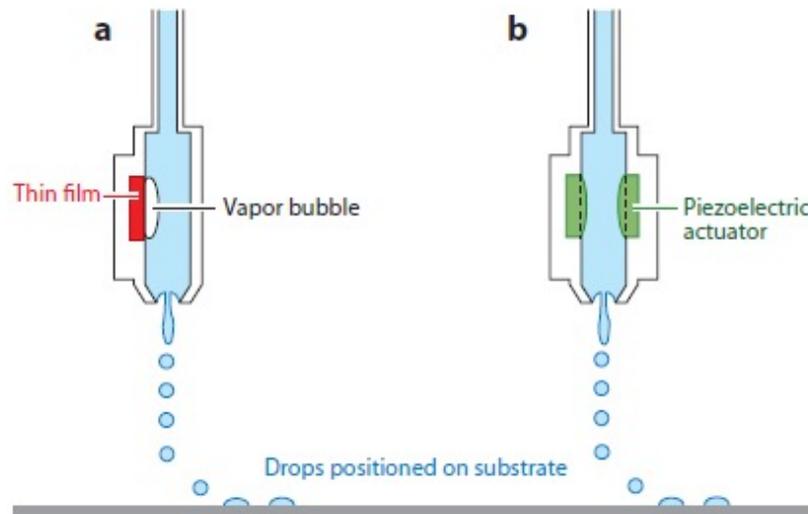
MEMS-Bauteile (Zahnrad)



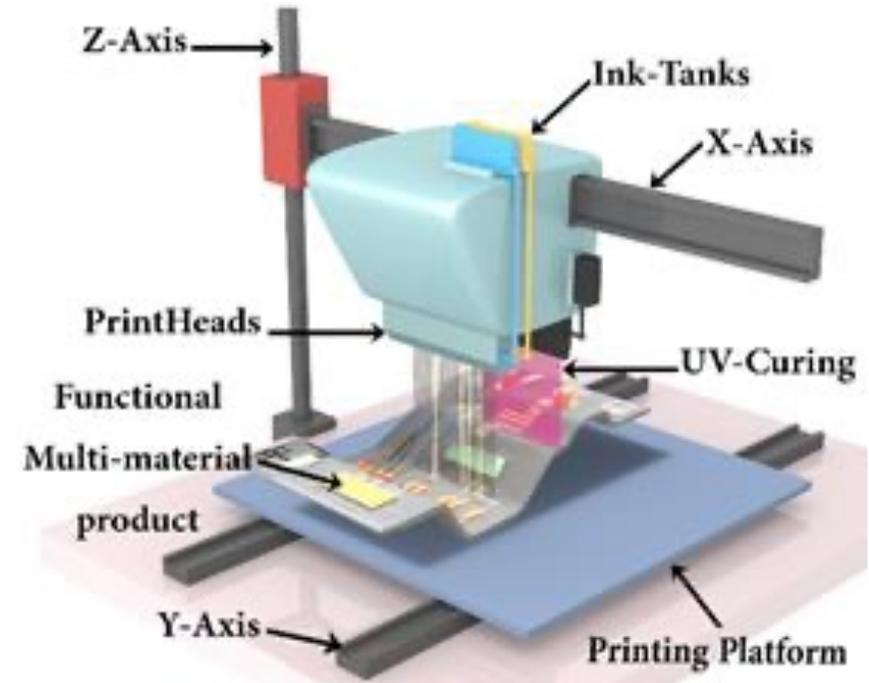
Mikrofluidischer Chip mit Tinte

# 3D-Inkjet-Druck

- Flüssige Tintensysteme für 3D-Strukturen
- Ursprünglich verwendet für Text & Grafik
- Industrielle Anwendung am Beginn
- Steigende Relevanz



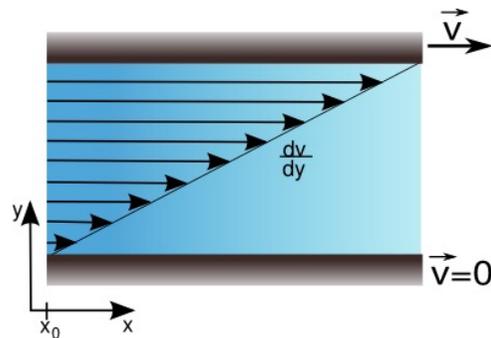
Drop-on-demand zur Generierung der Tropfen durch a) Dünnfilm-Heizer oder b) piezoelektrischen Aktuator



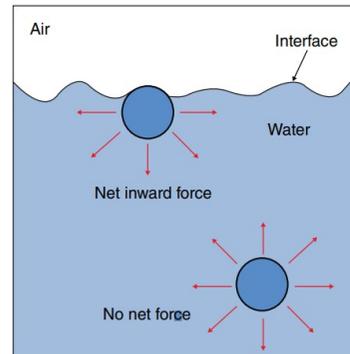
Visualisierung des Inkjet 3D Druckprozesses

# Mikro-Additive Fertigungstechniken

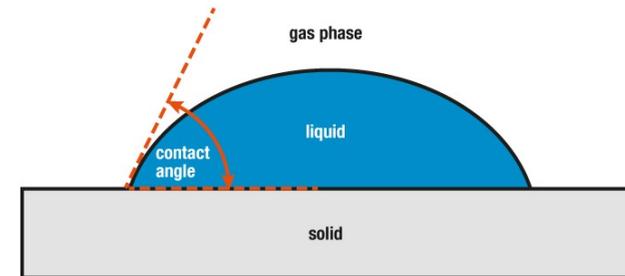
## Viskosität



## Oberflächen- spannung



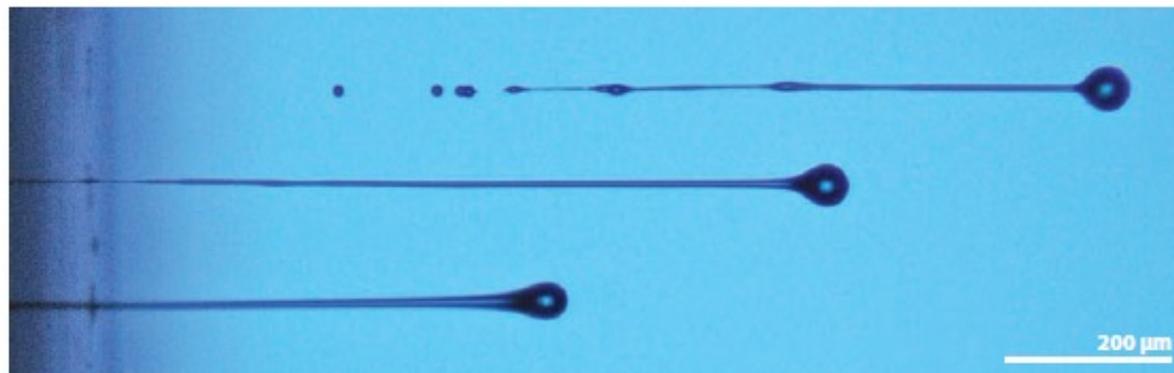
## Kontaktwinkel



<https://www.linseis.com/en/properties/contact-angle/>

Furlani, E. P., *Fluid Mechanics of Inkjet Printing*

<https://lp.uni-goettingen.de/get/text/4979>



Verschiedene Stadien der Tropfengenerierung

- Tropfenform entscheidend
- Vermeidung von Satelliten

→ Waveform Optimierung

# Mikro-Additive Fertigungstechniken

Notion n.jet 3D & functional

Inkjet printer mit mehreren Druckköpfen

Bauvolumen: 305 x 305 x 70 mm (XYZ)  
156 x 200 x 80 mm (XYZ)

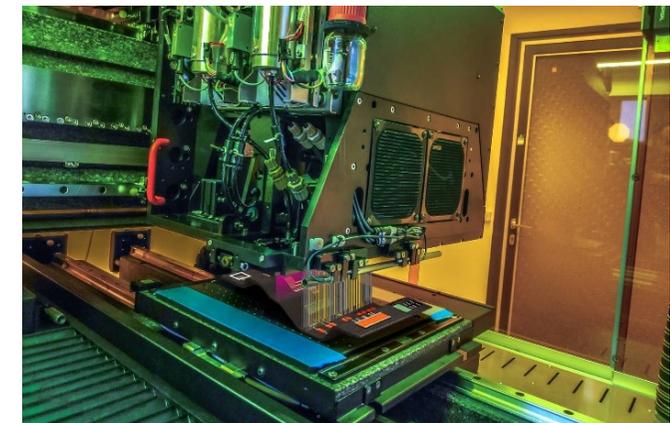
XY Genauigkeit: 1 oder 2  $\mu\text{m}$

Z Genauigkeit: 3  $\mu\text{m}$

Drop-Placement Genauigkeit: 5  $\mu\text{m}$

Kompatible Druckköpfe: Fuji DMC  
KM 1024i  
Fuji S-Class  
Xaar1003

UV Lampen: 405 nm, 365 nm und 395 nm  
Integriertes Tropfenüberwachungssystem  
UV-härtbare Tinten mit bis zu 100 mPas



# Moulded Interconnect Devices

- Üblicherweise aus mikrospritzgegossenen Thermoplasten mit strukturierten Leiterbahnen, jedoch auch andere Methoden
- Vorteil: Geometriefreiheit im Hinblick auf die Integration

2D	2 ½ D			N x 2D	3D	
Planare Prozessfläche	Planare Prozessfläche 3D Elemente auf der gegenüber liegenden Seite	Planare Prozessfläche 3D Elemente auf der Prozessseite	Mehrere planparallele Prozessflächen	Mehrere planparallele Prozessfläche im Winkel	Regelflächen (z.B. Zylinderflächen)	Freiformflächen
						

Quelle: J. Franke et al., MIDStudies 2011 – Markt- und Technologieanalyse. 3-D MID e-v., Erlangen, 2011

# 3D-MID – typische Substratmaterialien

Material	Abbreviation	Peel Strength		Solderability			Relative cost
		Chemical	Hot Embossing	Reflow		Selective	
				normal	Low melting point solders		
Polypropylene	PP	+	+	-	0	+	
Acrylonitrile Butadien Styrene	ABS	+	+	-	-	+	
Polycarbonate	PC	+	+	-	+	+	
Polyethylene Terephthalate	PET	-	+	-	0	+	
Polybutylene Terephthalate	PBT	+	+	0	+	+	
Polyamide	PA	+	+	0	+	+	
Polyphenyle Sulfide	PPS	+	-	+	+	+	
Polysulfone	PSU	+		0	+	+	
Polyethersulfone	PES	+	+	+	+	+	
Polyetheremide	PEI	+	+	+	+	+	
Liquid Crystal Polymer	LCP	+	0	+	+	+	

# 3D-MID – Prozesse

- Zwei-Komponenten-Spritzgiessverfahren
- Laserdirektstrukturierung (LDS)
- Heissprägen
- Aerosol-Jet-Printing

Technologien	Min. Leiterbahnbreite	3D Design Freiheit	Layout- Änderung	Materialvielfalt	Teilanzahl	Materialkosten	Werkzeugkosten	Investition
<b>LPKF-LDS</b>	100 µm	hoch	Einfach	Mittel	Hoch	Hoch	Sehr niedrig	Mittel-Hoch
<b>Aerosol-Jet</b>	10µm	hoch	Einfach	Sehr einfach	Niedrig	Mittel	Mittel	Mittel-Hoch
<b>Zwei Komponenten</b>	150µm	Sehr hoch	Sehr Einfach	Niedrig	Sehr hoch	Niedrig-Mittel	Sehr Hoch	Sehr hoch
<b>Heißprägen</b>	300µm	Niedrig	Moderat	Sehr hoch	Hoch	Niedrig	Mittel	Niedrig

## Vergleich der wichtigen MID-Strukturierungsprozesse

Quelle: T.A. Osswald et al., International Plastics Handbook, 4th edn, Hanser, München, 2006

# Zwei-Komponenten-Spritzgießverfahren

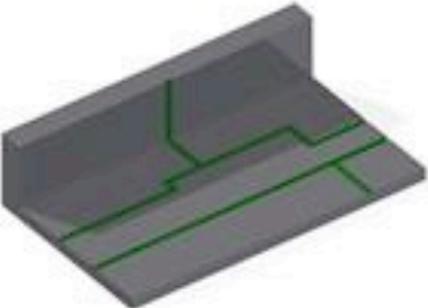
1. Erster Schuß beim Spritzgießen



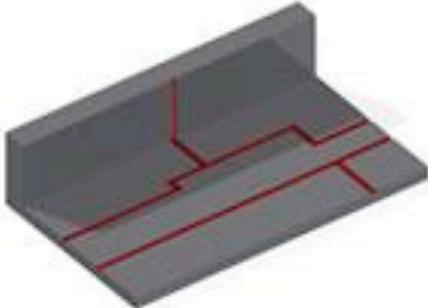
2. Aktivierung



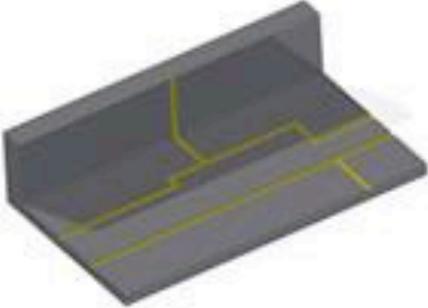
3. Zweiter Schuß beim Spritzgießen



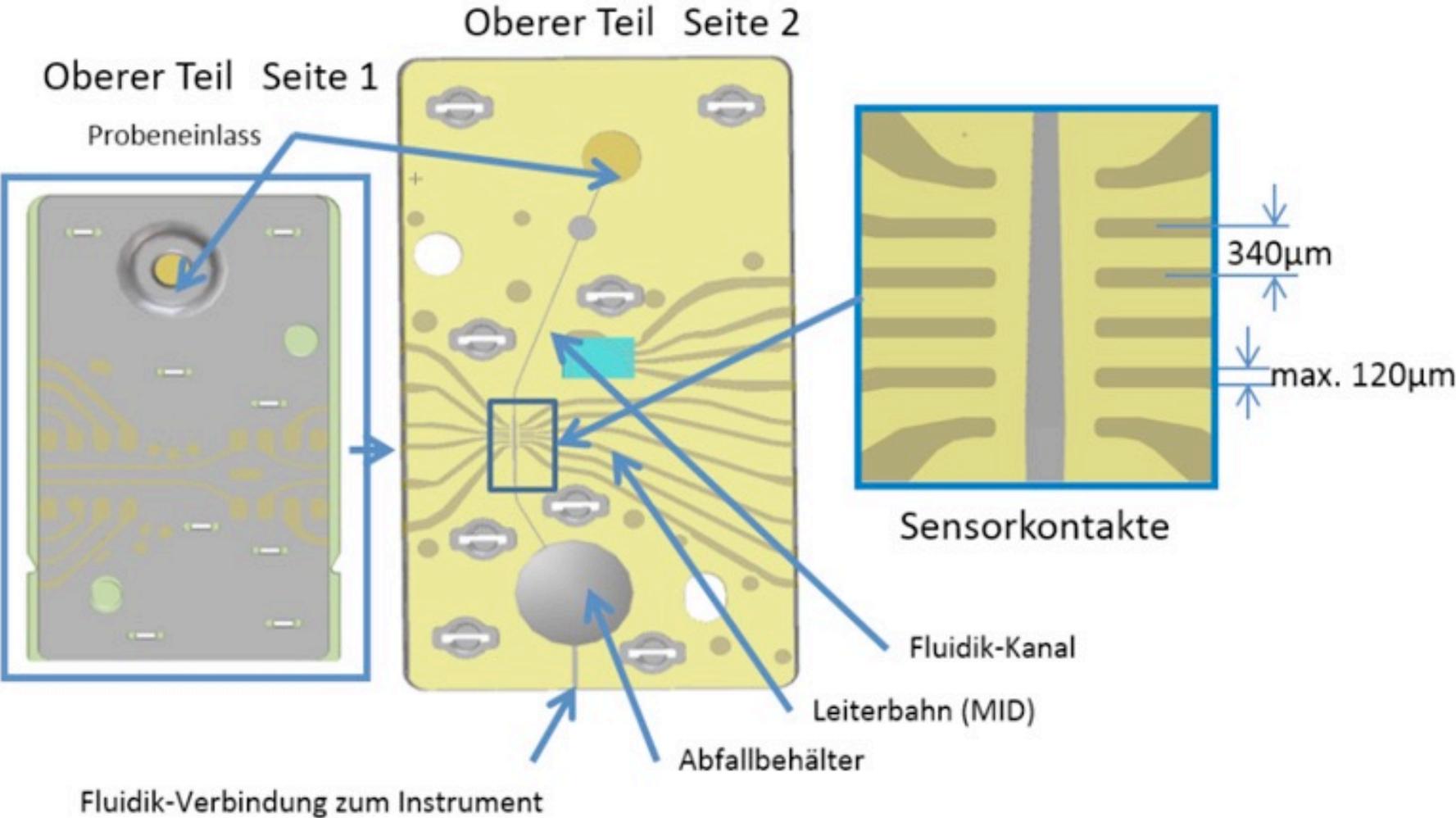
4. Chemisches Galvanisieren



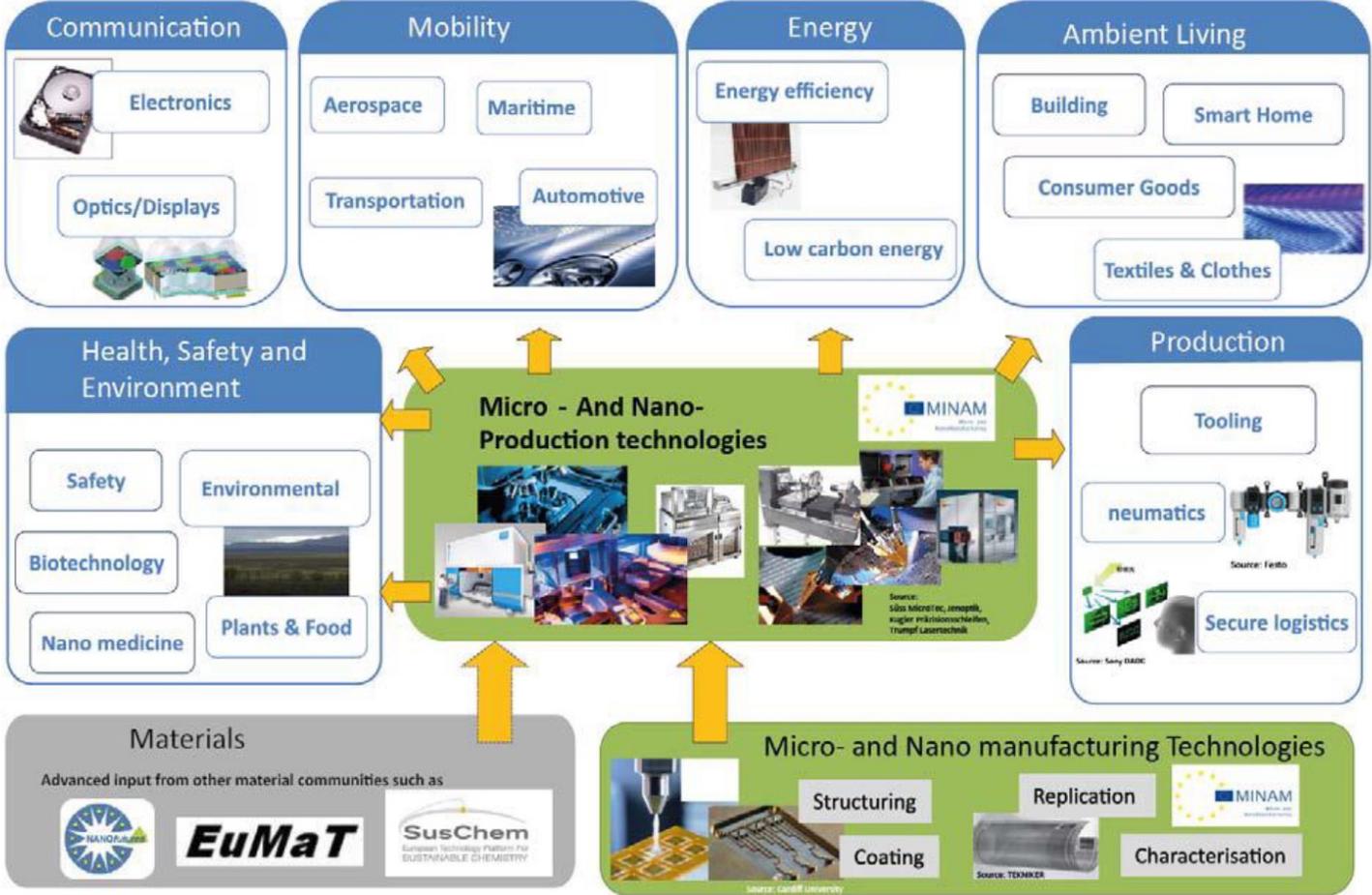
5. Oberflächenveredelung



# 3D-MID Beispiel - Lab-on-Chip



# Ausblick auf zukünftige Entwicklungen



## ■ Anwendungsbereiche für Mikro- und Nano-Fertigungstechnologien

Quelle: MINAM 2.0 (2012) Roadmap 2012: Final version; MINAM - Micro- and NanoManufacturing

# Ausblick – SWOT-Analyse

## Stärken

- Technologieviefalt und viele neue Ideen
- Technologiereife
- Etablierte Werkzeugmaschinenindustrie
- Fähigkeit bestehende Technologie an neue Produkte anzupassen
- Politische und wirtschaftliche Stabilität

## Chancen

- Aktuelle Nachfrage der Industrie
- Neue Märkte, die Mikroteile benötigen
- Infrastruktur, Integration in Prozessketten
- Standardisierung
- staatliche Initiativen und Förderungen für Mikrofertigungstechnologien

## Schwächen

- Hohe Kosten im Zusammenhang mit Mikrofertigungsanlagen
- Prozesskomplexität für die Entwicklung von 3D-Strukturen
- Arbeitskosten
- Hoher Forschungsaufwand für Design in der Fertigung

## Risiken

- Materialien (strenger geregelt in der EU)
- Materialentwicklung außerhalb der EU
- Vereinheitlichung und Standardisierung der Konzepte für die Mikrofertigung
- USA setzen Standards für Messtechnik
- Dominanz des Fernen Ostens im wichtigen Consumer Markt

## SWOT-Analyse für den Mikrofertigungsmarkt in Europa

# Wichtigste aktuelle und zukünftige Trends in der Mikrofertigung (1)

- Schlüsseltechnologie für neue Produkte
  - Fortschritt der Mikrofertigungstechnologien unterstützt Entwicklung neuer Produkte (z.B. Mikromotoren, Batterien, organische Photovoltaik, etc.)
  
- Beschleunigte Prozessentwicklung
  - Weiterentwicklung der Fertigungsprozesse durch vereinfachte Handhabung und Anwenderfreundlichkeit
  
- Simulation
  - Einführung von Simulationstools zur Produktentwicklung und Prozessplanung
  - Vorhersagen zu internen Spannungen, kritischen Geometrien etc.
  - Große Fortschritte im AM-Bereich
  
- Ersatz für Lithographieverfahren
  - Stärkerer Einsatz von Replikationsmethoden (Kostenreduktion, Zeitersparnis)

# Wichtigste aktuelle und zukünftige Trends in der Mikrofertigung (2)

## ■ Multi-Material Produkte

- Kombination der verschiedenen Materialeigenschaften
- Flexibler Einsatz verschiedener Materialkombinationen

## ■ Nano-Fertigungsprozesse

- Weitere Miniaturisierung bis in den Nanomaßstab
- Entwicklung von Prozessen für die Mikro-/Nano-montage
- Kosteneffizient und robust

## ■ Nachhaltigkeit

# Wichtigste aktuelle und zukünftige Trends in der Mikrofertigung (3)

## ■ Intelligente Fertigung

- Sensorik in der Fertigung («Industrie 4.0 Ansatz») zur Überwachung und Steuerung der Fertigungsprozesse
- Modulare Fertigungsansätze zur schnellen Adaption auf sich verändernde Anforderungen
- On- und Inline Überwachung und Steuerung der Prozesskette
- Einsatz Künstlicher Intelligenz zur Prozessoptimierung (Machine Learning und Neuronale Netzwerke)



KNMFi ist eine Hightech-Plattform zur informationsgesteuerten Strukturierung und Charakterisierung einer Vielzahl von Funktionsmaterialien auf der Mikro- und Nanoskala.

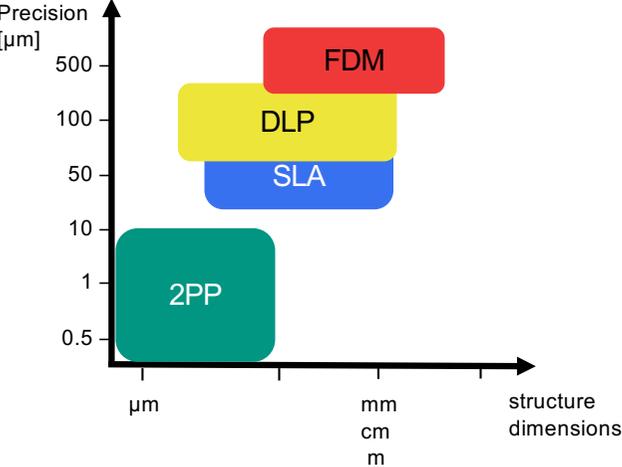
Online informieren: [www.knmf.kit.edu](http://www.knmf.kit.edu)

**Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!**



# Technology

## 2 Photon Polymerisation in comparison to other printing technologies



31