

*Brunet · Müller · Scholz*

# MIKROFERTIGUNGSTECHNOLOGIEN UND IHRE ANWENDUNGEN

*Ein theoretischer und praktischer Leitfaden*



Adrien Brunet, Tobias Müller, Steffen Scholz

## Mikrofertigungstechnologien und ihre Anwendungen

Ein theoretischer und praktischer Leitfaden





# Mikrofertigungstechnologien und ihre Anwendungen

Ein theoretischer und praktischer Leitfaden

von

Adrien Brunet, Tobias Müller, Steffen Scholz

Translated into German by Dr. Jürgen Gauss  
Translation from the English language edition:  
“Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications”  
by Irene Fassi and David Shipley  
Copyright © Springer International Publishing Switzerland 2016.  
All Rights Reserved.

This project has been funded with the support of the Lifelong Learning Programme of the European Union.  
This publication reflects the views only of the authors, and the commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.



## Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark  
of Karlsruhe Institute of Technology.  
Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2017 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISBN 978-3-7315-0604-1

DOI 10.5445/KSP/1000062009





# Vorwort

Diese Publikation ist eine Zusammenfassung der Arbeit, die von führenden Experten im Bereich Mikrofertigung im Rahmen des Leonardo da Vinci Projektes “MIMAN-T: Micro-Manufacturing Training System for SMEs” (542424-LLP-1-2013-1-IT-LEONARDO-LMP) durchgeführt wurde. Die an diesem Projekt beteiligten Partner waren: Das Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), die Universität von Nottingham, ASERM, Eurecat, und das Institute of Industrial Technologies and Automation (CNR-ITIA).

Dieses Buch beinhaltet Beiträge aus den Bereichen Mikrofertigungstechnologie und -ingenieurwesen und ergänzt die Online-Trainingplattform, die durch das MIMAN-T Konsortium entwickelt wurde. Auf dieser Plattform werden interessierten Nutzern theoretische Grundkenntnisse sowie praktische Tipps zu einigen Spitzentechnologien zur Fertigung und Vermessung von Mikrokomponenten, -geräten und -produkten vermittelt.

In der Einleitung dieses Buches werden die im Mikrobereich wirkenden physikalischen Gesetze, die durch die Verkleinerung die Materialien, Prozesse und Produktionsmethoden beeinflussen, beschrieben. Im weiteren Verlauf werden einzelne Technologien beschrieben: Mikrospritzgießen, Mikro-Additive Fertigungstechniken, Mikrobearbeitung, Mikro-EDM, Mikro-Wasserstrahltechnik und Mikromontage. Jedes Kapitel enthält dabei Erklärungen zu physikalischen Grundlagen, Materialien, Design und Simulation sowie eingesetzten Werkzeugen und Maschinen, Anwendungsgebieten und möglichen Marktsektoren.

Ein Kapitel ist speziell den sogenannten Moulded Interconnected Devices gewidmet, ein weiteres beschäftigt sich mit den speziellen Anforderungen, die sich bei der effektiven Vermessung der Oberflächentopographie und Geometrie von Mikrokomponenten ergeben. Dabei werden stets Beispiele gegeben, um den Leser im Lernprozess zu unterstützen.

Zum Abschluss wird im letzten Kapitel ein Ausblick auf künftige Entwicklungen im Bereich der Mikrofertigung gegeben sowie Hilfestellungen für eine erfolgreiche Marktanalyse und Entwicklung von Geschäftsmodellen beschrieben.

Dieses Buch richtet sich vorrangig an Techniker und zukünftige Fachkräfte, die in diesem Gebiet tätig werden. Es soll als effektives Werkzeug dienen, dass dazu führt, dass wissenschaftliche Entwicklungen in konkrete industrielle Vorteile umgesetzt werden können.

Wir hoffen, dass wir mit diesem Buch dieses Ziel erreicht haben.

*Irene Fassi, David Shipley*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>i</b>
<b>1 Einführung in die Miniaturisierung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Einführung.....	1
1.2 Skalierungsgesetze.....	2
1.2.1 Geometrie.....	3
1.2.2 Mechanik.....	4
1.2.3 Dynamik.....	5
1.2.4 Mikrofluidik.....	6
1.2.5 Van-der-Waals-Kräfte.....	8
1.2.6 Elektromagnetismus.....	9
1.2.7 Thermodynamik.....	11
1.2.8 Skalierung der Abstände.....	11
1.2.9 Skalierungsexponent.....	13
1.3 Materialien.....	14
1.3.1 Intelligente Materialien.....	15
1.4 Mikro-Fabriken.....	19
1.5 Referenzen.....	24
<b>2 Mikrospritzgießen</b> .....	<b>27</b>
2.1 Überblick.....	27
2.1.1 Technische Beschreibung.....	27
2.1.2 Definition der Technologie.....	29
2.2 Materialien.....	30
2.3 Design und Simulation.....	31
2.3.1 Charakterisierung – Mikrorheologie.....	31
2.3.2 Rheologische Simulation.....	32
2.3.3 Schlussfolgerungen.....	34
2.4 Prozess und Materialien.....	35
2.4.1 Prinzipien des Spritzgießverfahrens.....	35
2.4.2 Hauptmerkmale.....	38
2.4.3 Dosierung (Beladung).....	39
2.4.4 Einspritzgeschwindigkeit.....	41
2.4.5 Einspritzdruck.....	41
2.4.6 Haltedruck.....	42
2.4.7 Druckhaltezeit.....	42
2.4.8 Kühlzeit.....	43

2.4.9	Prozesstemperaturen in der Form, Ausdehnung und Gleichgewicht.....	43
2.4.10	Entlüftung der Gießform .....	47
2.5	Werkzeuge und Maschinen .....	50
2.5.1	Die Spritzgießmaschine .....	50
2.5.2	Plastifiziersysteme .....	52
2.5.3	Mikrospritzgießsystem ohne Plastifizierung.....	54
2.5.4	Die wichtigsten Mikrospritzgießmaschinen.....	56
2.5.5	Mikrospritzformen .....	56
2.6	Branchen und Anwendungen .....	60
2.7	Handhabung und Prüfung von Mikroteilen .....	65
2.7.1	Handhabung .....	65
2.7.2	Inspektion.....	66
2.7.3	Morphologische Analyse .....	68
2.7.4	Mechanische Analyse .....	69
2.8	Anwendungsfall: Mikrofilter .....	69
2.8.1	Beschreibung.....	69
2.8.2	Mikrofilter-Design-Analyse (FEM/CAE).....	70
2.8.3	Mikrospritzgießen-Prozesssimulation .....	71
2.8.4	Design und Herstellung der Form .....	73
2.9	Prozessoptimierung und Teilefertigung.....	74
2.10	Referenzen.....	75
<b>3</b>	<b>Mikro-Additive Fertigungstechniken .....</b>	<b>77</b>
3.1	Überblick.....	77
3.2	Mikro-Stereolithographie (MSL) und Zwei-Photonen-Polymerisation (2PP) .....	79
3.2.1	Arbeitsweise.....	79
3.2.2	Technologieübersicht und Systeme.....	82
3.2.3	Materialien .....	84
3.2.4	Anwendungen .....	85
3.3	Pulverbett-Fusionstechniken .....	87
3.3.1	Arbeitsweise.....	87
3.3.2	Technologieübersicht und Systeme.....	88
3.3.3	Maschinen und Materialien.....	89
3.3.4	Anwendungen (Tabelle 3.3).....	91
3.4	Dreidimensionales Printing über Binder-Jetting .....	92
3.4.1	Arbeitsweise.....	92
3.4.2	Technologieübersicht und Systeme.....	93
3.4.3	Maschinen und Materialien.....	95
3.4.4	Anwendungen .....	96
3.5	Dreidimensionales Printing über Material-Jetting.....	96
3.5.1	Arbeitsweise.....	96



---

3.5.2	Technologieübersicht und Systeme .....	98
3.5.3	Maschinen und Materialien .....	99
3.5.4	Materialien: .....	100
3.5.5	Anwendungen.....	101
3.6	Filament-Deposition .....	102
3.6.1	Arbeitsweise .....	102
3.6.2	Technologieübersicht und Systeme .....	103
3.6.3	Maschinen und Materialien .....	104
3.6.4	Anwendungen.....	107
3.7	Referenzen .....	107
<b>4</b>	<b>Fertigungstechnologie: Mikrobearbeitung .....</b>	<b>111</b>
4.1	Überblick .....	111
4.1.1	Warum Mikrobearbeitung?.....	111
4.1.2	Definitionen.....	112
4.2	Technische Materialien und Materialeigenschaften.....	114
4.2.1	Elastisches und plastisches Materialverhalten .....	114
4.2.2	Versagen der Materialien .....	116
4.3	Design und Simulation .....	119
4.3.1	Einführung.....	119
4.3.2	Welche Gründe sprechen für die Simulation des Mikroschneidens? .....	119
4.3.3	Mikrobearbeitung gegenüber konventioneller Bearbeitung .....	122
4.3.4	Modellierung der Mikrobearbeitung.....	123
4.3.5	Mechanistische Modellierung des Mikroschneidverfahrens .....	124
4.3.6	Finite-Elemente-Analyse (FEA).....	124
4.3.7	Molekulardynamik-Modellierungsansatz .....	126
4.3.8	Multiskalen-Simulationsmethoden .....	126
4.3.9	Voraussichtliche Kosten .....	127
4.4	Verfahren, Werkzeuge und Maschinen.....	127
4.4.1	Verfahren.....	127
4.4.2	Mikrowerkzeuge.....	133
4.4.3	Werkzeugmaschinen.....	136
4.4.4	Messsysteme.....	139
4.5	Branchen und Anwendungen .....	142
4.5.1	Industriebranchen und Anwendungsbereiche .....	143
4.6	Referenzen .....	144
<b>5</b>	<b>Mikrowasserstrahltechnik .....</b>	<b>147</b>
5.1	Einführung in die Wasserstrahltechnik .....	147
5.2	Erzeugung eines hochenergetischen Flüssigkeitsstrahls.....	148
5.2.1	Hochdruckpumpe .....	149

5.2.2	Hochdruckkreislauf.....	150
5.2.3	Handlingsysteme und Haltevorrichtungen .....	150
5.2.4	Energieumwandlung .....	151
5.2.5	Bearbeitungsmechanismen und Schneidköpfe .....	153
5.2.6	Beschickungssystem für Schleifmittel .....	153
5.2.7	Fangeinrichtung .....	154
5.3	Qualitätsbewertung für AWJ.....	155
5.3.1	Beschreibung der Bearbeitungsfehler .....	156
5.3.2	Methoden zur Fehlerreduzierung .....	157
5.4	Mikro-AWJ-Technologie .....	159
5.5	Wesentliche Merkmale des Mikro-AWJ .....	160
5.5.1	Erforderliche Eigenschaften für Mikro-AWJ.....	162
5.6	Mikro-AWJ Fallstudien.....	163
5.6.1	Präzision durch Fehlerkompensation .....	163
5.6.2	Feinheiten beim Bohren und Bearbeitung dünner Wände.....	164
5.6.3	Inhomogene Materialien .....	164
5.7	Referenzen.....	166
<b>6</b>	<b>Mikrofunkenerosion (<math>\mu</math>EDM) .....</b>	<b>167</b>
6.1	Prinzip der Funkenerosion (EDM) .....	167
6.2	Mikro-EDM-Prozessparameter .....	169
6.3	Durchführung des Mikro-EDM-Verfahrens: Qualitätsindizes .....	172
6.3.1	Optimierung des Mikro-EDM-FräSENS über Design of Experiment (DoE).....	174
6.3.2	Überwachung zur Bewertung der Mikro-EDM-Performance .....	175
6.3.3	Werkzeugverschleiß und Werkzeugbahn: Wie man Oberflächen- und Profilgenauigkeit in Mikro-EDM-Strukturen erhält.....	177
6.3.4	Hohlräume mit hohen Seitenverhältnissen: Die Rolle des Werkzeugverschleißes und der dielektrischen Spülung .....	179
6.4	Materialien und Auswirkungen auf den Mikro-EDM-Prozess.....	180
6.5	Anwendungen.....	182
6.5.1	Geradverzahnte Mikro-Kegelradgetriebe.....	182
6.5.2	Maßgeschneiderte interne Fixationsvorrichtungen für die orthopädische Chirurgie .....	184
6.5.3	Kombinierte Ansätze für Micro-EDM-FräSEN/Senkerodieren: Mikrofilterform .....	188
6.6	Referenzen.....	192
<b>7</b>	<b>Moulded Interconnect Devices .....</b>	<b>195</b>
7.1	Übersicht - Moulded Interconnect Devices .....	195
7.2	Materialien .....	197

---

7.2.1	Einführung.....	197
7.2.2	Anforderungen an das Substratmaterial.....	198
7.2.3	Typische MID-Materialien.....	199
7.3	Prozesse.....	200
7.3.1	Überblick.....	200
7.3.2	Zwei-Komponenten-Spritzgießverfahren.....	201
7.3.3	Laserdirektstrukturierung (LDS).....	205
7.3.4	Heißprägen.....	208
7.3.5	Aerosol-Jet-Printing.....	210
7.3.6	Vorteile und Herausforderungen jeder Technologie.....	212
7.4	Bestückung von MID-Bauteilen.....	213
7.4.1	Montagetechniken.....	213
7.4.2	Positionierung.....	214
7.4.3	Herausforderungen.....	214
7.5	Branchen und Anwendungen.....	215
7.6	Anwendungsbeispiel.....	216
7.7	Referenzen.....	218
<b>8</b>	<b>Geometrievermessung im Mikrobereich.....</b>	<b>221</b>
8.1	Einführung.....	221
8.2	Kontakttechniken.....	221
8.2.1	Tastschnittgeräte.....	222
8.2.2	Mikro-Koordinatenmessgeräte.....	223
8.3	Berührungslose Techniken.....	229
8.3.1	Mikroskopie mit Fokusvariation.....	229
8.3.2	Kohärenz-Scanning-Interferometrie.....	230
8.3.3	Konfokalmikroskopie.....	232
8.3.4	Laser-Triangulation.....	235
8.3.5	Mikrostreifenprojektion.....	236
8.4	Tomographische Verfahren.....	238
8.4.1	Optische Kohärenztomographie.....	238
8.4.2	Röntgencomputertomographie.....	241
8.5	Referenzen.....	243
<b>9</b>	<b>Mikromontage.....</b>	<b>251</b>
9.1	Einführung.....	251
9.2	Herstellung von Hybrid-Mikrosystemen.....	251
9.3	Definition der Mikromontage.....	253
9.4	Mikromontage Methoden.....	254
9.4.1	Klassifizierung.....	254
9.4.2	Roboter-Mikromontage.....	257

9.4.3	Selbstmontage .....	258
9.4.4	Vergleich von Roboter-Mikromontage und Selbstmontage .....	260
9.4.5	Hybrid-Mikromontage .....	260
9.5	Roboter für die Mikromontage .....	261
9.5.1	Definition .....	262
9.5.2	Klassifizierung .....	262
9.5.3	Designüberlegungen .....	264
9.5.4	Beispiele von Robotern für die Mikromontage .....	265
9.6	Mikromanipulationssysteme .....	268
9.6.1	Probleme bei der Mikromanipulation .....	269
9.6.2	Mikromanipulationsstrategien .....	269
9.6.3	Freigabestrategien .....	274
9.7	Sensoren und Steuerungsverfahren für die Mikromontage .....	277
9.7.1	Sichtsystem .....	277
9.7.2	Kraftmessung .....	280
9.7.3	Umweltbedingungen bei der Mikromontage .....	282
9.8	Eine Fallstudie: die ITIA Mikromontage-Arbeitszelle .....	284
9.9	Referenzen .....	288
<b>10</b>	<b>Marktanalyse, technologische Zukunftsforschung und Geschäftsmodelle für die Mikrofertigung .....</b>	<b>297</b>
10.1	Einführung .....	297
10.2	Marktanalyse für die Mikrofertigung .....	298
10.2.1	Business-Treiber und Marktanforderungen .....	298
10.2.2	Hauptanwendungsgebiete .....	300
10.2.3	Wichtige Akteure .....	304
10.2.4	Stärken, Schwächen, Chancen, Risiken .....	305
10.3	Die Zukunft des Mikrofertigungsmarktes und technologische Zukunftsforschung .....	307
10.3.1	Markttrends .....	308
10.3.2	Zukunftsbranchen .....	309
10.3.3	Zukünftige Anwendungen und Technologien .....	311
10.4	Geschäftsmodelle für die Mikrofertigung .....	314
10.4.1	Was ist ein Geschäftsmodell? .....	314
10.4.2	Innovative Geschäftsmodelle .....	319
10.4.3	Aktuelle Geschäftsmodelle für die Mikrofertigung .....	320
10.4.4	Innovative Geschäftsmodelle für die Mikrofertigung .....	323
10.5	Referenzen .....	330

# 1 Einführung in die Miniaturisierung

**Claudia Pagano and Irene Fassi**

ITIA-CNR, Institute of Industrial Technology and Automation,  
National Research Council, Italy

## 1.1 Einführung

Die Miniaturisierung von Systemen und Geräten ist ein Trend, der vor ein paar Jahrzehnten begann und der für unseren Alltag immer wichtiger wird. Miniaturisierte Geräte und Komponenten werden in einer ständig wachsenden Zahl von Anwendungen eingesetzt; nicht nur in Elektronikgeräten wie Smartphones, Laptops, Sensoren in Fahrzeugen und Haushaltsgegenständen, sondern auch in biologischen Sonden, medizinischen Geräten und militärischen Systemen. Viele Ziele, die Feynman bereits 1959 in seiner Zukunftsvision aufgeführt hat, wurden inzwischen realisiert und wichtige Erkenntnisse wurden gewonnen [1]. Von Anfang an war jedoch klar, dass die Miniaturisierung einfach über das Downscaling bzw. die Verkleinerung von Systemen und Technologien nicht funktionieren würde.

Das Konzept der Mikrofertigung entwickelte sich als direkte Folge nicht konventioneller Fertigungstechnologien. Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) entwickelten sich aus der Elektronik; dabei nutzen die Hersteller vor allem Herstellungstechnologien für integrierte Schaltungen (IC). Dies ermöglichte die Batch-Verarbeitung der Teile, beschränkte jedoch das Spektrum der Materialien auf Halbleitern, beispielsweise Silizium. Außerdem war die Herstellung von Teilen mit hohen Seitenverhältnissen und 3D-Komponenten mit IC-Herstellungstechnologien äußerst schwierig oder gar unmöglich. Für die Herstellung komplexerer Geometrien entwickelten sich deshalb mehrere technische Bereiche [2]. Materialwissenschaftler erforschten innovative und hochleistungsfähige Materialien, die für die Massenproduktion miniaturisierter Teile geeignet waren; Ingenieure untersuchten neue Technologien für die Produktion preiswerter und hochentwickelter Geräte und Physiker studierten die Mechanik miniaturisierter Systeme. Dann wurden herkömmliche Fertigungstechnologien angepasst und neue Technologien entwickelt, so dass die Mikrofertigung nun in zwei Hauptkategorien unterteilt werden kann: MEMS-Fertigung und nicht-MEMS-Fertigung. Erstere wird eingesetzt für Silizium-basierte Technologien, wie Photolithographie, chemisches Ätzen, Galvanisieren, LIGA, Laserablation, usw. Letztere bezieht sich auf die Verwendung einer größeren Vielfalt von Materialien und Geometrien; sie umfasst mikromechanisches Schneiden, Laserschneiden/Strukturierung/Bohren, mikro-elektro-erosive Bearbeitung, fokussierte

Ionenstrahlbearbeitung, Mikroprägung, Mikrospritzgießen, Mikroextrusion, Mikrostanzen, etc. Konventionelle Technologien mussten überarbeitet werden, um Probleme aufgrund der reduzierten Abmessungen der Komponenten und Werkzeuge zu überwinden. In einigen Bearbeitungsbereichen können Fixierungsprobleme auftreten, traditionelle Toleranzen können die Spezifikationen möglicherweise nicht erfüllen; Klebprobleme treten während der Manipulation auf, sowohl in der Fertigung und Montage; außerdem können Restspannungen auch die Funktionalität der Teile beeinträchtigen.

Ziel dieses ersten Kapitels ist es, die wichtigsten physikalischen Phänomene im Zusammenhang mit der Miniaturisierung in Bezug auf die Skalierungsgesetze, Kräfte, Materialien, Verfahren und Produktionssysteme zu überprüfen.

## 1.2 Skalierungsgesetze

Im Mikrobereich gewinnen einige physikalische Phänomene, die früher als vernachlässigbar angesehen wurden, an Bedeutung. Die Skalierungsgesetze helfen, diese Phänomene zu erklären. Die Skalierungsgesetze setzen die Parameter der Systeme (z.B. die Oberfläche) in Beziehung mit ihrer Längenskala; die Oberfläche ist in der Tat proportional zur Länge im Quadrat. Wenn daher die Länge um drei Größenordnungen abnimmt (von Meter auf Millimeter), verringert sich die Oberfläche um sechs Größenordnungen und ihr Beitrag kann an Wichtigkeit verlieren. Jeder Ingenieur, der das Ziel hat, Mikrosysteme zu entwickeln, sollte die Skalierungsgesetze berücksichtigen und vorhersagen, ob ein Downscaling möglich und sinnvoll ist.

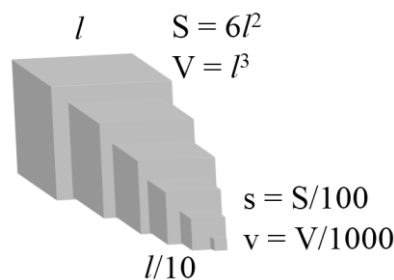


Abbildung 1.1: Auswirkung der Miniaturisierung auf Oberfläche und Volumen

Wird ein System isomorph in der Größe reduziert (d.h. alle Abmessungen des Systems werden gleichmäßig verkleinert), dann ändert sich das Verhältnis des Volumens zur Oberfläche. Da das Volumen proportional zur Länge hoch drei ist und zur Oberfläche hoch

zwei, nimmt das Volumen tatsächlich schneller ab, als die Oberfläche (Abbildung 1.1). Aus diesem Grund werden physikalische Phänomene im Zusammenhang mit dem Volumen (z.B. Gewicht) auf der Mikroskala an Bedeutung verlieren, während Oberflächenphänomene das physikalische Verhalten des Systems stark beeinflussen. Dies erklärt, weshalb die Flüssigkeit in einem Wasserglas einfacher auszugießen ist, als aus einem Kapillarröhrchen; tatsächlich ist dies auf die höhere Oberflächenspannung in einem Kapillarröhrchen als in einem viel größeren Wasserglas zurückzuführen aufgrund der kleineren Abmessung des Röhrchens. Weitere Details finden Sie in Abschnitt 1.2.4.

Die Skalierungsgesetze erlauben es, die Auswirkungen zu verstehen und vorherzusagen, die auf makroskopischer Ebene vernachlässigbar sind, im Mikrometermaßstab jedoch wichtig geworden sind, und umgekehrt. Die Auswirkungen beziehen sich auf die Skalierung der Größe eines Systems und seines phänomenologischen Verhaltens, und sie können auf jeden physikalischen Bereich angewendet werden. In den folgenden Abschnitten werden einige relevante Skalierungsgesetze untersucht und einige praktische Beispiele aufgezeigt [3].

### 1.2.1 Geometrie

Die Skalierung eines Systems kann sein:

- isometrisch, wenn alle Elemente in der gleichen Weise skaliert werden, so dass die Geometrie des Systems aufrechterhalten wird
- allometrisch, wenn verschiedene Elemente des Systems auf unterschiedliche Weise skaliert werden

Die geometrische Skalierung ist sehr einfach und da  $l$  (die Längenskala) vorgegeben ist, folgt sie folgenden Gesetzen:

- Umfang ( $P$ )  $\propto l$
- Fläche ( $A$ )  $\propto l^2$
- Volumen ( $V$ )  $\propto l^3$

Abbildung 1.2 zeigt den Nachweis des Satzes des Pythagoras unter Verwendung des Skalierungsgesetzes.  $ABC$  ist ein rechtwinkliges Dreieck und  $CD$  ist die Normale zur Hypotenuse  $AB$ . Die Dreiecke  $\triangle ABC$ ,  $\triangle ACD$  und  $\triangle BCD$  sind ähnlich, damit sind ihre Flächen proportional zum Quadrat einer charakteristischen Länge, wie den Hypotenusen. Somit wird die Fläche  $\triangle ABC = \lambda AB^2$ , die Fläche  $\triangle ACD = \lambda AC^2$  und die Fläche  $\triangle BCD = \lambda CB^2$ , wobei  $\lambda$  eine Proportionalitätskonstante ist, die aus einfachen trigonometrischen Formeln zeigen kann, dass sie für alle Dreiecke gleich ist. Da

$$\text{die Fläche } \triangle ACD + \text{ die Fläche } \triangle BCD = \text{Fläche } \triangle ABC$$

$$\lambda AC^2 + \lambda BC^2 = \lambda AB^2$$

bedeutet dies, dass nach dem Satz des Pythagoras  $AC^2 + BC^2 = AB^2$

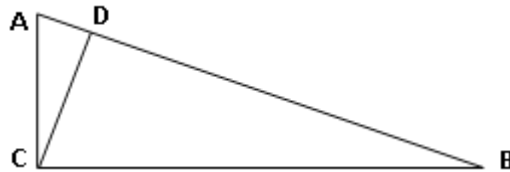


Abbildung 1.2: Nachweis des Satzes des Pythagoras unter Verwendung des Skalierungsgesetzes.

## 1.2.2 Mechanik

Lassen Sie uns ein einfaches System anschauen, beispielsweise einen Tragbalken mit einer Länge  $L$ , Breite  $W$  und Dicke  $t$ . Wird eine Kraft  $F$  entlang der Richtung  $-y$  an das freie Ende des Balkens angelegt, so ergibt sich eine Durchbiegung am gleichen Ende,  $\delta$ , entlang der gleichen Richtung von  $F$ . Die Steifigkeit des Balkens  $k$  ist gleich dem Verhältnis von  $F$  zu  $\delta$  und  $\delta$  wird einfach wie folgt berechnet:

$$\delta = \frac{(FL^3)}{(3EI)}$$

wobei:

$E$  = Youngsches Elastizitätsmodul

$I$  = Trägheitsmoment des Querschnitts des Balkens um seine neutrale Achse =  $(1/12)wt^3$

Daher,

$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{3EI}{L^3} = \frac{Ewt^3}{4L^3}$$

Deshalb wird im Falle einer isometrischen Skala des Systems die Steifigkeit eines Auslegerbalkens wie die Längenskala ( $l$ ) des Balkens skaliert:  $k \propto l$ .

Die Steifigkeit des Balkens unter seinem Eigengewicht kann berechnet werden, vorausgesetzt die Kraft ist proportional zu seinem Gewicht. So skaliert  $F$  als  $l^3$ ,  $k$  skaliert als  $l$  und damit ist die Durchbiegung  $\delta$  proportional zu  $l^2$ . Somit führt die Schrumpfung des Balkens zu einer Erhöhung der Steifigkeit.



Daher können im Mikromaßstab dünnere und weniger voluminöse Strukturen oder schwächere Materialien verwendet werden.

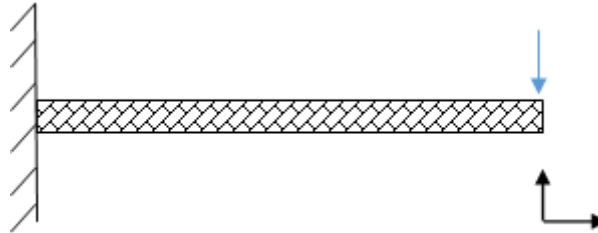


Abbildung 1.3: Tragbalken

### 1.2.3 Dynamik

Die erste Resonanzfrequenz des Balkens ( $\omega$ ) in Abbildung 1.3 kann wie folgt geschrieben werden:

$$\omega = \frac{22,4}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

wobei:

$A$  = Fläche des Querschnitts

$\rho$  = Dichte des Materials

Daher erhöht sich die Eigenfrequenz beim Downscaling des Systems. Geringe Interferenzen und eine niedrige Reaktionszeit werden im Mikrobereich erwartet.

Massenträgheitsmomente skalieren als  $l^5$ , wobei die Masse ( $\propto l^3$ ) mal die Dimension im Quadrat ist, so dass sie im Mikromaßstab sehr klein wird und nahezu den sofortigen Start und Stopp von Mikrorobotern ermöglicht.

Die Trägheitskräfte skalieren als  $l^3$ , da sie die Masse mal die Beschleunigung sind, so dass sie auf der Mikroskala oft vernachlässigt werden können.

Energie und Arbeit skalieren als  $l^4$ , da sie das Ergebnis von Kraft mal Verschiebung sind.

## 1.2.4 Mikrofluidik

Die Oberflächenspannung ( $F_\gamma$ ) wird auf der Mikroskala vorherrschend sein, da sie als 1 skaliert, während, wie bereits gesehen, die volumenbezogenen Kräfte als  $l^3$  skalieren. Dies kann leicht durch das klassische Beispiel in Abbildung 1.4 veranschaulicht werden: die Höhe,  $h$ , der Flüssigkeit in dem kreisförmigen Rohr mit dem Radius  $r$  kann durch das Gleichgewicht zwischen den konkurrierenden Wirkungen der Oberflächenspannung  $F_\gamma$  und der Gravitationskraft  $F_g$  berechnet werden:

$$F_\gamma = F_g$$

$$F_\gamma = 2 \pi r \gamma \cos\theta$$

$$F_g = \rho g \pi r^2 h$$

wobei:

$\rho$  = Flüssigkeitsdichte

$\gamma$  = Koeffizient der Oberflächenspannung

Wird daher die Länge  $l$  um den Faktor 10 verkleinert, verringert sich auch die wirkende Schwerkraft ( $F_g$ ) um den Faktor  $10^3$ ; die Oberflächenspannung  $F_\gamma$  verringert sich hingegen nur um den Faktor 10 und fällt somit stärker ins Gewicht.

Ähnliche Effekte können beobachtet werden, wenn sich ein System in einer Flüssigkeit (beispielsweise Luft) bewegt. Wenn wir uns nicht in einem Vakuumzustand befinden, ist dies immer der Fall. Wenn sich ein Körper in einer Flüssigkeit bewegt, erfährt er den viskosen Widerstand, den die Flüssigkeit ausübt. Diese Kraft begrenzt seine Endgeschwindigkeit ( $v_{\text{lim}}$ ), die für ein kugelförmiges Objekt mit einem Radius ( $r$ ) wie folgt geschrieben werden kann:

$$v_{\text{lim}} \propto \frac{2gr^2\rho}{9\eta} \propto l^2$$

Dabei sind  $\rho$  und  $\eta$  die Dichte und Viskosität der Flüssigkeit. Daher wird  $v_{\text{lim}}$  für Mikroobjekte sehr klein und dies erklärt, warum z.B. fliegende Mikroroboter nicht sehr schnell fliegen können. Allerdings haben sie im Vergleich mit einem Roboter im Makrobereich eine größere Chance zu überleben, wenn sie abstürzen/fallen sollten.

Die Miniaturisierung von Fluidikvorrichtungen bietet den Vorteil, dass man geringere Probenmengen verwenden kann und weniger Platz benötigt. Allerdings kann die volumet-

rische Strömungsrate ( $Q$ ) nach der Hagen-Poiseuille-Gleichung wie folgt geschrieben werden:

$$Q = \frac{(\pi r^4 \Delta p)}{8 \eta L}$$

Dabei sind  $r$  und  $L$  der Radius und die Länge des Kanals,  $\Delta p$  ist der Druckabfall und  $\eta$  die Viskosität der Flüssigkeit. Daher ist für einen gegebenen Druckabfall  $Q$  proportional zu  $l^4$  und eine drastische Reduzierung des Volumenstroms wird aufgrund der Miniaturisierung beobachtet; für einen gegebenen Volumenstrom ist der Druckabfall  $\Delta p \propto l^4$ , der sich damit dramatisch erhöht.

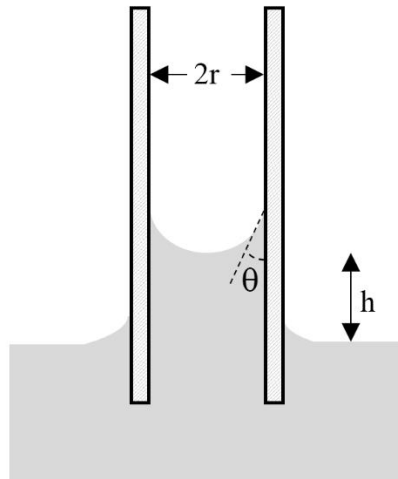


Abbildung 1.4: Kapillarröhrchen in einer Flüssigkeit

Darüber hinaus wird der Fluidstrom in mikrogroßen Kanälen weniger turbulent, da die Reynolds-Zahl ( $Re$ ) sehr niedrig wird:

$$Re \propto \frac{vd\rho}{\eta}$$

wobei  $\rho$  und  $\eta$ , wie oben, die Dichte und Viskosität der Flüssigkeit sind,  $d$  der Durchmesser des Kanals und  $v$  die Geschwindigkeit der Flüssigkeit. Daher skaliert  $Re$  als  $l$  und nimmt ab, wenn der Kanalabschnitt abnimmt. Der Übergang zwischen laminarer und turbulenter Strömung tritt auf, wenn  $Re \approx 10^3$ . Die nahezu laminare Strömung, zu der geraden Mikrokanälen führen, verursacht Schwierigkeiten beim Mischen von Flüssigkei-

ten; deshalb sind serpentinartige Mikrokanäle in miniaturisierten Fluidik-Systemen wie Lab-on-Chip (LoC) erforderlich [4].

## 1.2.5 Van-der-Waals-Kräfte

Abbildung 1.5 zeigt das bekannte Diagramm der Kräfte in Abhängigkeit von der Anlagengröße. Sie werden berechnet unter der Annahme, dass eine Siliziumkugel von einem Greifer mit flachen Backenoberflächen aufgenommen wird [5]. Wie bereits erwähnt, wird die Schwerkraft schnell unbedeutend, sobald die Objektgröße reduziert wird, während die oberflächlichen Kräfte, wie Oberflächenspannung und auch van-der-Waals-Kräfte, die vorherrschenden Kräfte sind, die auch auf der Makroskala immer vorhanden sind, aber aufgrund der Anwesenheit höherer Kräfte normalerweise vernachlässigt werden.

Van-der-Waals-Kräfte beruhen auf drei anziehend wirkenden Faktoren: die Ausrichtung oder Keesom-Wechselwirkung, die Induktion oder Debye-Wechselwirkung und die Dispersion oder London-Wechselwirkung; darüber hinaus gibt es eine abstoßende Kraft, wenn Moleküle sich annähern.

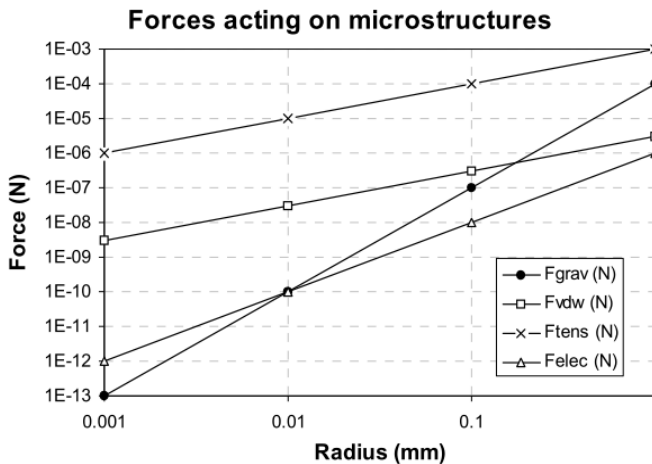


Abbildung 1.5: Kräfte im Vergleich zum Objekt

Der Orientierungseffekt (Dipol-Dipol) ist die Wechselwirkung zwischen zwei permanenten Dipolen; in einem isotropen Material, in dem alle Ausrichtungen möglich sind, wird erwartet, dass er Null ist; jedoch können die Moleküle in der Regel nicht völlig frei rotieren und einige Orientierungen werden gegenüber anderen bevorzugt, so dass es einen Beitrag gibt, der nicht gleich Null ist. Die Induktionswirkung ( permanenter Dipol-induzierter Dipol) beruht auf der Wechselwirkung zwischen einem polaren Molekül und

einem nicht-polaren Molekül. Tatsächlich tritt unter dem Einfluss eines externen elektrischen Feldes eine induzierte Polarisation für das nicht-polare Molekül auf. Wenn kein polares Molekül vorhanden ist, treten die oben erwähnten Wechselwirkungen nicht auf und nur der Dispersionseffekt (temporärer Dipol-induzierter Dipol) kann beobachtet werden. Diese Wechselwirkung ergibt sich aus einem temporären Dipol, der einen komplementären Dipol in jedem benachbarten Molekül induziert. Die Dispersionskraft ist quantenmechanischen Ursprungs. Die Dispersionskraft übersteigt im Allgemeinen die Dipol-abhängigen Induktions- und Orientierungskräfte, abgesehen von kleinen hochpolaren Molekülen, wie Wasser. Bei der Wechselwirkung zwischen zwei unterschiedlichen Molekülen, von denen eines nicht-polar ist, wird die Van-der-Waals-Energie nahezu vollständig vom Dispersionsbeitrag dominiert. Da die Dispersionskraft eine Wechselwirkung zwischen zwei induzierten fluktuierenden Dipolen ist, wird sie enorm reduziert, wenn sich Dipole in einem nennenswerten Abstand voneinander befinden (Abbildung 1.7). Tatsächlich kann die Dispersionsenergie zwischen zwei Atomen mit zunehmender Trennung noch schneller zerfallen als  $1/r^6$ , und nähert sich einer  $1/r^7$  Abhängigkeit an. Dies wird als Verzögerungswirkung bezeichnet und die Wechselwirkung als verzögerte London-Kraft.

## 1.2.6 Elektromagnetismus

Der Widerstand (R) skaliert als  $l^{-1}$ ; wenn der Widerstand (Abbildung 1.6 a) eine Länge gleich L hat, sind die Querschnittsfläche A und der spezifische Widerstand  $\rho$ :

$$R = L\rho/A \propto l^{-1}$$

Die Kapazität C eines Parallelplattenkondensators (Abbildung 1.6 b) mit Platten der Fläche A, Abstand d, und Isolator-Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  ist:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \propto l$$

Die elektrostatische Kraft zwischen den beiden Platten kann aus der potenziellen Energie gewonnen werden:

$$U = -\frac{1}{2}CV^2 = -\frac{\epsilon A}{2d}V^2 \Rightarrow F_d = -\frac{\partial U}{\partial d} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{d^2} V^2 \propto l^2$$

Dies bedeutet, wenn die Platten schrumpfen nimmt die Kraft weniger schnell ab, als die auf die Masse bezogenen Kräfte.

Aus diesem Grund kann auf der Mikroebene das Vorhandensein von Restladungen für den ordnungsgemäßen Betrieb eines Systems katastrophale Auswirkungen haben. Zur gleichen Zeit wurden, zusammen mit den Kapillarkräften (Oberflächenspannung), die elektrischen

Kräfte umfassend erforscht mit dem Ziel, sie zu reduzieren oder zu kontrollieren, um neue Betätigungs- und Manipulationsmethoden zu entwickeln (wie in Kapitel 9 beschrieben).

Schließlich ist die Induktivität ( $\lambda$ ) eines Induktors (Abbildung 1.6 c) bestehend aus  $N$ -Windungen pro Längeneinheit, jede mit einer Fläche  $A$  und einer Länge  $L$ :

$$\lambda = \frac{\mu N^2 A}{L} \propto l$$

Wobei  $\mu$  die Permeabilität des Materials zwischen den Spulen ist.

Die Skalierungsgesetze für die elektromagnetische Kraft sind komplizierter und die Ergebnisse sind abhängig von den getroffenen Annahmen. Die Kraft zwischen zwei Magnetspulen (A und B) kann wie folgt geschrieben werden:

$$F = \mu_0 J_A J_B A_A A_B$$

wobei  $\mu_0$  die Permeabilität ist,  $J$  die Stromdichte und  $A$  die Querschnittsfläche der Spule. Die Stromdichte kann vernünftigerweise als konstant angenommen werden, während die Spule schrumpft, obwohl diese Annahme eine Grenze hat aufgrund der maximalen Verlustleistung in Form von Wärme, die die Spule aushalten kann. Unter dieser Annahme  $F \propto A_A A_B \propto l^4$ . Deshalb ist die Miniaturisierung für elektromagnetische Kräfte ungünstig.

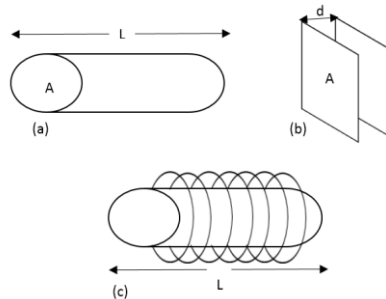


Abbildung 1.6: (a) Widerstand, (b) Kondensator und (c) Induktor

Dies ist einer der Gründe, warum die elektrische Betätigung auf der Mikroebene in viel größerem Umfang eingesetzt wird als die magnetische Betätigung; dieses Problem wird noch verstärkt durch die Schwierigkeit, Spulen mit Hilfe von Mikrofertigungsverfahren herzustellen.

## 1.2.7 Thermodynamik

Die thermische Trägheit ist ein Maß dafür, wie schnell das thermische Gleichgewicht in einem Festkörper erreicht wird. Sie ist ein wichtiger Parameter bei der Gestaltung einer thermisch betätigten Vorrichtung. Sie hängt ab von der Masse und skaliert somit als  $l^3$ . Die Wärmeleitfähigkeit von Feststoffen misst, wie schnell Wärme in einem Festkörper geleitet wird. Sie skaliert als  $l$  oder  $l^2$ , je nachdem, welches Prinzip die Wärmeübertragung dominiert, Konduktion oder Konvektion.

## 1.2.8 Skalierung der Abstände

Um kleinere und besser integrierte Vorrichtungen durch Miniaturisierung zu erhalten müssen nicht nur die Abmessungen der Objekte reduziert werden, sondern auch die Abstände zwischen den Objekten müssen verringert werden. Die Komponenten sind näher zusammen und deshalb werden Kurzstreckenkräfte oft dominant.

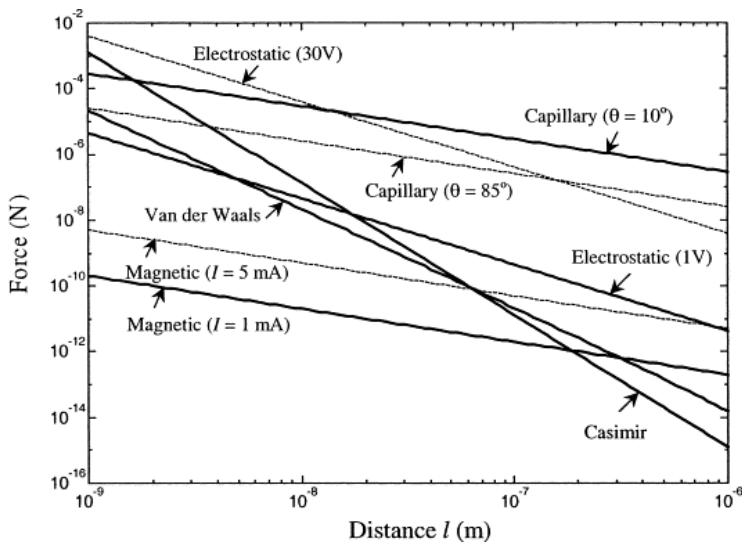


Abbildung 1.7: Kräfte im Vergleich zur Interaktionsdistanz [6]

Abbildung 1.7 zeigt eine grafische Darstellung der verschiedenen Kräfte, die zwischen einer Kugel und einer Platte wirken, im Vergleich zum Kehrwert der Entfernung [6]. Bei kürzeren Entfernungen überwinden Kurzstreckenkräfte, die in der Regel bei herkömmlichen Skalen unbedeutend sind, die anderen Kräfte: van-der-Waal-Kräfte werden signifikant und dominieren zusammen mit der Kapillarkraft. Außerdem taucht eine Kraft auf, die auf der Makroebene unbekannt ist: die Casimir-Kraft [7]. Sie erinnert uns daran, dass bei

den kleineren Maßstäben die Newtonsche Mechanik die Wechselwirkung nicht steuert und dass die Quantenmechanik besser geeignet ist.

Das Diagramm zeigt auch, dass die elektrische Kraft ( $F_e$ ) mit abnehmendem Abstand zunimmt. Tatsächlich ist nach dem Coulombschen Gesetz die elektrostatische Kraft zwischen zwei Ladungen umgekehrt proportional zum Abstand im Quadrat, also  $F_e \propto 1^2$ . Aus diesem Grund sind die elektrostatischen Kräfte in der Regel vernachlässigbar, während sie auf der Mikroebene sehr signifikant werden, und insbesondere ein Mittel zur Betätigung bereitstellen können. Tatsächlich basiert einer der am weitesten verbreiteten Aktoren für MEMS auf dem Prinzip des Kammantriebs [8]. Allerdings muss die Durchschlagsspannung bei der Konstruktion miniaturisierter elektrischer Vorrichtungen ebenfalls berücksichtigt werden. Gemäß dem Paschenschen Gesetz, dargestellt in Abbildung 1.8 [9], hängt die Durchbruchspannung stark von der Lücke zwischen den Elektroden ab. Das Paschensche Gesetz basiert auf den Townsend-Avalanche-Mechanismen für die Gasionisierung [10]; bei einem kleinen Abstand der Lücken können andere Mechanismen für die Vor-Durchschlagsspannungs-Produktion auftreten, wie Elektronen-Feldemission und Tunneling. Daher ist äußerste Vorsicht angebracht bei Lücken von weniger als  $5 \mu\text{m}$  und einige Korrekturen am linken Teil der Paschen-Kurve müssen in Betracht gezogen werden.

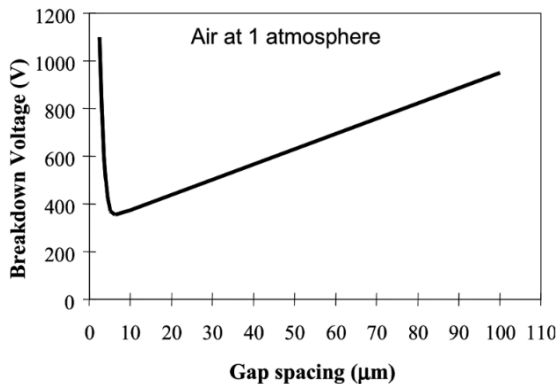


Abbildung 1.8: Paschen-Kurve [9].

Abbildung 1.8 zeigt auch, dass die van-der-Waals-Kraft vergleichbar sein kann mit der elektrostatischen Kraft im Nanometer-Abstand und dass die Magnetkraft relativ klein ist im Vergleich zu den anderen Wechselwirkungen in kurzen Abständen. Bei größerem Abstand werden sie jedoch signifikanter, wenn kapillare und van-der-Waals-Kräfte weniger wirksam sind. Je nach Art der Anwendung müssen die Konstrukteure die Auswirkung



dieser Kräfte berücksichtigen und Lösungen benennen, entweder um ihre Auswirkungen auszunutzen oder zu minimieren.

## 1.2.9 Skalierungsexponent

In Anbetracht der Tatsache, dass in einer miniaturisierten Vorrichtung sowohl die Abmessungen des Gegenstandes als auch die Abstände verkleinert werden, werden auch die Geschwindigkeit ( $v = lt^{-1}$ ) und die Beschleunigung ( $a \propto lt^{-2}$ ) skaliert und auch die wichtigsten physikalischen Größen werden gemäß Tabelle 1.1 skaliert.

Tabelle 1.1: Skalierungsexponent

$Q \propto l^n$	
Bezeichnung der Größe (Q)	n
Masse	3
Massenträgheitsmoment	5
Flächenträgheitsmoment	4
Trägheitskraft	3
Stärke	2
Eigenfrequenz	-1
Biegesteifigkeit	1
Schersteifigkeit	1
Oberflächenspannung	1
Fluidkraft	2
Reynolds-Zahl	2
Wärmekapazität	3
Widerstand Verlustleistung	1
Elektrischer Widerstand	-1
Elektrische Kapazität	1
Induktivität	1
Elektromagnetische Kraft	3
Elektrostatische Kraft	2

## 1.3 Materialien

Die Miniaturisierung hat nicht nur Einfluss auf die Wechselwirkung zwischen Körpern; ihre Auswirkungen auf die Materialeigenschaften aufgrund der diskreten inneren Struktur können ebenfalls beobachtet werden. Obwohl Materialien auf der Makroebene als homogen bezeichnet werden können, ist ihre Heterogenität auf der Mikroebene erkennbar und beeinflusst das Herstellungsverfahren. Korngrenzen sind Regionen, in denen Verlagerungen und hohe Mobilität während der Verformungstests auftreten; ihre Anwesenheit ist durch die Beobachtung mehrerer Materialeigenschaften leicht zu erkennen.

Bei Mikroproben wird entweder die Korngröße verringert oder sie enthalten Körner der gleichen Größe wie Makroproben. In beiden Fällen unterscheidet sich das Verhalten der Mikroproben wahrscheinlich von dem Verhalten massiver Werkstücke. Im letzteren Fall nimmt die interne Korngrenzenfraktion ab und dies führt zu einer Verstärkung des Materials. Wenn jedoch die Proben so klein sind, dass sie nur sehr wenige Körner enthalten, dann ist die gleichmäßige Verteilung nicht gewährleistet und eine inhomogene Verformung tritt auf. Der Extremfall ist ein Beispiel eines Einkristalls, bei dem aufgrund der Anisotropie die Eigenschaften von der Richtung der Deformation abhängen [11]. Mehrere Studien auf der Makroebene haben bewiesen, dass sich, gemäß dem Hall-Petch-Gesetz, polykristalline Materialien verstärken, wenn die Korngröße abnimmt [12,13]; allerdings wurde im Nanomaßstab ein entgegengesetztes Verhalten beobachtet [14]. Bei Mikroproben führt eine interaktive Wirkung zwischen Korngröße und Probendimension, die noch nicht vollständig verstanden wird, dazu, dass das mechanische Verhalten schwierig vorherzusagen ist [15]. Bei Keramik und anderen kerbempfindlichen Materialien führt die Volumenreduzierung zu einer höheren Bruchresistenz.

Nicht nur die mechanischen Eigenschaften, sondern auch die magnetischen Eigenschaften werden durch die Korngröße beeinflusst. Beispielsweise verschwinden bei Mikroproben aus ferromagnetischen Materialien Multi-Domänen und leichte Magnetisierung, so dass nur einzelne Domänen möglich sind [16]. Dies geschieht, wenn die Korngröße bei 10-100 nm liegt, während für kleinere Körner die Koerzitivkraft abnimmt, bis ein superparamagnetischer Zustand erreicht wird [17].

Die Probendimension beeinflusst somit die Eigenschaften des Materials und infolgedessen die Materialbearbeitung. Aufgrund der Kornabmessung können Probleme beim Materialabtrag auftreten, wie beispielsweise die Begrenzung der ungeschnittenen Mindestspandicke. Bei thermischen Prozessen, wie dem Mikro-EDM, beeinflussen die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften zwischen Korn und Korngrenze die Bearbeitungsleistungen [18]. Darüber hinaus können sich bei Anisotropie die Prozessparameter ändern und die Ergebnisse beeinflussen [19,20].

Der Miniaturisierungsprozess beeinflusst die Wahl der verwendeten Materialien. Tatsächlich hat die Mikrotechnologie ihren Ursprung in der Elektronik. So waren Halbleitermaterialien – in erster Linie Silizium – die am häufigsten verwendeten Materialien. Allerdings ist die Herstellung von Siliziumstrukturen durch die Art der Herstellungsverfahren und durch die Materialeigenschaften auf planare Strukturen begrenzt. Dank Fortschritten in den Mikrofertigungstechnologien bei traditionelleren Materialien wie Polymeren, Metallen und Keramik (die in den folgenden Kapiteln diskutiert werden) können diese nun zur Fertigung von Mikroteilen in kleinen bis großen Chargen verwendet werden. Darüber hinaus können diese Materialien eine wesentlich größere Vielfalt von Eigenschaften und Teilefunktionalitäten bieten.

Ebenso spielen anspruchsvollere Materialien, wie intelligente oder funktionalisierte Metall- oder Polymerlegierungen aufgrund der geringen Materialmenge, die benötigt wird, eine Rolle in der Mikrosystemfertigung; dies bietet neue Entwicklungsmöglichkeiten. Außerdem erfordert die Notwendigkeit der Integration mehrerer Funktionen in wenigen Komponenten die Verwendung unterschiedlicher Arten intelligenter Materialien, die in einem sehr breiten Spektrum von Anwendungsbereichen eingesetzt werden können [21].

### 1.3.1 Intelligente Materialien

Intelligentes Material wird definiert als „ein Material, das (einen) eingebaute(n) oder intrinsische(n) Sensor(en), Aktor(en) und Steuermechanismus/Steuermechanismen besitzt, so dass es in der Lage ist, einen Stimulus zu erfassen und auf ihn in einer vorbestimmten Weise und Ausmaß in kurzer/angemessener Zeit zu reagieren und in seinen ursprünglichen Zustand zurückzukehren, sobald der Stimulus verschwunden ist“ [22].

Sie können nach den Stimuli klassifiziert werden, für die sie empfindlich sind: piezoelektrische und elektrostriktive Materialien unterliegen mechanischen Veränderungen, wenn sie einer Änderung der Spannung unterzogen werden, und umgekehrt; die mechanische Veränderung der elektrostriktiven Materialien ist proportional zum Quadrat des elektrischen Feldes; magnetostriktive Materialien werden durch ein Magnetfeld aktiviert und erzeugen eine induzierte mechanische Belastung; Formgedächtnislegierungen, die einem thermischen Feld ausgesetzt werden, durchlaufen eine Phasenumwandlung, die eine Formänderung erzeugt; Lichtwellenleiter können Dehnung, Temperatur, elektromagnetische Felder, Druck und andere Größen durch Intensität, Phase, Frequenz oder Polarisation der Modulation messen [23].

#### 1.3.1.1 Piezoelektrische Materialien

Der piezoelektrische Effekt besteht in der Fähigkeit bestimmter Kristalle elektrisch polarisiert zu werden, sobald sie einer mechanischen Belastung ausgesetzt werden, wobei der Polarisationsgrad proportional zur angelegten Belastung ist. Außerdem verformen

sich diese Materialien, wenn sie einem elektrischen Feld ausgesetzt werden. Verschiedene natürliche Materialien, wie Quarz, Turmalin und Natriumkaliumtartrat, weisen aufgrund ihrer Kristallstruktur ohne Symmetriezentrum den piezoelektrischen Effekt auf. Neben diesen natürlich vorkommenden Kristallen gibt es mehrere Familien handgefertigter Keramiken, die gemeinhin unter dem Begriff PZT bekannt sind, welche diese piezoelektrische Eigenschaften aufweisen. Es handelt sich um polykristalline ferroelektrische Materialien, die aus winzigen Kristalliten bestehen. Die Moleküle dieser Materialien weisen eine Polarisierung auf; dies bedeutet, dass ein Ende eher negativ und das andere Ende positiv geladen ist, so dass ein Dipol auftritt. Dies ist ein Ergebnis der Anordnung der Atome, die das Molekül bilden [24]. Die Dipole sind nicht zufällig im gesamten Material ausgerichtet, da sie sich gegenseitig beeinflussen; benachbarte Dipole richten sich so aus, dass Regionen mit lokaler Ausrichtung gebildet werden, die wir unter dem Begriff Weiss-Domänen kennen. Deshalb gibt es innerhalb jeder Weiss-Domäne ein Netto-Dipolmoment und somit eine Netto-Polarisation (Dipolmoment pro Volumen) (Abbildung 1.9). Verschiedene Domänen weisen eine zufällig verteilte Polarisationsrichtung auf, so dass keine allgemeine Polarisierung oder piezoelektrische Effekte auftreten. Allerdings kann der piezoelektrische Effekt in jeder beliebigen Richtung durch eine Polungsbehandlung induziert werden, wodurch er bei einer bestimmten Temperatur einem starken elektrischen Feld ausgesetzt wird.



Abbildung 1.9: (a) Zufällig orientierte Weiss-Domäne-Dipole, (b) ausgerichtete Dipole nach der Polarisation durch ein elektrisches Feld.

Aufgrund des elektrischen Feldes wachsen die Domänen, die am ehesten am Feld ausgerichtet sind, auf Kosten der anderen Domänen. Als Ergebnis weist das Material eine Nettopolarisation auf und das Material wird auch in Richtung des Feldes verlängert. Diese Ausrichtung bleibt auch, wenn das Feld entfernt wird, und verleiht dem Keramikmaterial eine permanente Polarisation sowie eine permanente Verformung (d.h. es wird anisotrop). Aufgrund dieser Anisotropie ändert eine Druck- oder Zugspannung des Materials das Dipolmoment und verursacht eine Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden, so dass sich das Material wie ein Generator verhält, der mechanische Energie in elektrische Energie umwandelt. Wenn andererseits eine Spannung an die Elektroden angelegt wird, verkürzt oder verlängert sich das Material, je nach der Richtung der Spannung. In diesem Fall verhält sich die Keramik wie ein Motor, der elektrische Energie in mechanische Energie umwandelt.

### 1.3.1.2 Formgedächtnislegierungen

Formgedächtnislegierungen (FGL) sind funktionelle Materialien, die eigentümliche thermo-mechanischen Eigenschaften aufweisen, wie Formgedächtniseffekt und Superelastizität. Diese Eigenschaften sind Folge einer reversiblen, thermoelastischen, martensitischen Umwandlung, die im festen Zustand stattfindet. Sie haben die Fähigkeit durch Erwärmung ihre ursprüngliche Form wieder anzunehmen, nachdem bei niedriger Temperatur eine Verformung aufgetreten ist. Aus mikroskopischer Sicht besitzen sie zwei stabile feste kristallographische Phasen, bekannt unter den Begriffen Martensit und Austenit, und sie können reversibel von einer Kristallstruktur in eine andere umgewandelt werden [25]. Bei niedrigen Temperaturen ist die kristallografisch stabile Phase ( $M_{\text{final}}$ ) Martensit, der eine niedrig-symmetrische monokline Struktur besitzt. Austenit ist stabil bei hoher Temperatur ( $A_{\text{final}}$ ) und besitzt eine körperzentrierte symmetrische Struktur. Da die Bindungsenergien im Martensit niedrig sind, lässt sich das Material leicht verformen (Abbildung 1.10 A). Die eingebrachte Deformation bleibt auch bei Entlastung erhalten; durch Erhitzen über die Umwandlungstemperatur kann allerdings die austenitische Phase ( $A_{\text{start}}$ ) stabilisiert und die Verformung rückgängig gemacht werden. Diese Phasenumwandlung führt dazu, dass die FGL in die ursprüngliche Form zurückkehrt (Abbildung 1.10 B). Die kritischen Temperaturen, bei denen ein Übergang stattfindet, hängen nicht nur von der Zusammensetzung der Legierung ab, sondern auch von ihrer thermomechanischen Geschichte und der aufgebrachten Last. Wenn eine FGL von der hohen Austenit-Temperatur abkühlt (Abbildung 1.10 C), erfährt das Material eine Martensitumwandlung (von  $M_{\text{start}}$  zu  $M_{\text{final}}$ ). Dieser Zyklus kann millionenfach wiederholt werden; wird dabei die Belastung nicht entfernt, verhalten sich Formgedächtnislegierungen allerdings anders. Da die martensitische Phase eine starke Abhängigkeit der internen Reibungskräfte von der Amplitude zeigen, haben FGL ein hohes Dämpfungsvermögen.

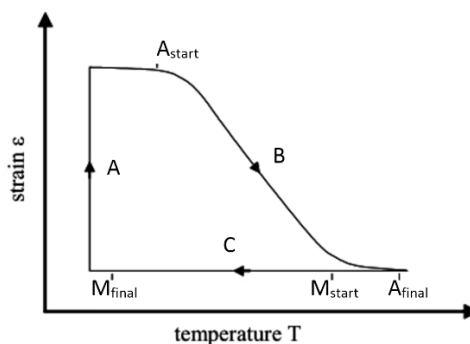


Abbildung 1.10: Formgedächtniseffekt.

Aufgrund ihrer Phasenumwandlung oberhalb einer bestimmten Temperatur können FGL auch als Sensoren verwendet werden. Allerdings können sie sehr gute Aktoren sein, da sie während der Phasenumwandlung mechanische Arbeit verrichten. Sie müssen einige "Trainings"-Zyklen durchlaufen, um eine hohe Reproduzierbarkeit zu erreichen, wenn sie in Funktion sind; ihre Form, thermomechanische Behandlung und die einwirkende Last definieren die Kraft und die Verschiebung, die während des Betriebs erzeugt werden. Zu den Vorteilen gegenüber anderen Betätigungsmethoden gehören die große Verschiebe- und Betätigungskraft in einem extrem kleinen Hüllvolumen und bei niedriger Betriebsspannung. Die Tatsache, dass man sich nicht auf bewegliche Teile für die Betätigung verlassen muss, macht die FGL äußerst attraktiv für Anwendungen, die einen geringen oder keinen Geräuschpegel verlangen. Durch die Kombination dieser Vorteile, zusammen mit der Einfachheit des Mechanismus, Sauberkeit, leise Betätigung, Fernbedienbarkeit und niedrige Antriebsspannung, sind FGL ideal für die Betätigung von Mini-Micro-Devices in einer Vielzahl von Anwendungen [26].

Allerdings wird ihre Verwendung durch einige Probleme eingeschränkt, wie zum Beispiel das geringe dynamische Zeitverhalten und die große Hysterese [27].

### 1.3.1.3 Elektroaktive Polymere

Aktive Polymere können andere Formen der Energie, z.B. elektrische, elektromagnetische, chemische oder photonische Energie in mechanische Energie umwandeln. Je nach Stimulus, auf den die Polymere reagieren, können sie in zwei große Kategorien eingeteilt werden: nicht elektrisch verformbare Polymere (betätigt durch nicht elektrische Stimuli wie Variation von pH, Licht, Temperatur, Magnetfeld, usw.) und elektroaktive Polymere (EAP), ausgelöst durch elektrische Inputs. Polymere haben den großen Vorteil, dass sie leicht, kostengünstig, bruchtolerant, biegsam und leicht zu verarbeiten und herzustellen sind. Daher können sie in komplexe Formen gebracht und ihre Eigenschaften können je nach Bedarf angepasst werden [28]. Aufgrund ihrer Verfügbarkeit und Fortschritte in den Kontrollsystemen gilt die elektrische Stimulation als die vielversprechendste Betätigung. Elektroaktive Polymere können unterteilt werden in elektronische EAP, die durch ein elektrisches Feld oder Coulomb-Kräfte angetrieben werden, sowie ionische EAP, die ihre Form ändern durch die Mobilität oder Diffusion von Ionen und ihrer konjugierten Substanzen [29]. Elektronische EAP umfassen elektrostriktive, elektrostatische, piezoelektrische und ferroelektrische Polymere. Sie benötigen in der Regel eine hohe Gleichspannung ( $> 150$  V/ $\mu\text{m}$ ), ganz in der Nähe der Höhe der Durchschlagsspannung des Materials, um die induzierte Verschiebung zu halten und eine schnelle Reaktionszeit (in der Größenordnung von Millisekunden) zu erreichen. Ionische EAP, wie Gele, ionische Polymer-Metall-Verbunde und leitende Polymere, erfordern niedrige Antriebsspannungen (1-5 V). Allerdings müssen sie in einem nassen Zustand oder in festen Elektrolyten arbeiten und dies stellt für einige Anwendungen eine große Einschränkung dar.

Elektrostriktive Polymere – auch dielektrische Elastomere genannt – gehören zu den vielversprechendsten EAP. Sie weisen eine geringe elastische Steifigkeit und hohe Dielektrizitätskonstanten auf, so dass sie große Verformungen erreichen können (10% - 400%) und Hochspannung unterstützen. Ihr Funktionsprinzip ist ähnlich dem der elektromechanischen Transduktion eines Parallelplattenkondensators: wenn eine elektrische Potentialdifferenz über den Polymerfilm aufgebracht wird, der auf beiden Seiten mit Elektroden beschichtet ist, wird parallel zum elektrischen Feld eine Druckspannung erzeugt; folglich wird das Material in der Dicke komprimiert und expandiert in planaren Richtungen (Abbildung 1.11). Daher wird mechanische Energie aus der elektrischen Energie gewonnen.

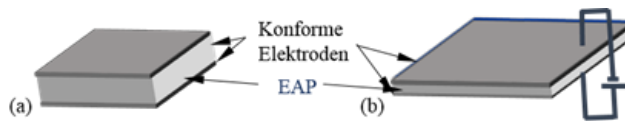


Abbildung 1.11: Elektrostriktiver Effekt: (a) EAP in Ruhestellung, (b) Flächenausdehnung und Dickenreduzierung aufgrund des elektrischen Feldes.

Wie bei vielen Betätigungsprinzipien sind elektronische EAP reversibel und können im Generatorbetrieb betrieben werden. In dieser Betriebsart wird mechanische Arbeit ausgeführt, um ein elektrisches Feld zu erzeugen und das EAP wirkt als elektromechanischer Generator-Wandler. EAP weisen Verformungen in Größenordnungen auf, die viel höher sind als PZT; sie haben eine höhere Reaktionsgeschwindigkeit, eine niedrigere Dichte und eine höhere Elastizität als FGL. Allerdings sind ihre Anwendungen begrenzt durch geringe Betätigungskräfte, geringe mechanische Energiedichte und unzureichende Robustheit.

## 1.4 Mikro-Fabriken

Die Miniaturisierung kann auch auf Produktionssysteme positive Auswirkungen haben. Tatsächlich sind herkömmliche Fabriken oft keine ideale Lösung für die Herstellung von Mikroprodukten. Ihr großer Platz- und Energieverbrauch sind unvorteilhaft angesichts der unterschiedlichen Anforderungen für die Herstellung von miniaturisierten Systemen und Mikroteilen. Für die Herstellung von Mikrobauteilen ist in der Regel wenig Platz erforderlich; allerdings benötigt man oft eine kontrollierte Umgebung, wie beispielsweise Reinräume oder Vakuumkammern, die hohe Wartungskosten mit sich bringen. Daher erlaubt die Miniaturisierung der Herstellungsmaschinen nicht nur Platzeinsparung, sondern auch Energieeinsparung aufgrund niedrigerer Betriebs- und Instandhaltungskosten. Zusammen

mit der geringeren Menge an Abfall ermöglicht dies eine nachhaltige Produktion in Bezug auf die Auswirkungen auf die Umwelt.

Darüber hinaus sind kleinere Maschinen, vorausgesetzt sie wurden unter Berücksichtigung der Skalierungsgesetze korrekt konstruiert, weniger anfällig für Fehler aufgrund von Wärmeverformung und Schwingungsamplituden. Außerdem benötigen sie weniger Material und dadurch wird die Verwendung teurerer Materialien mit besseren Eigenschaften erschwinglich.

Seit der Vorstellung der Konzepte in den frühen 2000er Jahren [30] sind neue Anforderungen für die Herstellung von Mikroprodukten aufgetaucht, die auf zwei neuen Paradigmen basieren: adaptive Fertigung und nachhaltige Produktion. Adaptive und rasch reagierende Produktionssysteme würden die Anpassung von Produkten zu niedrigen Kosten ermöglichen und damit dort auf den Markt kommen, wo der Markt besser darauf anspricht.

In den letzten zwei Jahrzehnten haben sich die Miniaturisierung traditioneller Fertigungsmaschinen und die Untersuchung innovativer Fertigungstechnologien für Mikroteile und Systeme zu Forschungsschwerpunkten in der Mikrofertigung entwickelt. Infolgedessen sind hoch-miniaturisierte Fertigungssysteme, sogenannte Mikrofabriken, entstanden, die für industrielle Anwendungen eingesetzt werden. Nachfolgend finden Sie eine kurze Übersicht über einige dieser Mikrofabriken.

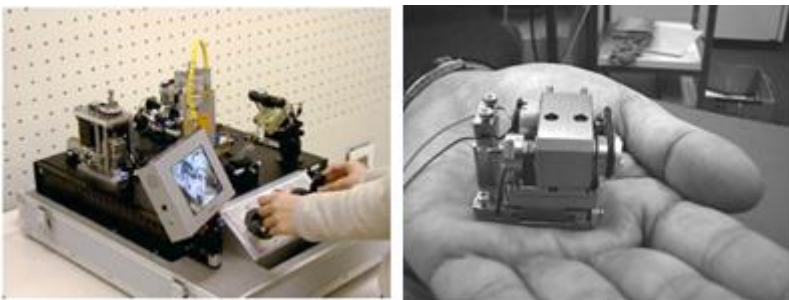


Abbildung 1.12: Tragbare, ferngesteuerte Mikrofabrik [31] (links), Mikro-Drehmaschine, entwickelt von MMC Japan [31] (rechts).

Ursprünglich wurden andere Namen verwendet, wie zum Beispiel Desktop-Fabrik, modulare Mikrofabrik, Fabrik-im-Koffer, Palmtop-Fabrik, tragbare Fabrik, Benchtop-Maschinen und andere, die darauf abzielten, nicht nur das Konzept der Miniaturisierung des Produktionssystems hervorzuheben, sondern auch dessen Flexibilität und Tragbarkeit. Jedes System konzentriert sich auf einige spezifische Schritte der Herstellung von Mikrogeräten; das ultimative Ziel der Entwicklung eines umfassenden miniaturisierten Produkti-



onssysteme ist jedoch die Herstellung von Mikrokomponenten und ihre Umsetzung in ein fertiges Produkt. Die Mikrofabrik umfasst somit Fertigungs-, Montage- und Verpackungsanlagen. Diese Integration ist ein wesentlicher Punkt in der Mikroherstellung, damit die erforderliche Positioniergenauigkeit erreicht und die Anzahl der Bearbeitungsschritte reduziert werden kann. Tatsächlich ist die Handhabung ein äußerst entscheidender Schritt auf der Mikroebene, da die vorherrschenden Oberflächenkräfte die Lokalisierung und Fixierung von Teilen zu einer komplizierten Angelegenheit machen können und die Freigabe dieser Teile äußerst problematisch und schwierig zu steuern ist [31]. Diese Konzepte werden in Kapitel 9 ausführlich vorgestellt. Der erste Prototyp einer Mikrofabrik (Abbildung 1.12) wurde 1999 in Japan vom Mechanical Engineering Laboratory Tsukuba entwickelt [32], nach der Entwicklung einer Mikrodrehmaschine im Jahre 1996, die kleiner war als eine menschliche Hand (Abbildung 1.12). Sie war 32 mm lang, 25 mm breit, 30,5 mm hoch und wog 100 g. Teile mit einem Mindestdurchmesser von 60 Mikrometern wurden hergestellt (Abbildung 1.13). Die Lineartische wurden zur feinen und groben Positionierung durch Piezoaktoren angetrieben. Die gesamte Mikrofabrik umfasst die Mikrodrehmaschine und andere miniaturisierte Bearbeitungsmaschinen; eine Fräsmaschine und eine Presse – installiert zusammen mit einem Mikro-Transferarm und einem Zwei-Finger-Mikromanipulator auf einer Leiterplatte. Die gesamte Mikrofabrik wurde in einem tragbaren Koffer mit einer Länge von 625 mm, einer Breite von 490 mm und einer Höhe von 380 mm und einem Gesamtgewicht von ca. 34 kg installiert. Die Maschinen wurden mit zwei Joysticks und einer Sehhilfe ferngesteuert. Die Leistungsaufnahme beträgt nur 60W.

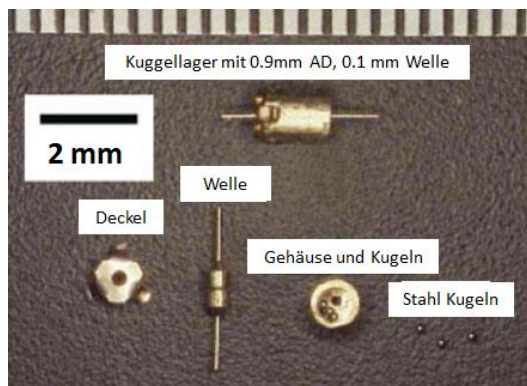


Abbildung 1.13 Beispiele für hergestellte Stücke [31].

Nach dieser ersten Entwicklung folgten mehrere andere Einheiten. Die Desktop Factory®, (Abbildung 1.14) entwickelt von Niked Sankyo (ex Sankyo Seiki) im Jahr 2003, ist die erste kommerzielle Mikrofabrik, deren Stärken Modularität, Flexibilität und Portabilität

sind. Sie basiert auf der Miniaturisierung herkömmlicher Komponenten und Maschinen, wie Motoren, Roboter, Paletten, Vakuumpumpen, entwickelt als Mehrzweckmodule mit einer Breite von 170 mm, die in der Lage sind folgende Arbeiten durchzuführen: reinigen, beschichten, klemmen, verbinden, schrauben, messen und erwärmen [33].



Abbildung 1.14: DESKTOP FACTORY® von Niked Sanyo

Die Olympus Corporation entwickelte seit 1991 zwei Mikrofabrik-Prototypen [3434] (Abbildung 1.15). Eine Mikrofabrik ist ein Fernbedienungssystem, das in der Lage ist, kleine Bauteile mit Hilfe eines Mikroskops zusammenzubauen. Sie eignet sich für Arbeiten auf der Mikroebene, die eine manuelle Unterstützung benötigen, wie zum Beispiel Mikroschweißen und Inspektion. Sie besteht aus einem Video-Mikroskop, einem Parallel-Link-Mikromanipulator und einem Parallel-Link-Tisch mit 6 Freiheitsgraden für Handling-Operationen.

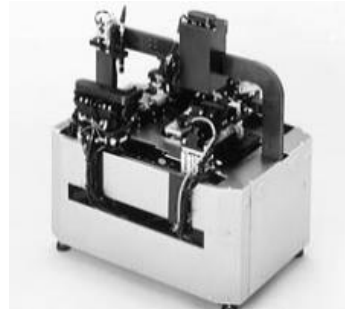
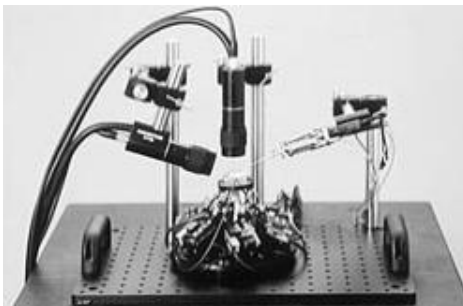


Abbildung 1.15: Mikroteile-Fernbedienungssystem (links), Olympus Montagesystem (rechts) [34].

Die andere Mikrofabrik wurde konzipiert für die Montage mikrooptischer Teile von Produkten, wie beispielsweise Mobiltelefonen und medizinischen Endoskopen; sie war in

der Lage Linsen mit 1 mm Außendurchmesser, einem CCD und einem Linsenrahmen mit einer Grundfläche von 500 x 350 mm zu montieren, und erreichte eine gute Raumausnutzung, hohe Automatisierung und eine hohe Genauigkeit.

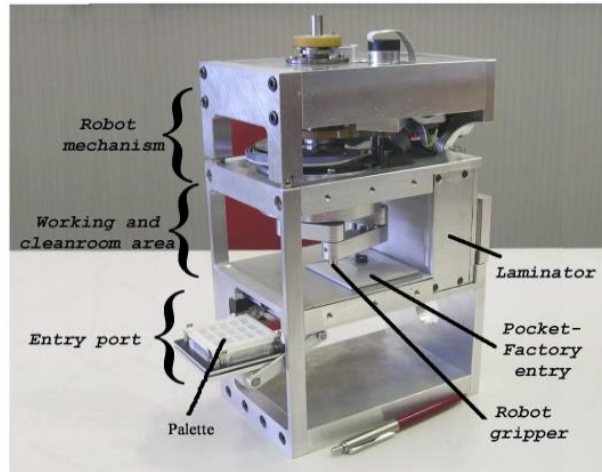


Abbildung 1.16: Pocket Factory von EPFL [35]

In der Schweiz hat die Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) zusammen mit dem Center Suisse d'Electronique et Microtechnique (CSEM) im Jahr 2005 die Pocket-Fabrik entwickelt [35]. Ihre Besonderheit im Vergleich zu anderen modularen Mikrofabrik-konzepten ist das vertikale Stapeln von Modulen (Abbildung 1.16). Jede Mikrobox ist ein Reinraum (Klasse 100 gemäß der Bundesnormen 209E) von 50 mm x 50 mm; sie enthält mehrere Teile speziell für Montagevorgänge, nämlich eine Eintrittsöffnung, einen Roboter sowie Sensoren für die Prozesssteuerung. Der miniaturisierte Roboter ist 100 x 100 x 200 mm groß, besitzt ein System mit 4 Freiheitsgraden und einen Zylinder mit einem Durchmesser und einer Höhe von 130 mm und einem Arbeitsbereich von 20 mm [36].

Auf der Basis der Agile Assembly Architektur [37] hat die Carnegie Mellon University ein Beispiel einer Minifabrik entwickelt (Abbildung 1.17): Ein modulares Tabletop-Präzisionsmontagesystem [38]. Es integriert Produkttransport und Positionierung durch mehrere Kuriere mit planaren Linearmotoren, welche die Baugruppen zu mehreren Montagesystemen mit 4 Freiheitsgraden, austauschbaren modularen Endeffektoren und Kameras und Beleuchtungseinrichtung transportieren. Ein Interface-Tool wird für ein umfassendes zentralisiertes Design sowie die Programmierung einer Betriebsüberwachung eingesetzt.

Mehrere andere Mikrofabrikkonzepte und -ausrüstungen folgten auf diese Pionierarbeiten. Heute ist das Konzept gut etabliert und kann zur Umsetzung neuer Geschäftsmodelle führen (siehe auch Kapitel 10); allerdings wird seine Durchsetzung im Markt noch begrenzt durch die notwendige Änderung der Herstellungsparadigmen.

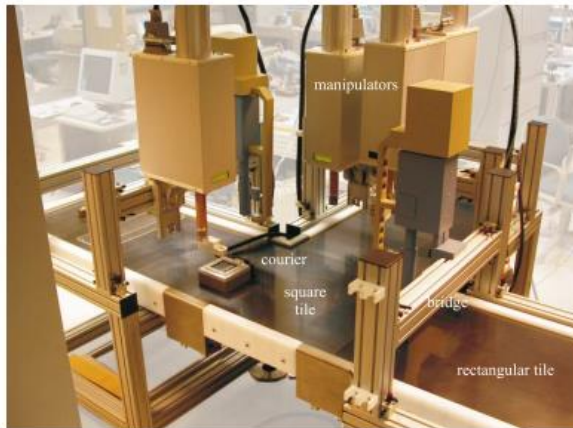


Abbildung 1.17: Agile Assembly Architektur der Carnegie Mellon University [37]

## 1.5 Referenzen

1. Feynman RP. (1960) There's plenty of room at the bottom. *Engineering and science*, 23(5), 22-36.
2. Madou M. J. (2002) *Fundamentals of microfabrication: the science of miniaturization*. CRC press.
3. Ghosh A, and Corves B (2015) *Introduction to Micromechanisms and Microactuators*. Springer India.
4. Squires, Todd M. and Quake, Stephen R. (2005) *Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale*. *Reviews of Modern Physics*, 77 (3). pp. 977-1026. ISSN 0034-6861
5. Van Brussel H., Peirs J., Reynaerts D., Delchambre A., Reinhart G., Roth N., Weck M., Zussman E.(2000) *Assembly of microsystems*, *Annals of the CIRP*, Vol. 49 (2), 2000, pp. 451-472.
6. Shu-Ang Zhou (2003) *On forces in microelectromechanical Systems*, *International Journal of Engineering Sci.* 41, 313-335.
7. Milonni PW. (1994) *The Quantum Vacuum: an Introduction to Quantum Electrodynamics*, Academic Press, San Diego.
8. Rob Legtenberg, Groeneveld A.W. and Elwenspoek M. (1996) *Comb-drive actuators for large displacements*. *J. Micromech. Microeng.* 6: 320–329.
9. Wallash, A.J., Levit L. (2003) *Electrical breakdown and ESD phenomena for devices with nanometer-to-micron gaps*. In: *Micromachining and Microfabrication*.

- International Society for Optics and Photonics, 2003. p. 87-96.
10. Townsend JS (1915) *Electricity in gases*. Clarendon Press, Oxford
  11. Nye J.F. (1985) *Physical Properties of Crystals*, Oxford: Clarendon Press.
  12. Hall EO. (1951) Deformation and ageing of mild steel. *Phys Soc Proc* 64(B381):747–753.
  13. Petch NJ. (1953) Cleavage strength of polycrystals. *J Iron Steel Inst* 174:25–28.
  14. Chang, H., Altstetter CJ., Averbach RS. (1995) *Nanophase Metals—Processing and Properties*. In *Advanced Materials and Processing*, vol. 3.
  15. Fu MW. and Chan WL. (2014) *Micro-scaled Products Development via Microforming*, Springer Series in Advanced Manufacturing, DOI: 10.1007/978-1-4471-6326-8\_2, Springer-Verlag London
  16. Weissmüller J., Löffler J., Kleber M. (1995) *Nanostructured Materials* 6, 105-114.
  17. Yoshizawa, Y., S. Oguma, K. Yamauchi. 1988. New Fe-Based Soft Magnetic-Alloys Composed of Ultrafine Grain-Structure. *J Applied Physics* 64, 6044-6046.
  18. Liu QY., Zhang QH., Zhang JH., Zhang M. (2014) "Influence of Grain Size and Grain Boundary of Workpiece on Micro EDM", *Advanced Materials Research*, Vols. 941-944, pp. 2116-2120, 2014 - 10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.2116
  19. Vogler MP, DeVor RE, Kapoor SG. (2004) On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling. Part I: Surface generation. *ASME J Manuf Sci Eng* 126:685–694. 73.
  20. Vogler MP, DeVor RE, Kapoor SG (2004) On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling. Part II: Cutting force prediction. *ASME J Manuf Sci Eng* 2004;126:695–705.
  21. Susmita K. (2013) Introduction, classification and applications of smart materials: an overview. *Am J Appl Sci* 10 (8): 876-880, 2013
  22. Ahmad I. (1988) 'Smart' structures and materials, *Proceedings of Army Research Office Workshop on Smart Materials, Structures and Mathematical Issues*, ed C.A. Rogers *Proceedings*. Virginia Polytech. Inst. & State Univ., Blacksburg. VA, Sept. 15-16, pp. 13–16.
  23. Akhras, G. (2000) "Smart Materials and Smart Systems for the Future", *Canadian Military Journal*, Vol.1 N° 3, pp 24-31.
  24. Dineva P. et al. (2014) *Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials*, 7 *Solid Mechanics and Its Applications* 212, DOI: 10.1007/978-3-319-03961-9\_2, Springer International Publishing Switzerland
  25. Delaey L. (1991) *Phase Transformations in Materials*. In: Cahn RW, Haasen P., Kramer EJ. (Eds.), *Material Science and Technology*, vol. 5, VCH.
  26. Nespoli A., Besseghini S., Pittaccio S., Villa E. and Viscuso S. (2010) The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical devices: a review on shape memory alloy mini-actuators. *Sensors and Actuators A* 158 149–160.
  27. Hu M., Fu Y., Du H. and Ling S. (2004) "Titanium nickel thin films for microactuation". In *Proceedings of the 9 th international conference on new actuators*, June. ISBN-3-933339-06-5, pp. 79.
  28. Bar-Cohen Y. (2001) *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles (Reality, Potential, and Challenges)*. SPIE Press, Bellingham.
  29. Samatham R., Kim KJ., Dogruer D., Choi HR., Konyo M., Madden JD., Nakabo Y.,

- Nam JD., Su J., Tadokoro S., Yim W., Yamakita M. (2007) Active Polymers: an overview in electroactive polymers for robotic applications: artificial muscles and sensors. Springer-Verlag London.
30. Kawahara N., Suto T., Hirano T., Ishikawa Y., Kitahara T., Ooyama N., Ataka T. (1997) Microfactories; new applications of micromachine technology to the manufacture of small products, *Microsystem Technologies* 3:37-41.
  31. Feddema J.T., Xavier P. and Brown R. (1998) Assembly Planning at the Micro Scale. In: *Proceeding of the Workshop on Precision Manipulation at the Micro and Nano Scales, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, May 16-20.*
  32. Tanaka M. (2001) Development of desktop machining microfactory. *RIKEN Review* 34: Focused on Advances on Micro-mechanical Fabrication Techniques.
  33. [http://www.nidec-sankyo.co.jp/english/technology/core\\_technology.html](http://www.nidec-sankyo.co.jp/english/technology/core_technology.html)
  34. <http://www.olympus-global.com/en/news/1999b/nr991201mifae.jsp>
  35. Verettas I., Clavel R., Codourey A. (2005) "Pocket Factory": Concept of miniaturized modular cleanrooms, not yet published (No. LSRO2-CONF-2005-017), available at <http://infoscience.epfl.ch/record/63609/files/TMMF05-pocketfactory.pdf>.
  36. Bacher JP., Bottinelli S., Breguet JM., Clavel R. (2002) "Delta3 : a New Ultra-high Precision Micro-robot". *Journal Européen des Systèmes Automatisés, Hermes*, 36(9):1263-1275.
  37. Rizzi AA., Gowdy J., and Hollis RL. (1997) Agile assembly architecture: an agent based approach to modular precision assembly systems. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 1511–1516.
  38. Hollis RL, Cowdy J., Rizzi AA. (2004) "Design and Development of a Tabletop Precision Assembly System". *Machatronik & Robotics 2004, IEEE, Aachen, Germany*, pp 1624-1628, 13-15 September 2004.

## 2 Mikrospritzgießen

Andreu Sancho, Laura Arribas and Daniel Teixidor

Eurecat, Technology Centre of Catalonia

### 2.1 Überblick

Das Mikrospritzgießen von Kunststoffen ist derzeit die Technik mit dem größten Entwicklungspotenzial für die kommenden Jahre zur Herstellung von Kunststoffkomponenten, die weniger als 1 Gramm wiegen und Toleranzen im Bereich von 10 bis 100 Mikrometer aufweisen, so dass komplizierte Geometrien und eine hohe Oberflächenqualität möglich werden.



Abbildung 2.1: Mikro-Zahnrad. Gewicht 0,0022 g.

#### 2.1.1 Technische Beschreibung

Die Herstellung winziger Kunststoffteile im Spritzgießverfahren hat sich zu einer spezialisierten Dienstleistung entwickelt. Dies ist eine Zukunftstechnologie mit immensem Entwicklungspotenzial für die Massenproduktion von Komponenten für viele Anwendungen.

Durch Mikrospritzgießen lassen sich Mikroformteile mit einem Gewicht von weniger als einem zehntel Gramm mit hoher Maßgenauigkeit herstellen.

Das Gewicht einer Mikrokomponente kann zwischen wenigen tausendstel Gramm bis einhundert hundertstel Gramm mit Maßtoleranzen im Bereich von 0,0002 bis 0,0005 mm liegen.



Abbildung 2.2: Mikroteile. (Quelle: Fraunhofer IPT/WZL und RWTH Aachen)

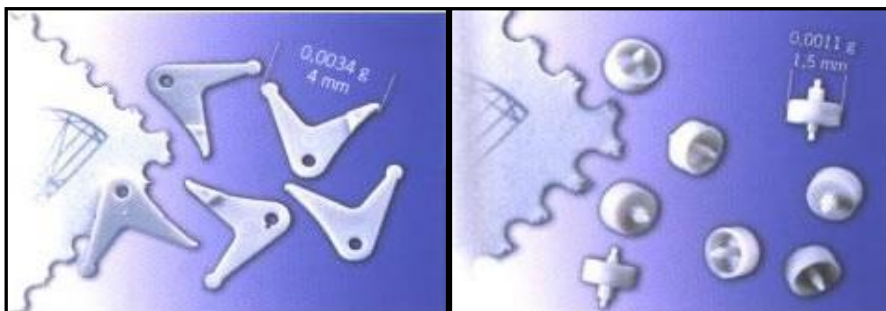


Abbildung 2.3: Details von Mikroteilen. (Quelle: Wittmann-Battenfeld)

Das Mini-Spritzgießen beinhaltet die Herstellung von Teilen, die zwischen einigen zehntel Gramm bis zu einigen Gramm wiegen, jedoch mit geringerer Maßgenauigkeit als das Mikrospritzgießen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass der Hauptunterschied zwischen Mini- und Mikrospritzgießen, abgesehen vom Volumen des Teils, durch die geforderte Maßgenauigkeit definiert wird.

In beiden Fällen ähnelt der Massentransformationsprozess dem eines herkömmlichen Systems. Die Unterschiede liegen in den Mechanismen der Düsen, den Parametern und den eingesetzten Werkzeugen.



## 2.1.2 Definition der Technologie

Beim Mikrospritzgießen geht es nicht nur um das Spritzgießen kleiner Teile; das Mikrospritzgießen ist ein hochpräzises Spritzgießverfahren. Das Spritzgießen kleiner Teile, die keine hohe Präzision erfordern, gilt nicht als Mikrospritzgießen, sondern als das herkömmliche Spritzgießen kleiner Teile, oder einfach als Mini-Spritzgießen.

Nach dem "Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF)" umfasst das Mikrospritzgießen drei verschiedene Bereiche:

- Mikrospritzgießteile: Komponenten mit sehr geringem Gewicht (in der Größenordnung von Milligramm), kleine Abmessungen (wenige Millimeter) und Details im Mikrometerbereich.
- Mikrostrukturteile: Komponenten mit Standardabmessungen mit einem Gewicht von mehreren Gramm, aber mit Bereichen mit Mikrostrukturdetails.
- Mikropräzisionsteile: Teile jeder Größe, jedoch mit Toleranzen in der Größenordnung von einem Mikrometer.



Abbildung 2.4: Verschiedene Mikroteile. (Quelle: Sumitomo-Demag)

## 2.2 Materialien

Obwohl man jedes thermoplastische Material in eine Form einspritzen kann, muss man beim Mikrospritzgießen berücksichtigen:

- die Einspritzgeschwindigkeiten sind höher.
- die Schergeschwindigkeit ist höher.
- die Kühlgeschwindigkeiten sind schnell aufgrund des hohen Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses

Materialien verhalten sich anders auf der Mikroskala und deshalb sind manchmal Kompromisse erforderlich, je nach Material, Bauteilgeometrie und Geometrie der Gießform. Beispielsweise kann es vorkommen, dass das Material mit den besten mechanischen Eigenschaften für Anwendungen im Mikrospritzgießvorgang nicht geeignet ist; aus diesem Grund sollte eine geeignete Alternative verwendet werden.

LCP, COC, PC, PS, PPE, PMMA, PEEK, PSU, PAI, PEI, PBT, PA und POM sind Kunststoffmaterialien, die üblicherweise beim Mikrospritzgießen verwendet werden.

LCP oder COC sind eine gute Materialauswahl für eine hohe Reproduktion. PC, PA, POM, PBT, PEI, PSU und PSA sind Materialien mit hoher Fließfähigkeit. Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die thermoplastischen Materialien.

Tabelle 2.1: Thermoplastische Materialien

Akronym	Polymer	Temperaturstabilität [C]	Eigenschaften	Struktur
COC	Cyclic Olefin Polymer	140	Hoch transparent	Amorph
PMMA	Polymethylmethacrylate	80	Hoch transparent	Amorph
PC	Polycarbonate	130	Hoch transparent	Amorph
PS	Polystyrene	80	Transparenz	Amorph
POM	Polyomexymethylene	90	Niedrige Friktion	Teilkristallin
PFA	Perfluoropolymer	260	Hohe chemische Beständigkeit	Teilkristallin
PP	Polypropilene	110	Mechanische Eigenschaften	Teilkristallin
PET	Polyethylene Terephthalate	110	Transparenz, Niedrige Friktion	Amorph / Teilkristallin
PEEK	Polyetheretherkelone	250	Hohe Temperaturbeständigkeit	Teilkristallin
PA	Polyamide	80-120	Gute mechanische Eigenschaften	Teilkristallin
PSU	Polysulfone	150	Chemische und Temperaturbeständigkeit	Amorph
LCP	Liquid Crystal Polymer	230	Stabilität, niedrige Kontraktion	Flüssig Kristallin

## 2.3 Design und Simulation

### 2.3.1 Charakterisierung – Mikrorheologie

Eine Möglichkeit, die rheologischen Eigenschaften der Polymere zu charakterisieren ist die Messung der Verformung einer kleinen Materialprobe (in der Größenordnung von Millimetern), wenn eine Zugkraft von kleiner Amplitude bei unterschiedlichen Frequenzen angelegt wird (in der Größenordnung von einigen zehn Hertz) unter Verwendung eines mechanischen Rheometers.

Die Verwendung von Geräten, mit denen man feststellen kann, ob das sich ergebende Ausgangssignal in Phase oder außer Phase ist, hilft bei der Charakterisierung der Verformung als elastische oder plastische Verformung.

Allerdings liefern diese konventionellen Rheometer ein "durchschnittliches" Maß für den Test und lassen keine zeit- oder positions-spezifischen Messungen zu. Deshalb berücksichtigen sie nicht die "Nicht-Homogenität des Systems".

Zur Charakterisierung von Materialien im Mikrometer-Maßstab wurde deshalb eine spezifische Mikrorheologie-Technik entwickelt.

Grundsätzlich gibt es zwei Methoden der Mikrorheologie: Zum einen, die physikalische Manipulation der Probe durch äußere Kräfte, auch aktive Methode genannt; zum anderen, die Messung der Bewegung der Partikel, die aufgrund thermischer oder Brownscher Schwankungen in das Material (verursacht durch Kollisionen zwischen den Teilchen) eingeführt wurden, auch als passives Verfahren bezeichnet.

- Magnetische Manipulationsmethode: Metall-Mikropartikel werden in das Material eingearbeitet und durch magnetische Felder angeregt. Danach werden die Trajektorien durch optische Mikroskopie analysiert.
- Optische Pinzetten-Methode: Zwei Laserstrahlen erfassen und manipulieren kleine dielektrische Partikel. Die Anwendung dieser Kraft ist äußerst lokalisiert und bewegt sich in der Größenordnung von pN. Die Erfassung und Messung der Bewegung wird auch durch Interferometer-Techniken durchgeführt.

Die passiven mikrorheologischen Methoden nutzen nur die thermische Energie des Mikropartikels, das in das Polymer eingebettet ist. Die untersuchten Materialien müssen eine Viskosität besitzen, die niedrig genug ist, um eine Bewegung dieser Mikropartikel zu ermöglichen.

Diese Bewegung ist abhängig von der Art des Materials. Diese Verfahren arbeiten stets im linearen Bereich, da eine äußere Kraft aufgebracht wird.

### 2.3.2 Rheologische Simulation

Die Vorteile einer Computersimulation für das Spritzgießen sind bekannt. Ein Benutzer wird wissen, ohne eine Form zu konstruieren, ob:

- der Hohlraum gefüllt werden kann
- eine Wand sehr dünn ist
- das Material richtig ausgewählt wurde
- die Zykluszeit akzeptabel ist
- die Anzahl, die Art und der Ort der Gates optimiert wurden und mögliche Defekte wie Schweißlinien, Lufteinschlüsse oder Teileverformung vorhersagen

Die rheologische Simulation von Mikroteilen unter Verwendung von Software-Prozessen, die für herkömmliche Spritzgießverfahren entwickelt wurden, stellen Unsicherheiten dar.

Eine signifikante Zunahme im Oberflächen-Volumen-Verhältnis in einem Mikroteil hat einen erheblichen Einfluss auf das Füll- und Kühlverhalten.

Die Wandstärke dieser Teile von einem Mikrometer oder weniger müssen durch finite Elemente von beträchtlicher Größe modelliert werden und dies kann die Genauigkeit der Ergebnisse beeinflussen.

Das Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH (IMM) der Johannes Gutenberg Universität Mainz hat Simulationen von Mikrobautteilen durchgeführt, die als Membranen von 150 µm und 250 µm Dicke geformt waren und Schrumpfung / Verzerrung in einem Wellenleiter vorhergesagt.

Der anschließende Vergleich der simulierten Ergebnisse und der tatsächlichen Teile hat den Modellierungsprozess erfolgreich bestätigt.

Mathematische Modelle wurden für die Herstellung hochgenauer Mikrohohlräume unter Verwendung von Focused Ion Beam (FIB) entwickelt und überprüft. Mit Hilfe dieser Modelle ist es möglich, Mikrohohlräume mit einer Oberflächengenauigkeit im Nanomaßstab für die Mikroreplikation sowie polymere, keramische und metallische Mikrokomponenten im Submikronbereich zu erzeugen.

Spätere Studien haben sich mit der Korrelation zwischen Simulation mit 3D-MoldFlow-Algorithmus und einer experimentellen Form-Replikation von Mikrozahlrädern beschäftigt.

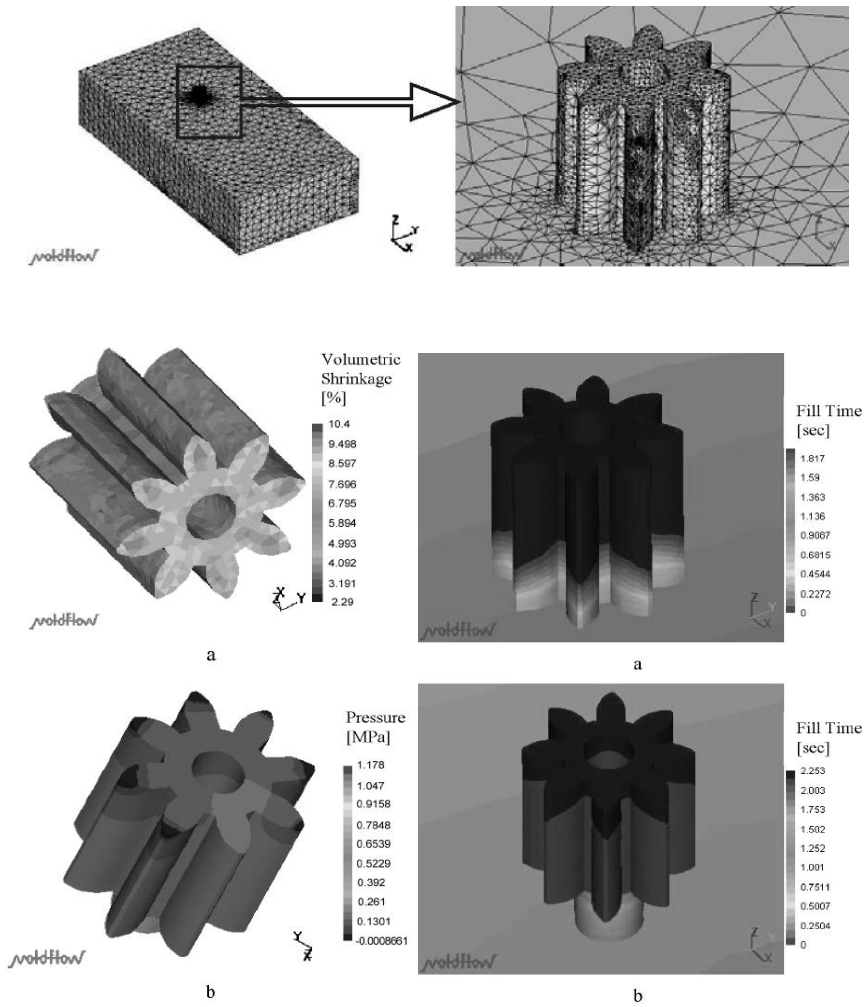


Abbildung 2.5: 3D-MoldFlow-Simulation von Mikro-Zahnradern.

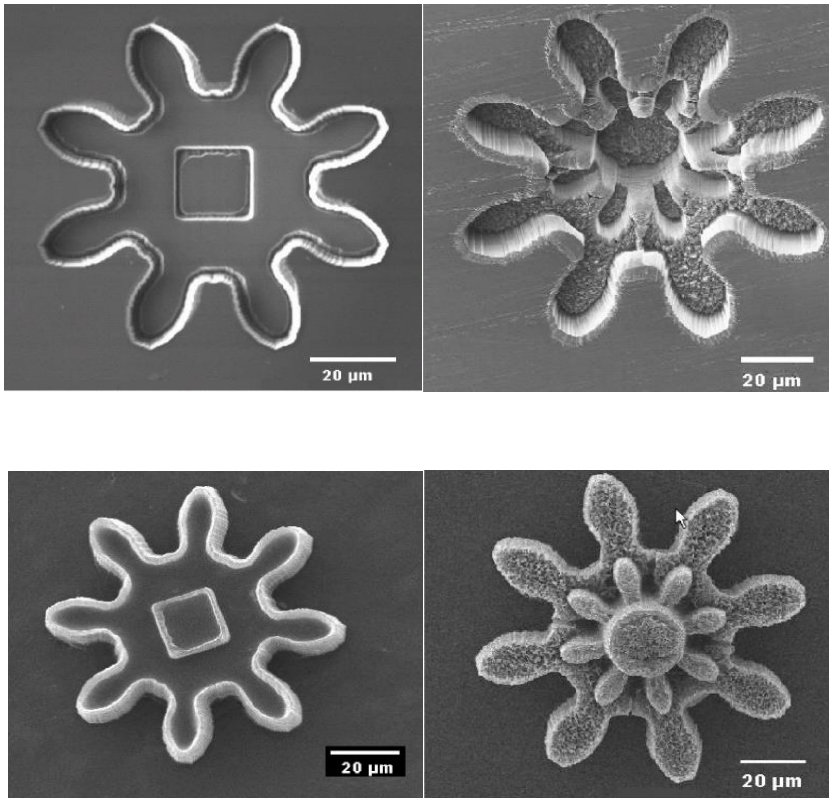


Abbildung 2.6: 3D-MoldFlow-Simulation von Mikro-Zahnradern.

### 2.3.3 Schlussfolgerungen

- Es gibt Grenzen hinsichtlich der Größe der Geometrien, die mit 3D den Prozess des Mikrospritzgießens simulieren.
- Ein Hohlraum kann durch das FIB-Verfahren hergestellt werden. Diese maskenlose Technik macht den Prozess wirtschaftlicher und flexibler.
- Ein System wurde für die Mikroreplikation entwickelt, das sowohl die thermische Steuereinheit und das Vakuum integriert und in der Lage ist, 3D-Mikrokomponenten zu replizieren.
- Mikrokomponenten, z.B. ein 100 µm Zahnrad, können erfolgreich geformt werden. Mit diesen Verfahren können auch andere Formen, wie beispielsweise Mikrolinsen, gestreifte Oberflächen usw. erzeugt werden.

- Die Formtemperatur hat einen dramatischen Einfluss auf den Prozess des Mikroformens. Eine Formtemperatur in der Nähe des Non-Flow hat sich als zweckmäßig erwiesen, um die Füllung zu erleichtern, auch bei niedrigem Einspritzdruck.
- Um ein Kunststoffmikrobauteil mit einer optischen Oberfläche zu replizieren, kann eine Si-Kavität verwendet werden. Für die Massenproduktion kann eine Kavität mit einem stärkeren Material (z.B. Ni-Be) verwendet werden.
- Mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) wurde ein qualitativer Vergleich der Mikrokavität und der geformten Komponente durchgeführt. Der Vergleich zeigte, dass dieser Mikroreplikationsprozess die Geometrie der Mikrokavität exakt duplizieren kann.

## 2.4 Prozess und Materialien

Der Mikrospritzgießvorgang ist eine Variante des herkömmlichen Spritzgießverfahrens. Die Mikrospritzgießtechnik basiert auf den Eigenschaften, die durch die geringe Größe der Stücke auferlegt werden.

### 2.4.1 Prinzipien des Spritzgießverfahrens

Thermoplast-Spritzgießen ist ein physikalischer und reversibler Prozess. Die Wärme, die dem Material durch den Plastifizierer einer Spritzgießmaschine zugeführt wird, schmilzt das Material und füllt die Kavität einer Form unter Verwendung vorgegebener Parameter wie Druck, Geschwindigkeit und Temperatur.

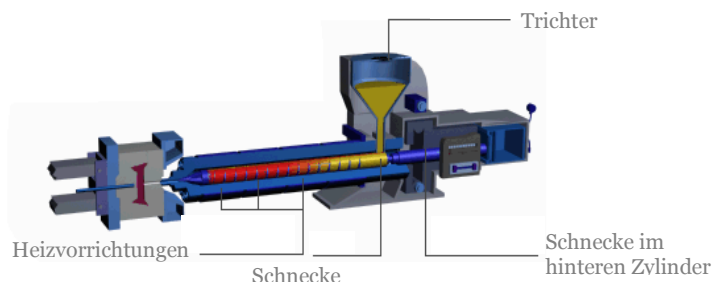


Abbildung 2.7: Aufbau einer Spritzeinheit.

Nach einer gewissen Zeit verliert der geschmolzene Kunststoff in der Form Wärme, verfestigt sich und reproduziert die Formen der hohlen Teile der Form. Nach dem Öffnen der Form hat man als Ergebnis ein solides Stück mit einer Textur und Abmessungen, die den Flächen und Formen der Formhohlräume und den natürlichen Kontraktionen des Kunststoffes entsprechen.

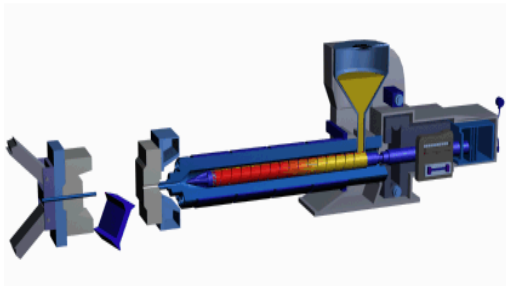


Abbildung 2.8: Einspritzvorgang.

Die amorphen und teilkristallinen Polymere behalten ihre dreidimensionale Form, wenn sie unterhalb ihrer  $T_g$  (Glasübergangstemperatur) bzw. ihrer Schmelztemperatur abgekühlt werden.

Amorphe Polymere sind in einem thermodynamischen Zustand des Pseudogleichgewichts, wenn ihre Temperatur unterhalb ihrer  $T_g$  (Glasübergangstemperatur) liegt. In diesem Zustand werden die Rotation und Entspannung (Abrollen der Ketten) des Polymers blockiert. Ohne einwirkende Kraft behält er deshalb seine dreidimensionale Form.

Teilkristalline Polymere bilden ebenfalls Kristalle. Diese Kristalle sorgen für Formstabilität des Moleküls, das im kristallinen Bereich thermodynamisch stabil ist.



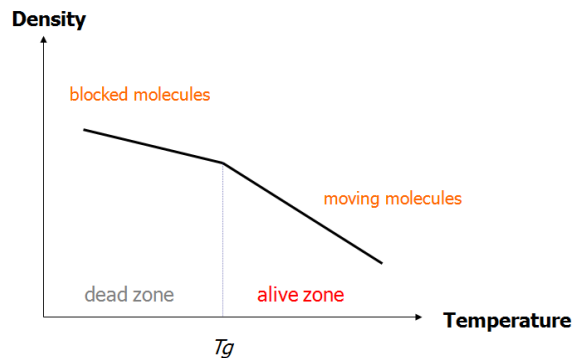


Abbildung 2.9: Verhalten eines amorphen Polymers. (Quelle: Eurecat)

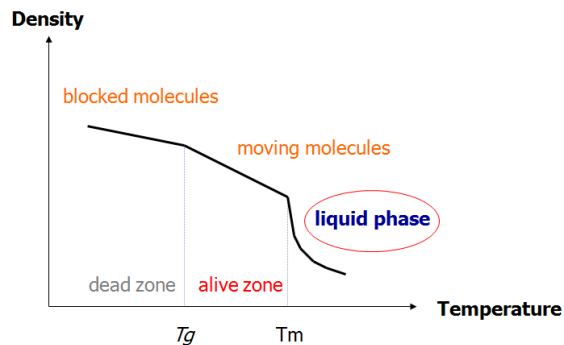


Abbildung 2.10: Verhalten eines halbkristallinen Polymers. (Quelle: Eurecat)

Die Prozessschritte werden im folgenden Diagramm dargestellt (Abbildung 2.11):

1. Schließen der Form
2. Der Zylinder wird nach vorne geschoben\*
3. Einspritzung: Füllphase. Die Schnecke wirkt als Kolben und drückt das Material durch die Düse in die Formhohlräume.
4. Zweiter Druck: Er kompensiert die Verringerung des Kunststoffvolumens aufgrund des Erstarrungsprozesses.
5. Plastifizierung. Die Schnecke dreht sich, um Material zu dosieren, und dreht sich auch wieder zurück.
6. Der Zylinder wird nach hinten geschoben\*

7. Das Teil kühlt in der Form, die Maschine löst den Klemmdruck und die Form öffnet sich. Dann tritt das Auswurfsystem in Aktion und die Formteile werden ausgeworfen.
8. Die Klemmkraft schließt die Form und der Zyklus beginnt erneut.

(\*) Bei einer Heißkanalform sind diese Bewegungen nicht erforderlich.

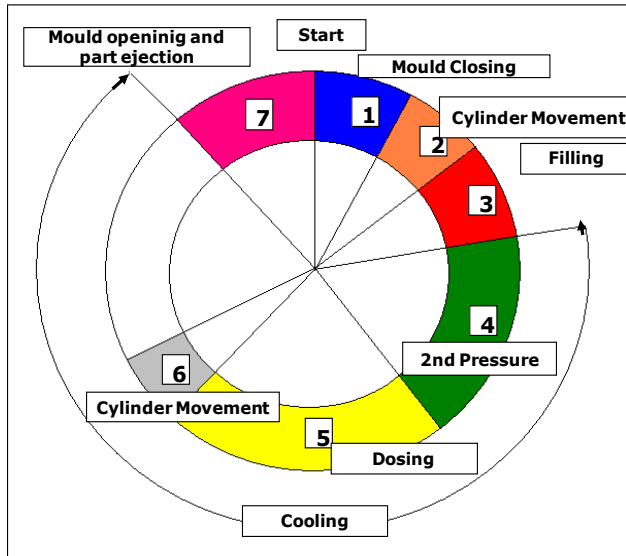


Abbildung 2.11: Diagramm der Injektionsschritte. (Quelle: Eurecat)

## 2.4.2 Hauptmerkmale

Die große Herausforderung ist die Fähigkeit, geeignete Mikroteile mit der Präzision und Genauigkeit herzustellen, die in einer langen Serie erreicht werden müssen.

Wesentliche Unterschiede zwischen Mikrospritzgießen und konventionellem Spritzgießen:

- Aufgrund der geringen Größe der Teile erfordert das Verfahren eine hohe Einspritzrate und Druck. Füllung und Verdichtung sollten in einem einzigen Schritt durchgeführt werden.
- Im Allgemeinen umfassen Kanalsysteme 75% des injizierten Materialvolumens.
- Vereinfacht gesagt erfordern Spritzpressen Spindeln mit kleinen Durchmessern (z.B. 10, 12, 14 mm) oder Extrusions- und

Injektionsdosierungsmechanismen, die mit Hilfe eines hochpräzisen kleinen Kolbens das geschmolzene Harz durch die Düse und die Fließkanäle drücken. Diese Systeme bieten eine hohe spezifische Druckeinspritzung des Materials.

- Die geringe Menge an injiziertem Material erfordert Zykluszeiten, die so kurz wie möglich sind.
- Mikrogranuliertes Material (kein Standardmaterial) muss verwendet werden, um die Spindeln mit kleinem Durchmesser zu versorgen.
- In hitzeempfindlichen Polymeren sollte das injizierte Volumen so eingestellt werden, dass eine ausreichende Kühlung gewährleistet wird.

Aus Sicht des Prozesses sind folgende Hauptmerkmale zu beachten:

- Genaue Dosierung muss eingehalten werden
- Genau gesteuerte Verweilzeit des Materials ist erforderlich
- Gute Kontrolle der Materialtemperatur
- Gute Kontrolle der Formtemperatur
- Injektion mit hoher Geschwindigkeit
- Luft muss aus der Form evakuiert werden, um eine gute Reproduktion zu erhalten.
- Beachten Sie immer die extrem schnelle Abkühlung der Mikroteile.

### **2.4.3 Dosierung (Beladung)**

Die Genauigkeit der Dosierung, eine homogene Schmelze und die Festlegung der richtigen Dosierzeit sind äußerst wichtig.

Die Beschränkungen der Dosiersysteme konventioneller Spritzgießmaschinen müssen bei der Entwicklung von Miniatur-Kunststoffteilen, die nur wenige hundertstel Gramm wiegen, ebenfalls berücksichtigt werden. Dies lässt begründete Zweifel daran aufkommen, ob eine rationelle und reproduzierbare Fertigung bei Verwendung einer Standard-Spritzgießmaschine überhaupt möglich ist.

Die folgende Tabelle zeigt die Genauigkeit des Hubes für eine Einspritzung mit 1 mg, je nach Größe der Schnecke.

Tabelle 2.2: Genauigkeit des Hubes für eine Einspritzung mit 1 mg, je nach Größe der Schnecke  
(Quelle: Wittmann-Battenfeld)

Schnecken- durchmesser	Hub 4D mm	Hubvolumen 4D cm <sup>3</sup>	Hubvolumen 5% 4D cm <sup>3</sup>	Hub für 1mg Schussgewicht mm	Auflösung Limit für 4D Hub mm
22	88	33,45	1,673	0,0024	0,0430
20	80	25,13	1,257	0,0028	0,0391
18	72	18,32	0,916	0,0034	0,0352
14	56	8,62	0,431	0,0056	0,0273
12	40	3,14	0,157	0,0112	0,0195
9	36	2,29	0,115	0,0138	0,0176
7	28	1,08	0,054	0,0228	0,0137
5	20	0,39	0,020	0,0446	0,0098
4	16	0,20	0,010	0,0697	0,0078

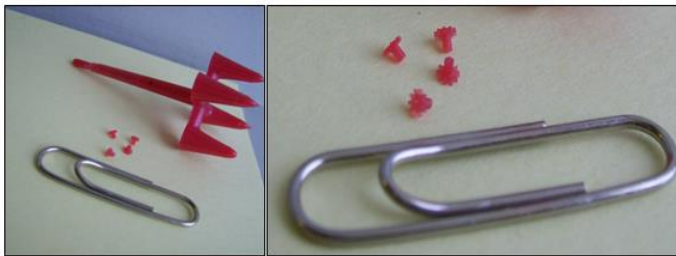


Abbildung 2.12: Injizierte Teile, wobei 90% des gesamten Injektionsvolumens dem Kanalsystem entsprechen.  
(Quelle: Eurecat)

In der Regel können Spritzgießmaschinen, die mit herkömmlichen Schneckensystemen ausgestattet sind, keine herkömmlichen Rohstoffe für Mikrospritzguss-Anwendungen verwenden, da die Materialkorngröße zu groß ist.

Aus diesem Grund müssen in Mikrospritzgießmaschinen spezielle Pellets mit einem Durchmesser von 0,05 bis 0,5 mm verwendet werden, um ein Verrutschen und Dosierungsprobleme in der Einzugszone der Schnecke zu verhindern.

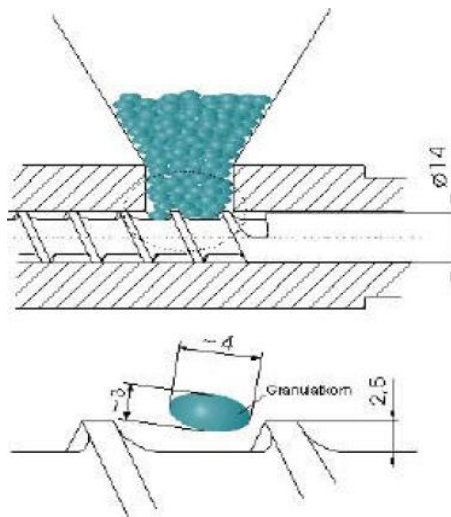


Abbildung 2.13: Erforderliche Korngröße in einer Schnecke mit einem Durchmesser von 14 mm oder weniger. (Quelle: Wittmann-Battenfeld)

## 2.4.4 Einspritzgeschwindigkeit

Im Allgemeinen müssen die Mikroteile mit der maximalen Geschwindigkeit injiziert werden, die die Maschine liefert, damit die Mikro Hohlräume in der kürzest möglichen Zeit gefüllt werden und um zu verhindern, dass sich Material während des Füllens verfestigen kann.

Außerdem verursacht eine hohe Einspritzgeschwindigkeit ein Scheren des Materials und dies führt zu einer Erhöhung der Materialtemperatur und verbessert so das Fließverhalten im Hohlraum. Es ist jedoch wichtig, dass der maximale Scherwert nicht überschritten wird, denn dies würde zu einem Abbau des Materials führen und somit die mechanischen Eigenschaften der Mikroteile beeinträchtigen.

Andererseits bedeutet die Füllung in der kürzest möglichen Zeit (maximale Geschwindigkeit), dass mit hohem Druck gearbeitet werden muss; dies kann jedoch negative Auswirkungen haben, weil es zu inneren Spannungen in der Komponente führt. Um diesen hohen Druck zu reduzieren ist es daher wichtig, dass die Form während der Füllphase bei einer erhöhten Temperatur gehalten wird.

## 2.4.5 Einspritzdruck

Wie bei herkömmlichen Spritzgießverfahren muss in der ersten Phase des Mikrospritzgießens ein hoher Druck aufrechterhalten werden, um die Einspritzgeschwindigkeit so hoch

wie möglich zu halten. In den meisten Fällen kann sich das gleiche Druckniveau verdichten und das endgültige Gewicht der Komponenten definieren.

### 2.4.6 Haltedruck

Ein weiterer wichtiger Faktor, der beim Mikrospritzgießen in Betracht gezogen werden muss, ist die begrenzte Funktionalität des zweiten Drucks oder Haltedrucks aufgrund der geringen Dicke der Spritzteile.

Wenn die Spritzgießmaschine ein hydraulisches Steuersystem besitzt, so muss es sehr dynamisch sein, um extrem niedrige Injektionsvolumina mit Einspritzzeiten von weniger als 0,1 Sekunden zu erlauben.

### 2.4.7 Druckhaltezeit

Angesichts der raschen Erstarrung während der ersten Phase ist in der Regel eine Druckanwendung in der zweiten Phase sinnlos, da sie sich nur auf den Anguss auswirkt – darüber hinaus ist das Material in der Regel bereits erstarrt.

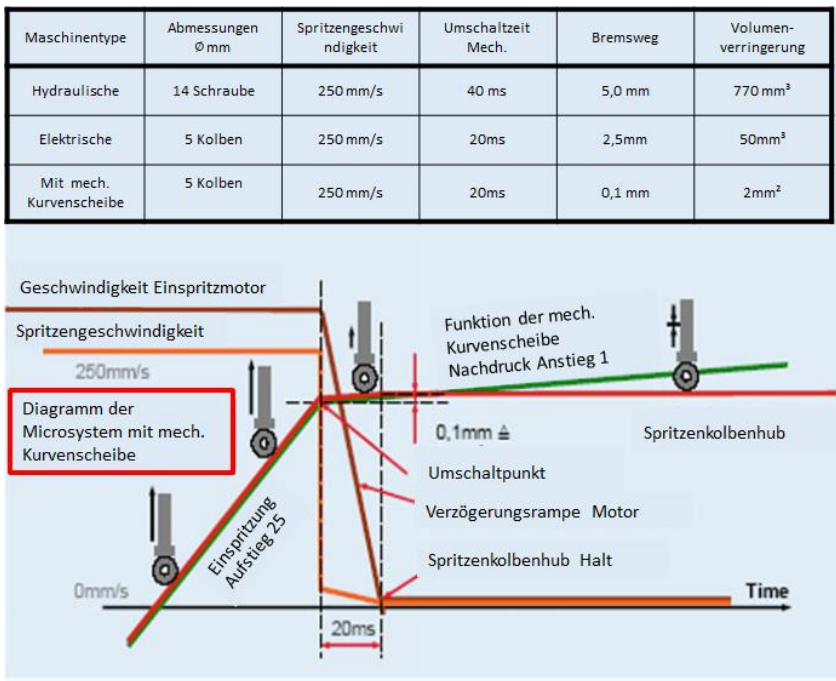


Abbildung 2.14: Vergleich der theoretischen Umschaltzeit für verschiedene Maschinentypologien. (Quelle: Wittmann-Battenfeld)

## 2.4.8 Kühlzeit

Nachdem der Haltedruck aufgebracht wurde, können die Mikroteile in der Regel entformt werden, da sich die Schmelze bereits abgekühlt und verfestigt hat. Es ist jedoch immer noch wichtig, den Angusskanälen Zeit zu geben, um ausreichend abzukühlen.

## 2.4.9 Prozesstemperaturen in der Form, Ausdehnung und Gleichgewicht

Eines der größten Probleme beim Mikrospritzgießen resultiert aus dem hohen "Oberflächen-Volumenverhältnis" der Teile. Das Material verfestigt sich sofort bei Kontakt mit den Wänden der Gießform. Dies könnte man durch Ändern der Parameter, z.B. der Einspritzgeschwindigkeit, kompensieren. Auf diese Weise füllt das Material den Hohlraum bevor es abkühlt; gleichzeitig steigt die Temperatur aufgrund der Scherrate, und dies hilft dem Prozess ebenfalls.

Je nach Geometrie wird dies nicht ausreichen, um eine vollständige Reproduktion (Füllen) des Hohlraums zu erreichen. In diesem Fall muss die Temperatur der Gießform erhöht werden.

Im folgenden Beispiel kann man diesen Einfluss sehen. Es zeigt Mikrohohlräume, radial angeordnet mit unterschiedlichen Oberflächen-Volumenverhältnissen, sowie Details von bis zu 300  $\mu\text{m}$ .

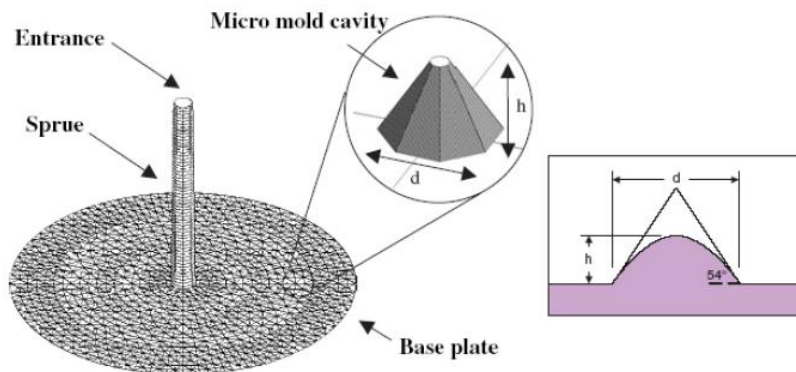


Abbildung 2.15: Radial angeordnete Mikrohohlräume. (Quelle: Fraunhofer IPT, WZL RWTH Aachen)

Dieser Test zeigt, was mit dem Material in einer gewissen Entfernung von der Eintrittsstelle geschieht. Das Formkonstruktionssystem sieht wie folgt aus:

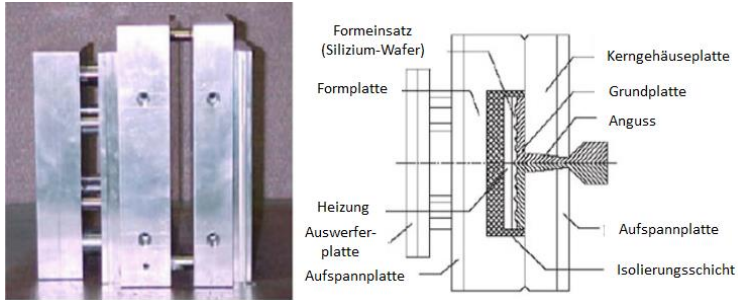


Abbildung 2.16: Formkonstruktionssystem für die Herstellung von Mikrohöhlräumen. (Quelle: Fraunhofer IPT, WZL RWTH Aachen)

Die Ergebnisse des Injektionstests bei einer Düsentemperatur von 300° C und einer Füllzeitkonstante von 1,5 s sind in der folgenden Abbildung zu sehen:

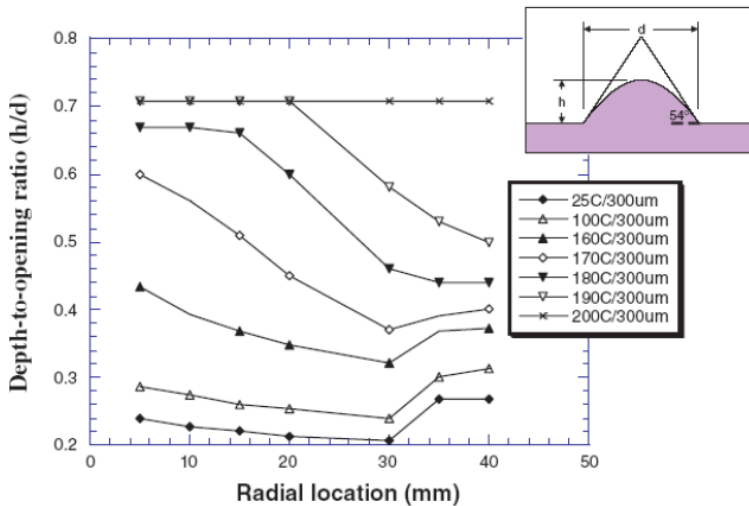


Abbildung 2.17: Testergebnisse der Mikrohöhlräume. (Quelle: Fraunhofer IPT, WZL RWTH Aachen)



Das Ergebnis ist immer noch nicht einheitlich, bis die Formtemperatur  $200^{\circ}\text{C}$  erreicht hat. Dies bestätigt die Tatsache, dass das Mikrospritzgießen mit einer Formtemperatur von  $40$  bis  $50^{\circ}\text{C}$  über dem  $T_g$  des thermoplastischen Materials (PC,  $T_g \approx 145^{\circ}\text{C}$ ) transformiert werden muss.

Beachten Sie bitte, dass das Risiko eines Materialabbaus und einer höheren Zykluszeit besteht. Außerdem sind die Maßabweichungen größer als in einer herkömmlichen Form gerade wegen dieser Temperaturerhöhung. In einigen Fällen kann eine Temperaturdifferenz von  $200^{\circ}\text{C}$  zwischen Auswerfen und Austreibung auftreten. Aus diesem Grund schlagen einige Hersteller von Mikrospritzgießmaschinen die Verwendung von Zentriersystemen für Mikroformen vor, wie unten gezeigt:

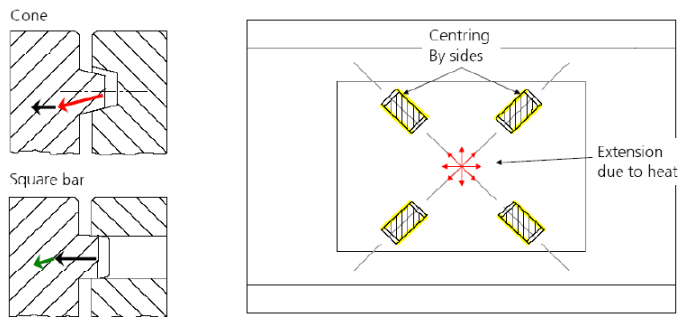


Abbildung 2.18: Zentriersystem für Mikroformen. (Quelle: Wittmann-Battenfeld)

Optimale Zentrierelemente für das Mikrospritzgießverfahren sind quadratisch oder rechteckig. Außerdem erfordert es ein schwebendes Hohlraumsystem.

Mit quadratischen oder rechteckigen Führungen erreicht man eine bessere Fokussierung des Hohlraums, da die Anpassung zwischen zwei parallelen Flächen stattfindet. Kleinere Schließkräfte sind erforderlich, um eine Gießform mit quadratischen oder rechteckigen Führungen zu schließen.

Mould shift during closing movement

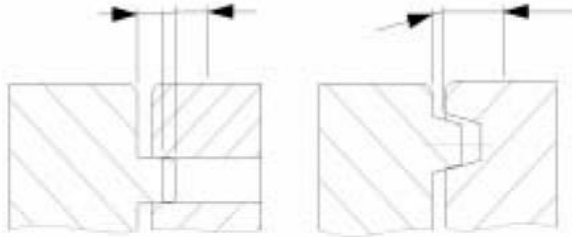


Abbildung 2.19: Typische Probleme bei der konventionellen Zentrierung. (Quelle: Wittmann-Battenfeld)

The mould should be closing with a minimum of power, it means that normally pillar guide is to avoid and a leader over 2 axis is recommended. the advantage of this centering is, different temperature on both side of the mould does not lead for an increase of the force (no higher resistance).

Heat-expansion always assumes the center. With different form-temperatures, the precision of fit is given with application of precision-square-leaderships, if the two sides, which proceed to the heat-expansion parallel, as leadership is used. These square-leaderships are also used by gripperplate from the handling.

Flat-leaderships are for micromoulding the better solution without that disturbing Side-strengths on the leaderships or it appears on part.

Conic leadership-elements are with standard-machines absolutely problem - less solutions.

**Wittmann-Battenfeld**  
 Injection Moulding Technology  
 1974 2-1-1

Abbildung 2.20: Empfehlungen für die Konstruktion eines Form-Zentriersystems (Quelle: Wittmann-Battenfeld)

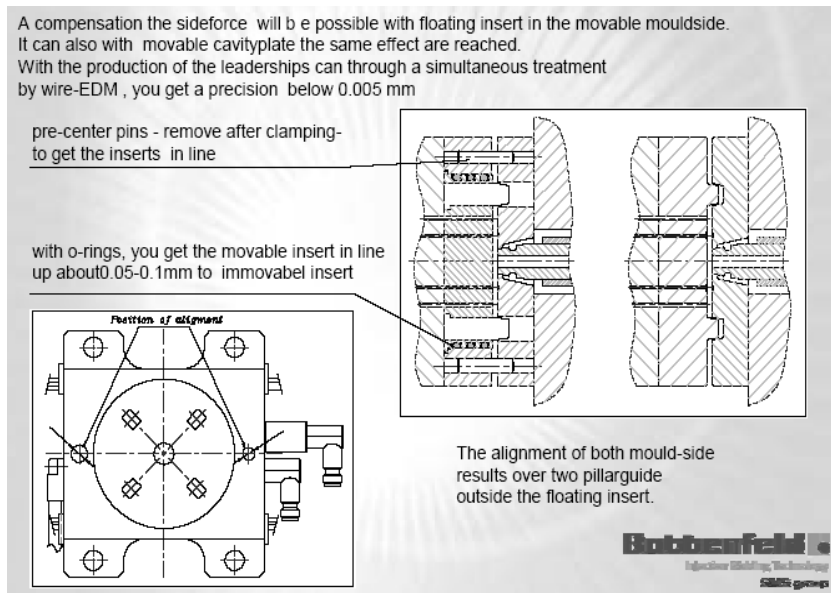


Abbildung 2.21: Empfehlungen für die Konstruktion eines Form-Zentriersystems  
(Quelle: Wittmann-Battenfeld)

### 2.4.9.1 Entlüftung der Gießform

Eines der typischen Probleme beim Mikrospritzgießen ist die Konstruktion des Entlüftungssystems.

Die Dicke des Teils hat die gleiche Größenordnung wie die Dicke der herkömmlichen Gasspülkanäle; wenn also herkömmliche Größen verwendet werden, könnte möglicherweise Kunststoffmaterial durch die Entlüftungskanäle entweichen.

Aus diesem Grund und insbesondere, um eine getreue Reproduktion der Formoberfläche zu erhalten, wird in vielen Fällen eine Vakuumpumpe verwendet, um die Luft aus dem Inneren der Form zu entfernen. Dies erfordert die Installation eines Perimeter-O-Rings, in der Regel auf der feststehenden Seite der Form, ein Ventil in der Düse der Maschine und eine kleine Vakuumpumpe, die aktiviert wird, nachdem die Form geschlossen und abgedichtet wurde.

In einigen Fällen wird die Änderung der Einspritzparameter oder die Erhöhung der Formtemperatur nicht ausreichen, um eine optimale Füllung zu erzielen, wie in den folgenden Abbildungen dargestellt:

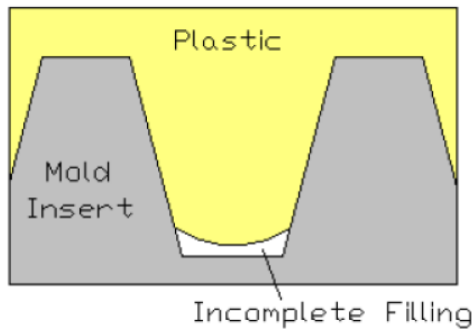


Abbildung 2.22: Detail einer unvollständigen Füllung aufgrund von Belüftungsproblemen. (Quelle: Eurecat)



Abbildung 2.23: Echtes Bild des Belüftungsproblems (Quelle: Eurecat)

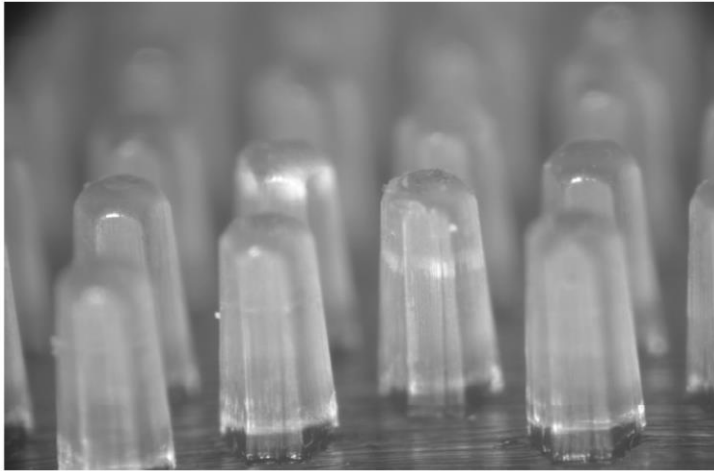


Abbildung 2.24: Gleiche Teile bei Verwendung eines Vakuumsystems. (Quelle: Eurecat)

Obwohl es keine offensichtlichen Füllprobleme gibt, hilft das in der Form erzeugte Vakuum den "Dieseleffekt" in den Formteilen zu vermeiden.



Abbildung 2.25: Dieseleffekt. (Quelle: Eurecat)

## 2.5 Werkzeuge und Maschinen

### 2.5.1 Die Spritzgießmaschine

Spritzgießmaschinen bestehen aus zwei unterschiedlichen Teilen: der Schließeinheit und der Plastifiziereinheit.

Die Schließeinheit ist verantwortlich für das Öffnen und Schließen der Form; das Teil wird mit Hilfe eines Auswerfers ausgeworfen. Diese Einheit besteht aus den folgenden Elementen:

- Fest montierte Aufspannplatte, die eine Hälfte der Form unterstützt
- Mobile Aufspannplatte, welche die andere Formhälfte unterstützt
- Reaktions-Aufspannplatte zur Unterstützung der Spann- und Haltekräfte
- Vier Bindungen als Widerstand gegen die Kräfte der mobilen Aufspannplatte
- Klemmsystem
- Auswurfsystem

Es gibt drei verschiedene Klemmantriebe: Hydraulische, mechanische oder elektrische.

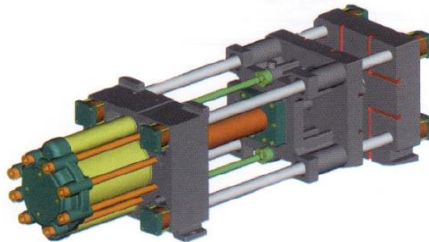


Abbildung 2.26: Hydraulischer Antrieb. (Quelle: Eurecat)

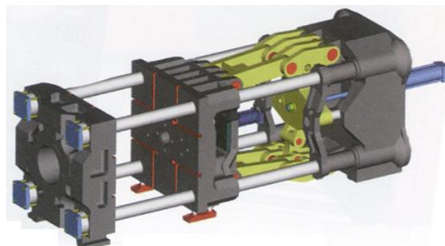


Abbildung 2.27: Mechanischer Antrieb. (Quelle: Eurecat)

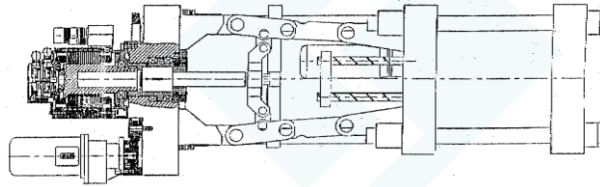


Abbildung 2.28: Elektrischer Antrieb. (Quelle: Eurecat)

Die Plastifiziereinheit ist ein beheiztes System, bestehend aus einer rotierenden Schnecke, die das geschmolzene Polymer unter Druck in eine geschlossene Form einführt. Diese Einheit besteht aus den folgenden Elementen:

- Trichter
- Plastifizierkammer
- Elektrische Heizungen
- Schnecke
- Düse
- Einspritzzylinder
- Extrudermotor

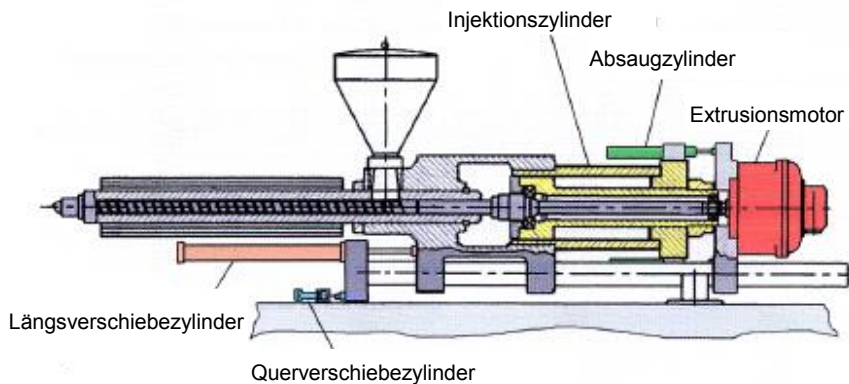


Abbildung 2.29: Teile einer Spritzgießmaschine. (Quelle: Eurecat)

Das wichtigste Element für das Spritzgießen ist die Schnecke. Es gibt drei unterschiedliche Schneckenbereiche:

- Zuführung: Transport des Materials
- Kompression: Erhitzen des Polymers durch Scherspannung
- Dosierung: Endgültige Homogenisierung, das Material ist bereit für die Einspritzung

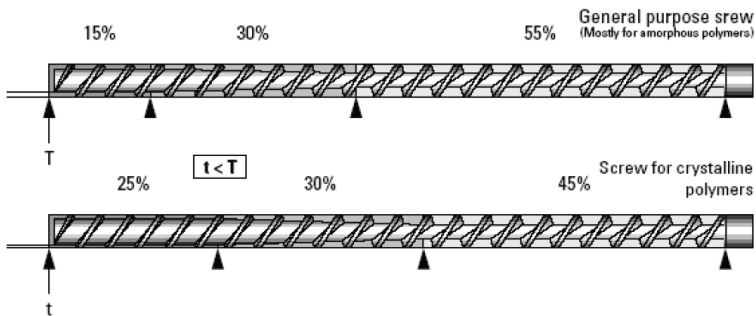


Abbildung 2.30: Schneckenbereiche. (Quelle: Arburg)

Die Rückstromsperre in der Düse ermöglicht die Einspritzung des Kunststoffes in die Form und verhindert, dass das Material in den Plastifizierzylinder zurückfließen kann.

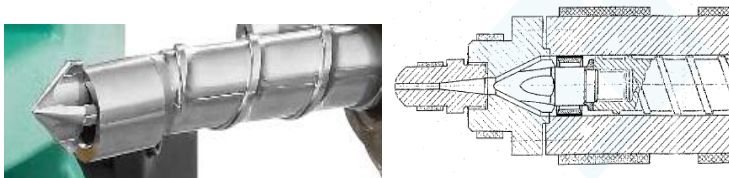


Abbildung 2.31: Schnecke und Rückstromsperre. (Quelle: Arburg)

## 2.5.2 Plastifiziersysteme

Verschiedene Plastifiziersysteme stehen für das Mikrospritzgießen zur Verfügung. Die beiden am weitesten verbreiteten Systeme werden hier vorgestellt:

- Das am häufigsten verwendete Plastifiziersystem ist eine Direkteinspritzeinheit mit einer Schnecke. Sie besteht aus einem



skalierten Plastifizierer, einer herkömmlichen Schnecke mit kleinem Durchmesser, Ring und Ventil oben. Andere typische Systeme enthalten Kugelventildichtungen, die sowohl für die Dosierung als auch das Einspritzen des Kunststoffes verwendet werden.

- Als Alternative werden manchmal Einspritzeinheiten mit Doppelstufen, Extruder und Einspritzkolben verwendet. Dieses System besteht aus einer Reihe von Mechanismen, wobei ein kleiner Extruder die Dosierung durchführt. Das Material gelangt in die Kammer und wird während des Einspritzvorgangs durch einen Kolben gedrückt



Abbildung 2.32: Herkömmliche skalierte Schnecke. (Quelle: Wittmann-Battenfeld)

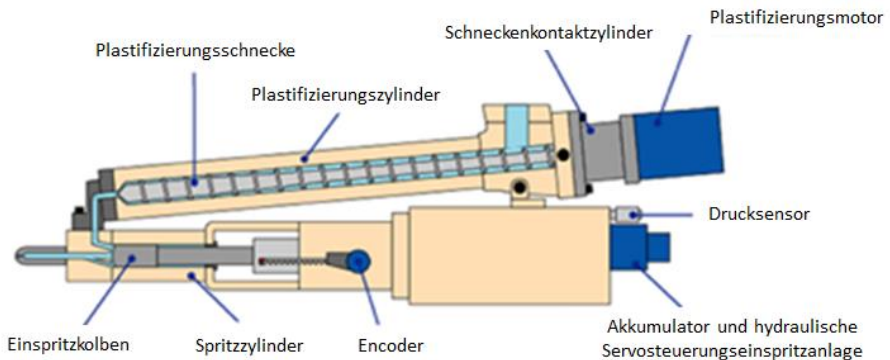


Abbildung 2.33: Plastifizierer mit Extruder und Einspritzkolben.

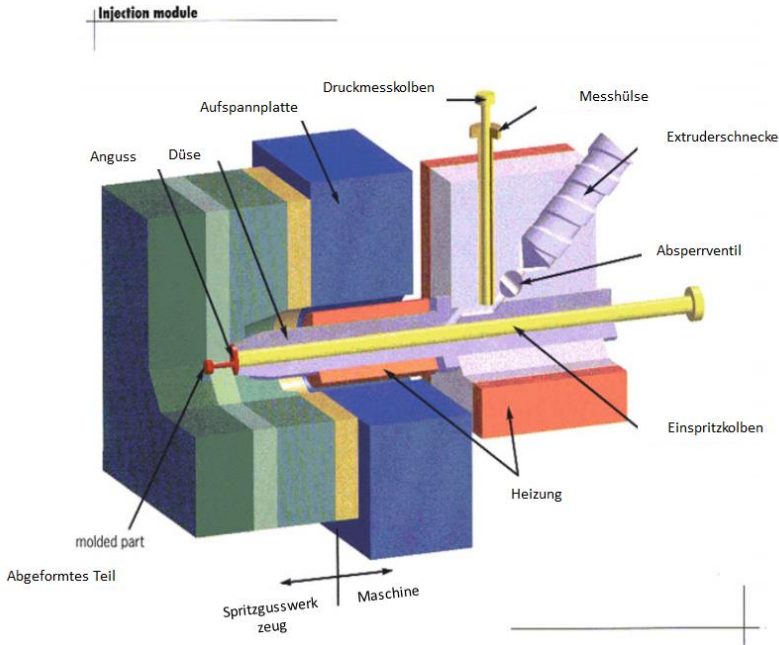


Abbildung 2.34: Schematische Darstellung eines Plastifizierers. (Quelle: Wittmann-Battenfeld)

Bei Verwendung von Maschinen mit Schnecken-Einspritzsystem müssen die Formen mit einem ausreichend großen Angusskanal ausgestattet sein, der bezüglich der „Lieferung“ des Mindestmaterialvolumens nicht so präzise sein muss – das Material kann vom Angusskanal absorbiert werden.

Der Einsatz eines größeren Angusskanals, neben der Verteilung des Polymers vom Eingang der Form in den Hohlraum oder die Hohlräume, verhindert den Abbau des Materials im Schnecken-Plastifizierer aufgrund einer übermäßigen Verweilzeit.

Daher muss das Volumen des Angusskanals berechnet werden, um eine ständige Erneuerung des mit jedem Schuss eingespritzten Polymers zu gewährleisten.

Der Hauptnachteil beim Einsatz eines Einspritzsystems mit einem Angusskanal mit hohem Volumen ist die erhöhte Gesamtzykluszeit aufgrund einer erhöhten Kühlzeit.

### 2.5.3 Mikrospritzgießsystem ohne Plastifizierung

Eines der Hauptprobleme beim konventionellen Mikrospritzgießen ist die Zeitspanne, welche das geschmolzene Material im Plastifizierer der Einspritzeinheit verbleibt, wo es leicht abgebaut werden kann. Moderne Mikrospritzgießsysteme besitzen oft keinen Plasti-

fizierer. Stattdessen lassen sie Ultraschallwellen auf das Material einwirken und dies führt zu einer sofortigen Schmelze.

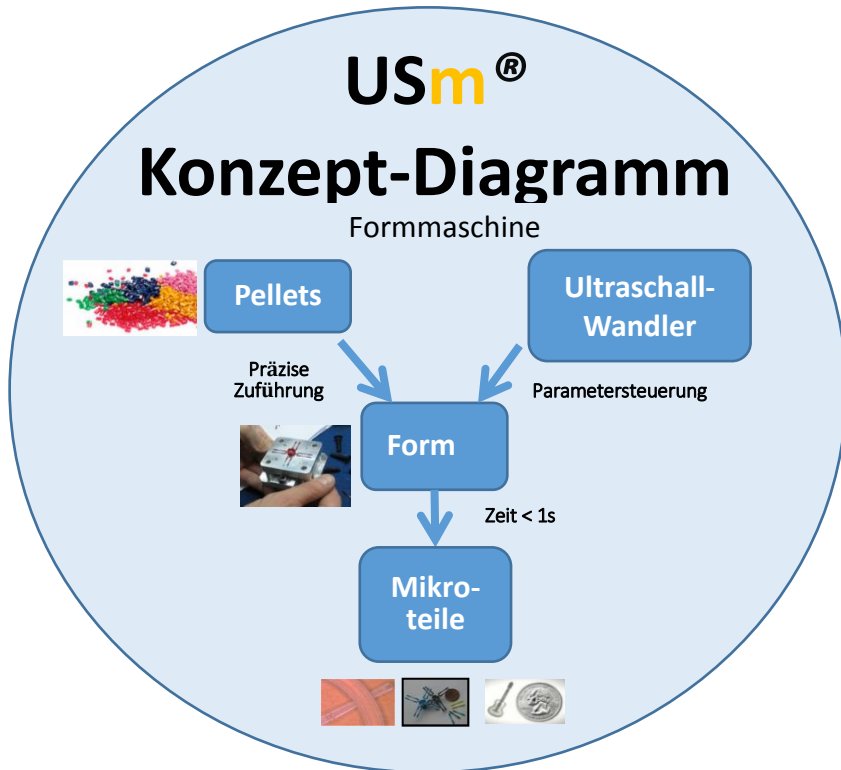


Abbildung 2.35: Konzept-Diagramm für Formung durch Ultraschall. (Quelle: Ultrason)

## 2.5.4 Die wichtigsten Mikrospritzgießmaschinen

Tabelle 2.3: Mikrospritzgießmaschinen

MANUFACTURER AND MACHINE	CLAMPING FORCE (kN)	INJECTION UNIT
Arburg – Microinjection module	----	Screw diameter: 8mm
Cronoplast/Rambaldi – Babyplast 610P	62,5	Piston diameter: 10mm to 18mm
Desma Tech – formicaPlast 1K and 2K	10	Pre-plastification piston: 6mm Plastification piston: 3mm
Dr. Boy – Boy XS	100	Screw diameter: 12mm
Juken Kogyo – JMW-017S-1.5t	15	Screw diameter: 14mm
L.K. Technology Holdings – SP2 and SP5	20 / 50	Screw diameter: 12mm / 14mm
Männer – Micro män 50 and Micro män 50 2C	50	Screw diameter: 14mm
Milacron – Fanuc Roboshot S2000i 17B	150	Screw diameter: 14 / 16 / 18mm
Mold Hotrunner Solutions – M3 and M3 mini	20	----
Nissei America – NEX15	150	Screw diameter: 16mm / 19mm
Sodick Plustech – LP10EH2, LP20EH3 and LP40A	100 / 200 / 400	Screw diameter: 14mm or 18mm
Sumitomo (SHI) Demag – Special plastification unit	Up to 500	Screw diameter: 12mm to 35mm
Toshiba Machine – EC5 and EC7	50	Screw diameter: 14 or 16mm
Ultrasion – Sonorus 1G	30	----
Wittmann Battenfeld – MicroPower 5 – 15t	50 or 150	Screw diameter: 14mm

## 2.5.5 Mikrospritzformen

Für die Herstellung derart kleiner Komponenten benötigt man Formen mit Eigenschaften, die auf die erforderliche Größe skaliert sind. Dies ist mit herkömmlichen Werkzeugmaschinen nicht machbar. Die üblichen Techniken zur Herstellung von Prototypen und Produktionswerkzeugen können im Allgemeinen nicht zur Herstellung von Formen für Mikroteile eingesetzt werden, die andere Techniken der Mikrobearbeitung erfordern.



Abbildung 2.36: Mikrobearbeitungsmaschinen. (Quelle: Fraunhofer IPT, WZL RWTH Aachen)

Verschiedene Technologien werden zur Durchführung der Mikrobearbeitung eingesetzt; die wichtigsten sind:

- Mechanische Systeme:
  - Mikrofräsen. Ein typisches Mikrobearbeitungsschneidwerkzeug kann einen Durchmesser von 0.1-0.5 mm aufweisen. Für die Mikrobearbeitung beträgt die Mindest-Spindeldrehzahl 20.000 UpM; unter außergewöhnlichen Umständen kann sie bis zu 500.000 UpM betragen. Weitere Informationen finden Sie im Kapitel Mikroschneiden.
  - Bearbeitung mit monokristallinen Diamanten

- Elektrische Systeme:
  - Laserablation: Durch Anwendung der Energie eines Laserstrahls wird ein Hotspot auf der zu bearbeitenden Oberfläche erzeugt.
- Mikro-Elektroerosion EDS Die Mikro-Elektroerosion bietet im Vergleich zu herkömmlichen Elektroerosion ein besseres "Seitenverhältnis". Sie besteht aus einem Elektrobearbeitungsverfahren, das die erosive oder erodierende Wirkung der elektrischen Entladungen nutzt, die aufgrund der Potentialdifferenz zwischen der Elektrode (dem Teil, das die Form gibt) und dem zu bearbeitenden Material, auftreten.

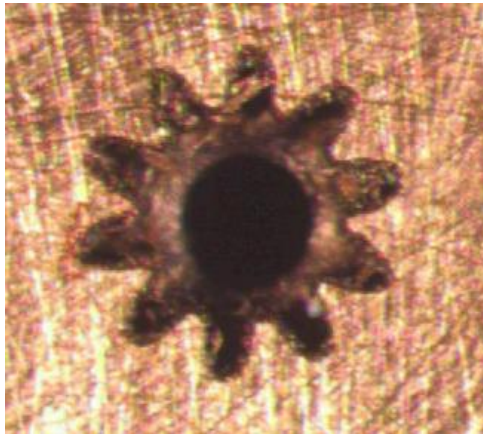


Abbildung 2.37: Detail einer Cavity-Laser-Ablation auf einem Mikrogetriebe. (Quelle: Eurecat)

- Chemische Systeme:
  - Selektives reaktives Ionenätzen
  - DRIE
  - Kombinierte Systeme:
  - Diamant- und Ultraschallbearbeitung.
  - ELID-Schleifen (Electrolytic-In-Process-Dressing). Eine kombinierte Technik zum Polieren und zur Veredelung.

- LIGA (Lithographisch-galvanischer Prozess). Sektorierte Strahlung aus einem Photopolymer mit Laser- oder Röntgenstrahlen.

Für Mikrospritzgießformen wird empfohlen, dass die Kühlung des Hohlraums durch gleichförmige Kühlkanäle geschieht, die eine effizientere Überwachung der Werkzeugtemperatur erlauben, die Qualität der Spritzteile verbessern und die Zykluszeit reduzieren können.

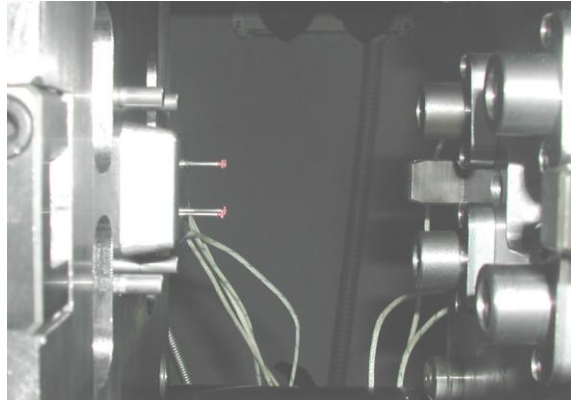
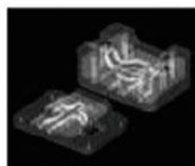


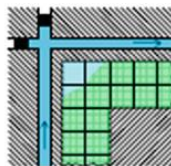
Abbildung 2.38: Details einer Mikrospritzgießform. (Quelle: Eurecat)

Das Variotherm-System oder ein ähnliches Verfahren können verwendet werden; dabei wird der Formhohlraum durch Induktion oder andere Methoden erwärmt und die Form mit einem Kühlkreislauf (mit Flüssigkeit) ausgerüstet. Bei diesem System wird die Form isoliert.



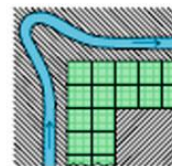
#### Funktionsprinzipien

- Effiziente Werkzeugtemperierung durch optimale Positionierung der Kühlkanäle



#### Stand der Technik

- Grundlegende Machbarkeitsstudien
- Weiterentwicklung der RT Technik hin zum Einsatz in Serienwerkzeugen



#### Zukünftiges Potential

- Reduktion der Zykluszeit im Spritzguss
- Verbesserung der Qualität und Komplexität den Spritzgussteile

Abbildung 2.39: Variotherm-System. (Quelle: Fraunhofer IPT, WZL RWTH Aachen)

Kleine Heizwiderstände, gesteuert durch Thermoelemente, werden verwendet, wenn Temperaturen zwischen 100° und 200°C in der Form benötigt werden. In den großen Formen kann man die klassischen thermischen Kanäle verwenden, indem man eine zuvor temperierte Flüssigkeit ständig zirkulieren lässt.

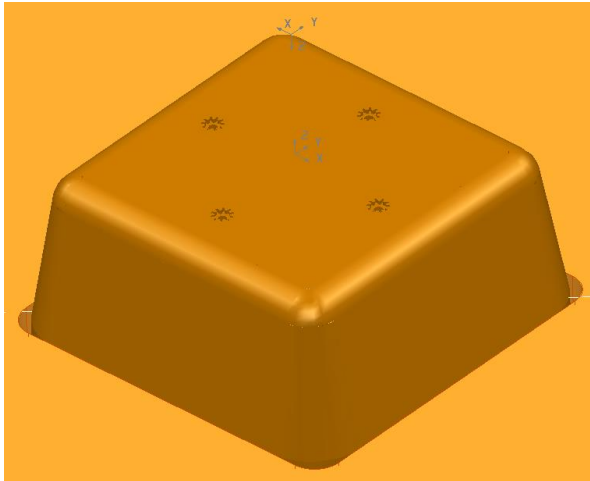


Abbildung 2.40: 3D-CAD-Zeichnung: vier Kavitäten in einem Formeinsatz. (Quelle: Eurecat)

## 2.6 Branchen und Anwendungen

Eine Vielzahl winziger Kunststoffkomponenten, hergestellt durch Mikrospritzgießen, werden in folgenden Branchen eingesetzt:

- IT und Kommunikation: Druckerköpfe und andere Schreibköpfe, Komponenten für Lichtwellenleiter, optische Schalter, Wellenleiter und Strahlteilerführungen.
- Medizinbranche: Komponenten für Schrittmacher, Hörgeräte, in-vitro-Diagnostik-Test, Mikro-Vision-Sensor, Komponenten für die Blutzuckermessung, Mikrofluidik-Chips.
- Biotechnologie: Mikroplatten zur Identifizierung von Mikroorganismen.
- Heimautomatisierung: Alle Arten von Mikrosensoren.
- Mikromechanik: Uhren, Messgeräte, Mikromechanismen usw.
- Automobilbranche: Drucksensoren, Motormanagement, Luft- und Gasqualitätskontrolle, Gangschaltung, ABS sowie Kontrolle der

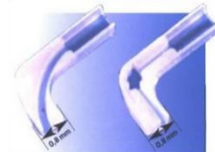


Dynamik des Fahrzeugs. Adaptive Navigationskontrolle (ACC), Airbag, Hinderniserkennung und verbesserte Sicht, usw.

- Elektronik: Chips, Sensoren, Beschleunigungssensoren
- Luft- und Raumfahrt: Alle Arten von Mikrosensoren.
- Luft- und Raumfahrt und Rüstungsindustrie: Messen des Luftdrucks, Beschleunigung, Sensoren, Feuchte, Druck, Gas, Temperatur, Stabilisatoren, Mikro-Seismometer, Mikro-Hygrometer, Mikromotorenantriebe und Infrarot-Photodetektoren, Mikroroboter.
- Umwelt und Landwirtschaft: Mikrospektrometer, Gassensoren, Messtechnik zur Kontrolle der Umweltverschmutzung.



Micro – clip  
Part weight: 0,037 g



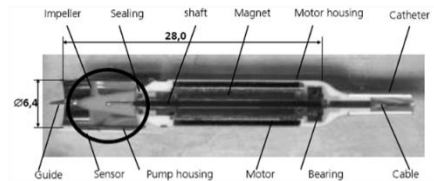
Micro – implant  
Part weight: 0,022 g



Micro – bearing cap  
Part weight: 0,01 g /  
0,02 g

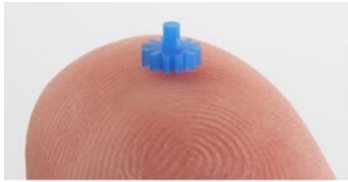


Disposable cartridge for in vitro diagnostic tests [Philips, 2010]

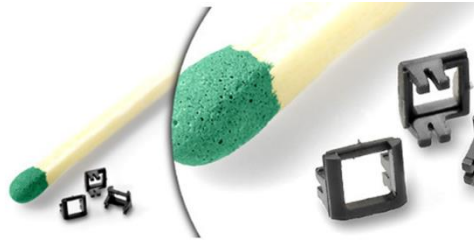


Intracardiac pumping system

Abbildung 2.41: Produkte für Medizin, Pharmazie und Biotechnologie.



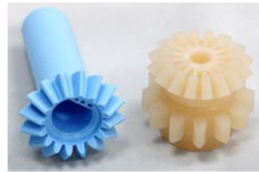
Micro-gear  
[Mold Hotrunner Solutions]



Micro-clamping frames  
[Arburg]



Micro-gears and micro-encoders  
[Makuta]



Micro-mechanical components  
[U moulding]

Abbildung 2.42: Produkte für die Mikromechanik.



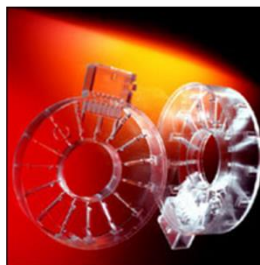
Micro-connectors [Accumold USA]



Umbrella valves  
[Accumold USA]



High temperature component  
[Makuta]

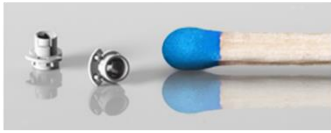


Micro-housings  
[Accumold USA]

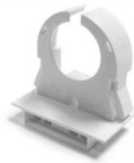


Clip for car door  
[Makuta]

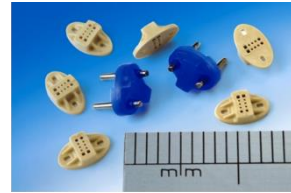
Abbildung 2.43: Produkte für die Automobilbranche.



Micro-electronic circuit board component  
[Mold Hotrunner Solutions]



Electrical bracket  
[Mold Hotrunner Solutions]



Micro-connectors  
[Accumold USA]



Electrical bracket  
[Mold Hotrunner Solutions]

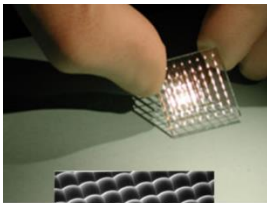


Telecommunication - Socket  
[Mold Hotrunner Solutions]



Micro-connector  
[U moulding]

Abbildung 2.44: Produkte für die Automobilbranche.



Micro-lenses arrays  
[RPC Photonics]



Micro-lenses  
[Jenoptik]

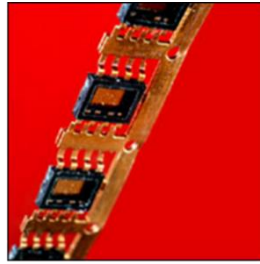


Micro-lenses  
[U moulding]

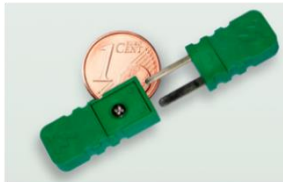
Abbildung 2.45: Produkte für die optische Industrie.



Insert Mould Lamp Capsule  
[Accumold USA]



Lead Frame SO8  
[Accumold USA]



Micro-connector for  
temperature sensor  
[Thermo Sensor]



Micro-mould Rotor Pinion  
[Accumold USA]

Abbildung 2.46: Produkte für die Luft- und Raumfahrt-Industrie und die Rüstungsindustrie.

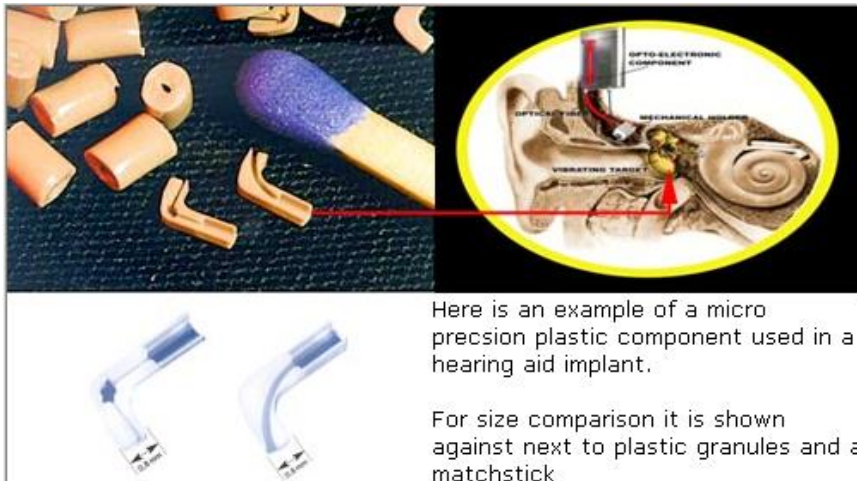


Abbildung 2.47: Beispielanwendung eines Mikroteils. (Quelle: Battenfeld Microsystem 50)

## 2.7 Handhabung und Prüfung von Mikroteilen

Eines der Hauptprobleme auf dem Gebiet des Mikrospritzgießens ist die Handhabung und Prüfung der eingespritzten Teile, nicht nur in Bezug auf die Abmessungen, sondern auch auf die Struktur.

### 2.7.1 Handhabung

Arbeiten auf der Mikrometerebene bringt eine Reihe von Schwierigkeiten mit sich, die bei Arbeiten mit normalen Größen nicht auftreten, beispielsweise Kohäsionskräfte, elektrostatistische Kräfte, van der Waals und Kapillarwirkung.

Die Arbeitsumgebung ist von größter Bedeutung: Temperatur, Feuchtigkeit, Partikel (Staub) sollten kontrolliert werden und dem Reinraum-Standard entsprechen. Sie sollte auch gegen äußere Vibrationen geschützt werden.

Grundsätzlich gibt es zwei Handling-Systeme: mit Kontakt und berührungslos. Obwohl berührungslose Systeme das Problem der Kohäsionskräfte lösen, sind sie begrenzt durch die Größenordnung der Kräfte, die auf die Teile einwirken.

Eine Möglichkeit, die Kohäsionskräfte zu verringern, ist die Reduzierung der Kontaktkräfte, wie wir in den folgenden Abbildungen sehen.

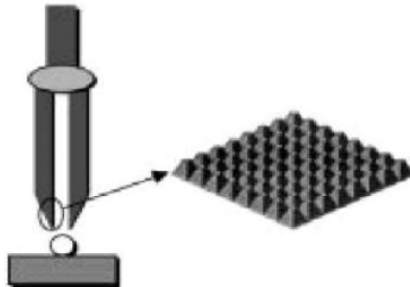


Abbildung 2.48: Handhabung von Mikroteilen. (Quelle: Fraunhofer IPT, WZL RWTH Aachen)

In einem Kontakt-Handlingsystem müssen die Kräfte, die auf die Teile einwirken, sorgfältig kontrolliert werden. In diesem Fall müssen piezoelektrische Sensoren integriert werden.

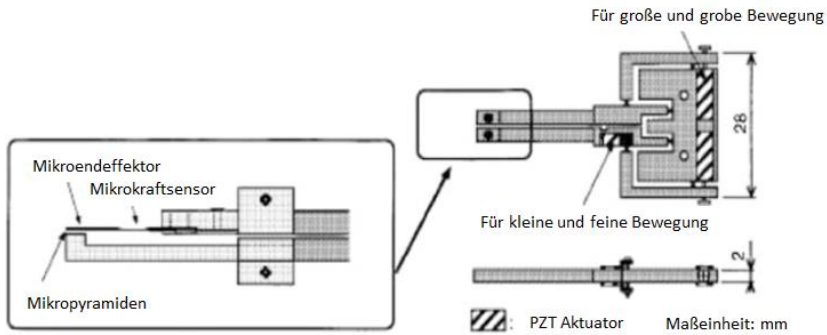


Abbildung 2.49: Piezoelektrischer Sensor. (Quelle: Fraunhofer IPT, WZL RWTH Aachen)

Spezielle Mikrospritzgießmaschinen, wie die Battenfeld Microsystem 50, bieten Handling- und Inspektionssysteme für die Mikroteile. Mit einer Gesamtarbeitsumgebung von 1 cm<sup>3</sup> und einer Positionsgenauigkeit von 1 µm kann sie je nach Anwendung verschiedene Werkzeuge aufnehmen: Klemmen, Klammern, Schneidelemente, Werkzeuge zum Entgraten, usw.

## 2.7.2 Inspektion

Analyse der Oberflächenbeschaffenheit:

Ein AFM (Rasterkraftmikroskop) erzeugt, wie unten gezeigt, Bilder, auf denen man auf der Oberfläche eines Formteils (im gezeigten Beispiel aus POM) Bearbeitungsspuren erkennen kann, die durch das Schneidwerkzeug verursacht wurden, das zur Herstellung der Form verwendet wurde.

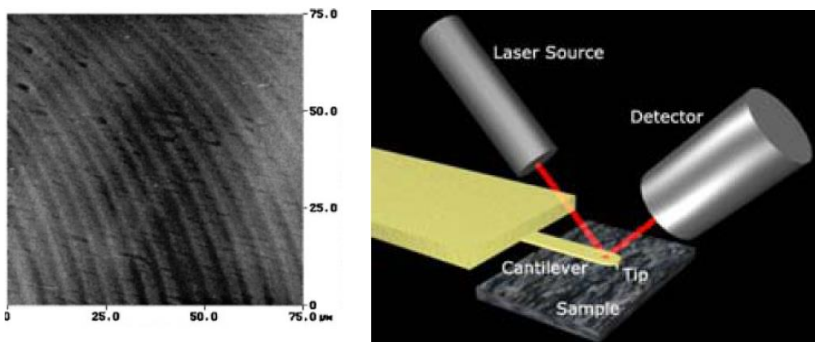


Abbildung 2.50: Bearbeitungsspuren auf der Oberfläche eines Bauteils (links) und Funktionsskizze eines AFM (rechts).

Das Funktionsprinzip besteht aus einem Silizium-Mikroausleger mit einer Mikrospitze am oberen Ende. Das Mikroskop verwendet eine Laserquelle und einen Detektor zur Überwachung der Auslenkung.

Dieses System liefert nicht nur "topographische" Informationen; mit der richtigen Konfiguration kann es Informationen über strukturelle Eigenschaften und Material zur Verfügung stellen.

Das Weißlichtinterferometer (ein Instrument, bei dem die Welleninterferenz benutzt wird, um präzise Messungen der Länge der Verschiebung in Bezug auf die Wellenlänge durchzuführen) ist eine Technik, die eingesetzt wird, um eine Karte der Komponentenprofile ohne Kontakt, durch optische Reflexion, zu erhalten. Es wird verwendet zur Bestimmung der Abstände sowie der Wellenlängen.

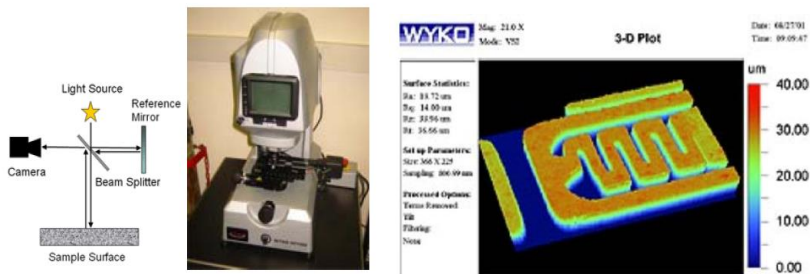


Abbildung 2.51: Weißlichtinterferometer.

Alle Messtechniken, die mit optischen Systemen arbeiten, haben zwei grundlegende Einschränkungen: die Mehrfachreflexion aufgrund der Oberflächenrauigkeit und die Schwierigkeit, die Reflexion in komplexen Teilgeometrien zu erfassen.

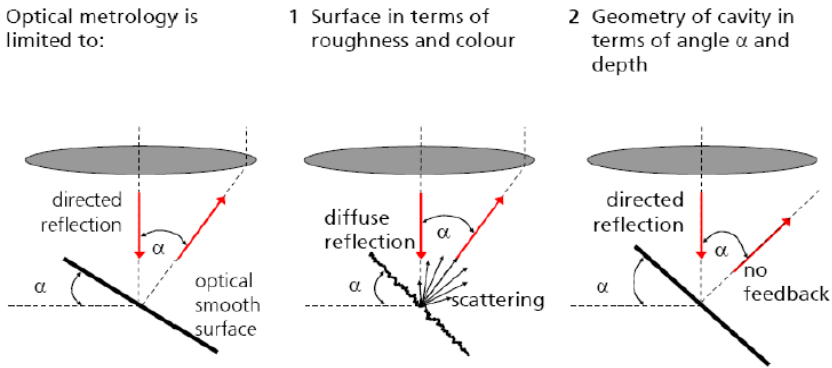


Abbildung 2.52: Optische Messtechnik. (Quelle: Fraunhofer IPT, WZL RWTH Aachen)

### 2.7.3 Morphologische Analyse

Auflöstechniken ermöglichen eine selektive Entfernung des amorphen Teils eines semikristallinen Materials und dann die Analyse seiner Struktur. Zur Durchführung dieses Tests ist ein semikristallines Material erforderlich, das einem chemischen Angriff des Lösungsmittels widersteht.

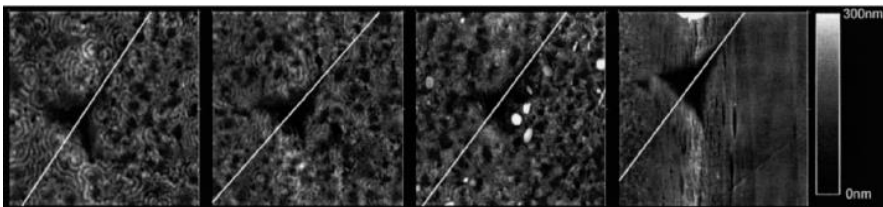


Abbildung 2.53: Fotos einer morphologischen Analyse.

Das Testergebnis (vorherige Abbildung) zeigt, wie an der Innenseite des Teils bis  $125\ \mu\text{m}$  von der Oberfläche sphärolithische kristalline Formationen auftreten, das Kristallwachstum jedoch abnimmt, wenn die Oberfläche erreicht wird (letztes Bild rechts); dort ist das Kristallwachstum Null. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Teil zu schnell abgekühlt wurde. Daher können wir zu dem Schluss kommen, dass die Materialstruktur mechanisch nicht homogen ist.

<sup>1</sup> Ein Sphärolith ist ein Cluster strahlig-nadeliger oder lattenförmiger Kristalle.



## 2.7.4 Mechanische Analyse

Der Mikro-Durometer ermöglicht die Analyse der Oberflächenhärte in Mikroteilen und der Viskoelastizität (Herstellung zyklischer Belastung), Elastizitätsmodul und Kriechen.

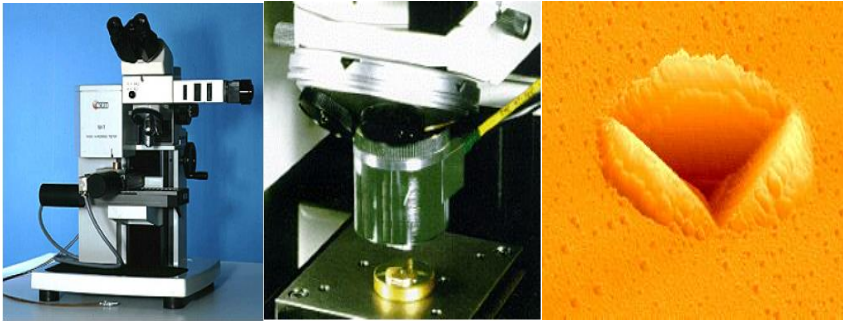


Abbildung 2.54: Mikrophotonik-Mikrodurometer.

MicroDAC (Mikro-Deformationsanalyse mittels Korrelation) ist eine Technik, die es möglich macht, Oberflächenspannung in Mikroteilen zu erkennen; dabei wird das Teil gescannt und mit mathematischen Algorithmen der gleichen Bereiche bei unterschiedlichen Spannungsniveaus verglichen.

## 2.8 Anwendungsfall: Mikrofilter

### 2.8.1 Beschreibung

Ziel: Design, Herstellung und Charakterisierung eines Mikrofilters für Hörgeräte, Dialyse-Medien und Inhalator.

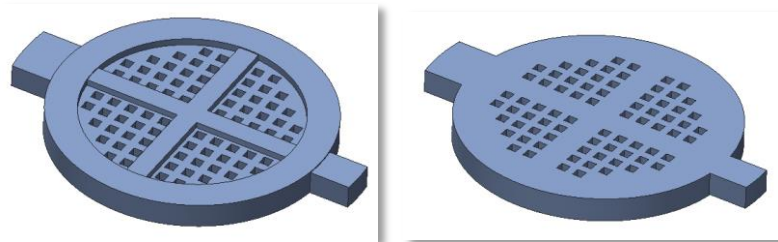


Abbildung 2.55: CAD3D-Mikrofilter. (Quelle: Eurecat)

Haupteigenschaften:

Technical Specification	Unit	Value
External Diameter	mm	2
Squared holes size	$\mu\text{m}$	70
Pitch between holes	$\mu\text{m}$	80
Material	-	POM
Flow Pressure	bar	1

Mikrofilter-Fertigung:

- Mikrospritzgießverfahren ( $\mu\text{IM}$ )
- DesmaTec FormicaPlast 1K Maschine

Formherstellung:

- Mikro-Funkenerosionsprozess ( $\mu\text{EDM}$ )
- Sarix SX 200 Maschine

Mikrofilter-Eigenschaften untersucht:

- Filtermaterial
- Lochform
- Quadratische Lochgröße
- Abstand zwischen den Löchern (Lochdichte)
- Gesamtzahl der Poren
- Filterstärke
- Form, Anzahl und Position der Verstärkungsrippen
- Anforderungen und Beschreibung der Anwendung
- Fertigungseinschränkungen

## 2.8.2 Mikrofilter-Design-Analyse (FEM/CAE)

- Die numerische Simulation mittels der Finite-Elemente-Methode FEM lieferte eine Richtlinie zur Optimierung der Geometrie.
- Die Strukturanalyse wurde mit SW Inventor Pro 2013 durchgeführt, um die resultierende Spannungsverteilung auf dem Filter zu prognostizieren, die einen Druck von 1 bar auf die gesamte vordere Oberfläche ausgeübt hat.

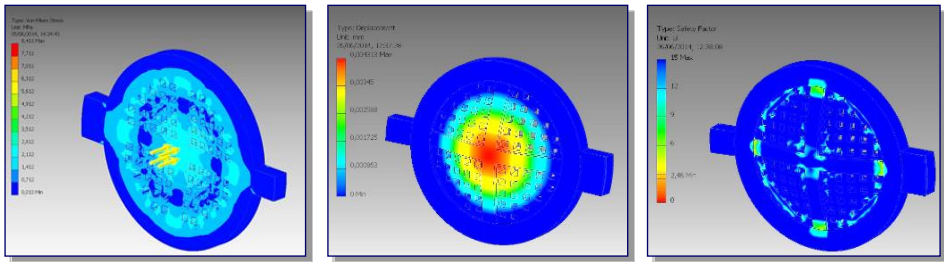


Abbildung 2.56: Von Mises Spannung, Verschiebung und Sicherheitsfaktor-Simulationen. (Quelle: Eurecat)

## 2.8.3 Mikrospritzgießen-Prozesssimulation

### 2.8.3.1 Füllung und Parameter

µIM-Prozess-Simulationsprogramm: Moldflow2013 SW

- Simulation: Fließfront und Füllphase

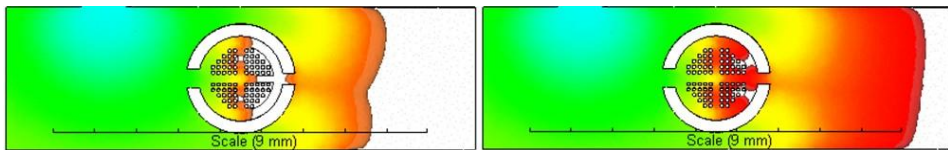
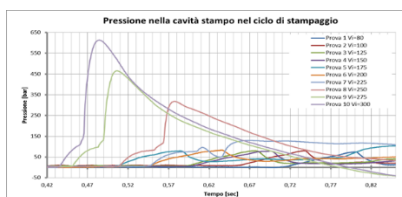


Abbildung 2.57: MoldFlow-Simulationen. (Quelle: Eurecat)

- Optimierung der Prozessparameter nach Erfassung der Druckwerte in der Einspritzphase.



- **Process parameters optimisation:**

- $T_{\text{mold}} = 80^{\circ}\text{C}$
- $T_{\text{melt}} = 220^{\circ}\text{C}$
- $V_{\text{inj}} = 200 \text{ mm/sec}$
- $\text{Max } P_{\text{inj}} = 1000 \text{ bar}$
- Plunger run = 12,5 mm
- $P_{\text{hold}} = 1000 \text{ bar}$
- $t_{\text{hold}} = 5 \text{ sec}$
- $t_{\text{cool}} = 3/5 \text{ sec}$

Abbildung 2.58: Optimierung der Prozessparameter. (Quelle: Eurecat)

### 2.8.3.2 Optimierung der Gate-Positionierung

- Anzahl der Gates und ihre Positionierung. Simulationen und Größenoptimierung

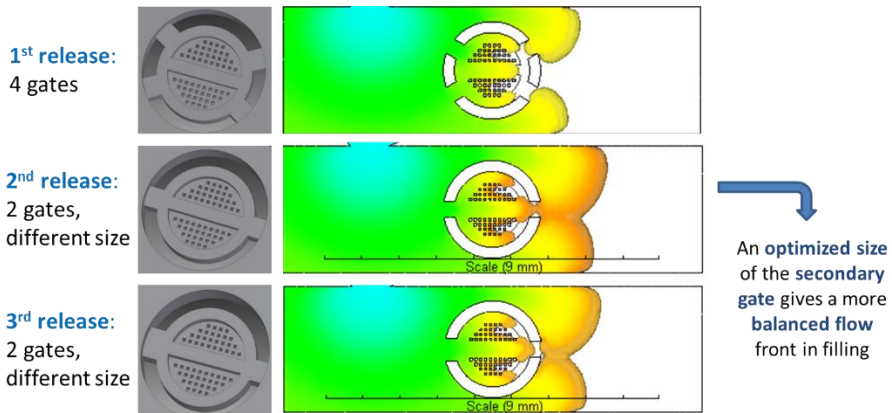


Abbildung 2.59: Optimierung der Gate-Positionierung. (Quelle: Eurecat)

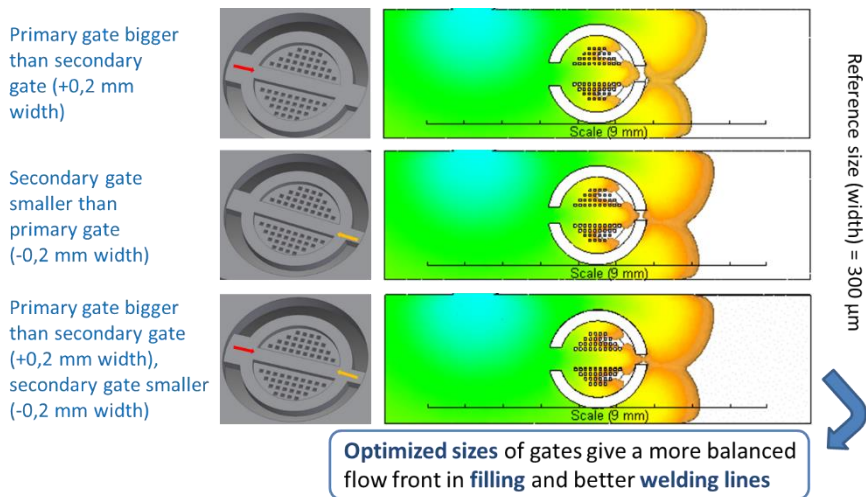


Abbildung 2.60: Optimierung der Gate-Positionierung. (Quelle: Eurecat)

### 2.8.3.3 Analyse der Schweißlinien und Lufteinschlüsse

Weitere wichtige Themen sind Schweißlinien und Lufteinschlüsse:

- Schweißlinien sind strukturelle Schwächen im Teil.
- Lufteinschlüsse geben uns Hinweise über das Füllen.

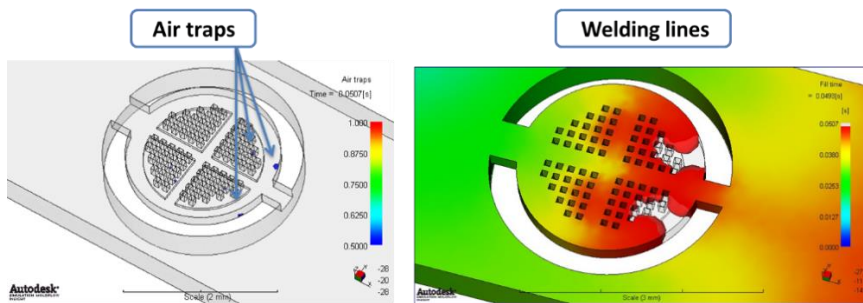


Abbildung 2.61: Analyse der Schweißlinien und Lufteinschlüsse (Quelle: Euresat)

## 2.8.4 Design und Herstellung der Form

$\mu$ EDM-Prozess

Der  $\mu$ EDM-Prozess wurde in zwei unterschiedlichen Arbeitsansätzen angewendet: Sinken und Fräsen

Das Werkzeug war ein Zylinderstab aus Wolframkarbid (WC) mit einem Nenndurchmesser gleich 0,4 mm.

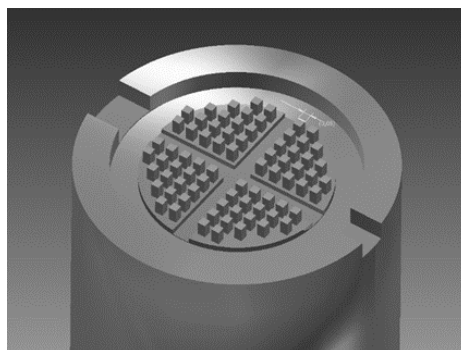


Abbildung 2.62:  $\mu$ EDM-Werkzeug. (Quelle: Euresat)

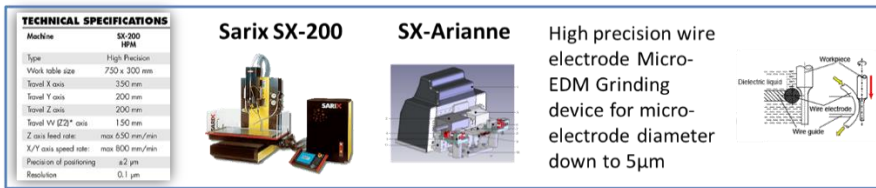


Abbildung 2.63: µEDM-Maschine. (Quelle: Eurecat)

Das µEDM-Senken der Stifte (80 µm quadratische Größe) wurde durch Bearbeiten der Elektrode in die gewünschte Form unter Verwendung des Drahtwerkzeuges, eingebaut in die Sarix-Maschine, durchgeführt unter Berücksichtigung der Kompensation des Werkzeugverschleißes und durch Bearbeiten des Stückes in vertikaler und horizontaler Richtung.

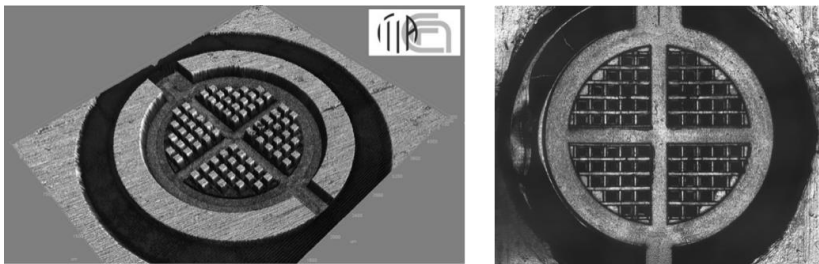


Abbildung 2.64: Mikrofilter. (Quelle: Eurecat)

Das µEDM-Fräsen der Kanäle (70 µm Breite), wurde durch die Anwendung der Schicht-für-Schicht-Strategie durchgeführt. Die Gesamtbearbeitungszeit betrug etwa sechs Stunden.

## 2.9 Prozessoptimierung und Teilefertigung

- Das Mikrospritzgießen von Teilen unter Verwendung des Einsatzes, der mit EDM hergestellt wurde, montiert auf einer Masterform in einer schneckenlosen/Zwei-Kolben-Mikrospritzgießmaschine.
- Die Konfiguration der Prozessparameter (Schmelz- und Formtemperatur, Einspritzgeschwindigkeit, Haltezeit und Druck, Kühlzeit), ausgehend von früheren Untersuchungen und Simulationen, wurde durchgeführt, um das letzte Teil zu erhalten.

- Dimensionelle Charakterisierung des Teils durch konfokales Mikroskop Zeiss CSM 700. Ein weiterer Schritt, der noch umgesetzt werden muss, wird die Mikrofilterprüfung in medizinischen Geräten sein.

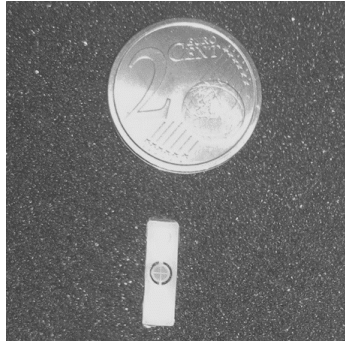


Abbildung 2.65: Mikrofilter injiziert. (Quelle: Eurecat)

## 2.10 Referenzen

1. DEMAG ERGOTECH
2. BATTENFELD SMS Group
3. Fundación privada ASCAMM
4. IPT Fraunhofer
5. ULTRASION
6. WITTMANN-BATTENFELD
7. WZL RWTH AACHEN





# 3 Mikro-Additive Fertigungstechniken

Felip Esteve<sup>1</sup>, Djamilia Olivier<sup>1</sup>, Qin Hu<sup>2</sup> and Martin Baumers<sup>2</sup>

1 Asociación Española de Rapid Manufacturing (ASERM)

2 Additive Manufacturing and 3D Printing Research Group (3DPRG),  
The University of Nottingham

## 3.1 Überblick

In vielen Branchen, einschließlich Medizin, Luft- und Raumfahrt, Militär/Verteidigung, Optik, Automobilindustrie, Konsumgüter und Kommunikation, werden immer mehr Kleinstgeräte und Komponenten mit komplexen Strukturen im Mikromaßstab benötigt, die aus einer Vielzahl von Materialien hergestellt werden. Aktuelle Anwendungen für miniaturisierte Komponenten - mit Abmessungen im Bereich von wenigen Mikrometern bis zu einigen zehn Millimetern - sind Miniaturmotoren und Turbinen, Mikrosatelliten, implantierbare medizinische Geräte, Ausrüstung für die minimal-invasive Chirurgie, Mikro-Roboter, und Miniatur-Gießformen und Formbauteile. Es wird erwartet, dass die Nachfrage nach Miniaturteilen in der Zukunft stark ansteigen wird [1].

Insbesondere Additives Manufacturing (AM) bietet Möglichkeiten zur Herstellung präziser Strukturen in einem echten dreidimensionalen Fertigungsverfahren für eine wachsende Zahl an technischen Fachgebieten. Zu den prominentesten Fachgebieten gehören regenerative Medizin, Medizinprodukte, neue Techniken der biologischen Medizin auf Grundlage der kontrollierten Freisetzung von Arzneimitteln und organischen Prinzipien, Bionik, Mikroelektronik und Optoelektronik. Biochips, MEMS, Mikrofluid-Vorrichtungen, photonische Kristalle, Gerüste für Tissue Engineering (Gewebezüchtung) und Systeme zur Abgabe von Arzneimitteln sind einige gängige Anwendungen, die auf zunehmendes Interesse stoßen.

AM kann als eine Sammlung von Technologien definiert werden, die in der Lage sind Materialien zu verbinden, um Objekte aus 3D-Modelldaten herzustellen, in der Regel Schicht auf Schicht, im Gegensatz zu subtraktiven (oder formativen) Herstellungsmethoden [2]. AM hat sich ursprünglich aus einer Reihe von Technologien für das Rapid Prototyping entwickelt. Zwei generische Vorteile im Vergleich zu anderen Herstellungstechni-

ken werden mit AM in Verbindung gebracht [3]: Zum einen ermöglicht AM die Herstellung von Komponenten, ohne viele der geometrischen Einschränkungen, die subtraktive und formative Prozesse mit sich bringen. Zum anderen ermöglicht AM die Produktion kleiner Mengen potenziell maßgeschneiderter Produkte zu vergleichsweise niedrigen durchschnittlichen Kosten pro Einheit. Neben diesen Vorteilen ist AM allerdings auch mit einer Reihe von Verfahrensbeschränkungen verbunden [4], beispielsweise:

- Begrenzte Auswahl an Materialien und Eigenschaften;
- Relativ geringe Prozessproduktivität;
- Geringe Genauigkeit der Produktabmessungen;
- Die Anforderung an die Nachbearbeitung aufgrund der schlechten Oberflächenqualität;
- Prozessvariabilität und begrenzte Wiederholgenauigkeit;
- Relativ hohe Kosten pro Einheit bei mittleren und hohen Volumina.

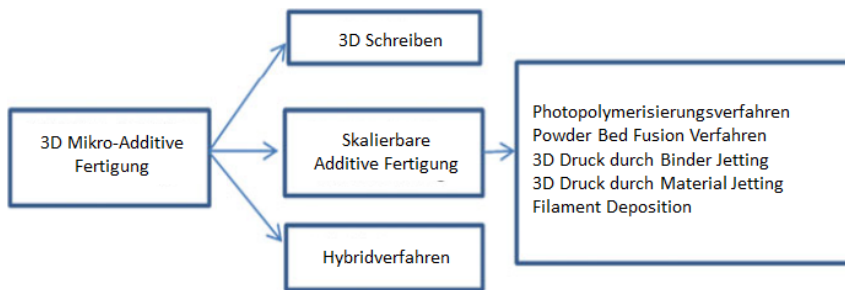


Abbildung 3.1: Klassifizierung von 3D-mikroadditiven Fertigungsverfahren.

Dieses Kapitel stellt fünf additive Fertigungsverfahren vor, die ursprünglich für den Einsatz in allgemeinen Fertigungsanwendungen entwickelt wurden und die sich für die Herstellung im Mikro-/Nanomaßstab als vielversprechend erwiesen haben. Man sollte jedoch beachten, dass in anderen Bereichen der Beschichtungstechnologie Entwicklungen basierend auf dem Prinzip der direkten Strukturierung (direct writing) stattgefunden haben. Auch wenn die Technologien auf Grundlage der direkten Strukturierung in Abbildung 3.1 aufgeführt sind, ist diese Methode zur 3D-Mikrostrukturierung derzeit nicht in großem Ausmaß entwickelt. Die zur Verfügung stehenden 3D-Direktschreibtechniken verwenden einen 2½-dimensionalen Ansatz, der im Vergleich zur auf Silizium basierten planaren Herstellung einige zusätzliche Freiheiten erlaubt, aber immer noch nicht das Niveau der räumlichen Volumenfertigung erreicht [5]. Darüber hinaus zeigt Abbildung 3.1 Hybridverfahren, die sich auf eine beliebige Kombination von herunterskalierten Additive Manufacturing, 3D-Schreibentechnologien beziehen, sowie herkömmliche Herstellungswegen auf

der Mikroskala. Als Voraussetzung für die erfolgreiche Einführung der 3D-mikroadditiven Fertigung müssen daher die allgemeinen Probleme im Zusammenhang mit AM gelöst werden. Außerdem muss die Auflösung innerhalb dieser Verfahren zur Herstellung miniaturisierter Teile verbessert werden. Dadurch kann eine ausreichende Oberflächenqualität erzielt werden und dies führt zu einer Reduzierung der Nachbearbeitung.

## **3.2 Mikro-Stereolithographie (MSL) und Zwei-Photonen-Polymerisation (2PP)**

Die Stereolithographie war die erste AM-Technik, die im Jahre 1984 von Charles Hull erfunden und von 3D Systems Inc. in den Handel gebracht wurde [6]. Sie hat mehrere Aspekte in Bezug auf Materialien, Maschinengrößen, Laserquellen und Controlling-Software eingeführt. Einige Jahre später bildete diese Technologie die Grundlage für verschiedene Harzwannen-Systeme, die in Kombination mit einer Maskenprojektion eingesetzt werden; dabei wird ein Mikrospiegelsystem für die Maskenprojektion verwendet, das im Wesentlichen die Herstellung einer Schicht auf einmal ermöglicht. Solche Maskenprojektionsplattformen wurden für eine angemessene Auflösung für die Mikrofertigung optimiert. Zusätzlich wurde ein leistungsfähiges System auf Grundlage der Zwei-photonenabsorption entwickelt, das in der Lage ist, die nanometrische Skala zu erreichen.

### **3.2.1 Arbeitsweise**

#### **3.2.1.1 Mikro-Stereolithographie**

Die Mikro-Stereolithographie (MSL) ist ein 3D-mikroadditives Fertigungsverfahren, das zuerst von Ikuta und Hirowatari eingeführt wurde [7]. MSL basiert auf der herkömmlichen Stereolithographie (SL), bei der eine Lichtquelle einen UV-Laserstrahl auf eine Oberfläche eines UV-härtbaren flüssigen Photopolymers ausstrahlt, was zu einer Verfestigung des Photopolymers führt. MSL hat eine mikrometrische Auflösung für die x, y, z Translationsstufen. Für diese Technik besitzt der Laserspot einen kleinen Durchmesser von einigen Mikrometern, was zu einer Verfestigung des Photopolymers in einem sehr kleinen Bereich des Harzes führt; dadurch kann die MSL Mikroteile mit einer Schichtdicke von 1-10  $\mu\text{m}$  herstellen.

Zwei wichtige MSL-Techniken, namentlich Scanning-MSL und Projektions-MSL, wurden abhängig von den verschiedenen Strahlführungssystemen entwickelt. Abbildung 3.2 zeigt die schematische Darstellung des Scanvorgangs im Scanning-MSL-Verfahren.

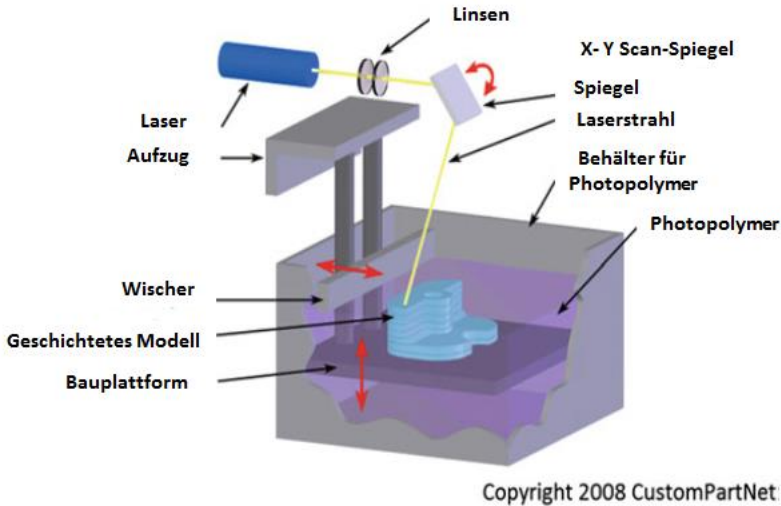


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Scanning-Stereolithographie-Verfahrens (SL).  
Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von CustomPartNet [8].

Scanning-MSL verfestigt das Photopolymer (einschließlich UV-Photoinitiator, Monomer und andere Additive) in einem Punkt-für-Punkt- und Zeile-für-Zeile-Stil in jeder Schicht. Bei der Projektions-MSL ist die Bauzeit erheblich kürzer als bei der Scanning-MSL, da eine ganze Schicht des Photopolymers auf einmal über die Belichtung durch die vorgesehene Maske ausgehärtet wird.

Bertschs Forschungsgruppe hat vorgeschlagen, dass der Digital Micro Mirror Device (DMD), der in Digital Light Processing Projektoren eingebettet ist, als dynamische Maske innerhalb des MSL-Verfahrens angewendet werden kann. Bei diesem Ansatz wird eine Metallhalogenidlampe mit optischen Filtern kombiniert, um ein Band sichtbarer Wellenlängen für die Bestrahlung des Harzes zu wählen [9]. Im Jahr 2004 schlugen Stampfl et al. eine Variante der DMD-basierten MSL vor, bei der sichtbares Licht von unterhalb der Harzwanne projiziert wird, um hochwertige 3D-Mikroteile herzustellen [10]. Darüber hinaus verwendeten Hadipoesposito et al. und Cheng et al. UV-Licht anstelle von sichtbarem Licht zur Aushärtung des Harzes.

Der DMD-Device ist ein Halbleiterchip, der von Texas Instruments® für qualitativ hochwertige digitale Projektion entwickelt wurde. Er umfasst etwa 1,5 Millionen Mikrospiegel (jede Seite mit  $\sim 13 \mu\text{m}$ ), die in einer Matrix angeordnet und jeweils an winzigen Scharnieren montiert sind, die individuell gesteuert werden können. Jeder Mikrospiegel steht für 1 Pixel in dem projizierten Muster und kann selbständig in einem kleinen Winkel ( $\pm 10\text{-}12^\circ$ ) über eine elektrostatische Kraft geneigt werden, um das Licht zu reflektieren, und kann

schnell neu positioniert werden, um das Licht an- und auszuschalten. Da die Auflösung des projizierten Bildes zur Größe und der Anzahl der Spiegel in Bezug steht, wurden hochauflösende DMDs mit  $2.800 \times 2.100$  Spiegeln in MSL verwendet, um feinere 3D-Mikroteile herzustellen. Zur Verbesserung der erreichbaren Auflösung werden die DMD-basierten MSL-Systeme um ein verbessertes Auflösungsmodul (ERM) erweitert, wobei es für jeden aufgebauten Pixel zwei Belichtungsmodi gibt. Diese erzeugen eine Verschiebung um einen halben Pixel, der die native Auflösung des Systems halbiert [11]. Abbildung 3.3 zeigt eine Mikrofluid-Vorrichtung, die mit dieser Technik hergestellt wurde.

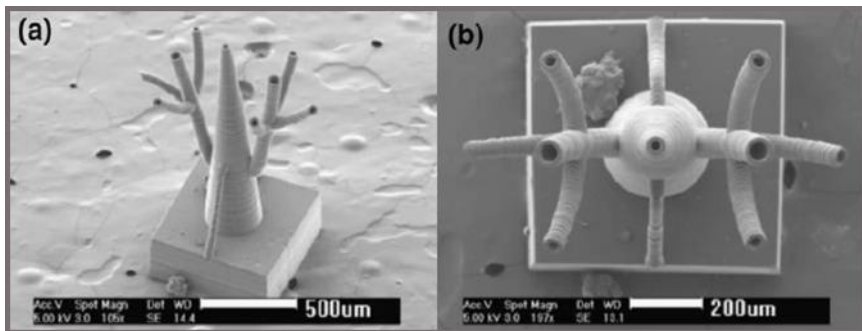


Abbildung 3.3: REM-Aufnahmen, die eine stark verzweigte kapillare Netzwerkstruktur zeigen (Innenradius der Kapillaren variieren 10-30 µm), hergestellt durch Projektions-Mikro-Stereolithographie. Quelle: Biomed Micro-devices Journal.[12]

### 3.2.1.2 Zwei-Photonen-Polymerisation

Diese Technik ist auch unter dem Begriff direkte Laserlithographie, Multi-Photonen-Lithographie oder direktes Laserschreiben (DLS) bekannt und kann geometrisch komplexe 3D Nano-/Mikrostrukturen erstellen.

Das Zwei-Photonen-Polymerisationsverfahren (2PP) wurde von Maruo und Kawata mit dem Ziel entwickelt, die Auflösungsbeschränkungen der MSL-Technik zu überwinden. Um das zu erreichen wird ein ultraschneller Laser anstelle eines herkömmlichen UV-Lasers verwendet. Die Spitzenenergie ultraschneller Laser ist sehr hoch und die projizierte Bestrahlungsstärke ist hoch genug, um die erforderliche Photonendichte zur Verfügung zu stellen. Im 2PP-Verfahren benötigt der Photoinitiator zwei Photonen, um ein freies Radikal freizugeben, das die Polymerisation auslösen kann. Die Laserleistung kann so eingestellt werden, dass die Energie (nur an der zentralen Stelle des fokussierten Laserpunkts) die Schwelle für die Polymerisation überschreitet. Auf diese Weise kann, obwohl die Belichtungsfläche durch einen fokussierten Laserstrahl im Mikrometerbereich liegen kann, die polymerisierte Fläche viel kleiner sein, wodurch sich die Auflösung verbessert [5].

Unterschiedliche Mikro-/Nano-3D-Strukturen können mit dem 2PP-Verfahren exakt hergestellt werden. Durch die präzise Fokussierung eines Femtosekunden-Laserstrahls im 2PP-Verfahren konnte gezeigt werden, dass es in der Lage ist, eine hohe räumliche Auflösung um die 100 ~ 200 nm zu liefern. Dieses Verfahren hat das 2PP-Prinzip in der 3D-Mikrofabrikation von Mikro-Rotoren, Mikro-Oszillatoren, optischen Speichern und photonischen Kristallen erfolgreich umgesetzt. Derzeit wird die Technologie von einigen Anbietern angeboten, wie beispielsweise der Nanoscribe Company.

### 3.2.2 Technologieübersicht und Systeme

Zwei wichtige Herstellungsverfahren werden in Abbildung 3.4 verglichen. Den wichtigsten Unterschied finden wir in Bezug auf die Auflösung, wobei das 2PP-System in der Lage ist, den Nanomaßstab zu erreichen.

Ein weiterer wichtiger Unterschied ist die Verfestigungsstrategie des Materials. Bei MSL findet die Belichtungsaktivität an der Oberfläche des flüssigen Photopolymers statt. Daher wird jede feste Geometrie notwendigerweise in einem Schicht-für-Schicht-Ansatz aufgebaut. Beim 2PP-Verfahren kann der NIR-Femtosekunden gepulste Laserstrahl auf jede gewünschte Stelle im Volumenraum fokussiert werden, der mit flüssigem Photopolymer überzogen ist. Dies ermöglicht effektiv einen wirklich dreidimensionalen Ansatz zur Abscheidung physikalischer Strukturen.

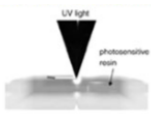
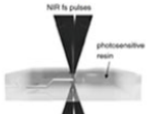




	<b>Mikrostereolithography</b>		<b>Zwei-Photonen Polymerisierung</b>
			
Wesentliche Elemente	CAD design, 2D Schichtvorbereitungsfunktionen, Laser Scannen- & Steuerungssystem mit Überwachungsgeräten		
Mechanismus für Polymerisierung	<b>Ein-Photon Absorption</b> (lineare Absorption) 		<b>Multi-photon Absorption</b> (Non-lineare Absorption) 
Lasertypen	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

Abbildung 3.4: Vergleich von MSL und 2PP. Quelle: University of Nottingham

Beide Techniken sind auf dem Markt erhältlich als Handelsplattformen für die Mikrofertigung, jeweils mit interessanten Fähigkeiten. Beispielsweise hat UNIRAPID Inc. in Japan ein µSL-System entwickelt: "UNIRAPID III". Das System ist in der Lage sehr detaillierte

Designs zu drucken, mit einem maximalen Bauraum von  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ . Das Gerät druckt mit einer Mindestschichtdicke von 0,05 mm. Die UNIRAPID III eignet sich für die Herstellung von Teilen mit mikrometrischer Auflösung für Forschung und Entwicklung; zur Herstellung großer Modelle wird sie jedoch nicht empfohlen, da die Geschwindigkeit des Aufbaus langsam ist.

Darüber hinaus hat das Unternehmen auch ein MSL-Gerät für das Labor entwickelt, die URM-HP301, ein Starter-Kit für die Mikro-Modellierung. Es verwendet einen HeCd-Laser zur Aushärtung von farblosem Acrylharz. Der HeCd-Laserstrahldurchmesser beträgt etwa  $7 \mu\text{m}$ , und der Bauraum ist maximal 30 mm XYZ.

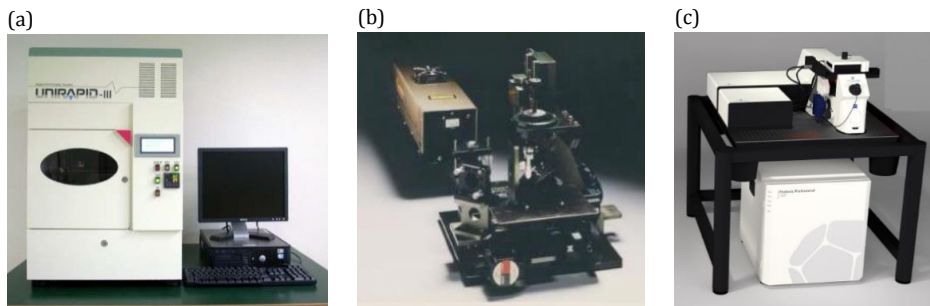


Abbildung 3.5: Kommerzielle MSL- und 2PP-Systeme. Quellen: UNIRAPID[13], Nanoscribe [14].  
(a). MSL UNIRAPID III System (b). MSL URM-HP301 Lab System (c). 2PP Photonic Professional GT

Andererseits hat die Firma Nanoscribe GmbH ein 3D-Laserlithographie-System auf Grundlage des Zwei-Photonen-Polymerisationsverfahrens entwickelt. Das System heißt Photonic Professional GT und setzt neue Maßstäbe im 3D-Mikrodruck und in der maskenlosen Lithographie mit einer Auflösung um 100-200 nm. Es kombiniert zwei Schreibmodi in einem Gerät: einen ultra-präzisen Piezo-Modus für beliebige 3D-Bahnen und den ultraschnellen Galvanometer-Modus für schnellste Strukturierung im Layer-by-Layer-Modus. Alle genannten Systeme werden in Abbildung 3.5 vorgestellt.

Der Arbeitsablauf der Zwei-Photonen-Lithographie ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Der Femtosekunden-Laser fokussiert den Strahl innerhalb des flüssigen Monomers, das über das Deckglas platziert wurde. Der Fotolack wird Punkt für Punkt gehärtet und macht Platz für die feste Struktur. Die Struktur wird mit der Entwicklerflüssigkeit gewaschen, um das nicht verfestigte Harz zu entfernen. Schließlich erhält man eine 3D-Polymerstruktur.

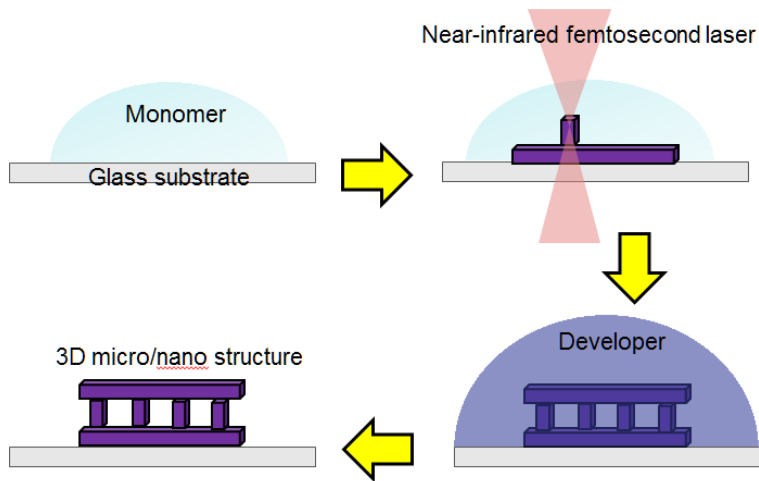


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung des Prozessablaufs für die Zwei-Photonen-Lithographie.  
Quelle: Dr. Qin Hu, Nottingham University

### 3.2.3 Materialien

Für die Auswahl der geeigneten Photopolymer-Formulierung müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden, die die Eigenschaften des Materials direkt beeinflussen. Es ist notwendig, abgestimmte Zusammensetzungen von Monomeren und Reaktanden einzurichten. Die Photoinitiatoren sollten nach der Chemie der Reaktion ausgewählt werden, deren Einfluss auf die Erstarrungsparameter und Endeigenschaften, die für das zu bauende Mikroteil gewünscht werden. Die Monomere sind der Hauptrohstoff, der die endgültige Struktur des erhaltenen gehärteten Harzes bestimmt; deshalb müssen sie, sowie jedes zusätzliche Material, beispielsweise metallische Nanopartikel oder Metallsalz-Nanopartikeln, sorgfältig ausgewählt sein, entsprechend der beabsichtigten Funktionalitäten des geplanten Materials.

Für das 2PP-Verfahren müssen das Monomer und der Initiator eine Reihe von Anforderungen erfüllen. Da der Femtosekundenlaser im nahen Infrarotbereich arbeitet, muss das Monomer im sichtbaren und im nahen Infrarotbereich transparent sein. Es sollte auch eine schnelle Härtungsgeschwindigkeit aufweisen, so dass nur das Harz im Brennpunkt des Laserstrahls sofort polymerisiert wird. In Anbetracht des anschließenden Auswaschprozesses, dem das Teil unterzogen wird, ist es zwingend erforderlich, dass das Monomer eine chemische Beständigkeit gegenüber dem verwendeten Lösungsmittel aufweist. Hinsichtlich der Anwendungsanforderungen sollte das resultierende Material schließlich geeignete mechanische Eigenschaften und thermische Stabilität bieten, um im Betrieb die Form und Eigenschaften zu erhalten. Es gibt eine große Gruppe von Materialien, die innerhalb der



Photopolymermatrix gemischt werden können, entweder physikalisch oder chemisch, mit dem Ergebnis, dass neue funktionale Verbundwerkstoffe oder Hybridmaterialien entstehen. Für diese Materialien kann man die Vorteile der anpassbaren Funktionsfähigkeiten nutzen. Einige Material-Familien, die bereits verwendet werden, sind [5]:

- Polymermaterial
- Metallisches Material
- Hybridmaterialien
- Nanomaterialien
- Biomaterialien

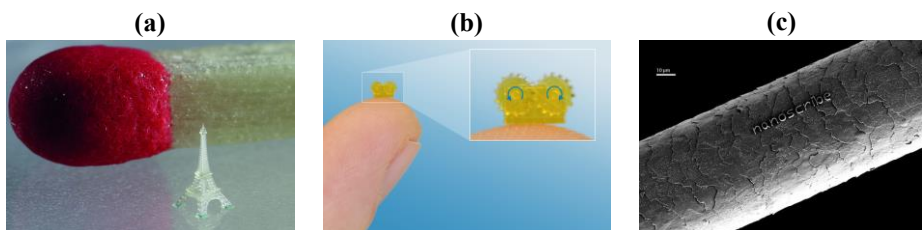


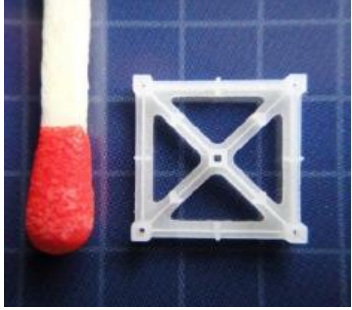
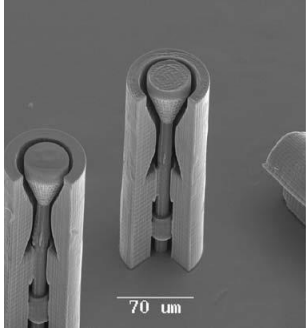
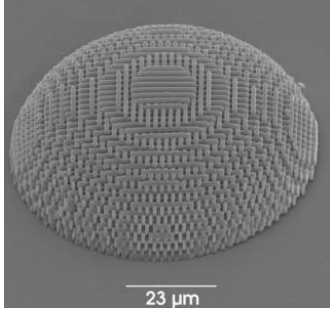

Abbildung 3.7: Beispiele von Mikrostrukturen, die durch Zwei-Photonen-Polymerisation hergestellt wurden. Quelle: Nanoscribe [15].

Einige Beispiele von Hybridmaterialien und deren Anwendungen werden in Abbildung 3.7 gezeigt. Die Polymere für die Harzwannen-Technologie sind im Handel erhältlich. Anbieter sind: Huntsman Advanced Materials, DSM Somos, 3D Systems, JSR, American Dye Source, Asahi Denka, Teijin Seiki, und Allied Photochemical [16].

### 3.2.4 Anwendungen

Diese mikroadditiven Verfahren werden in verschiedenen Bereichen wie Mikromaschinen, Mikrosensoren, Mikrofluidik-Systemen, optischen Wellenleitern, 3D-photonischen Band-Gap-Strukturen, Fluidchips für die Proteinsynthese und Bioanalyse verwendet. Einige Beispiele sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1: Beispiele für Anwendungen der Mikro-Stereolithographie und Zwei-Photonen-Polymerisation (2PP)

<p>Mikro-Steckverbinder</p>		<p>Unirapid III MSL Equipment. Material: Nano-Werkzeug; Modell: Höhe 0,6 mm; Dicke: 0,1 mm, Herstellungszeit: 39 Minuten. Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von [13].</p>
<p>Fertig montiertes Mikroventil</p>		<p>Optisches Bild eines komplexen, fertig montierten Mikrorückschlagventils unter Verwendung der 2PP-Technik. Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von [17].</p>
<p>Mikrokanäle mit eingebauten Mikroturbinen</p>		<p>REM-Aufnahmen mikrooptischer Elemente hergestellt durch Zwei-Photonen-Polymerisation. Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von [18]</p>
<p>Optische Pinzetten</p>		<p>Bild eines optisch angetriebenen Mikrohebels, der die angelegte optische Kraft um ~ 9 Mal erhöhen kann. Hergestellt mit 2PP-Technik. Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von [19]</p>

## 3.3 Pulverbett-Fusionstechniken

Im Jahr 1992 patentierte Carl Deckard das selektive Lasersinterverfahren. Bis 1994 entwickelte DTM das erste Rapid-Prototyping-System zur Herstellung von Metallprototypen mit dieser Methode [20]. Das Funktionsprinzip eines solchen Pulverbett-Fusionssystems ist einfach: Pulverteilchen werden durch das Aufschmelzen der Granulate durch eine Laserstrahlquelle selektiv miteinander verbunden. Ausgehend von den frühen Entwicklungen haben sich die Ausrüstung, die Materialien und Systeme weiterentwickelt; derzeit ist es möglich, Teile mit nahezu 100% Dichte und akzeptablen mechanischen Eigenschaften zuverlässig zu erhalten [21].

### 3.3.1 Arbeitsweise

Beim polymeren Lasersintern wird ein Hochtemperaturlaser eingesetzt, um Schichten aus feinem Pulver selektiv zu belichten. In jede Schicht wird durch Abscannen/-rastern der Oberfläche durch einen Laserspot die entsprechende Geometrie eingebracht. Sobald eine Schicht in dem hergestellten Pulverbett aufgebaut wird, verteilt ein Pulverabscheidungsmechanismus eine frische Schicht Pulver aus dem Pulverzufuhrsystem (Abbildung 3.8) und der Prozess wiederholt sich, bis das Teil fertig ist [22]. Selektives Laserschmelzen (Selective Laser Melting, SLM) verwendet ein sehr ähnliches Konzept für die Abscheidung metallischer Komponenten, wobei der Hauptunterschied in einem angepassten Wärmemanagement während des Herstellungsprozesses besteht.

Für die erfolgreiche Produktion von Metallteilen durch SLM werden zusätzliche Stützstrukturen benötigt, um überhängende Oberflächen zu unterstützen, um Prozesswärme abzuleiten und durch innere Spannungen induzierte geometrische Verzerrungen zu minimieren. Diese Strukturen sind oft massiv und ihre Entfernung erfordert zusätzliche Nachbearbeitungszeit. Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass der Stützaufwand in der Regel durch Anpassung des Teiledesigns oder der Ausrichtung verringert werden kann [24].

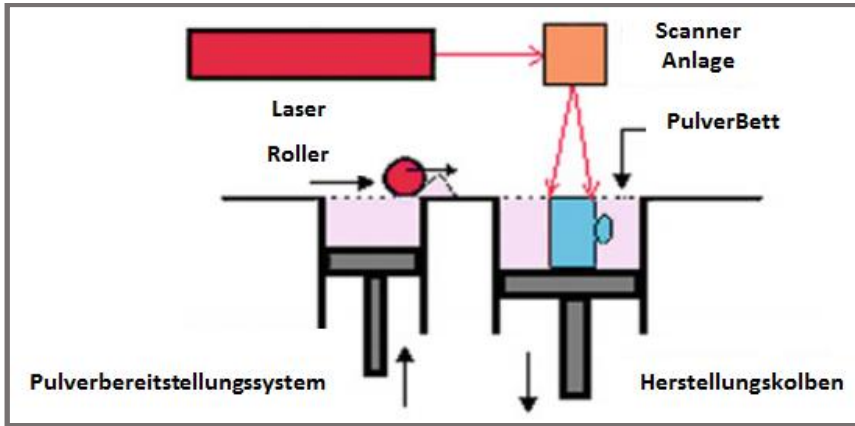


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung der Lasersinter- und selektiven Laserschmelz-Verfahren.  
Quelle: Additive3D [23]

Bei metallischen Pulverbett-Fusionsverfahren ist es notwendig, die Atmosphäre während der Sinter- oder Schmelzverfahren zu schützen, da die Anwesenheit von Luft oder Sauerstoff eine unerwünschte Oxidation und Verunreinigungen hervorrufen kann. Eine weitere Überlegung für die Herstellung von Mikrokomponenten ist, dass das Aufschmelzen des Pulverbetts von der Verwendung feinerer Pulverteilchen profitieren kann, wobei die Teilchengrößen im Bereich von Nanometern bis zu einigen zehn Mikrometern liegen [25].

### 3.3.2 Technologieübersicht und Systeme

Das Formgebungsverfahren in Pulverbett-Fusionssystemen verläuft entlang der Abtastrichtung des Laserstrahls. Jeder Querschnitt (Schicht) des Teils wird nacheinander mit Spuren des geschmolzenen Pulvermaterials gefüllt; dies bedeutet, dass solche Verfahren eine Überlagerung von Spuren und Schichten bilden. Daher bestimmt die Schichtmorphologie im Wesentlichen die Eigenschaften des Endprodukts. Eine Reihe von Faktoren (einschließlich direkter und indirekter Parameter) wirken sich auf solche Verfahren aus. Die wichtigsten Prozessparameter sind Laserleistung, Wellenlänge, Durchmesser der Spotgröße, Scangeschwindigkeit, Schraffurabstand, Pulverschichtdicke. Material-basierte Eingabeparameter sind Pulver-Granulomorphometrie, chemische Zusammensetzung, thermische, optische, metallurgische, mechanische und rheologische Eigenschaften.

Das physikalische Verhalten eines "Laserstrahlung-Pulver-Substrat"-Systems umfasst Absorption, Reflexion, Strahlung und Wärmeübertragung, Phasenumwandlungen, eine bewegliche Schnittstelle zwischen fester Phase und flüssiger Phase, Flüssigkeitsströmung, hervorgerufen durch Oberflächenspannungs-Gradienten und Massentransport innerhalb des geschmolzenen Pools, sowie chemische Reaktionen. Dieses System zeigt eine nicht-

lineare Reaktion, wenn die Prozessparameter geändert werden: eine Änderung der Laserleistung oder Scangeschwindigkeit kann zu verschiedenen unerwünschten Wirkungen wie Unregelmäßigkeit und Balling-Effekt führen. Daher ist es wichtig, Verbindungen zwischen den wichtigsten Abscheidungsparametern und der Oberflächenmorphologie herzustellen. Studien haben den Einfluss des Schraffurabstands und der Dicke der Pulverschicht auf die Morphologie der ersten Schicht und der Oberflächenstruktur von dünnen Wänden, die durch SLM aus Metallpulvern hergestellt wurden, untersucht. Die erhaltenen Daten können in der Oberflächenstrukturierung und Mikroteilefertigung verwendet werden, die durch eine kleine Zahl von Schichten in einem Teil gekennzeichnet sind, und somit sensibel reagieren gegenüber den geometrischen Abmessungen und der Form der Oberfläche [21].

### 3.3.3 Maschinen und Materialien

Im Vergleich zu einer Stickstoffatmosphäre [26]. Das handelsübliche System SLM 50 der Realizer GmbH, Deutschland ist in der Lage, feine Strukturen im Bereich von 40  $\mu\text{m}$  zu erzeugen, da es mit feinen Pulvern (kleiner als 30  $\mu\text{m}$ ) und einer Mindestschichtdicke handelsübliche Lasersintersysteme sind nicht in der Lage Mikrokomponenten kleiner als 500  $\mu\text{m}$  herzustellen, da der Laserfokusedurchmesser begrenzt ist (50-300  $\mu\text{m}$ ). Dünnere Schichten und Pulver mit kleineren Partikelgrößen sind erforderlich, um feinere Details zu erreichen. Ein genauerer Blick auf die Unterschiede bei der Verarbeitung kann uns helfen, einige wesentliche Merkmale der verschiedenen Prozesse zu verstehen. Bei SLM-Verfahren kann der Laserstrahlprojektor näher am Punkt der Anwendung aufgestellt werden und die Intensität des Lasers zeigt eine höhere Größenordnung. Eine spezielle Variante der metallischen Pulverbett-Fusionssysteme ist das Laser Cusing®; es ermöglicht eine x/y-Übersetzung des Strahlprojektors des Festkörper-Laserstrahls über die Bauplattform und erlaubt dadurch eine strengere Kontrolle der Strahlgenauigkeit.

Je nach verarbeitetem Material arbeiten die meisten Pulverbett-Fusionssysteme in einer inerten Atmosphäre, typischerweise mit Stickstoff und Argon. In einigen Fällen arbeiten diese Systeme auch in einem Vakuum. Einige Bauumgebungen sind für spezielle Metalle besser geeignet. Argon, das zur Verarbeitung von Edelstahl verwendet wird, induziert einen deutlichen Anstieg der erreichbaren Bruchdehnung von 20  $\mu\text{m}$  arbeitet [27]. Eine breite Palette von Metallen, darunter Superlegierungen, Gold (Au), Silber (Ag), Aluminium (Al), Edelstahl, Werkzeugstahl, Kobalt-Chrom (CoCr) und Titan (Ti) wurden erfolgreich mit dem Realizer SLM-System verarbeitet [5]. Neue SLM-Maschinen bieten eine Strukturauflösung von weniger als 30  $\mu\text{m}$ . Mit diesem System ist es möglich, Multi-Material-Mikrokomponenten zu bauen. Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, sind derzeit drei verschiedene Systeme zur Abformung im Mikrobereich im Handel erhältlich.

Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über ihre Funktionen. Im Jahr 2006 hat der Gerätehersteller EOS GmbH eine Joint-Venture-Vereinbarung mit der MicroMac AG getroffen, bei der beide Firmen von den Erfahrungen auf dem Gebiet der Mikrofertigung profitieren. Ein neues Pulverbett-Fusionssystem, EOSINT  $\mu$ 60, für die Mikrofertigung wurde entwickelt und im Jahr 2014 auf den Markt gebracht.

Tabelle 3.2: Gerätebeschreibung für das mikroselektive Laserschmelzen

Concept Laser Mlab Cusing [26]	Realizer GmbH [27]	EOS Machine - EOSINT $\mu$ 60 [28]
		
<p>Bauraum:                      50 x 50 mm (x, y)                      70 x 70 mm (x, y)                      90 x 90 mm (x, y)                      z = 80 mm</p> <p>Schichtdicke: 15 <math>\mu</math>m</p> <p>Materialien                      Edelstahl (1.4404)                      Cobalt-Chrom-Legierung                      Titanlegierung (TiAl6V4 ELI)                      Reines Titan Grade 2                      Bronze                      (930% Silberpulver)</p>	<p>Bauraum:                      Plattfordurchmesser 70 mm                      Bauhöhe 40 mm                      Dicke der Schichten: 20-50 <math>\mu</math>m</p> <p>Schichtdicke: 20 - 50 <math>\mu</math>m</p> <p>Materialien                      Kobalt-Chrom                      Edelstahl                      Goldlegierungen                      Titan.</p>	<p>Bauraum:  <math>\varnothing</math> 57 mm x 30 mm Höhe</p> <p>Schichtdicke: 15 - 50 <math>\mu</math>m</p> <p>Materialien                      Wolfram                      Cu                      Ag                      Wolfram/Cu-Mischungen                      Edelstahl 316L                      Molybdän</p> <p>Wird auch für Verfahren für Keramik- und Verbundwerkstoffe eingesetzt.</p>

### 3.3.5 Anwendungen (Tabelle 3.3)

Tabelle 3.3: Einige Anwendungen von Pulverbett-Fusionstechniken im kleinen Maßstab.

	<p><b>Situation:</b> Steigende Kosten für Edelmetalle motivieren Material-einsparungen für Schmuck, ohne Kompromisse hinsichtlich Aussehen einzugehen.</p> <p><b>Lösung:</b> Hohlstrukturen sparen Material; Plasma-polieren verbessert die Oberflächenbeschaffenheit.</p> <p><b>Vorteile:</b> Schmuck kann ohne zusätzliche Kosten personalisiert werden; Strukturen sind ein einzigartiges Designmerkmal [28].</p>
	<p><b>EOS-Herausforderung:</b> Mischlösung, die für 3 flüssige Komponenten erforderlich ist; die mechanische Gebrauchslast muss minimiert werden.</p> <p><b>Lösung:</b> Spiralförmige Rohre mit 200 µm Wandstärke und 150 µm Innendurchmesser.</p> <p><b>Vorteile:</b> Die Gebrauchslast wird minimiert, keine beweglichen Teile für das Mischen erforderlich; das Mischungsverhältnis kann leicht durch Rohrdurchmesser, Strömungsverhältnis und die Konstruktion der Mischkammer geändert werden [28].</p>
	<p><b>SLM 50 Realizer:</b> Eine wichtige Anwendung für die SLM 50 ist die Herstellung von Kronengerüsten, Brückengerüsten oder Klammern aus Kobalt-Chrom und Gold-Legierungen für die Dentalindustrie. Nach dem Formen durch den Zahnarzt wird zunächst eine herkömmliche dentale Modellform hergestellt. Der Zahntechniker scannt das Modell und bereitet die Daten für die einzelnen Komponenten mit einer speziellen CAD-Software vor. Auf der Basis dieser 3D-Daten produziert die SLM 50 exakt passende Dental-komponenten [27].</p>
	<p><b>SLM 50 Realizer:</b> Die Möglichkeit zur Herstellung von Hohlteilen für die Schmuck-industrie ist besonders attraktiv. Ein wichtiger Vorteil der SLM 50 ist die kleine Menge an Material, die für die Herstellung von Schmuck aus teuren Edelmetallen benötigt wird [27].</p>



Concept Laser Mlab Cusing

Mit Unterstützung des Jewellery Industry Innovation Centre (JIIC) haben Studenten der Birmingham City University (BCU) die Möglichkeit, Schmuckstücke in 3D-CAD-Software zu entwerfen und diese auf der Concept Laser Mlab Maschine bauen zu lassen [26].

## 3.4 Dreidimensionales Printing über Binder-Jetting

Das Verfahren wurde in den frühen 90er Jahren von Emanuel Sachs am Massachusetts Institute of Technology entwickelt [29]. Das Patent für diese Technik wurde an mehrere Unternehmen lizenziert und das gleiche Verfahren konnte für die Herstellung aller Arten von Materialien verwendet werden: Polymere, Keramiken und Metalle. Im Mikrometerbereich hat sich diese Methode zu einem effizienten 3D-Druckverfahren zur Herstellung von Metallkomponenten entwickelt. Derzeit ist es im Handel über die Firma Höganäs AB erhältlich.

### 3.4.1 Arbeitsweise

Die Binder-Jetting-Variante der 3D-Drucktechnik basiert auf der kontrollierten Agglomeration des pulverförmigen Materials durch das gesteuerte Ausstoßen einer flüssigen Tinte, die die Bindung der Pulvergranulate bewirkt. Die Tinte wird auf jeder Schicht abgeschieden und auf diese Art und Weise wächst das Teil kontinuierlich Schicht um Schicht. Solche Systeme arbeiten oft mit zwei Pulverkammern, eine für die Lagerung und Zuführung des Pulvers, wie in Abbildung 3.9 auf der linken Seite dargestellt. Die andere Kammer, auf der rechten Seite dargestellt, ist die Baukammer, in der der Abscheidungsprozess stattfindet.



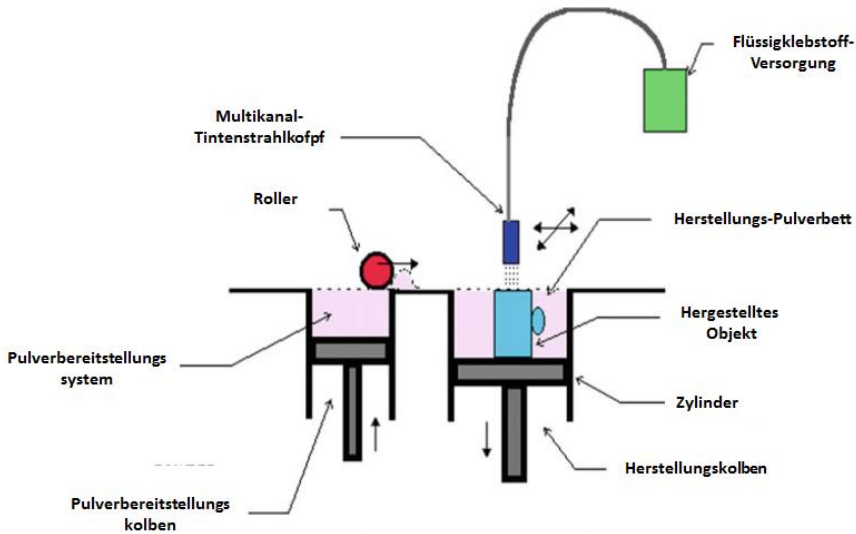


Abbildung 3.9: Schematische Darstellung des Herstellungssystems für dreidimensionales Drucken.  
Quelle: Additive3D [30].

3D-Printing nach der Binder-Jetting-Methode läuft wie folgt ab: Der Mehrkanal-Strahlkopf (A) sprüht eine flüssige Klebmasse auf die obere Schicht eines Pulverbett-Objektmaterials (B). Die Pulverpartikel werden in den Bereichen gebunden, in denen der Klebstoff aufgebracht wird. Sobald eine Schicht fertig ist, bewegt sich der Kolben (C) um eine Schichtdicke nach unten. Der Kolben bewegt sich zunehmend nach oben und liefert Pulver für das Verfahren und der Roller (D) verteilt und komprimiert das Pulver auf der Oberseite des Aufbauzylinders. Um ein funktionsbereites Fertigteil zu erhalten kann die gedruckte Komponente mit einem anderen Wirkstoff infiltrierte werden, um die mechanische Festigkeit für die Handhabung zu verbessern.

### 3.4.2 Technologieübersicht und Systeme

Digital Metal ist das von Höganäs AB vermarktete System; Höganäs AB ist der weltweit führende Hersteller von Eisen- und Metallpulvern. Fcubic, ein kleines Unternehmen, das im Jahr 2003 gegründet wurde, entwickelte die Präzisions-Inkjet-Technologie Digital Metal. Im Jahre 2012 erwarb Höganäs AB die Firma Fcubic zur Entwicklung von 3D-Printing metallischer Komponenten im Mikrobereich. Für diese Technologie werden dünnere Schichten und entsprechend kleinere Pulverpartikel benötigt. Ein weiterer Vorteil der Verwendung feiner Pulver ist eine geringere Oberflächenrauigkeit.

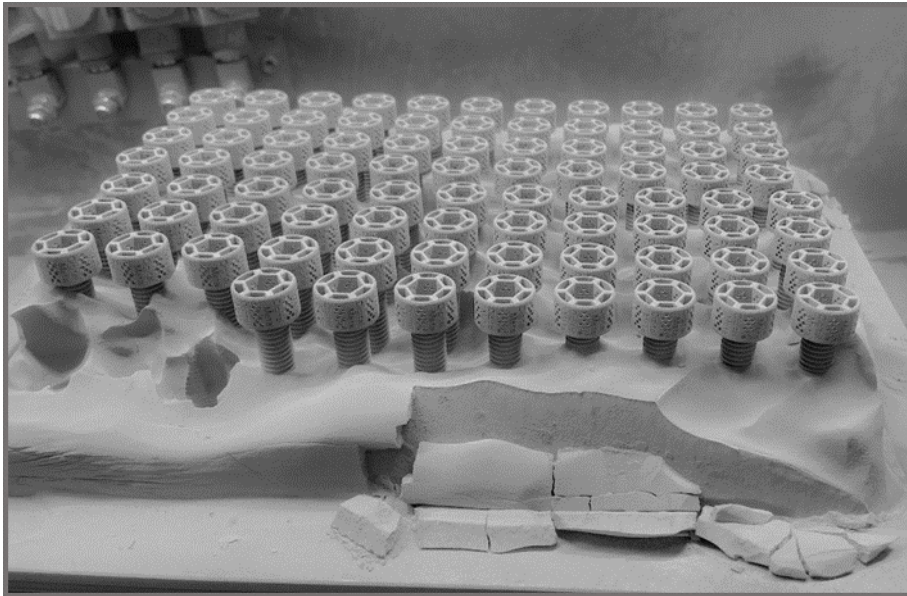


Abbildung 3.10: 11x8 Anordnung ausgehöhlter Schrauben nach dem Drucken durch die Höganäs Direct-Metal-Fertigung. Quelle: Höganäs

Um die erforderliche hohe Auflösung für den 3D-Druck im Mikrobereich zu erreichen, nutzen solche Plattformen piezoelektrische Druckköpfe anstelle von Thermodruckköpfen. Nach Aussage von Höganäs hat das Digital-Metal-Verfahren die Bauteilgenauigkeit, Toleranzen, Oberflächenbeschaffenheit und Kosteneffizienz verbessert und ist trotzdem in der Lage, den Markt schnell zu versorgen. Abbildung 3.10 zeigt eine Bauplattform nach der Abscheidung einer 11x8 Anordnung von Schrauben, bereit für die nächsten Schritte der Nachbearbeitung.

Der Prozessablauf der Technik ist in Abbildung 3.11 skizziert. In einem vorbereitenden Schritt wird das Teil in einer CAD-Anwendung entworfen und nach Erstellung der Datei kann sie für das „Slicing“-Verfahren an den Drucker gesendet werden. Nach diesem grundlegenden Schritt wird der Herstellungsprozess Schicht-für-Schicht durchgeführt. Die erhaltenen 3D-gedruckten Teile, dargestellt in Abbildung 3.10, sind "grüne Teile", die durch Anwendung einer Wärmebehandlung und Veredelungsverfahren fertig gestellt werden müssen. Wenn komplizierte kleine Strukturen vorhanden sind, wird eine Nachbesserung/Polieren durchgeführt, um die fertigen Teile zu erhalten.



Abbildung 3.11: Prozessablauf für Metal-3D-Printing. Quelle: Voxeled Materials.

### 3.4.3 Maschinen und Materialien

Digital Metal Equipment verfügt über Fähigkeiten, welche die Herstellung von Teilen mit einer minimalen Strukturgröße von  $20\ \mu\text{m}$  und einer Toleranz von  $100\ \mu\text{m}$  ermöglichen. Die Teile können in einem Nachbearbeitungsschritt bis zu einem Radius von  $1\ \mu\text{m}$  poliert werden. Die Mindestdicke der Pulverschicht beträgt  $45\ \mu\text{m}$ . In Bezug auf die erreichbare Oberflächenqualität ist die hohe Auflösung bemerkenswert. Höganäs bietet verschiedene Techniken zur Verbesserung der Oberflächenqualität an, darunter:

- Kalthämmern/Abstrahlen/Trommeln (durchschnittliche Ra  $3.0\ \mu\text{m}$ )
- Superfinished (durchschnittliche Ra  $1.0\ \mu\text{m}$ )
- Superfinished+ (durchschnittliche Ra  $<1.0\ \mu\text{m}$ )

Unter Berücksichtigung der Fertigungskapazitäten ist das Höganäs Digital Metal System nach eigener Aussage in der Lage, Tausende von Teilen pro Tag herzustellen. Abbildung 3.12.a zeigt einen Bauraum, der eine große Anzahl von Komponenten für die Produktion in einem einzigen Prozess enthält. Da das Binder-Jetting-Verfahren bei Raumtemperatur durchgeführt wird, kann das gesamte Volumen des Bauraums ausgenutzt werden und die Komponenten können eng gepackt werden, da die Wärmeleitfähigkeit nicht berücksichtigt werden muss.

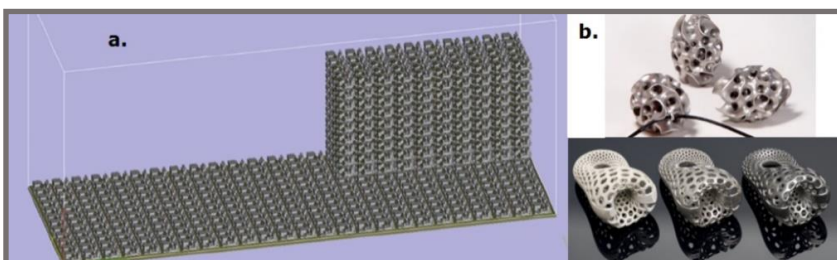


Abbildung 3.12: (a) Schematische Darstellung der Build-Box für ein Digital Metal System. (b) Schmuckstücke. [31]

Die Digital-Metal-Technik ist derzeit beschränkt auf die Arbeit mit Edelstahl. Andere Materialien wie Gold, Silber und Titan sind in der Entwicklung. Eine vergleichbare Binder-Jetting-Technik im Makrobereich wurde bereits auf verschiedene Materialien abgestimmt, einschließlich: Keramik, Metalle (Titan, Silber, Kupfer), Formgedächtnislegierungen (SMA) und Polymere.

### **3.4.4 Anwendungen**

Aufgrund der Fähigkeit, hohle und leichte Komponenten herzustellen, kann die Binder-Jetting-Technik dazu beitragen, das Gewicht kleiner unkritischer Teile deutlich zu reduzieren. Dieser Vorteil wird in der Luftfahrtindustrie besonders geschätzt. Zusätzlich haben die vergleichsweise hohe Auflösung und die Möglichkeit des Polierens neue Chancen für die Anpassung dentaler und medizinischer Geräte eröffnet. Des Weiteren macht die Freiformgestaltung, die durch Hohlstrukturen ermöglicht wurde, die Technik zu einem äußerst nützlichen Tool für das Modedesign, wie in Abbildung 3.12.b gezeigt, wo sie zur Herstellung innovativer Designs in der Schmuck-, Möbel-, Accessoires- und vielen anderen Branchen eingesetzt wird. Für industrielle Anwendungen ermöglicht diese Variante der Mikroadditiv-Technologie die schnelle und kosteneffektive Realisierung von Sonderstrukturen, wie hohle und netzartige Metallkomponenten mit Hinterschneidungen, Kanälen, Hohlräumen und internen Strukturen [5, 31].

## **3.5 Dreidimensionales Printing über Material Jetting**

Ein Verfahren auf der Basis des direkten Ausstoßes von Build-Materialien wurde von Objet Geometries Ltd. im Jahr 2001 unter dem Markennamen PolyJet-Technologie in die AM-Industrie eingeführt. Fast gleichzeitig brachte 3D-Systems im Jahr 2002 eine konkurrierende proprietäre Technologie, die auf dem gleichen Funktionsprinzip basiert, unter dem Markennamen MultiJet-Technologie auf den Markt.

### **3.5.1 Arbeitsweise**

Material-Jetting-Verfahren arbeiten über Schicht-für-Schicht-Abscheidungen und Erstarren eines flüssigen Materials in Form einer digital gesteuerten Matrix von Tröpfchen. Die additive Abscheidung jeder Schicht auf die vorhergehende wird wiederholt, bis der Vorgang abgeschlossen ist. Erwähnenswert ist, dass das flüssige Baumaterial, das als Tröpfchen verteilt wird, oft als "Tinte" bezeichnet wird. Die Tinte wird in der Regel verfestigt durch eine Kombination chemischer Veränderungen, die durch lichtinitiierte Vernetzung eines photoempfindlichen Polymers oder Lösungsmittelverdampfung gefördert werden.

Abbildung 3.13 zeigt eine schematische Darstellung einer solchen Material-Jetting-Plattform. Wie in anderen additiven Verfahren wird das Teil über einer Aufbauplattform abgeschieden, die oft als „Build Substrate“ bezeichnet wird. Zwei Patronen mit Baumaterial und Trägermaterial liefern die flüssigen Tröpfchen zum Düsenkopf zum Aufbau der Schichten. Gleichzeitig liefert eine Lichtquelle Energie für die Tröpfchen und dies begünstigt die sofortige Verfestigung der Schicht [5].

Bei einigen Verfahren nivellieren Walzen oder eine Fräseinrichtung das abgeschiedene Material, um mögliche Schrumpfungen oder Erhebungen auszugleichen, die während des Aushärtens der Schicht entstehen können. Auf diese Weise bildet jede Schicht ein geeignetes Substrat für die nächste Schicht, die darauf aufbauen kann. Lose Partikel, die Verunreinigungen erzeugen können, werden durch eine Partikelsammelvorrichtung, die für diesen Zweck neben der Walze aufgestellt wird, abgesaugt. Das Trägermaterial kann leicht entfernt werden, da es eine alternative Chemie besitzt, so dass die Erstellung sehr komplexer Geometrien ermöglicht wird [5]. Im nächsten Abschnitt werden Details der Technik besprochen und die verschiedenen Systeme beschrieben.

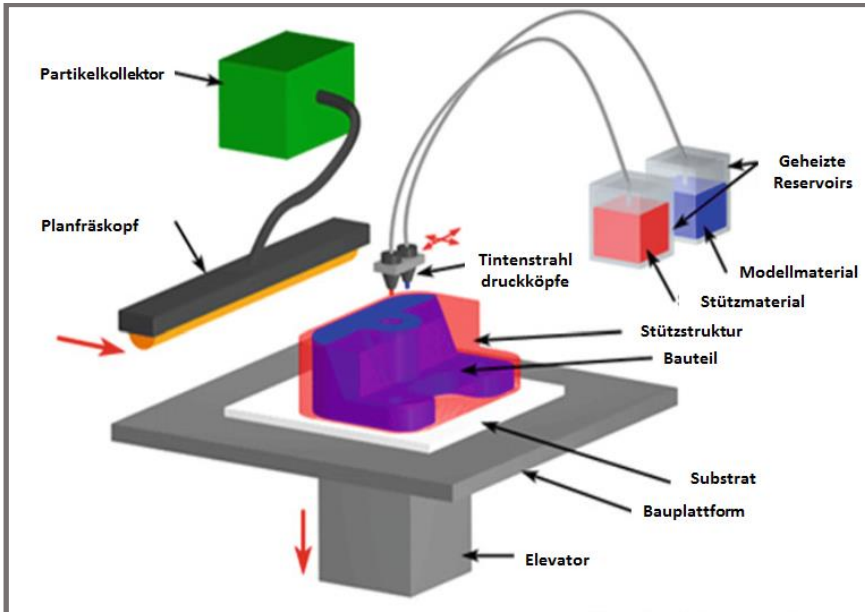


Abbildung 3.13: Schematische Darstellung der Material-Jetting-Technik. Quelle: CustomPartNet. [32]

### 3.5.2 Technologieübersicht und Systeme

Ein Strom von Tröpfchen, aus Tinten mit geeigneten Eigenschaften, kann aus winzigen Düsen auf Abruf ausgestoßen werden, wenn der Druckkopf durch elektrische Impulse angetrieben wird. Basierend auf verschiedenen Drop-on-Demand (DoD) Funktionsprinzipien, z.B. thermisch, piezoelektrisch, elektrostatisch und akustisch, durchlaufen die ausgestoßenen Tröpfchen im allgemeinen eine morphologische Umwandlung aufgrund des Zusammenspiels von viskoser Kraft und Oberflächenspannung, von der ersten Phase bis zur Einschnürungsphase, wie in Abbildung 3.14 dargestellt.

In diesem Fall wird der Tröpfchenausstoß aktiviert durch einen Druckpuls, der durch einen Aktuator erzeugt wird. Es gibt zwei Arten von Aktuatoren: thermische oder piezoelektrische. Das piezoelektrische Element ist das gebräuchlichste industrielle System, das eine Änderung im Innenvolumen des Tintenbehälters mit Hilfe eines elektrischen Feldes bewirkt, das Druckwellen erzeugt. Die Druckwellen führen zu einem Tintenausstoß aus der Druckkopfdüse und danach zu einer entsprechenden Auffüllung des Behälters. Die Verdampfung des kleinen Tintenvolumens führt zu folgerichtigen Einschränkungen bei den verwendbaren Materialien im thermischen DOD-Verfahren [33].

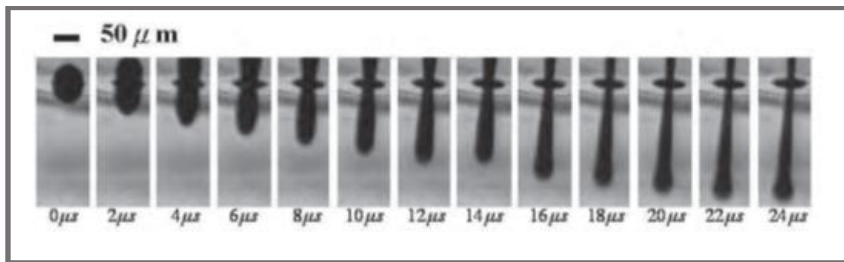


Abbildung 3.14: Dynamische Entwicklung der Tröpfchenbildung in wenigen Mikrosekunden.

Quelle: National Kaohsiung University of Applied Sciences[33].

Für additive Verfahren im Mikromaßstab wird die DOD-Technologie den kontinuierlichen Jetting-Verfahren vorgezogen, da nicht verwendete Flüssigkeit nicht recycelt werden muss, denn Tintentröpfchen werden nur geliefert, wenn sie tatsächlich gebraucht werden. Normalerweise besitzen Druckköpfe mehrere separate Düsen, die über einen einzigen Tintenverteiler versorgt werden; jede Düse ist jedoch einzeln steuerbar. Das Tröpfchen über der Substratoberfläche entwickelt sich dynamisch in drei verschiedenen Phasen nacheinander: Aufprallen, Ausbreiten (und Benetzen) und Trocknen, wie in Abbildung 3.15 gezeigt. Infolgedessen kann das Tröpfchenabscheidungsverfahren, das für praktische Anwendungen von Interesse ist, charakterisiert werden als Prozessparameter, der gesteuert werden kann.

### 3.5.3 Maschinen und Materialien

Zwei Tintenstrahldrucksysteme werden nach dem gleichen Prinzip vermarktet: Der Eden-Drucker von Objet Geometries und der ProJet-Drucker von 3D Systems.

Objet-Drucker verwenden spezielle Druckköpfe mit vielen einzelnen Düsen, um eine Reihe unterschiedlicher Photopolymermaterialien auf Acrylbasis mit einer Auflösung von  $42\ \mu\text{m}$  und in  $16\ \mu\text{m}$  Schichten abzuscheiden. Jede Photopolymerschicht wird sofort durch UV-Licht gehärtet, sobald sie gedruckt wurde, so dass vollständig gehärtete Modelle produziert werden. Trägerstrukturen werden in einem gelartigen Material aufgebaut, das mit der Hand und einem Wasserstrahl entfernt wird. Der ProJet-Drucker nutzt die gleiche Technik; allerdings verwendet dieses Gerät eine veränderte Stützstruktur aus Wachs, das eine viel niedrigere Schmelztemperatur aufweist, als das gedruckte Teil und leicht ausgeschmolzen werden kann. Diese Methode der "freihändigen" Entfernung des Trägers ermöglicht die Herstellung hochkomplexer 3D-Mikrokomponenten/Baugruppen und anspruchsvolle Anwendungen. Abbildung 3.16 zeigt ein Beispiel von Mikroteilen mit  $400\ \mu\text{m}$  Flügeldicke, die mit verschiedenen handelsüblichen Inkjet-basierten Systemen hergestellt wurden, einschließlich Eden 260 V, ProJet HD 3000plus sowie dem T76 3D-Drucker

von Solidscape, einem handelsüblichen piezoelektrischen DOD Mikro-AM-System zum Drucken mit Polymertinten [5].

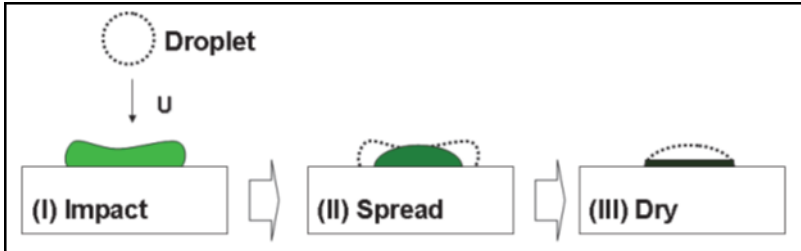


Abbildung 3.15: Hydrodynamische Entwicklung eines Tröpfchens auf der Substratoberfläche durch drei verschiedene aufeinanderfolgende Phasen: (I) Aufprallen (II) Ausbreiten und (III) Trocknen.

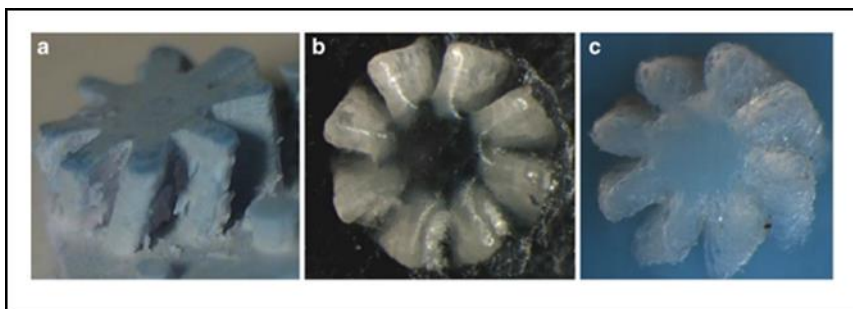


Abbildung 3.16: Klinge hergestellt mit 400  $\mu\text{m}$  Dicke unter Verwendung verschiedener Inkjet-Drucksysteme [5]: (a) Solidscape T76, das Teil wurde hergestellt mit  $\sim 5\text{-}\mu\text{m}$  Auflösung und in 12,7  $\mu\text{m}$  Schichten; (b) 3D-System ProJet HD 3000plus, das Teil wurde im extremen High-Definition-Modus hergestellt (34  $\mu\text{m}$  Auflösung und 16  $\mu\text{m}$  Schichten); (c) Objet Eden 260 V 3D-Drucker, das Teil wurde hergestellt mit 42  $\mu\text{m}$  Auflösung und in 16  $\mu\text{m}$  Schichten.

### 3.5.4 Materialien:

- Optische Polymere
- Lote
- Thermoplaste
- Licht emittierende Polymere
- Organischer Transistor
- Biologisch aktive Flüssigkeiten



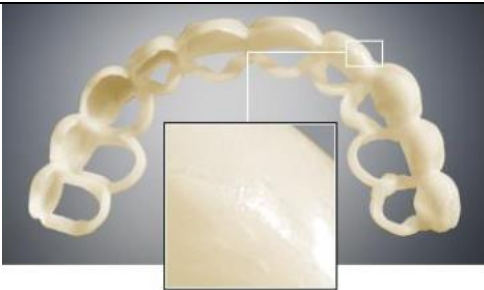


Die wichtigste Einschränkung der Tintenstrahldrucksysteme ist derzeit vermutlich die Entfernung der Träger für komplexe 3D-Mikrostrukturen. In der Zwischenzeit sollte die Auflösung des Verfahrens verbessert werden, um den Anwendungsbereich zu erweitern.

### 3.5.5 Anwendungen

Eine Reihe gängiger Anwendungen des Material-Jetting-Verfahrens wird in Tabelle 3.4 vorgestellt. Es werden vor allem Prototypen gebaut, die für Form-und-Fit-Tests eingesetzt werden. Andere Anwendungen umfassen Schmuck, medizinische Geräte und hochpräzise Produkte.

Tabelle 3.4: Die häufigsten Anwendungen des Material-Jetting-Verfahrens

	<p><b>Hörgeräte.</b> Sie werden entsprechend der Anatomie des Patienten angepasst. Die mikroelektronischen Geräte sind in den extern maßgeschneiderten Boxen untergebracht, um Töne zu verstärken und zu übertragen. [34, 35]</p>
	<p>Die Anwendung neuer Robotertechnologien in der flexiblen Endoskopie und Laparoskopie für die <b>Chirurgie</b> über natürliche Körperöffnungen verspricht erhebliche Vorteile für den Patienten hinsichtlich Komfort und Genesungszeit. [36]</p>
	<p><b>Dental:</b> VeroGlaze für Objet EdenV und OrthoDesk; 3D-Drucker liefern Zähne passend in Farbe und Genauigkeit und gutem Aussehen. [37]</p>

## 3.6 Filament-Deposition

Die Filament-Deposition, ursprünglich entwickelt von Stratasys Inc., war eines der ersten Verfahren, das 1992 für Rapid-Prototyping-Anwendungen auf den Markt gebracht wurde. Für Mikrofertigungsanwendungen werden Filament-Deposition-Verfahren hauptsächlich ausgewählt, um die Vorteile der intrinsischen porösen Eigenschaften der Teile, die mit dieser Technik hergestellt werden, nutzen zu können. Da es möglich ist, den extrudierten Filamentdurchmesser, den Abstand zwischen den Filamenten und dem Baumuster, das dem Filament folgt, zu steuern, ist es möglich, das Durchlässigkeitsmuster des fertigen Teils zu gestalten. Die Verwendung biokompatibler Polymere hat das Fenster für die Herstellung einer wachsenden Anzahl von Anwendungen auf Gerüsten für Tissue Engineering als auch für innovative Drug-Delivery-Mechanismen und für die regenerativer Medizin aufgestoßen [38].

### 3.6.1 Arbeitsweise

Aufgrund der Einfachheit der Funktionsprinzipien dieser Technik ist die Filament-Deposition eines der am weitesten verbreiteten Verfahren, das es derzeit auf dem Gebiet der additiven Fertigungstechnik gibt. Der Grad der Verbreitung wird auch durch den Ablauf wichtiger erster Patente gefördert. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für die Entwicklung neuer Anwendungen mit dieser Fertigungstechnik.

Das Verfahren arbeitet durch Abscheidung eines Fadens aus polymerem Material, das durch eine mikrometrische Düse extrudiert wird, welche die Querschnittsgeometrie des Teils nachzeichnet und dabei Schicht um Schicht aufbaut, bis der Festkörper fertig ist. Wie in Abbildung 3.17 gezeigt werden die Bau- und die Trägermaterialien als Filament-Spulen geliefert. Die Filamente werden dem Extrusionssystem durch Antriebsräder zugeführt, mit dem Zweck, die Filamente in einer kontrollierten Geschwindigkeit und Spannung zu ziehen und zur beheizten Düse zu transportieren.

Die Extrusionsdüsen sind mit Widerstandsheizelementen ausgerüstet, die das Polymer auf einer Temperatur knapp oberhalb seines Schmelzpunktes halten, so dass es leicht durch die Düsen fließen und die Schicht bilden kann. Unmittelbar nachdem der geschmolzene Kunststoff aus der Düse geflossen ist bindet er sich an die Schicht darunter und härtet aus. Sobald eine Schicht aufgebaut ist, wird die Plattform abgesenkt und die Extrusionsdüsen werden am Nullpunkt neu positioniert, um die Abscheidung einer nachfolgenden Schicht zu starten [39].

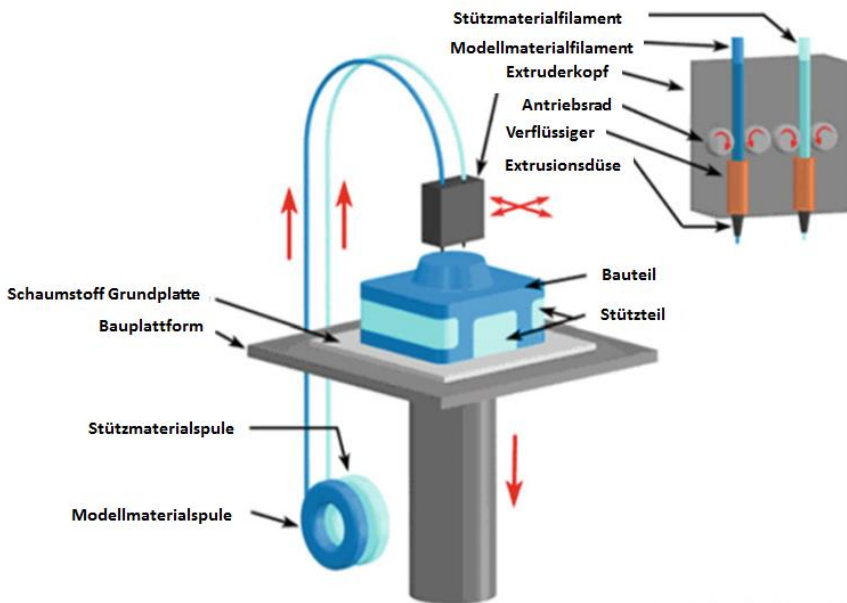


Abbildung 3.17: Schematische Darstellung des Fused Deposition Modelling Verfahrens. Grafik mit freundlicher Genehmigung von CustomPartNet

### 3.6.2 Technologieübersicht und Systeme

Bei Filament-Deposition-Verfahren hängen Maßhaltigkeit, Oberflächenrauheit, mechanische Festigkeit und vor allem die Funktionalität der hergestellten Teile von vielen Prozessvariablen und ihren Einstellungen ab. Beispiele relevanter Prozessparameter für diese Technik sind die Schichtdicke, die Ausrichtung des Teils, Rasterwinkel, Rasterweite und Luftspalt, die, wie mehrere Studien gezeigt haben, einen Einfluss auf die mesostrukturelle Konfiguration des Aufbauteils haben. Die genannten Parameter haben auf eine komplexe Weise eine Wirkung über die Bindung und Verzerrung innerhalb des Teils und dies führt zu den anisotropen und brüchigen Eigenschaften von Teilen, die über das Filament-Deposition-Verfahren hergestellt wurden [38].

Teile, die unter Verwendung des Filament-Deposition-Verfahrens hergestellt wurden, ähneln einem Laminatverbundstoff mit vertikal gestapelten Schichten, die aus zusammenhängenden Materialfasern (Rastern) bestehen mit interstitiellen Hohlräumen (Luftspalten), wie in dem Beispiel in Abbildung 3.18 dargestellt.

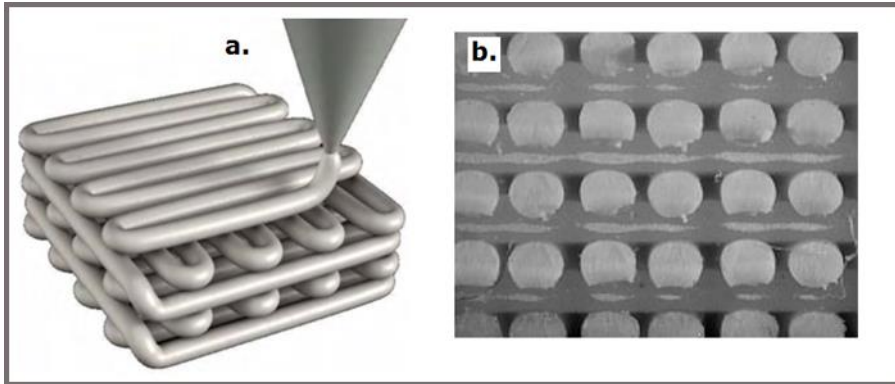


Abbildung 3.18: (a) Schematische Darstellung des Fused Deposition Modelling-Verfahrens [40]  
 (b) Mikrostruktur eines FDM-Teils. R. Protot. J.[41]

Die Bindung zwischen benachbarten Fasern erfolgt über thermisch betriebenes Diffusions-schweißen. In den unteren Schichten ist das Diffusionsphänomen für benachbarte Filamente ausgeprägter als in den oberen Schichten und die Bindungsqualität ist abhängig von der Hülltemperatur und Schwankungen in den konvektiven Bedingungen innerhalb des Aufbauteils [38].

Wie oben beschrieben können die Abmessungen der interstitiellen Hohlräume von beträchtlicher Größe sein und können nach Belieben gestaltet werden. Diese Eigenschaft macht das resultierende Material interessant für seine intrinsische diskrete Gestaltung. Bei der Mikrofertigung wird diese Funktion in der Tat als konstruierte Porosität oder räumlich gesteuerte Abscheidung von Material verwendet, das für spezifische Anwendungen verwendet wird, hauptsächlich in der Medizin für das Tissue Engineering von Gerüsten und Drug-Delivery-Systemen oder für die Elektronik, wie in Tabelle 3.5 gezeigt.

### 3.6.3 Maschinen und Materialien

Tissue Engineering ist ein interdisziplinäres Gebiet, das die Prinzipien der Technik auf die Biowissenschaften (Life Science) anwendet, um lebendes Gewebe und Organersatz zu erzeugen. Es gilt als vielversprechender Ansatz für die Geweberekonstruktion. Dieser Ansatz hat ein enormes Potenzial, um den Mangel an lebenden Geweben und Organen, die für Transplantationen benötigt werden, zu überwinden. In den letzten zwei Jahrzehnten wurden in diesem Bereich große Anstrengungen unternommen, vor allem im Tissue Engineering von Knochen. 3D poröse Gerüste, hergestellt aus verschiedenen Biomaterialien durch progressive Methoden zur Gewinnung von Knochentransplantat in der Orthopädie, haben das Potential, die erforderliche Morphologie, Struktur und Funktion von Knochengewebe zu erreichen und können dadurch die Integration in das umliegende Gewebe

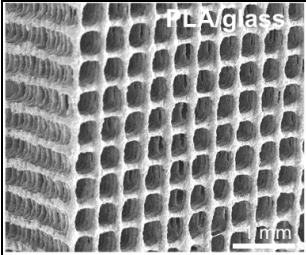
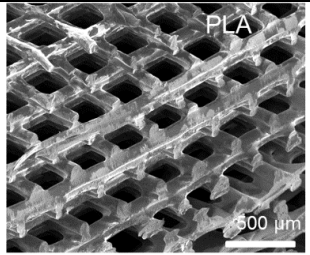
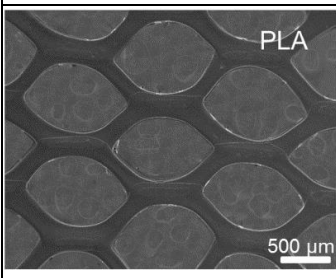
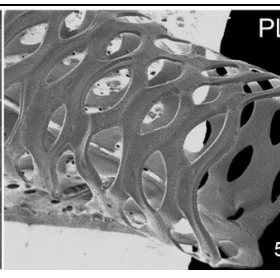
optimieren. Deshalb werden mögliche Materialien und Gerüstherstellungstechnologien sowie Strategien für die Entwicklung von Gerüsten sorgfältig analysiert und ausgewählt.

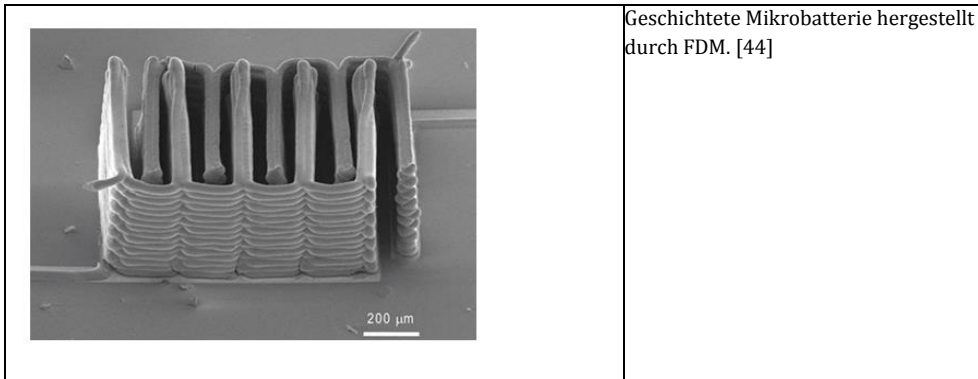
Die 3D-300-Serie (nScript Inc.) ist ein Beispiel für ein Filament-Deposition-Mikroadditives-Fertigungssystem dieses Typs.

Es handelt sich um ein digitales Fertigungssystem, basierend auf einem automatisierten Abgabemechanismus, der durch die Schicht-für-Schicht-Abscheidung verschiedener Materialien 3D-Strukturen herstellt. Es ermöglicht die Herstellung gut definierter, am Computer entwickelter, 3D-Strukturen mit vorgegebener Geometrie in einer zuverlässigen und hoch reproduzierbaren Weise mit einer exakten Steuerung der Porosität der Struktur, Porenverteilung und Morphologie. Es ermöglicht die Herstellung von 3D-Strukturen unter Verwendung von Polymeren und Keramiken mit einer großen Bandbreite an Viskositäten. Es gibt bestehende vordefinierte Protokolle zur Herstellung von Polymergerüsten auf Basis von Polylactid (PLA), Chitosan und auch PLA/Gerüste aus Kalziumphosphat-Glas-Verbundstoffen.

Die Abgabe von Proteinen und Zellsuspensionen steht ebenfalls zur Verfügung. Die Hauptanwendung dieses Systems ist die Herstellung von 3D porösen Gerüsten mit definierter Geometrie und Porosität für Tissue-Engineering-Anwendungen. Die Abgabe und Lokalisierung von Zellen in spezifischen Positionen auf definierten Substraten ist aufgrund der hohen Präzision dieses Werkzeugs ebenfalls möglich.

Tabelle 3.5: Anwendungsbeispiele für unterschiedliche Geometrien von Gerüsten.

		<p>Quadratisches Gitter einer Polymilchsäure (PLA) Gerüststruktur in zwei unterschiedlichen Visualisierungsskalen dargestellt. Quelle: IBEC</p>
		<p>Rohrförmige, ausgehöhlte Gerüststrukturen aus Polymilchsäure können ebenfalls gestaltet und hergestellt werden. Quelle: IBEC</p>



In Bezug auf die Baumaterialien verwendet diese Art von Systemen drei Köpfe für die gleichzeitige Injektion verschiedener Materialien, einschließlich Polymeren, Keramiken und lebender Zellen. In der Fachliteratur wird die Herstellung von Gerüsten mit Materialien beschrieben, darunter [43]:

- Poly(e-Caprolacton) PCL,
- Polypropylen/Tricalciumphosphat (PP/TCP),
- Polycaprolacton/Hydroxylapatit (PCL/HA),
- Poly(e-Caprolacton)/Tricalciumphosphat PCL/TCP
- Poly(lactid-coglycolid) (PLGA)

Durch die proprietäre Software gesteuert, ermöglicht das System die Schaffung einer Mikroumgebung, die für jede Mischung von Materialien und Proteinen geeignet ist und hohe Raten an Zellviabilität erreichen kann. Die erlaubten Viskositäten variieren von 1 bis 106 Centipoise, ermöglicht durch eine hochpräzise Dispensing-Pumpe für die dynamische Steuerung der Strömungsrate. Weitere Features sind visuelle Überwachungssysteme basierend auf einer Digitalkamera, FireWire-Kameras und Linsen mit starker Vergrößerung, mit Erfassung und Messung kolorimetrischer-monochromatischer Variationen.



Abbildung 3.19: 3D-300-Serie von nScript Inc. zur Gerüsterstellung. Quelle: nScript [42]

### 3.6.4 Anwendungen

Die am häufigsten vorkommenden Anwendungen in der FDM-Mikrofertigung sind, wie bereits erwähnt, Anwendungen für Elektronik und regenerative Medizin. Einige Beispiele werden in Tabelle 3.5 unten aufgeführt.

## 3.7 Referenzen

1. MINDS@UW-Madison, "International Conference on MicroManufacturing (ICOMM)." [Online]. Available: <http://minds.wisconsin.edu/handle/1793/64713>. [Accessed: 12-May-2015].
2. "ASTM F2792 - 12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,," [Online]. Available: <http://www.astm.org/Standards/F2792.htm>. [Accessed: 02-Oct-2015].
3. C. J. Tuck, R. J. M. Hague, M. Ruffo, M. Ransley, and P. Adams, "Rapid manufacturing facilitated customization," *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 21, no. 3, pp. 245–258, Apr. 2008.
4. M. Ruffo and R. Hague, "Cost estimation for rapid manufacturing — simultaneous production of mixed components using laser sintering," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 221, no. 11, pp. 1585–1591, Jan. 2007.
5. M. Vaezi, H. Seitz, and S. Yang, "A review on 3D micro-additive manufacturing technologies," *Int. J. Adv. Manuf. Technology*, no. 67, pp. 1721–1754, 2013.

6. C. W. Hull, "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography," US 4575330 A, 11-Mar-1986.
7. K. Ikuta and K. Hirowatari, "Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding," in [1993] Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 1993, pp. 42–47.
8. "Rapid Prototyping - Stereolithography (SLA)." [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>. [Accessed: 02-Oct-2015].
9. H. Yang, S. Ratchev, M. Turitto, and J. Segal, "Rapid Manufacturing of Non-Assembly Complex Micro-Devices by Microstereolithography," *Tsinghua Sci. Technol.*, vol. 14, no. SUPPL. 1, pp. 164–167, 2009.
10. J. Stampfl, S. Baudis, C. Heller, R. Liska, A. Neumeister, R. Kling, A. Ostendorf, and M. Spitzbart, "Photopolymers with tunable mechanical properties processed by laser-based high-resolution stereolithography," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 18, no. 12, p. 125014, 2008.
11. A. S. Limaye and D. W. Rosen, "Process planning method for mask projection micro-stereolithography," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 13, no. 2, pp. 76–84, 2007.
12. C. Xia and N. X. Fang, "3D microfabricated bioreactor with capillaries," *Biomed. Microdevices*, vol. 11, no. 6, pp. 1309–1315, 2009.
13. "Small 3D printer Unirapid III." [Online]. Available: [http://www.unirapid.com/eng\\_ur3.html](http://www.unirapid.com/eng_ur3.html). [Accessed: 02-Jul-2015].
14. "Photonic Professional GT - Nanoscribe GmbH." [Online]. Available: <http://www.nanoscribe.de/en/products/photonic-professional-gt/>. [Accessed: 01-Jul-2015].
15. Y. L. Zhang, Q. D. Chen, H. Xia, and H. B. Sun, "Designable 3D nanofabrication by femtosecond laser direct writing," *Nano Today*, vol. 5, no. 5, pp. 435–448, 2010.
16. Savla Associates, "Photopolymers for Additive Manufacturing," 2008. [Online]. Available: <http://www.photopolymer.com/stereolithography.htm>. [Accessed: 05-May-2015].
17. C. Schizas, V. Melissinaki, A. Gaidukeviciute, C. Reinhardt, C. Ohrt, V. Dedoussis, B. N. Chichkov, C. Fotakis, M. Farsari, and D. Karalekas, "On the design and fabrication by two-photon polymerization of a readily assembled micro-valve," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 48, no. 5–8, pp. 435–441, Oct. 2009.
18. B. N. Chichkov and A. Ostendorf, "Two-Photon Polymerization: A New Approach to Micromachining," *Photonics Spectra*, vol. 40, no. October, pp. 72–79, 2006.
19. C.-L. Lin, Y.-H. Lee, C.-T. Lin, Y.-J. Liu, J.-L. Hwang, T.-T. Chung, and P. L. Baldeck, "Multiplying optical tweezers force using a micro-lever," *Opt. Express*, vol. 19, no. 21, pp. 20604–9, Oct. 2011.
20. Carl R. Deckard, "Method and apparatus for producing parts by selective sintering," US4863538 A, 05-Sep-1989.
21. I. Yadroitsev and I. Smurov, "Surface Morphology in Selective Laser Melting of Metal Powders," *Phys. Procedia*, vol. 12, pp. 264–270, Jan. 2011.
22. J. Kruth, G. Levy, R. Schindel, T. Craeghs, and E. Yasa, "Consolidation of Polymer Powders by Selective Laser Sintering," in *International Conference on Polymers and Moulds Innovations*, 2008.
23. "Selective Laser Sintering." [Online]. Available: [http://www.additive3d.com/sls\\_int.htm](http://www.additive3d.com/sls_int.htm). [Accessed: 02-Oct-2015].



24. M. Cloots, a. B. Spierings, and K. Wegener, "Assessing new support minimizing strategies for the additive manufacturing technology SLM," *Int. Solid Free. Fabr. Symp. An Addit. Manuf. Conf.* August 12-14 2013, 2013.
25. A. B. Spierings, M. Schneider, and R. Eggenberger, "Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 17, no. 5, pp. 380–386, 2011.
26. C. Laser, "MLab Laser Cusing." [Online]. Available: <http://www.concept-laser.de/en/industry/jewellery/machines.html>. [Accessed: 06-Jul-2015].
27. R. GmbH, "No Title." [Online]. Available: <http://www.realizer.com/en/startseite/products>. [Accessed: 06-Jul-2015].
28. J. Goebner, "A Peek into the EOS Lab : Micro Laser Sintering," 2014.
29. E. M. Sachs, J. S. Haggerty, M. J. Cima, and P. A. Williams, "Three-dimensional printing techniques," 1993.
30. "Three Dimensional Printing." [Online]. Available: <http://www.additive3d.com/3dp.htm>. [Accessed: 08-Jul-2015].
31. "Höganäs 3D printing minutiae precision - TCT - 3D Printing, Additive Manufacturing and Product Development Technology." [Online]. Available: <http://www.tctmagazine.com/euomold-news/hoganas-minutiae/>. [Accessed: 08-Jul-2015].
32. Custom\_part\_net, "Ink-jet-printing." [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing>.
33. C. Chen, "Inkjet Printing of Microcomponents : Theory , Design , Characteristics and Applications," 1998.
34. "Stratasys Hearing Aids." [Online]. Available: [http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Secure/Material Specs MS/PolyJet-Material-Specs/HAids\\_3D modeling\\_Letter low.pdf?v=635011192407864638](http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Secure/Material Specs MS/PolyJet-Material-Specs/HAids_3D modeling_Letter low.pdf?v=635011192407864638). [Accessed: 02-Oct-2015].
35. "Rapid Prototyping Laboratory, India ." [Online]. Available: <http://ed.iitm.ac.in/~gsaravana/rplab.htm>. [Accessed: 02-Oct-2015].
36. "Project Case Study: ProJet™ HD 3000 Success at Sant'Anna." [Online]. Available: <http://www.senztech.cc/showsuccessfulstories.aspx?caseid=88>. [Accessed: 10-Jul-2015].
37. Additive3d, "New Veroglaze Dental Material for Stratasys 3D Printers," 2014. [Online]. Available: <http://www.additive3d.com/news/inr2312.htm>.
38. S.-H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 8, no. 4, pp. 248–257, Jan. 2002.
39. B. N. Turner, R. Strong, and S. A. Gold, "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 192–204, Apr. 2014.
40. C. Duty, "Carbon Fiber Reinforced Polymer Additive Manufacturing," 2012.
41. S.-H. Ahn, C. S. Lee, and W. Jeong, "Development of translucent FDM parts by post-processing," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 10, no. 4, pp. 218–224, Jan. 2004.
42. nScrypt, "Micro Dispense Pump 3Dn Series." [Online]. Available: <http://www.nscrypt.com/micro-dispensing-systems-equipment/direct-print-3dn-machines/index.php>. [Accessed: 01-Jul-2015].

43. M. T. Arafat, I. Gibson, and X. Li, "State of the art and future direction of additive manufactured scaffolds-based bone tissue engineering," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 20, no. 1, pp. 13–26, Jan. 2013.
44. Cloud Color Media, "Layered micro-battery created using FDM 3D printing technology," 2014. [Online]. Available: <http://tobuya3dprinter.com/3d-printer-extrusion-made-easy/>.

# 4 Fertigungstechnologie: Mikrobearbeitung

Lorelei Gherman, Andrew Gleadall, Otto Bakker and Svetan Ratchev

(Beiträge von: David Shipley, Mark Strickland, Matthew Hutchinson)  
The University of Nottingham, Institute for Advanced Manufacturing

## 4.1 Überblick

### 4.1.1 Warum Mikrobearbeitung?

Die ständig steigende Nachfrage nach kleineren und präziseren Produkten hat die kontinuierlichen Entwicklungen in den Mikrobearbeitungstechnologien vorangetrieben.

Der globale Wettbewerb hat Verbesserungen in der Genauigkeit der gefertigten Teile sowie die Anforderungen für eine hohe Produktivität und geringere Kosten angeregt.

Mikrobearbeitungstechnologien waren in den letzten Jahrzehnten Gegenstand zahlreicher Studien und Entwicklungen aufgrund ihrer Bedeutung bei der Herstellung von Mikroformen, Mikroventilen, medizinischen Komponenten, Mikro-elektromechanischen Systemen, Subminiatur-Aktoren, Motoren und Mikro-Produkten im Allgemeinen. Entwicklungen in der Mikrobearbeitung haben die Verwendung von Mikrosensoren in der Medizin, der Luftfahrt oder bei der Herstellung tragbarer Geräte erleichtert.

Verschiedene Produkttypen können besondere Herausforderungen stellen; die allgemeinen Anforderungen an die mikrotechnische Produktion sind: Präzision, Genauigkeit und Wiederholgenauigkeit. Zwei zentrale Herausforderungen für die Mikrobearbeitung sind die Bearbeitungsgenauigkeit und die Herstellungskosten (Abbildung 4.1).



Abbildung 4.1: Mikroteile in der Automobilindustrie, Medizin und Uhrenherstellung [1-2]

Die Bearbeitungsgenauigkeit spiegelt die Qualität der Mikroprodukte wider, während die Herstellungskosten angeben, wie marktfähig oder rentabel das Verfahren für die Hersteller ist.

Um Bearbeitungspräzision auf der Mikroebene zu erreichen, sind folgende technische Überlegungen erforderlich:

- Größeneffekte - einschließlich des Themas Werkzeugminiaturisierung, die Auswirkung der Mindestspandicke, oder Überlegungen zur Materialkorngröße, sowie die
- Steifigkeit des Mikrobearbeitungssystems - unter besonderer Berücksichtigung der Genauigkeit des Gesamtprozesses, einschließlich Vibrationen und Rattern beim Mikroschneiden.
- In diesem Kapitel werden wir einige wichtige Begriffe (im Kontext der Mikrobearbeitung) definieren und dann folgende Themen genauer betrachten:
  - Überlegungen zum Material
  - Herausforderungen bei der Erreichung der gewünschten Oberflächengüte
  - Simulationstechniken
  - Verfahrens- und Maschinen-Aspekte der Mikrobearbeitung, und schließlich,
  - Beispiele für Branchen und Anwendungen in der Mikrofertigung.

## **4.1.2 Definitionen**

### **4.1.2.1 Mikroschneiden**

Definitionen der Mikrobearbeitung/des Mikroschneidens können, auch innerhalb der akademischen Gemeinschaft, sehr unterschiedlich ausfallen. Es gibt nicht DIE anerkannte Definition, die alle Aspekte des Mikroschneidens abdeckt.

Wenn wir versuchen, Mikrobearbeitung/Mikroschneiden zu definieren, müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden, einschließlich, aber nicht beschränkt auf:

- Die Größe der Struktur, die hergestellt werden soll
- Werkzeuggröße
- Die spezifische Werkzeugmaschine (z.B. Bearbeitungszentrum) und die Fixierungen

Mikroschneiden (einschließlich Fräsen und Bohren) wird in der Regel in Betracht gezogen für die Herstellung von Strukturen in einem Bereich von 1 - 100  $\mu\text{m}$ .

Makroschneiden wird in der Regel eingesetzt, wenn die bearbeitete Struktur größer als  $100\ \mu\text{m}$  ist.

Strukturen, die kleiner als  $1\ \mu\text{m}$  sind, werden allgemein als das Ergebnis einer Nanobearbeitung angesehen.

Die wichtigste Überlegung bei den oben genannten Faktoren ist die Größe der hergestellten Struktur, die in direkter Beziehung zur Tiefe des Schnitts steht.

Alternative Vorschläge definieren das Mikroschneiden in Bezug auf die Werkzeugabmessungen und beziehen sich dabei hauptsächlich auf den Durchmesser des Schneidwerkzeugs. Werkzeuge mit einem Durchmesser von  $0,5\ \text{mm}$  sind durchaus geeignet für die Mikrobearbeitung. Beispielsweise haben Özel et al. [3]  $0,6\ \text{mm}$  große Werkzeuge für ihre Mikrofräs-Experimente verwendet. Morcom [4] schlägt jedoch vor, dass Mikrofräswerkzeuge einen Durchmesser von  $3,2\ \text{mm}$  oder weniger haben müssen, halb so groß, wie bei anderen Autoren.

Im Gegensatz dazu nehmen Özel et al. [3] an, dass der Schneidkantenradius bei der Definition des Mikroschneidens wichtiger ist. Einige Werkzeuge mit  $0,5\ \text{mm}$  Durchmesser können sehr geringe Schnitttiefen im Submikrometerbereich erreichen. Dies stellt eine Beziehung zwischen bestimmten geometrischen Eigenschaften des Werkzeugs und der Mindestspandicke her, die mit jedem Werkzeug erreicht werden kann.

Die Material-Mikrostruktur wurde ebenfalls zur Definition der Mikrobearbeitung herangezogen [5]. In diesem Fall wurde die Struktur der ungeschnittenen Spandicke in Beziehung gesetzt mit der durchschnittlichen Korngröße des Werkstückmaterials.

#### **4.1.2.2 Größeneffekt**

Metalle besitzen eine kristalline Struktur - diese ist normalerweise für das bloße Auge nicht sichtbar, aber sie ist beispielsweise sichtbar auf verzinkten Laternenpfählen. Sobald sich ein Metall im geschmolzenen Zustand langsam verfestigt, beginnen Millionen winziger Kristalle zu wachsen. Die Größe der Körner hängt hauptsächlich von der Abkühlgeschwindigkeit ab; je länger es dauert, bis das Metall abgekühlt ist, desto größer wachsen die Kristalle. Diese Kristalle bilden die Körner, die das feste Metall bilden. Jedes Korn ist ein individueller Kristall mit eigener Orientierung. Die Bereiche zwischen den Körnern werden Korngrenzen genannt.

Größeneffekt ist ein Begriff, der auf die Tatsache angewendet wird, dass bei der Mikrobearbeitung die Materialschicht, die abgetragen wird, häufig in der gleichen Größenordnung ist, wie die Materialkorngröße, die durch die Materialkornstruktur vorgegeben wird. Um zum Beispiel die erforderliche Form und Oberflächengüte zu erreichen, muss Material

durch Zerschneiden der einzelnen Körner entfernt werden, anstatt komplette Körner zu entfernen, wie dies bei einer Bearbeitung im größeren Maßstab der Fall ist.

Weitere Informationen zur Materialkornstruktur finden Sie in Kapitel Versagen der Materialien, Abschnitt 4.2.2. Weitere Informationen finden Sie in Kapitel Größeneffekt, Abschnitt 4.4.1.3.

#### **4.1.2.3 Ungeschnittene Spandicke**

Die ungeschnittene Spandicke ist die Dicke des unverformten Spans vor der Verformung, die während des metallabtragenden Verfahrens auftritt. Aufgrund des kleinen Formats der Mikrobearbeitung ist die ungeschnittene Spandicke von ähnlicher Größe, wie der Schneidkantenradius. Unter einem bestimmten Wert bilden sich keine Späne und dies führt zu einer schlechten Genauigkeit und Oberflächengüte.

#### **4.1.2.4 Spanwinkel**

Spanwinkel beschreibt den Winkel der Schneidfläche in Bezug auf die Arbeit. Es gibt drei Arten von Spanwinkeln: positive, negative und Null. Positive Spanwinkel reduzieren die Schneidkräfte und fördern die Spanabfuhr.

#### **4.1.2.5 Scheren, Pflügen und Reiben**

Bei der Bearbeitung stoßen wir auf drei Phänomene. Der gewünschte Zustand ist das Scheren, d.h. Materialbruch. Die beiden anderen, weniger wünschenswerten Phänomene, treten jedoch auch immer wieder auf. Pflügen beschreibt die plastische Verformung des Werkstückmaterials, während Reiben oder Verrutschen die elastische Erholung des Werkstückmaterials bezeichnet.

Diese Phänomene werden im nächsten Abschnitt ausführlich erläutert.

## **4.2 Technische Materialien und Materialeigenschaften**

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die wichtigsten mechanischen Eigenschaften von Materialien, die das Mikroschneiden beeinflussen, einschließlich elastischem Verhalten, plastischem Verhalten und Materialversagen. Der größte Teil der Erläuterungen bezieht sich auf Metalle; allerdings gelten viele der Themen auch für die anderen Materialien.

### **4.2.1 Elastisches und plastisches Materialverhalten**

**Elastizität** beschreibt die Fähigkeit eines Materials, eine temporäre Verformung als Reaktion auf eine einwirkende Kraft beizubehalten. Bei der elastischen Verformung kehrt

das Material in seine ursprüngliche Form und Größe zurück, sobald die einwirkenden Kräfte weggenommen werden. Bei Metallen wird die Verformung hauptsächlich dadurch verursacht, dass die Atome enger zusammenrücken (Verdichtung) oder sich leicht voneinander weg bewegen (Dehnung). Nach Wegnahme der einwirkenden Kraft kehren die Atome in ihre ursprünglichen, bevorzugten Positionen zurück. Das elastische Verhalten wird durch das Elastizitätsmodul beschrieben, das auch als **Youngsches Modul** oder Steifigkeit bezeichnet wird. Es beschreibt, wie widerstandsfähig Material gegen Verformung ist. Für steifere Materialien mit höherem Modul muss mehr Kraft aufgebracht werden, um eine bestimmte Verformung zu erreichen.

**Plastizität** bezieht sich auf die Art, in der ein Material eine permanente Verformung erfährt. Bei der plastischen Verformung kehrt das Material nicht in seine ursprüngliche Form und Größe zurück, sobald die einwirkende Last weggenommen wird. Die permanente Verformung ergibt sich aus der umfangreichen Umstrukturierung der atomaren Struktur. Die Fähigkeit eines Materials, sich plastisch zu verformen, ist ein wichtiges Attribut für die Herstellung; insbesondere für Verfahren, bei denen ein Material in eine neue Form gebracht wird, aber auch für das mechanische Schneiden.

Eine nützliche Methode zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften eines Materials ist die Durchführung einer Zug- oder Druckprüfung, bei der eine Probe allmählich verformt wird, während die einwirkende Kraft gemessen wird. Abbildung 4.2 (a) zeigt eine schematische Darstellung einer hundeknochenförmigen Zugfestigkeitsprobe. Die größeren Bereiche an beiden Enden der Probe werden in eine Zugprüfmaschine eingespannt und die Probe wird gestreckt. Die Werte für Spannung und Dehnung im zentralen Testabschnitt werden während des gesamten Tests berechnet. Wird die Probe über ihre Elastizitätsgrenze hinaus belastet, so bleibt eine gewisse Streckung des Testabschnitts erhalten, nachdem die Kräfte nicht mehr einwirken, wie im unteren linken Bild in Abbildung 4.2 gezeigt.

Die Ergebnisse des Tests können als Spannung versus Dehnung aufgetragen werden. Abbildung 4.2 (b) zeigt ein Beispiel eines solchen Plots. Am Anfang der Spannungs-Dehnungskurve weisen Metalle einen linearen Bereich auf. Das Elastizitätsmodul ist gleich der Steigung dieses linearen Bereichs. Der Punkt, an dem die Kurve nichtlinear wird, wird als Streckgrenze definiert; das bedeutet, dass die Elastizitätsgrenze erreicht ist; jede weitere Dehnung führt dann zu einer dauerhaften plastischen Verformung. Wenn die einwirkenden Kräfte allmählich auf den Wert der Dehnung reduziert werden, der durch Punkt A in der Abbildung unten definiert wird, so würde sich die Dehnung verringern, angezeigt durch die gestrichelte Linie. Sobald die gesamte Kraft weggenommen wird, verursacht die verbleibende Dehnung eine permanente plastische Verformung. Der maximale Belastungswert, der an jedem beliebigen Punkt während eines Ausfalltests erreicht

wird, ist die äußerste Zugfestigkeit (ultimate tensile strength, UTS). Ab diesem Punkt versagt die Probe schnell und zerbricht in mehrere Teile.

Die Materialeigenschaften des Werkstücks und des Schneidwerkzeuges sind von entscheidender Bedeutung für eine effektive Bearbeitung. Das Elastizitätsmodul, die Streckgrenze, die äußerste Zugfestigkeit und die Belastung, ab der ein Ausfall auftritt, haben alle Einfluss auf das Verfahren.

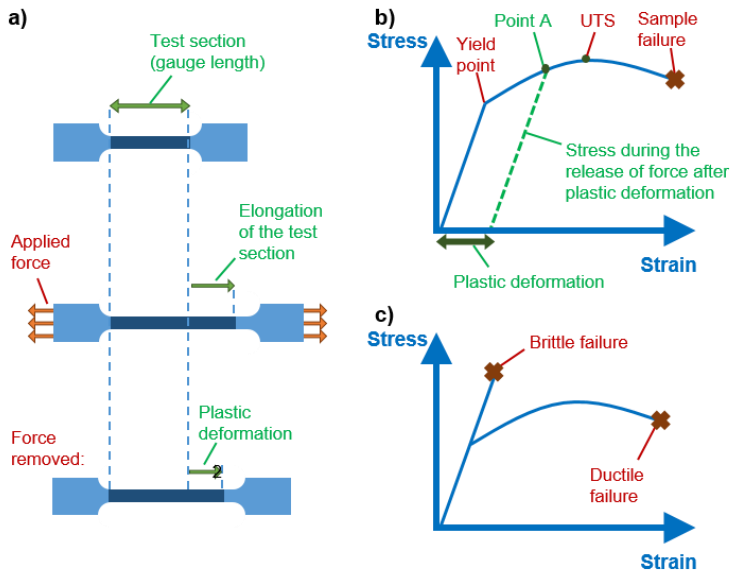


Abbildung 4.2: (a) Prüfling, der einer Zugfestigkeitsprüfung unterzogen wird. Von oben nach unten: vor, während und nach dem Einwirken einer Zugkraft. (b) Typische Spannungs-Dehnungskurve für formbares Metall. Die gestrichelte Linie zeigt die Beziehung, wenn die einwirkenden Kräfte an Punkt A weggenommen werden. (c) Typische Spannungs-Dehnungskurven für spröde und formbare Metalle.

## 4.2.2 Versagen der Materialien

Metalle versagen üblicherweise aufgrund von Bruch, wobei eine einwirkende Spannung einen Riss verursacht, der sich durch die Probe ausbreitet und diese in zwei Teile teilt. Es gibt zwei grundlegende Arten von Brüchen: Spröbruch oder Verformungsbruch; der Unterschied liegt im Grad der plastischen Verformung, den das Material erfahren hat. Abbildung 4.2 (c) zeigt, wie sich die Spannungs-Dehnungskurven der beiden Arten von Brüchen unterscheiden. Bei spröden Materialien erfährt eine Probe eine elastische Dehnung, bis so hohe Belastungen erreicht sind, dass sich ein Riss bildet, der sich schnell über



den gesamten Prüfling mit sehr geringer plastischer Verformung ausbreitet. In vielen Fällen beginnt der Riss so plötzlich und breitet sich so rasch aus, dass es keinen visuellen Hinweis auf den bevorstehenden Bruch gibt. Risse bilden sich an Fehlstellen innerhalb oder auf der Oberfläche eines Prüflings. Im Gegensatz dazu breitet sich ein Riss bei einem Verformungsbruch langsamer aus und es tritt eine erhebliche plastische Verformung auf. Eine plastische Verformung kann zu einer Verengung eines Abschnitts des Prüflings führen, wenn dieser gestreckt wird; dies bezeichnet man als Einschnürung. Da dieser Abschnitt eine reduzierte Querschnittsfläche aufweist, ist er einer höheren Spannung ausgesetzt und daher werden sich Risse typischerweise dort bilden.

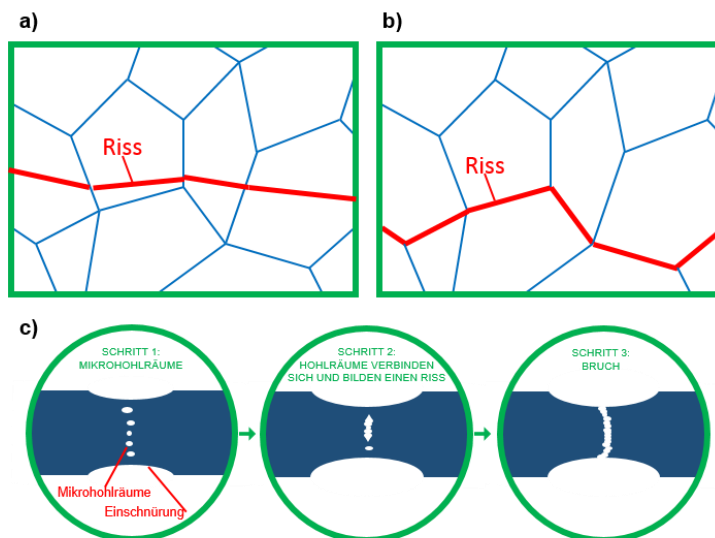


Abbildung 4.3: (a) Riss, der sich bei einem Sprödbuch durch die Mikrostrukturkörner ausbreitet. (b) Riss, der sich bei einem Sprödbuch entlang der Korngrenzen ausbreitet. (c) Riss, der sich bei einem Verformungsbruch durch Verschmelzung der Mikro Hohlräume ausbreitet.

Abbildung 4.3 (a) zeigt, wie sich spröde Risse durch Metallkörner ausbreiten; dies nennt man transgranulare Fraktur; (b) zeigt, wie ein Riss den Korngrenzen folgen kann; dies nennt man intergranulare Fraktur. Viele Faktoren beeinflussen, welche Art Fraktur auftritt: die Größe der Körner und die Festigkeit der Korngrenzen sind besonders wichtig. Beim Mikroschneiden können die Korngrenzen größer sein, als die erforderliche Genauigkeit; in diesem Fall wirkt sich ein intergranularer Bruch nachteilig auf die Durchführung des Verfahrens aus.

Abbildung 4.3 (c) zeigt eine schematische Darstellung einer Rissausbreitung während eines Verformungsbruchs. Hohe Spannungen führen zu einer lokalisierten plastischen Verformung und zur Bildung von Mikrohohlräumen. Nimmt die Größe dieser Mikrohohlräume zu, so verschmelzen sie allmählich miteinander und bilden einen Riss. Höhere Spannungen in der Nähe der Rissspitze führen zur Bildung von Mikrohohlräumen in der Nähe, die wieder wachsen und sich schließlich mit dem Riss verbinden, bis sich der Riss durch den gesamten Prüfling ausgebreitet hat.

#### 4.2.2.1 Rissausbreitung

Die Spannung, die für ein Materialversagen aufgrund der plötzlichen Ausbreitung eines Risses in spröden Materialien erforderlich ist, kann entsprechend vorhergesagt werden:

$$\sigma_c = \left( \frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{0,5}$$

wobei:

$\sigma_c$  = kritische Spannung für die Rissausbreitung

E = Youngsches Elastizitätsmodul

$\gamma_s$  = spezifische Oberflächenenergie

a = Risslänge

Bei Verformungsbrüchen tritt ebenfalls eine plastische Verformung in der Nähe der Rissspitze auf und muss zusätzlich zu Überlegungen zur Oberflächenenergie ebenfalls in Betracht gezogen werden. Daher ist für die duktile Rissausbreitung eine höhere Spannung oder ein längerer Riss erforderlich (als dies bei einem Spröbruch der Fall ist). Die obige Gleichung kann verwendet werden, um die Bruchfestigkeit spröder Materialien auf der Basis der Größe der natürlich vorkommenden Fehler zu bestimmen.

Für das Mikroschneiden ist die Rissausbreitung wichtig für die Bildung von Spänen.

## 4.3 Design und Simulation

### 4.3.1 Einführung

Die Simulation des Mikroschneidens ist ein komplexer und hochtechnischer Bereich, der eine spezielle Ausbildung und umfangreiche Erfahrung erfordert. Die Simulation des Mikroschneidens kann den Eindruck erwecken, dass sie der Simulation herkömmlicher Bearbeitungsprozesse ähnlich ist; in diesem Abschnitt versuchen wir jedoch zu erklären, dass die Verfahren sehr unterschiedlich sind und viele komplexe Phänomene auftreten, die sich gegenseitig beeinflussen.

Darüber hinaus benötigt man zur Simulation des Mikroschneidens teure, komplexe Software-Pakete, die noch in der Entwicklung sind.

In diesem Abschnitt wollen wir versuchen, dies in einem größeren Zusammenhang zu stellen und dem Leser helfen zu verstehen, wie komplex die Simulation des Mikroschneidens tatsächlich ist. In einem hart umkämpften globalen Markt können Unternehmen zu dem Schluss gelangen, dass es finanziell sinnvoll sein kann, bei Bedarf die Unterstützung erfahrener Berater zu suchen.

### 4.3.2 Welche Gründe sprechen für die Simulation des Mikroschneidens?

Wie bereits erwähnt unterscheiden sich Mikroschneidvorgänge aufgrund der spezifischen Schnittenergie, der Mindestspandicke, Oberflächenrauheit, Gratbildung, des Mikrostruktureffekts und Werkzeugverschleißes sehr deutlich von einer konventionellen Bearbeitung.

Außerdem sind Mikrowerkzeuge relativ teuer und daher ist Werkzeugbruch höchst unerwünscht. Im Vergleich zur herkömmlichen Bearbeitung führen die relativ hohen Schneidkräfte, die Empfindlichkeit der Mikrowerkzeuge gegenüber Schwingungen, sowie Phänomene wie Reiben und Pflügen, zu unterschiedlichen Spanbildungen und erhöhen somit die Komplexität des Verfahrens.

Aufgrund der geforderten hohen Genauigkeit werden stabile und hochpräzise Maschinen benötigt.

Aus diesem Grund muss eine Vielzahl von Themen in Betracht gezogen und effektiv gehandhabt werden.

Zum Beispiel:

- Veränderungen der Umwelt, die Auswirkungen auf den Prozess haben (in der Regel die Temperatur)
- Vibration (Quellen innerhalb und außerhalb des Bearbeitungszentrums)
- Die kleine Größe der Teile, was zu Problemen führen kann
- Teilemanagement (Haltevorrichtung und Werkstückposition)
- Geringe Steifigkeit des Werkstücks
- Schneidflüssigkeiten und deren Wechselwirkung mit dem Schneidwerkzeug und dem Werkstück
- Genauigkeit; Toleranzen bis zu  $0,1 \mu\text{m}$
- Durchbiegung und Schnittkräfte, die bis zu 20-mal höher als erwartet sein können, können hohe Werkzeug- und Werkstückdurchbiegungen verursachen.
- Spanlasten und Vorschubgeschwindigkeiten (hohe Spindeldrehzahlen (UpM) ermöglichen angemessene Vorschubgeschwindigkeiten), haben jedoch negative Auswirkungen auf die Standzeit und können leicht zu Werkzeugbruch beitragen.

Außerdem können sich die Maschinenbediener, im Gegensatz zur konventionellen Bearbeitung, bei der Überwachung des Mikroschneidens nicht auf Bearbeitungsgeräusche verlassen, um Probleme wie Werkzeugbelastung und Verschleiß zu erkennen. Daher können kleine Änderungen der Schneidebedingungen, wie Werkzeugverschleiß oder Werkzeughdurchbiegung, zum sofortigen Werkzeugbruch führen.

Aus all diesen Gründen ist es zwingend erforderlich, dass Zuführungen, Geschwindigkeiten und Werkzeugbahnen gleich beim ersten Mal korrekt sind. Da es wenig Spielraum für Fehler gibt, ist die Simulation von unschätzbarem Wert.

#### **4.3.2.1 Simulation der Mikrobearbeitung**

Speziell entwickelte Simulationssoftware für die Mikrobearbeitung ist im Handel erhältlich, z.B. Cimatron E Micro-Milling [6] und G-Wizard [7]. Allerdings sind die Kosten für diese Software-Pakete oft unerschwinglich und es können auch Systemkompatibilitätsprobleme, Herausforderungen für die IT-Infrastruktur, etc. auftreten. Bedeutende Forschungen wurden im Projekt "Micro Milling" unternommen [8], um Simulationssoftware zu etablieren; diese Software muss jedoch noch erheblich weiterentwickelt werden, damit die Simulationssoftware für das Mikroschneiden so weit verbreitet zum Einsatz kommt, wie es bei der konventionellen Bearbeitung üblich ist.

Für KMUs ist es daher nicht immer sinnvoll, speziell entwickelte Simulationssoftware für die Mikrobearbeitung zu verwenden. Allerdings können durch Nutzung der Werkstatter-

fahrung, und in einigen Fällen durch mechanistische Modellierung (siehe Abschnitt 4.3.5) Bearbeitungsstrategien entwickeln werden, die für die Mikrobearbeitung geeignet sind. Es gibt Gemeinsamkeiten zwischen der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung und der Mikrobearbeitung, z.B. die Notwendigkeit, abrupte Werkzeugbewegung zu vermeiden.

Bei der Verwendung von Simulationssoftware, die für den Einsatz unter Bedingungen der konventionellen Bearbeitungssimulation bestimmt ist, muss man sich bewusst sein, dass aufgrund der kleinen Abmessungen mögliche CAD/CAM-Übersetzungsprobleme auftreten können. Um diese Probleme zu minimieren müssen beim Import von CAD-Teilen die Oberflächen genau verbunden sein. Zweitens sollte die Simulationssoftware in der Lage sein mit hoher numerischer Präzision zu arbeiten, um Probleme mit kleinen Strukturen zu vermeiden, vor allem auf größeren Flächen, wo das Verhältnis zwischen den Gesamtabmessungen des Teils und den Strukturdimensionen in der Größenordnung von 10<sup>3</sup> bis 10<sup>4</sup> liegen kann.

#### 4.3.2.2 Bearbeitungsstrategien

Die Simulation wird häufig zur Entwicklung von Bearbeitungsstrategien eingesetzt.

Es ist wichtig, Erfahrungen des Bedienpersonals und der Werkstatt zu nutzen, wenn diese zur Verfügung stehen. Maschinenbediener verfügen oft über eine Menge Erfahrung, Fähigkeiten und Kenntnisse, die sie an andere weitergeben können.

Eine häufig genannte Empfehlung ist, dass Unternehmen Bearbeitungsstrategien entwickeln und effektiv umsetzen, die für die Mikrobearbeitung geeignet sind. Es gibt Parallelen zwischen der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung und der Mikrobearbeitung, die äußerst hilfreich sein können. Viele Grundlagen der Metallzerspanung gelten für beide Bereiche, und es ist wichtig, auf diesen Vorkenntnissen, trotz aller Unterschiede, aufzubauen.

Die Strategien sollten folgende Überlegungen berücksichtigen:

- Abrupte Werkzeugbewegung vermeiden.
- Für Eckstrukturen sollten, wenn möglich, die Werkzeugbahnen gerundet werden - dies wird beeinflusst durch das vorgelagerte Produktdesign und kann machbar sein, oder auch nicht.
- Die Vorschubgeschwindigkeiten sollten reduziert werden, wenn man sich Strukturen annähert, bei denen ein Richtungswechsel erforderlich ist. Dies reduziert die Belastung für kleine und relativ fragile Mikrowerkzeuge.
- Konventionelles Fräsen ist in der Regel effektiver als Gleichlaufräsen.
- Es kann auch ratsam oder sogar notwendig sein, Schrupp- und Schlichtbearbeitungen für Teile mit hohen Seitenverhältnissen zu

kombinieren. Die Einrichtung der Maschinen für die Mikrobearbeitung und das Vereinfachen der Bearbeitungsstrategie kann schwierig und zeitaufwändig sein; der Einsatz komplexer Einrichtungen ist in der Regel ratsam.

Simulationssoftware ist von großem Nutzen für die Planung von Mikrobearbeitungsvorgängen. Es gibt einige wichtige Überlegungen für die Gestaltung / Erzeugung von Werkzeugbahnen und Prozessparametern:

- Aufgrund der Dynamik der Spanbildung gibt es einen Zusammenhang zwischen Spindeldrehzahlen (UpM) und Vorschub.
- Ein starker Kühlmittelstrom kann einige Mikrowerkzeuge durchbiegen und zu Ungenauigkeiten führen.
- Besonders zu achten ist auf die Werkzeugdurchbiegung; relativ kleine Werkzeuglasten können hier einen Einfluss haben – je nach der Schneidumgebung insgesamt.
- Es ist wichtig, dass geeignete Werkzeuglasten für den Schneidevorgang verwendet werden, da eine nicht ausreichende Last keine Spanbildung, sondern Reiben zur Folge haben wird; andererseits verursachen zu starke Belastungen Durchbiegungen oder schlimmer noch, Werkzeugbruch.
- Versuchen Sie die Werkzeugbelastungen konstant zu halten, um die Genauigkeit zu maximieren und Werkzeugbruch zu vermeiden.

Folglich muss jede eingesetzte Simulationssoftware in der Lage sein, während des gesamten Schneidevorgangs eine möglichst konstante Spanlast aufrecht zu halten.

### **4.3.3 Mikrobearbeitung gegenüber konventioneller Bearbeitung**

Die Strukturen eines typischen mikrobearbeiteten Teils liegen in der Größenordnung von 1 bis 25  $\mu\text{m}$  und die geforderten Genauigkeiten können bei einer Größe von weniger als 2,5  $\mu\text{m}$  liegen. Oft müssen Werkzeuge mit negativen Spanwinkeln arbeiten, weshalb Reiben und Pflügen über das Scheren dominieren [9]. Dies ist ein Ergebnis des kleinen Maßstabs, in dem das Mikroschneiden stattfindet. Qualitätswerkzeuge mit scharfen Schneidkanten, sowie eine Vorschubrate pro Zahn in der Größenordnung des Schneideradiuses sind erforderlich, wie in Abbildung 4.4 dargestellt.

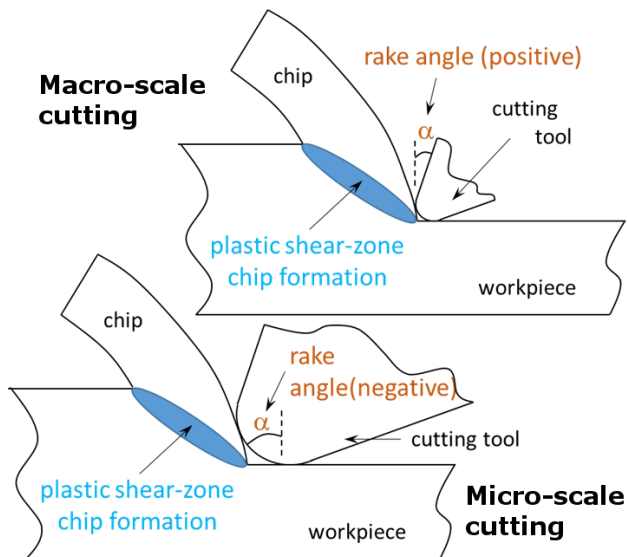


Abbildung 4.4: Spanwinkel beim Mikro- und Makroschneiden.

Wichtige Parameter, die zusammengenommen dieses Verfahren sehr schwierig machen, sind der oben genannte Größeneffekt (Schneidenradius von vergleichbarer Größe wie die unverformte Spandicke und die Materialkörner); negativer Spanwinkel, was zu Reiben, Pflügen und schlechter/unterbrochener Spanbildung führt (nicht bei jeder Umdrehung); und die sich ergebenden Spanlasten [10, 11].

Als Ergebnis dieser Größeneffekte können die erforderlichen Mikroschneidkräfte 10 bis 20 mal höher sein als für herkömmliche Modelle im Makromaßstab vorhergesagt wird, während gleichzeitig kleine, relativ fragile Schneidwerkzeuge verwendet werden [9].

#### 4.3.4 Modellierung der Mikrobearbeitung

Wie bereits erläutert, dient die Simulation dazu, Werkzeugbahnen zu erzeugen und Kräfte vorherzusagen. Sie macht Gebrauch von einigen einfachen Beziehungen, die experimentell abgeleitet wurden, oder vom Aufbau eines Modells der Physik des Schneidprozesses. Der Ausdruck "Modellierung des Mikrobearbeitungsprozesses" bedeutet in diesem Zusammenhang den Aufbau eines Modells, das die Physik des Schneidprozesses beschreibt, das schließlich dazu verwendet werden kann (innerhalb gewisser Grenzen), den Wert einer Reihe von Parametern abzuschätzen, die für die Definition der Werkzeugbahnen erforderlich sind. Das Mikroschneiden ist ein Prozess, der viele Variablen beinhaltet und deshalb relativ komplex zu verstehen und zu modellieren ist. Das Mikrowerkzeug spielt eine zentrale Rolle in dem Verfahren. Ferner sollte der Größeneffekt berücksichtigt werden.

Um Arbeitsmodelle herzustellen müssen eine Reihe von Annahmen über die Prozessvariablen gemacht werden, um den Grad der Komplexität des Modells zu reduzieren. Numerische Modelle des Mikroschneidprozesses verwenden die gleichen zugrundeliegenden Annahmen, wie analytische Modelle [12, 13].

Erwähnenswert ist auch, dass die numerische Modellierung des Mikroschneidens in den letzten Jahren zunehmend populärer geworden ist. Allerdings sind spezielle Fachkenntnisse erforderlich, um ein Modell zu definieren und die Modellqualität zu bewerten, nicht nur, um Fehler und mögliche Probleme inhärent in der Diskretisierung in finite Elemente zu identifizieren, sondern auch um beurteilen zu können, ob die zugrundeliegenden Annahmen über den Schneidprozess zur Reduzierung der Modellkomplexität gültig sind.

Die meisten Untersuchungen zu Mikroschneidverfahren, einschließlich der numerischen Modellierung des Prozesses, konzentrieren sich auf eine Reihe charakteristischer Probleme des Mikroschneidprozesses: der erreichbaren Mindestspandicke, dem Schneidenradius - wobei der Schneidenradius die Mindestspandicke stark beeinflusst - die Mikrostruktur des Werkstückmaterials und die spezifische Schneidkraft. Alle diese Parameter beeinflussen das erschütterungsdynamische Instabilitätsphänomen; dies ist ein anderes Thema, das bei der Modellierung des Mikroschneidverfahrens untersucht wird. Oberflächenbeschaffenheit ist ein weiteres Studiengebiet in der Modellierung des Schneidprozesses [12]. Eine Bemerkung in einem aktuellen Forschungsüberblick von Anand und Patra [12] deutet darauf hin, dass es nicht viele Publikationen zu diesem Thema und über die Wirkung des Pflügens gibt.

### **4.3.5 Mechanistische Modellierung des Mikroschneidverfahrens**

Mechanistische Modellierungstechniken verdienen eine gesonderte Betrachtung, da sie nicht auf dem Aufbau eines Modells aus den Grundprinzipien basieren [12]. Die mechanistische Modellierung erweist sich als sehr nützlich bei der Festlegung der Schneidkoeffizienten. Schneidkoeffizienten werden im Allgemeinen empirisch ermittelt unter Berücksichtigung der Beziehung zwischen den Spanlasten und der Schneidkräfte und einer Reihe anderer Prozessparameter. Die erhaltenen Parameter können anschließend in der Simulationssoftware verwendet werden. Die Anwendung dieser Modellierungsmethode erfordert weniger Spezialwissen und ist daher besser geeignet für den Einsatz in kleinen und mittleren Industrieunternehmen.

### **4.3.6 Finite-Elemente-Analyse (FEA)**

Das Schneidwerkzeug spielt eine entscheidende Rolle im Mikroschneidverfahren; spezielles Fachwissen ist erforderlich, um Simulationsmodelle zu generieren und zu bewerten.



Für die 3D-Modellierung ist eine viel höhere Rechenleistung erforderlich als für die 2D-Modellierung.

Die Finite-Elemente-Analyse (FEA) ist eine Rechentechnik zur Simulation realer physikalischer Effekte, einschließlich Kräften, Temperaturen, Vibrationen und Materialfluss. Die FEA kann eingesetzt werden, um eine Reihe von Skalen zu simulieren - vom Sub-Mikrometer-Bereich bis zum Brückenbau. Für das Mikroschneiden kann die FEA verwendet werden, um die Wechselwirkung zwischen Werkzeug und Werkstück in 3D zu modellieren.

Die Finite-Elemente-Methode im atomaren Maßstab (AFEM) wurde vor kurzem entwickelt [14]. Bei diesem Verfahren werden die interatomaren Bindungskräfte zwischen den einzelnen Atomen im (Werkstück) Material mit Kräften modelliert, die durch nichtlineare Federelemente ausgeübt werden, so dass sich diese Methode vom molekularen Dynamikansatz klar unterscheidet, der in Abschnitt 4.3.7 besprochen wird. Die AFEM kann als Brücke zwischen der Molekulardynamik-Methode (MD) und der herkömmlichen FEA für die Modellierung der Kontinuumsmechanik angesehen werden. Studien, welche die AFEM auf die Modellierung des Mikroschneidprozesses anwenden, sind uns nicht bekannt.

#### 4.3.6.1 Etablierte prädiktive FEA-Modelle

Abbildung 4.5 unten zeigt zwei Bilder einer Simulationssoftware, die im Rahmen der Studie "Modellierung und Simulation von Mikrofräsen-Schneidkräften" erzeugt wurden [15].

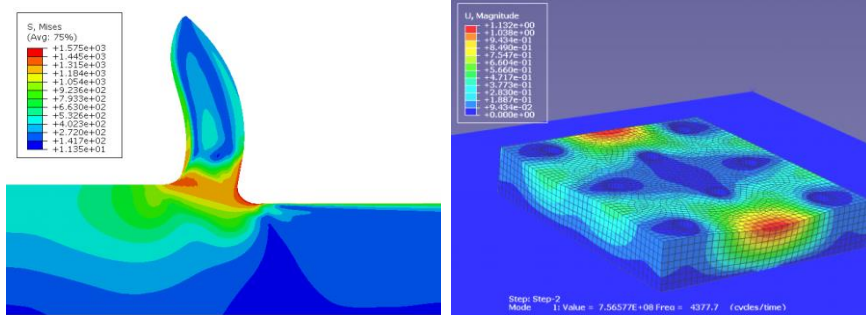


Abbildung 4.5: Links: Von Mises Spannungen und Spanbildung bei 4  $\mu\text{m}$  ungeschnittener Spandicke, Schneidgeschwindigkeit 1571 mm/s und Kantenradius 3,5  $\mu\text{m}$   
Rechts: Eigenfrequenz des Werkstücks beim ersten Shape-Model.

Die FEA-Technik wurde erfolgreich genutzt zur Vorhersage folgender Ereignisse [7]:

- Micro-Gratbildung (Grate können Probleme verursachen und ihre Entfernung von Mikrokomponenten kann sich als schwierig erweisen).

- Schneidkräfte (wie bereits erwähnt, unterscheiden sie sich erheblich von Makroschneide-Modellen).
- Spannungsverteilung auf dem Schneidwerkzeug.
- Werkzeugbruch.
- Thermische Analyse (Vorhersage von Wärmespannungskonzentrationen, thermo-mechanischen Materialeigenschaften).

### 4.3.7 Molekulardynamik-Modellierungsansatz

Der Ansatz für die Molekulardynamik-Modellierung (MD) führt eine Analyse auf atomarer Ebene durch, auf der Grundlage der atomaren Wechselwirkungspotentiale (mathematische Funktionen zur Berechnung der potentiellen Energie der Atome auf der Grundlage ihrer relativen Positionen zueinander) [9, 12]. MD-Simulationen erfordern einen sehr hohen Rechenaufwand sowie Fachkenntnisse, um das Modell zu bauen und die Ergebnisse zu testen und zu interpretieren. Sie werden in erster Linie, jedoch nicht ausschließlich, für nanoskaliges Schneiden verwendet. Simulationen in größeren Maßstäben werden aufgrund der Anzahl der beteiligten Atome rasch unausführbar.

#### 4.3.7.1 Etablierte MD-Modelle

Die Modelle dienen dazu:

- Den Mechanismus der Spanbildung und der Oberflächenerzeugung zu verstehen.
- Modelle für das Schneiden zu erstellen.
- Die Wirkung der atomaren Struktur des Materials auf die Spanbildung sowie die Schneidkräfte zu untersuchen.
- Die Mechanismen für Reibung, Verschleiß und Verkratzen zu verstehen.

### 4.3.8 Multiskalen-Simulationsmethoden

Simulationen, die sehr unterschiedliche Größenskalen berücksichtigen, sind eine besondere Herausforderung für Computersimulationen. Eventuell benötigt ein Werkzeug für die Werkzeugspitze eine Analyse im Nanomaßstab und für den Werkzeugkörper im Makromaßstab. Simulationsmethoden, die in der Lage sind, den Werkzeugkörper zu betrachten, sind möglicherweise nicht in der Lage, die feinen Details der Werkzeugspitze zu erfassen, während Methoden, die für die Werkzeugspitze geeignet sind, für den kompletten Werkzeugkörper nicht realisierbare Rechenressourcen voraussetzen würden. Aus diesem Grund wurden Multiskalen-Simulationstechniken entwickelt, die unterschiedliche numerische Methoden in einem einzigen Modell kombinieren [9, 12]. Für ein Multiskalen-FEA-Modell kann die Werkzeugspitze mit einer MD-Simulation analysiert werden, die Kräfte

und Temperaturen auf ein größeres FEA-Modell des Werkzeugkörpers überträgt. Somit erfasst das Modell Wechselwirkungen im atomaren Maßstab an der Spitze, und im Makromaßstab die Temperatur und Kraftverteilung im Gesamtwerkzeug. Es gibt viele alternative Kombinationen von Simulationstechniken. Allerdings erfordern solche Modelle hochspezialisierte Kenntnisse und werden hier in erster Linie zur Information und Sensibilisierung erwähnt. Eine ausführliche Diskussion dieser Modelle würde den Rahmen dieses Buches sprengen.

- Quasicontinuum (QC) Methode
- Coupled Atomistic and Discrete Dislocation (CADD) Methode
- Bridging-Methode
- Finite Element-Atomistic (FEAt) Methode
- Macroscopic, Atomistic, Ab initio Dynamics (MAAD) Methode, und,
- Coarse-Grained Molecular Dynamics (CGMD) Methode

QC, CADD und FEAt sind die beliebtesten Methoden, die angewendet werden, um Mechanismen für den Materialabtrag zu untersuchen und die Eigenschaften von Mikrostrukturen zu bewerten.

### **4.3.9 Voraussichtliche Kosten**

Zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Kapitels (2016), lagen die vorläufigen Kosten für FEA-Software in der Größenordnung von 10 – 25000 € pro Lizenz; möglicherweise gibt es in naher Zukunft preiswertere Cloud-basierte Lösungen.

Expertise ist bei Fachingenieurbüros oder Universitäten in der EU erhältlich.

## **4.4 Verfahren, Werkzeuge und Maschinen**

### **4.4.1 Verfahren**

Dieser Abschnitt enthält einen Überblick über die Verfahren, die zur Mikrobearbeitung eingesetzt werden.

#### **4.4.1.1 Bearbeitungsmaßstab**

Wie bereits dargelegt, sind die Anforderungen sowie die Parameter für das Mikroschneiden völlig unterschiedlich zum regulären Schneiden, trotz ähnlicher Kinematik. Beispielsweise ist das Mikroschneiden nur möglich bei Spindeldrehzahlen höher als 20.000 Umdrehungen pro Minute; für reguläre Schneidverfahren sind sie in der Regel viel niedriger. Die Mechanik des Mikroschneidens ist ebenfalls unterschiedlich. In der Regel ist die Material-

Mikrostruktur ein wichtiger Faktor bei der Herstellung der Werkstückoberfläche, da die Materialkörner oft geteilt (nicht getrennt) werden müssen, um die erforderliche Strukturgröße und Oberflächengüte zu erzielen. Der Hauptunterschied zwischen Bearbeitungs- und Mikrobearbeitungsverfahren ist jedoch, neben der Größe, die ungeschnittene Spandicke [9].

Im Folgenden werden einige der wichtigsten Unterschiede zwischen Makro- und Mikroschneiden in Bezug auf verschiedene Aspekte skizziert, nämlich das Werkzeug, die Werkzeugmaschinen und die ungeschnittene Spandicke.

Diese Unterscheidung hilft nicht nur, die Grenzen für das Schneiden im Mikromaßstab zu definieren, sondern trägt auch dazu bei, diejenigen, die beabsichtigen sich im Bereich Mikroschneiden zu engagieren, entsprechend vorzubereiten.

### **Bedeutung der Werkzeuge für das Mikroschneidverfahren**

Um die erforderliche Genauigkeit für das Mikroschneiden (z.B. Schnitttiefen, die oft in der Größenordnung von einigen Mikrometern liegen) zu erreichen, werden Spezialwerkzeuge benötigt. Allerdings werden die Unterschiede zwischen regulären Schneidwerkzeugen und Mikroschneidwerkzeugen nicht allein über die Größe definiert. Mikrowerkzeuge werden in der Regel mit einer oder zwei Spannuten gestaltet und besitzen eine eindeutige Geometrie. Da die ungeschnittene Spandicke und die Schneidkante vergleichbare Abmessungen aufweisen, muss die Schneidkante verbesserte mechanische Eigenschaften besitzen. Sie muss hohe thermische und mechanische Belastungen ertragen können, die durch die hohe Rotationsgeschwindigkeit verursacht werden.

Einige reguläre Werkzeuge, wie zum Beispiel Schaftfräser mit einem Durchmesser von 1 mm, sind in der Lage Schnitttiefen auf der Mikroebene in der Größenordnung von 10 µm durchzuführen. In solchen Fällen wird das Mikroschneiden durch den Schneidkantenradius ermöglicht und nicht durch den Werkzeughdurchmesser. Allerdings gibt es Einschränkungen bezüglich dessen, was mit einem nicht spezialisierten Werkzeug erreicht werden kann.

### **Bedeutung der Werkzeugmaschinen für das Mikroschneidverfahren**

Spezialwerkzeugmaschinen werden auch für das Mikroschneiden benötigt. Es gibt zwei Arten von Anlagen, die Mikroschneiden durchführen können: Ultrapräzisions-Bearbeitungszentren und Mikromaschinen, wie Mikro-Fabriken und Miniaturmaschinen.

Im Gegensatz zu einer regulären Werkzeugmaschine benötigen Mikrobearbeitungszentren eine größere Stabilität und die Maschinen selbst müssen als Dämpfer wirken, um die inhärenten prozessbedingten Vibrationen zu absorbieren. Spezialmikrowerkzeugmaschinen haben eine hohe Steifigkeit, sind extrem präzise und sollten in kontrollierten Umgebungen arbeiten, z.B. Temperatur, Feuchtigkeit usw. [16].

Bearbeitungsmaschinen für das Mikroschneiden müssen ebenfalls eine bessere Stabilität, Präzision auf Submikrometerniveau und Steifigkeit besitzen und müssen präzise eingestellt sein. Sie sollten auch ein hohes Maß an statischer und dynamischer Steifigkeit, sowie thermische Stabilität aufweisen und Positionierungsfehler kompensieren können [17]. Beispielsweise sind Hochgeschwindigkeitsmaschinen wie die KERN Triton (20.000 - 50.000 UpM) in der Lage sämtliche inhärenten und resultierenden Vibrationen zu dämpfen; dies ist von entscheidender Bedeutung, um die geforderten Toleranzen und Oberflächengüte zu erreichen.

### Bedeutung der ungeschnittenen Spandicke für das Mikroschneidverfahren

Das Verhältnis des Kantenradius des Schneidwerks zur ungeschnittenen Spandicke ist auch ein Unterscheidungsfaktor zwischen regulärer Bearbeitung und Bearbeitung im Mikromaßstab. Bei geringen Schnitttiefen tritt Pflügen und Rutschen häufiger auf. Einige Forscher haben beobachtet, dass eine Reduzierung der Schnitttiefenwerte auf einen Anstieg der nichtlinearen spezifischen Schnittenergie hinweisen [18]. Diese sogenannten Größeneffekte sind der wichtigste Unterschied, wenn man reguläres Schneiden mit dem Mikroschneiden vergleicht.

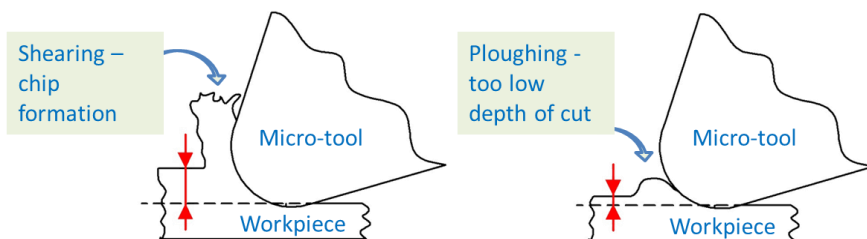


Abbildung 4.6: Größeneffekte aufgrund des kleinen Verhältnisses von ungeschnittener Spandicke zu Schneidenradius

Abbildung 4.6 zeigt die Auswirkungen des kleinen Verhältnisses von ungeschnittener Spandicke zu Schneidenradius. Diese Bilder verdeutlichen den Unterschied zwischen Schneiden im normalen Maßstab und Schneiden im Mikromaßstab. Der Hauptunterschied ergibt sich aus der Größe des Radius im Vergleich zur ungeschnittenen Spandicke. Beim regulären Schneiden ist der Radius wesentlich kleiner und somit hat das Werkzeug einen hohen Schärfegrad. Beim Mikroschneiden kann man jedoch davon ausgehen, dass der Radius eine ähnliche Größe aufweist, wie die mittlere Korngröße des Werkstückmaterials. Dies hat Auswirkungen auf die Schärfe und die Scherzonenbildung.

Abbildung 4.6 (links) zeigt gewünschte Schnittbedingungen, die zum Scheren führen, während Abbildung 4.6 (rechts) eine geringe Schnitttiefe zeigt, was zum Pflügen führt. Das Mikrowerkzeug besitzt eine andere Geometrie als die, die im konventionellen Fräsen eingesetzt wird.

#### 4.4.1.2 Schneidkräfte

Die Energie (und damit die Schneidkraft), die benötigt wird, um entlang einer Korngrenze zu scheren, ist geringer als die Energie, die erforderlich ist, um ein Korn eines bestimmten Materials zu durchschneiden (intergranularer Bruch).

Die Netto-Schneidkräfte in der Mikrobearbeitung sind oft geringer als die, mit denen man es in der konventionellen Bearbeitung zu tun hat. Allerdings werden sie in der Regel von kleineren und zerbrechlicheren Schneidwerkzeugen ausgeübt. Schnelle und wesentliche Änderungen an der Schneiddynamik, auch wenn sie klein sind, sind signifikanter und können auf der Mikroebene zu Werkzeugversagen führen. Daher müssen alle Faktoren berücksichtigt werden.

Ein Faktor ist die Scherzonenbildung und wie die Schneidkraft entwickelt wird.

Ein weiterer Faktor, der die Schneidkräfte beeinflusst, ist der Werkzeugverschleiß. Werkzeugverschleiß führt zu einem größeren Schneidenradius des Werkzeugs und anschließend zu einer erhöhten Mindestspandicke, die während der Bearbeitung nicht immer genau vorhergesagt werden kann. Dies hat größere Auswirkungen auf der Mikrobearbeitungsebene und führt zu Pflügen. Das Thema Pflügen wird im folgenden Abschnitt ausführlich beschrieben; zusammenfassend kann man jedoch sagen, dass Pflügen darauf hindeutet, dass das Werkzeug keine wirksame Scherung durchführt und die Belastung des Werkzeugs deutlich steigt.

Ein außerordentlicher Schneidvorgang kann den Verschleiß in einer oder mehreren der Spannen des Werkzeugs erhöhen und dies führt wiederum zu einer Änderung der Schneidkraftverteilung. Dies führt zu einer ungleichmäßigen Oberflächenrauigkeit auf dem Werkstück, zu allmählichem Werkzeugverschleiß und anschließend zu Werkzeugbruch.

Es gibt verschiedene Schneidmodelle, die die Entwicklung der Schneidkraft während der Verarbeitung beschreiben. Unter den ersten angebotenen Modellen waren Modelle von Merchant, von Ernst und von Piispanen [19]. Andere Modelle wurden von diesen abgeleitet, sie haben jedoch die Einschränkung, dass sie Hypothesen vereinfachen. Einige Forscher, darunter Astakhov [20], debattieren, ob sie eine geeignete Modellierung für den Mikroschneidprozess bieten, aufgrund der Tatsache, dass experimentelle Arbeiten die Modelle nicht zuverlässig unterstützen.

Weitere Studien wurden von Altintas und Lee [21] durchgeführt, die an Schneidkraft-Modellen für schraubenförmige Schaftfräser gearbeitet haben. Dabei haben sie die Scher- und Reibungswinkel berücksichtigt, ebenso die Scherspannung, um Bearbeitungskräfte, erzwungene Schwingungen und Ratterschwingungen sowie Fehler zu prognostizieren. Die Spanbildung wurde mit Hilfe von tatsächlichen trochoidalen Bewegungen der Fräsmodelle analysiert, wobei die statischen Verschiebungen berücksichtigt wurden. Ihre Studien umfassten auch die Mechanik und Dynamik von Kugelpkopffräsern [21, 22]. Für Kugelschaftfräser mit Spiralfräsern erwiesen sich die Modelle als genau; sie könnten jedoch weiter ausgebaut werden, um Schaftfräser-Modelle zu berücksichtigen.

Die meisten mechanistischen Modelle gehen davon aus, dass die Werkzeugschneide scharf ist, und der Radius Minimalwerte aufweist [23]. Da jedoch der Radius der Mikroschneidwerkzeugkante ( $0,5\text{-}3\ \mu\text{m}$ ) von vergleichbarer Größe ist, wie die Kornstruktur des Werkstückmaterials, müssen die mechanistischen Modelle noch weiter verbessert werden. Spezielle Modellierungssoftware für das Mikroschneiden könnten möglicherweise verwendet werden, um den Spitzenradius und die Kornstruktur zu berücksichtigen, z.B. CimatronE [6]. Diese Software wurde am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT) in Aachen für Lösungen entwickelt, die eine hohe Oberflächengenauigkeit erfordern, für Werkzeughersteller und für die Mikrofräsbearbeitung [6, 8]. Allerdings muss die im Handel erhältliche Software noch Auswirkungen auf der atomaren Ebene berücksichtigen, insbesondere das Pflügen.

Um den Mikroschneidprozess besser analysieren zu können, haben Studien, die von Câmara et al. [17] durchgeführt wurden, Eingangsparameter speziell für das Mikrofräsen identifiziert. Diese Aspekte werden in drei Unterabschnitten zusammengefasst, nämlich Werkstückmaterial, Werkzeugeigenschaften und Werkzeugmaschinen. Diese Überlegungen zu den Eingabefaktoren für einen Mikrofräsvorgang können als Modell dienen, um den Prozess zu definieren und die Eigenschaften hervorzuheben, die die Ergebnisse beeinflussen können.

#### **4.4.1.3 Größeneffekt**

Wie bereits besprochen, spielen Größeneffekte eine wichtige Rolle in der Mikrospanbildung; dies beeinflusst die Bearbeitbarkeit des Materials und dies wiederum die Qualität der mikrobearbeiteten Oberfläche. Die Tatsache, dass die Schicht des abgetragenen Materials die gleiche Größenordnung aufweist wie das Materialkorn, beeinflusst das Scherenphänomen und damit die Spanbildung.

Der Unterschied kann durch freie Oberflächenenergie-Effekte erklärt werden, wie in Abbildung 4.7 dargestellt, durch Materialverunreinigungen oder Defekte auf der kristallographischen Ebene [24].

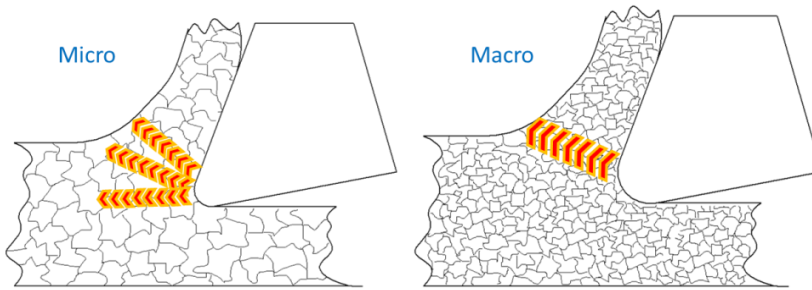


Abbildung 4.7: Unterschiede zwischen Mikro- und Makroschneiden-Phänomenen

Die Mindestspandicke ist abhängig vom Verhältnis zwischen ungeschnittener Spandicke und dem Kantenradius des Schneidwerkzeugs. Der genaue Wert der Mindestspandicke hängt vom Werkstückmaterial ab. Werte für die Mindestspandicke können zwischen 5% und 40% des Werkzeugkantenradius variieren und sie können empirisch bestimmt werden.

Die mechanischen Eigenschaften des Mikrowerkzeugs, z.B. Steifigkeit, spielen ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Bestimmung der minimalen Schnitttiefe, die unter bestimmten Bedingungen erreichbar ist.

#### 4.4.1.4 Gratbildung

Eine Priorität beim Mikroschneiden ist es, die erforderliche Oberflächengüte in einem einzigen Vorgang zu erreichen. Die Verwendung eines neuen Werkzeugs oder eines Werkzeugs in gutem Zustand unter optimalen Betriebsparametern ist der beste Weg, dies zu erreichen, und trägt auch dazu bei, die Gratbildung zu minimieren.

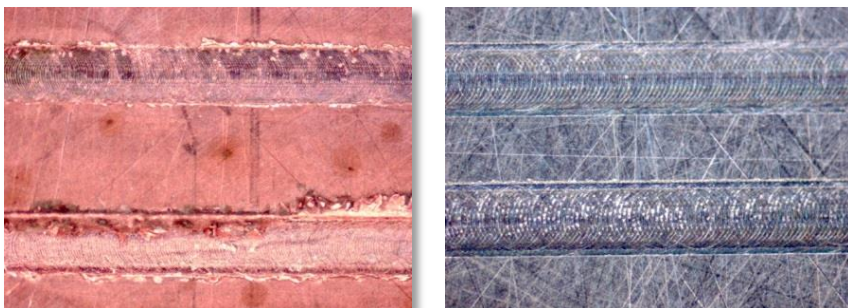


Abbildung 4.8: Gratbildung in Kupfer und Stahl unter analogen Schneidebedingungen



Spezialsoftware wie DEFORM-2D ist hilfreich bei der Betrachtung der Mindestspanndicke und folglich des Spanbildungsprozesses. Als Alternative können Schneidemodelle wie das Slip-Line-Modell von Merchant verwendet werden. Diese Scherebenenmodelle sind robust und wurden durch experimentelle Untersuchungen bestätigt.

Der Spanbildungsprozess ist abhängig von der kumulativen Wirkung mehrerer Faktoren, einschließlich Werkstückmaterial, Werkzeugmaterial, Vorschub, Schnittgeschwindigkeit und sogar von der Schnitttiefe. Schlechte Spanbildung führt zur Gratbildung, wie in Abbildung 4.8 dargestellt.

## 4.4.2 Mikrowerkzeuge

Dieser Abschnitt bietet einen Überblick über die Werkzeuge zur Mikrobearbeitung, einschließlich Größe, Verschleiß, Bruch und Materialbeschichtungen.

### 4.4.2.1 Werkzeuggröße

Bohrer, Schaftfräser, Kugelkopffräser oder Gravurwerkzeuge werden häufig für Mikroschneidanwendungen eingesetzt. Sie werden im Allgemeinen aus Wolframkarbid oder Diamant hergestellt, um stressbedingten Bruch zu verhindern.

Aufgrund ihres kleinen Formats sind Mikrowerkzeuge ein eigenständiger Industriezweig. Nicht nur die Größe des Werkzeugs verringert sich erheblich, 8  $\mu\text{m}$  für die kleinsten Bohrer oder 20  $\mu\text{m}$  für Fräsen, sondern auch ihre Geometrie ändert sich entsprechend. Sie besitzen in der Regel nur eine oder zwei Spannuten, um den Span abfließen zu lassen. Der Werkzeugschaft ist kürzer (wenige Millimeter), um die Steifigkeit zu maximieren, Vibrationen zu unterdrücken und die Positionsgenauigkeit des Werkzeuges aufrechtzuerhalten. Da die ungeschnittene Spandicke und die Schneidkante vergleichbare Abmessungen aufweisen, muss die Schneidkante verbesserte mechanische Eigenschaften besitzen. Sie muss hohe thermische und mechanische Belastungen ertragen können, die durch die hohe Rotationsgeschwindigkeit verursacht werden.

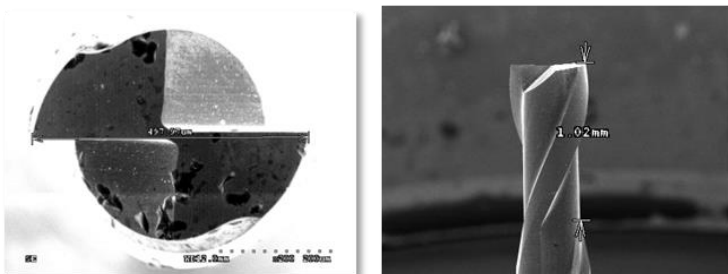


Abbildung 4.9: Beispiel für Werkzeuggröße in der Mikrobearbeitung

Mikrowerkzeuge sind teuer aufgrund der erforderlichen Fachkenntnisse und der Herausforderungen bei der Herstellung komplizierter Werkzeuggeometrien in Größen von weniger als 0,1 mm, wie in Abbildung 4.9 dargestellt. Da Werkzeugversagen ein wichtiger Aspekt des Mikroschneidens ist, muss alles unternommen werden, um das Risiko von Werkzeugbruch angesichts der Folgekosten der Produktion zu minimieren.

Eine der großen Herausforderungen bei der Herstellung von Mikrowerkzeugen ist, wie man ein Schneidwerkzeug mit Kantenradius erzeugt. Je kleiner der Radius, desto kleiner ist die erzielbare Schnitttiefe. Ein Focused Ion Beam (FIB; englisch für fokussierter Ionenstrahl) wird gelegentlich zur Bearbeitung scharfer Kanten eingesetzt. Electro-Discharge Machining (EDM; englisch für Funkenerodieren) und Wire Electro-Discharge Machining (WEDM; englisch für Drahterodieren) werden eingesetzt, um kleinere Strukturen mit Mikrowerkzeugen zu schneiden. Allerdings haben diese Technologien lange Bearbeitungszeiten und Einschränkungen bezüglich Geometrien, und damit beeinflussen die Kosten unweigerlich die Prozessauswahl [9].

#### 4.4.2.2 Werkzeugverschleiß und Bruch

Bei der Mikrobearbeitung läuft der Werkzeugverschleiß nicht allmählich ab, wie bei der Makrobearbeitung. Der Bruch eines Werkzeugs tritt bereits kurz nachdem der Verschleiß zu einer Erhöhung des Schneidenradius geführt hat mit wenig oder gar keiner Vorwarnung ein.

Ein unkontrollierter Prozess kann schnellen und unberechenbaren Werkzeugverschleiß zur Folge haben; dies beeinflusst die Oberflächengenauigkeit, die Qualität und letztlich die Kosten. Die größte Herausforderung für einen Hersteller ist die Optimierung der Betriebsparameter (Vorschub, Geschwindigkeit, Rotation, Schnitttiefe), um sowohl die gewünschte Oberfläche zu erhalten, als auch den Verschleiß zu kontrollieren und Werkzeugbruch zu verhindern. Die Prüfung der Werkzeuge vor der Verwendung und die Werkzeugüberwachung während des laufenden Prozesses können helfen, die optimale Leistung der Mikrowerkzeuge zu gewährleisten. Eine effektive Simulation und Modellierung, obwohl komplex, schwierig und teuer, kann enorm hilfreich sein.

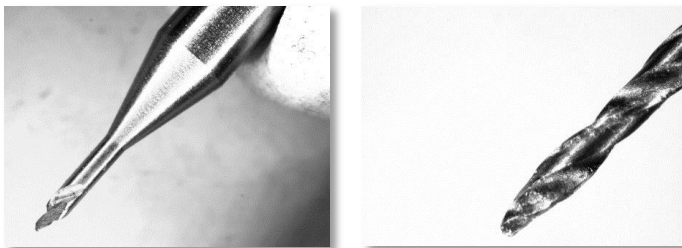


Abbildung 4.10: Beispiel eines defekten und eines abgenutzten Werkzeugs

Darüber hinaus kann der Werkzeugverschleiß bei der Mikrobearbeitung schwieriger zu überwachen sein, so dass Werkzeugverschleiß während des Schneidprozesses schwieriger zu berücksichtigen ist. Daraus ergibt sich eine Abhängigkeit von den Spezifikationen und Empfehlungen des Herstellers und, genauso wichtig, von den Erfahrungen des Technikers bei der Auswahl und aktiven Einstellung der Schneideparameter.

Werkzeugversagen wurde als Folge verschiedener Mechanismen erklärt:

1. Ermüdungsbedingter Ausfall – es besteht die Gefahr, dass sich Ermüdungsrisse bilden und als Folge der hohen Schnittgeschwindigkeiten, und damit der hohen Zahl an Belastungszyklen, zu Bruch führen können.
2. Belastungsbedingter Ausfall – wenn ein Werkzeug Schneidkräften ausgesetzt ist, die über seine normalen Betriebsgrenzen hinausgehen, kann das Werkzeug schnell brechen. Dies ist zurückzuführen auf Späne, die sich auf der Schneidkante bilden: Schneidkantenverschleiß. Wenn dies geschieht, wird das Werkzeug nicht mehr schneiden, es drückt jedoch gegen das Arbeitsmaterial und dies erhöht die Spannung im Werkzeug.
3. Anstieg der spezifischen Energie, während die Schnitttiefe abnimmt.

Diese Mechanismen können entweder zu Werkzeugverschleiß oder Werkzeugbruch führen, wie in Abbildung 4.10 gezeigt.

Eine Anzahl weiterer Faktoren tragen zum Werkzeugverschleiß bei, wie Größeneffekte, negative Spanwinkel, mehrphasige Werkstückmaterialien oder elastische Erholung des Materials. Diese schädlichen Effekte lassen sich durch geeignete Werkzeugprüfung, Prozessüberwachung und effektive Schneidstrategien verringern. Eine Werkzeugprüfung vor der Bearbeitung kann das Risiko von Werkzeugversagen im laufenden Prozess minimieren. Abbildung 4.11 zeigt ein Beispiel eines solchen Werkzeugschadens.

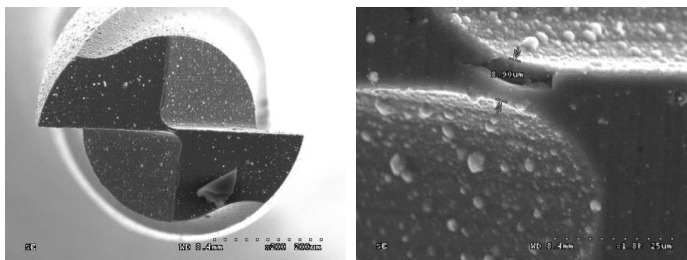


Abbildung 4.11: Die Bedeutung der Werkzeugprüfung vor der Bearbeitung. Diese Bilder zeigen einen Fehler am Fräskopf

#### 4.4.2.3 Beschichtungen von Mikrowerkzeugen

Beschichtungen für Makrowerkzeuge werden verwendet, um die Härte an der Schneidgrenzfläche zu erhöhen; außerdem bieten diese Beschichtungen eine bessere Beständigkeit gegen chemische und mechanische Abnutzung. In Anbetracht des kleinen Maßstabs müssen die Beschichtungen von Mikroschneidwerkzeug kompakter sein – sie brauchen eine feinere Kornstruktur. Sie müssen kristallographisch konsistenter sein und eine dünnere und glattere Oberseite haben, so dass Reibungskräfte an der Schnittstelle von Werkzeug und Werkstück weiter reduziert werden.

Beschichtungen für handelsübliche Mikrowerkzeuge umfassen:

- TiN – Titan-Nitrid
- TiAlN – Titan-Aluminium-Nitrid
- CrTiAlN – Chrom-Titan-Aluminium-Nitrid

#### 4.4.3 Werkzeugmaschinen

Dieser Abschnitt enthält einen Überblick über die Maschinen, die zur Mikrobearbeitung eingesetzt werden.

##### 4.4.3.1 Eigenschaften der Mikrobearbeitungs-Plattform

Es stimmt zwar, dass ein erfahrener Maschinenbediener mit einer Standard-Werkstattausrüstung außergewöhnliche Details und Genauigkeit produzieren kann (denken Sie nur an die ersten Uhrmacher); trotzdem ist es nicht möglich, in einem wettbewerbsintensiven Umfeld zu überleben, in dem Wiederholgenauigkeit, Reaktionszeiten und Produktion in großen Mengen erforderlich ist.

Was also sind die wichtigsten Maschinenfunktionen, die benötigt werden?

##### Spindelgeschwindigkeit

An erster Stelle ist für das Fräsen eine hohe Oberflächengeschwindigkeit erforderlich (dies gilt nicht immer für das Bohren). Idealerweise sind circa 50.000 + UpM wünschenswert. 20.000 + UpM können ausreichend sein, jedoch ohne Garantien. Geschwindigkeitssteigerungen können nützlich sein, aber möglicherweise mangelt es dann an der erforderlichen Empfindlichkeit für <0,5 mm Werkzeuge.

##### Aufbau der Maschine

Polymerbetonsockel und hydrostatische Führungsbahnen bieten eine sehr gute Steifigkeit, Isolierung gegen Hitze und Vibrationen. Dies erhöht die Empfindlichkeit der Maschine

und isoliert Kräfte, welche die sehr geringen Schneidkräfte, die für die Mikrobearbeitung erforderlich sind, stören können.

Eine Hochleistungs-Gussmaschinenkonstruktion mit Linearantrieben oder hoher Präzision, eine legierte Kugelumlaufspindel und digitale Antriebe können in den meisten Fällen ausreichen. Eine Standardmaschinenkonstruktion, eine Gusseisen-Kugelumlaufspindel und analoge Laufwerke sind nicht ausreichend.

### **Wiederholgenauigkeit**

Es ist von entscheidender Bedeutung, dass die Maschine ein hohes Maß an Wiederholgenauigkeit besitzt. Dies führt zu einer neuen Stufe der Empfindlichkeit im Bearbeitungsprozess; außerdem bedeutet dies, dass die Anlage Teile konsequent und ohne ständige Eingriffe herstellen kann. Maschinen mit höherer Spezifikation sollten in der Lage sein eine Wiederholgenauigkeit im Submikrometerbereich zu erzielen, während Maschinen im mittleren Bereich unter 10  $\mu\text{m}$  und im Standardbereich unter 25  $\mu\text{m}$  sein sollten.

### **Steuerung**

Die Maschinensteuerung muss in der Lage sein, große Mengen an Informationen zu verarbeiten, da die Programme, die auf Computer Aided Manufacturing (CAM) Plattformen erstellt werden, oft sehr groß sind. Individuelle Bewegungen der Schneidwerkzeuge können sehr klein sein; daher wird ein leistungsfähiger Prozessor benötigt, um eine konstante Vorschubgeschwindigkeit aufrechtzuerhalten. Ebenso ist ein "Look-Ahead"-Programm-puffer von wesentlicher Bedeutung. Die Heidenhain TNC530 (oder höher), zum Beispiel, ist eine geeignete Anlage. Jede Steuerung mit Look-Ahead-System kann als ausreichend angesehen werden, aber einige ältere Steuerungen, und alle Steuerungen ohne Look-Ahead-Funktionalität, werden den Ansprüchen einfach nicht gerecht.

### **Anzahl der Achsen**

Die Entscheidung, ob mit 4 oder 5 Achsen gearbeitet wird, anstatt mit dem traditionellen 3-Achsen-Layout, kann von spezifischen Arbeitsanforderungen oder der Verwendung flexibler Plattformen abhängen. Man muss zwischen Steifigkeit und Wiederholgenauigkeit abwägen. Auf High-End-Maschinen hat dies kaum Einfluss; man sollte sich dieser Tatsache angesichts von Maschinen, die nur durchschnittliche Spezifikationen erfüllen, jedoch bewusst sein.

Jede zusätzliche Achse führt zu mehr Positionsfehlern. Hier ein Beispiel: eine Maschine mit höchster Spezifikation, die submikrometergenau Punkt für Punkt auf einer Lehrenbohrung positioniert werden kann, kann auf einer simultanen 5-Achsen Werkzeugbahn um  $> 5 \mu\text{m}$  ungenau sein. Dieser Fehler kann durch Anwendung einer schlechten Werkzeugstrategie und begrenzter Steuerungsfunktionalität noch verschlimmert werden.

Daher müssen bei der Auswahl der Werkzeugmaschinen für Mikroschneidanwendungen alle diese Faktoren ganzheitlich und nicht isoliert betrachtet werden.

#### 4.4.3.2 Anbieter von Werkzeugmaschinen

Es gibt viele Hersteller von Mikro-Bearbeitungszentren und die Leistungsfähigkeiten der Maschinen variieren innerhalb der unterschiedlichen Preisklassen.

Ein typisches Kern-Bearbeitungszentrum (Abbildung 4.12) besitzt ein Polymerbetonbett, das Vibrationen während der Verarbeitung dämpft. Die Toleranzen liegen in der Regel innerhalb von  $\pm 0,5 \mu\text{m}$  für Mikroschneidfunktionen [25].

Zum Zeitpunkt des Schreibens (2015) lag der Preis einer Kern Evo im Bereich von 290.000 - 350.000 €.



Abbildung 4.12: KERN Bearbeitungszentren

Röders Tec bietet seinerseits hohe Steifigkeit, ein optimales Layout der Massenträgheit und einen geometrischen Ausgleich für erhöhte Präzision während der Bearbeitung. Der Preis für diese Maschinen liegt bei 290.000 €. Eine typische Maschine, wie die RXP400DS - 5-Achs-Maschine, bietet Spindeldrehzahlen bis zu 50.000 U<sub>p</sub>M.

Die Hermle Maschinenfabrik baut ultrakompakte Bearbeitungszentren, die für größere Teile ausgelegt sind. Einige von ihnen, wie das 5-Achsen-Bearbeitungszentrum C 12, können Teile mit einem Gewicht bis 100 kg verarbeiten und kosten bis zu 290.000 €. Ihr Vorteil sind integrierte Funktionen wie automatische Schwingungsmessung und -regelung, die für Mikroschneidanwendungen von entscheidender Bedeutung sind (Abbildung 4.13).



Abbildung 4.13: Ein Hermle-Bearbeitungszentrum, das an der University of Nottingham Manufacturing Labs ständig im Einsatz ist.

Sodick Bearbeitungszentren erreichen Spindeldrehzahlen bis zu 40.000 Umdrehungen pro Minute und kosten bis zu 300.000 €. Die HS430L Hochgeschwindigkeitsfräse bietet den Vorteil eines BLUM Laser-Längenmessgeräts, mit dem man Daten zur Abschätzung des Werkzeugverschleißes erhalten kann, ohne es aus dem Werkzeughalter herausnehmen zu müssen.

Andere Unternehmen, wie Fanuc und Kugler, bieten eine Reihe von Bearbeitungszentren an, die auf das Mikroschneiden spezialisiert sind. Die Nachfrage nach Mikroprodukten hat die Entwicklung vieler Mikrobearbeitungszentren mit sich gebracht, die miteinander im Wettbewerb stehen um den besten Preis und die besten Leistungen. Es gilt ein Gleichgewicht zwischen den Kosten der Maschinenbeschaffung und den Produkten und Strukturen, die produziert werden sollen, zu erreichen.

Es sollte betont werden, dass die Werkzeugmaschinenhersteller ihre Produkte, grundlegenden Technologien, Pakete und Preiskonditionen ständig weiterentwickeln; alle zur Verfügung gestellten Informationen sind nur als Anhaltspunkte gedacht.

#### 4.4.4 Messsysteme

Um höchste Produktqualität zu gewährleisten ist die Fähigkeit Komponenten genau und zuverlässig zu messen von absolut entscheidender Bedeutung.

In diesem Abschnitt besprechen wir kurz die beiden Hauptbereiche der Messung: die geometrische Messung und die Prozessparametermessung. Die mikrogeometrische Mes-

sung wird ausführlich im nachfolgenden Kapitel „Geometrievermessung im Mikrobereich“ diskutiert.

Typischerweise werden während des Mikroschneidverfahrens folgende Messungen durchgeführt:

- das Werkzeug (vor, während und nach der Bearbeitung)
- das Werkstück
- verschiedene Prozessparameter, die den Mikroschneidprozess (Vibrationen, Werkzeugposition, etc.) beeinflussen könnten.

Geometrische Messung können in drei Stufen durchgeführt werden:

- Vor der Bearbeitung
- Während der Bearbeitung
- Nach der Bearbeitung

#### **4.4.4.1 Geometrische Messung: Vor der Bearbeitung**

Vor Beginn des Schneidprozesses müssen die Abmessungen und die Position des Werkzeugs eindeutig festgelegt werden. Der zweite Schritt ist die Bestimmung der Oberflächenposition des Werkstücks. Diese beiden Koordinaten tragen dazu bei, die Genauigkeit des Mikroschneidvorgangs sicherzustellen. Lasergeräte und Infrarot-Touch-Sonden sind die bevorzugte Ausrüstung für diese Arbeit.

#### **4.4.4.2 Geometrische Messung: Während der Bearbeitung**

Lineare variable Wegaufnehmer können bei der Bestimmung der Werkzeughöhe und des Radius mit Hilfe einer vertikalen und horizontalen Kontakt-Werkzeugstation sehr effektiv sein. (AMETEK Precitech Ultracomp Geräte können dies mit einer Genauigkeit von 0,4 µm erreichen). Schneidwerkzeuge können in verschiedenen Positionen gemessen werden, und diese Daten werden mittels des Controllers erhalten. Während diese Messungen bekannt sind, ermittelt die Maschine die Werkzeugabmessung und -position genau und zuverlässig.

#### **4.4.4.3 Geometrische Messung: Nachbearbeitung**

Eine Reihe hochgenauer Messtechniken kann zur Bestimmung der Form, Geometrie, Abmessungen und Oberflächenrauigkeit eines mikrobearbeiteten Teils verwendet werden.

Dazu gehören berührungslose Systeme wie Labormikroskope, Rasterelektronenmikroskope und Interferometer. Kontaktsysteme (Taststift/Sonden-basierte Systeme) umfassen Oberflächenprofilometer und Koordinatenmessmaschinen. Neben der Messung der Oberflächenrauigkeit kann ein Stylus-Profilometer wie der AMETEK Taylor Hobson Taly-surf, siehe Abbildung 4.14, auch die Form messen. Dadurch kann das System zur Überprü-



fung der Maschineneinrichtung für Drehanwendungen (d.h. Werkzeug-Zentrierung), sowie zusätzlich zur Messung der Bauteilgenauigkeit in 2D, verwendet werden. Ein Weißlichtinterferometer, z.B. die Bruker NP Flex, siehe Abbildung 4.14, kann die 3D-Oberflächentopografie auf der Mikro- und Nanoebene messen.

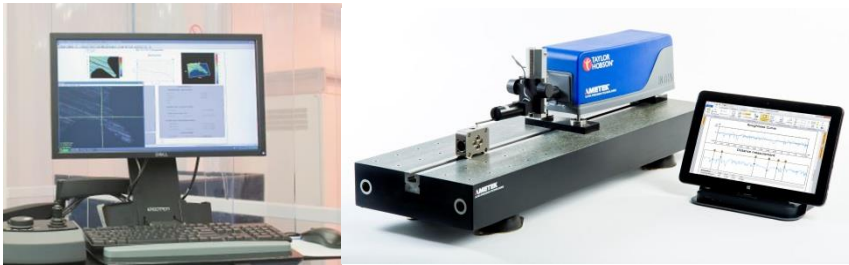


Abbildung 4.14: NP FLEX-Interferometer und AMETEK Taylor Hobson Talysurf Intra

#### 4.4.4.4 Messung der Prozessparameter:

Obwohl sie in der Industrie nicht häufig eingesetzt wird, kann die Schneidkraftmessung im laufenden Prozess für Großserien oder Massenproduktion nützlich sein. Die Entwicklung der Schneidkraft kann sich negativ auf die Standzeit auswirken und kann daher in der Prozessüberwachung von unschätzbarem Wert sein und dazu beitragen, die Kosten zu minimieren. Trotz ihres Nutzens wird diese Art der Messung in der Regel Forschungseinrichtungen überlassen. Die Schneidkraft kann mit einem Dynamometer (z.B. von Kistler) gemessen werden. Er kann genaue Informationen über die Entwicklung der Schneidkraft und ihre Schwankungen, die Periodizität des Prozesses und sogar über den Werkzeugverschleiß liefern. Mit zunehmendem Werkzeugverschleiß steigt auch die erforderliche Schneidkraft, um die gleiche Tiefe und die gleiche Art des Schnittes zu erreichen. Bei hohen Schneidkräften besteht ein großes Risiko, dass das Mikrowerkzeug bricht. Deshalb kann ein Überwachungssystem bei laufendem Prozess, z.B. ein Dynamometer, sehr hilfreich sein, um Werkzeugbruch zu verhindern. (Abbildungen 4.15 und 4.16)

*Ein Beispiel für eine Parametermessung bei laufendem Prozess ist eine Ausrüstung, die auf der Spindel montiert ist, welche die Position der Oberfläche in Bezug auf die Spindelorientierung bestimmt.*

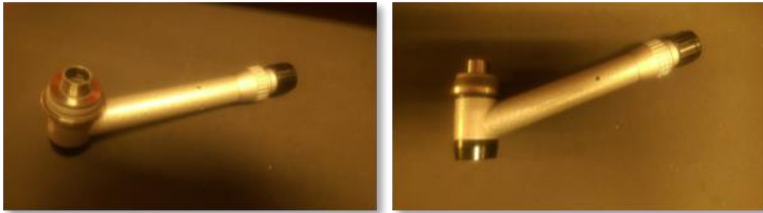


Abbildung 4.15: Ausrüstung für die Spindelpositionsmessung



Abbildung 4.16: Sonden-Karte und 60-fache Vergrößerung von Bohrlochern

## 4.5 Branchen und Anwendungen

Das Mikroschneiden und insbesondere das Mikrofräsen haben den Vorteil, dass sie Teile mit hohen Seitenverhältnissen und hoher geometrischer Komplexität bearbeiten können.

Einige Mikrofertigungstechnologien sind für die Massen- oder Serienfertigung weniger geeignet. Das Mikrofräsen ist perfekt geeignet, wenn geeignete Verfahren und Werkzeuge verwendet werden - beispielsweise zur Herstellung von Masken für die Röntgenlithographie.

Das Mikroschneiden wird in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Wie bereits erläutert, kann das Mikroschneiden eigenständig verwendet werden, um Fertigteile herzustellen. Allerdings wird es oft mit anderen Technologien zusammen verwendet, z.B. mit anderen Verarbeitungsarten, Messgeräten usw.

### 4.5.1 Industriebranchen und Anwendungsbereiche

Folgende Industriebranchen und Anwendungsbereiche wurden von Desarollo genannt [26]:

- Uhren- und Schmuckherstellung; Herstellung von Werkzeugen für die Uhrenherstellung, Gravur von Grundplatten, Formen für Ringe und Anhänger, detaillierte Mikrobearbeitung aller Uhrenteile.
- Automobilindustrie; Elektroden für Schneideinsätze, Kraftstoff-Einspritzdüsen, Diesel-Einspritzdüsen, Teile mit engen Toleranzen für das Mikrobohren.
- Luft- und Raumfahrt; Instrumentierung und elektronische Steckverbinder und Hydraulik, Miniaturgeräte für Raketen, Formen für Miniatur-Planetengetrieberäder, die an einer Turbine befestigt sind.
- Formen-Herstellung; Kunststoffoptiken für Mikroformen auf Basis von Mikroreplikationstechniken.
- Biomedizin; Cochlea-Implantate, Mikrowerkzeuge für die Chirurgie, Formen für Mikrodosierungsanwendung, Lab-on-a-Chip, in der Kieferorthopädie (z.B. Dentalklammern), Replikationsformen für Zellen, Formen für Biotechnologie-Anwendungen (Mikrochip-Elektrophorese-Geräte, polymere BIOMEMS (biomedizinische mikroelektromechanische) Systeme, Beschleunigung der Reaktion der Polymerase-Ketten für modulare Lab-on-a-Chip-Systeme), Katarakt-Linsen, retinale Mikro Stifte, usw.
- IT; Testmembran für die Herstellung von PC-Chips.
- Andere; direkte Bearbeitung in der Optik, entweder von Keramiklinsen oder Metallspiegeln, wissenschaftliche Geräte, Komponenten für Messgeräte, Elektroden für die Spielzeugindustrie, Elektroden für die Herstellung von Scherköpfen für elektrische Rasierer, Risserkennung (die Schaffung eines Mikrorisses auf einer Helix für Turbinen/Antriebswellen), Gasleckererkennung (Mikrostruktur mit einer speziellen Form - verschiedene Formen für verschiedene Gase).

Nebenbei bemerkt lassen sich die spezifischen Vorteile der Mikrobearbeitung in einen verbesserten Output der Bearbeitung auf der Meso - und Makroskala umsetzen, wenn sie mit einer mikrofähigen Ausrüstung durchgeführt werden. Bessere Ergebnisse können in Bezug auf die Werkzeugstandzeit, Produktivität und verbesserte Produktqualität erreicht werden.

Beispiel: Anwendung; Testmembran für Sonden-Karten:

- Kern Evo Bearbeitungszentrum
- 900 Löcher gebohrt mit einem Bohrer mit 0,13 mm Durchmesser
- Material: Aluminium
- Bohrtiefe 0,8 mm
- Positionierungstoleranz  $\pm 2 \mu\text{m}$
- Zeit 7,8 Sekunden

## 4.6 Referenzen

1. Waurzyniak, P (2013) Micro Manufacturing Keeps Shrinking the Envelope. Available: <http://www.sme.org/EMMagazine/Article.aspx?id=69873>, 28 May 2015
2. RAL Space website. Available: <http://www.stfc.ac.uk/ralspace/11291.aspx>, 28 May 2015
3. Özel T, Liu X, Dhanorker A (2007) “Modelling and simulation of micro-milling process”, 4th international conference and exhibition on design and production of machines and dies/molds, Cesme, Turkey, pp 21–23
4. MORCOM (2013) Micro-machining involves a lot more than using scaled-down tools. Available: <http://www.micromanufacturing.com/content/micro-machining-involves-lot-more-using-scaled-down-tools>, 25 Feb 2014
5. Simoneau A, Elbestawi MA (2006) The effect of microstructure on chip formation and surface defects in micro-scale, mesoscale and macroscale cutting of steel. *Ann CIRP* 55:97–102
6. CIMATRONE, CimatronE micro milling simulation software by Cimatron. Available: <http://www.cimatron.com/NA/general.aspx?FolderID=5320>, 5 Oct 2015
7. G-WIZARD, G-Wizard Software by CNC Cookbook. Available: <http://www.cnccookbook.com/CCCNCSoftware.html>, 5 Oct 2015
8. PROMOLDING BV (PRO) (2005) Final technical report and progress report (combined). Available: [http://promolding.nl/contentdownloads/Final\\_Report\\_MicroMilling\\_18.pdf](http://promolding.nl/contentdownloads/Final_Report_MicroMilling_18.pdf)
9. Cheng K, Huo D (2013) *Micro-cutting. Fundamentals and applications*, 1st edn. The Wiley Microsystem and Nanotechnology Series. Wiley, Oxford
10. Elkaseer AA (2011) “Modelling, simulation and experimental investigation of the effects of material microstructure on the micro-endmilling process. Ph.D. thesis, Cardiff University, Institute of Mechanical, and Manufacturing Engineering, Cardiff
11. Mian AJ (2011) *Size effect in micromachining*, Ph.D. thesis. Cardiff University, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, Manchester
12. Anand RS, Patra K (2014) Modelling and simulation of mechanical micro-machining—a review. *Mach Sci Technol: Intl J* 18(3):323–347
13. Leopold J (2014) Approaches for modelling and simulation of metal machining—a critical review. *Manuf Rev* 1(7):1–16

14. Liu B, Huang Y, Jiang H, Qu S, Hwang KC (2004) The atomic-scale finite element method. *Comput Methods Appl Mech Eng* 193:1849–1864
- Feynman, R. P. (1960). There's plenty of room at the bottom. *Engineering and science*, 23(5), 22-36.
15. Afazov SM, Ratchev SM, Segal J (2010) Modelling and simulation of micro-milling cutting forces. *J Mater Process Technol* 210:2154–2162
16. Chae J, Park SS, Freiheit T (2006) Investigation of the dynamics of micro end milling—Part I: model development. *J Manuf Sci Eng* 128(4):893–900
17. Câmara MA, Campos Rubio JC, Abrão AM, Davim JP (2012) State of the art on micro-milling of materials, a review. *J Mater Sci Technol* 28:673–685
18. Filiz S, Conley C, Wasserman M, Ozdoganlar O (2007) An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-end mills. *Intl J Mach Tools Manuf* 47:1088–1100
19. Atkins AG (2003) Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanations for some longstanding problems. *Intl J Mech Sci* 45:373–396
20. Astakhov VP (2005) On the inadequacy of the single-shear plane model of chip formation. *Intl J Mech Sci* 47(11):1649–1672
21. Altıntaş Y, Lee P (1996) A general mechanics and dynamics model for helical end mills. *CIRP Ann—Manuf Technol* 45(1):59–64
22. Altıntaş Y, Jin X (2011) Mechanics of micro-milling with round edge tools. *CIRP Ann—Manuf Technol* 60:77–80
23. Dornfeld D, Lee D-E (2008) *Precision manufacturing*. Springer, New York
24. Pham DT, Dimov SS, Popov KB, Elkaseer AMA (2008) Effects of microstructure on surface roughness and burr formation in micro-milling: a review. In: *Proceedings of the 3rd virtual international conference on innovative production machines and systems (IPROMS)*, pp 270–275
25. Rainford Precision, Kern Ultra and Nano Precision Machining Centres. Available: <http://rainfordprecision.com/kern/>, 26 Feb 2016
26. Desarollo, Micromilling (2009) Available: <http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarollo/micromilling/1-6-micromilling-applications>, 27 Sept 2015



# 5 Mikrowasserstrahltechnik

Massimiliano Annoni<sup>1</sup>, Francesco Arleo<sup>2</sup> and Francesco Viganò<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Manufacturing and Production Systems, Mechanical Engineering Department, Politecnico di Milano, Milano, Italy

<sup>2</sup> WatAJet S.r.l., Legnano, Milano, Italy

## 5.1 Einführung in die Wasserstrahltechnik

Die Idee, einen Hochgeschwindigkeitswasserstrahl zur Reinigung von Oberflächen oder zum Schneiden verschiedener Materialien einzusetzen, stammt aus der Mitte des 20. Jahrhunderts. Für industrielle Anwendungen wird das beeindruckende natürliche Phänomen der Wassererosion künstlich beschleunigt und konzentriert eingesetzt.

In den 1950er Jahren experimentierte der Forstingenieur Norman Franz mit einer frühen Form eines reinen Wasserstrahlschneiders (PWJ), um Holz zu schlagen. In den 1970er Jahren entwickelte Mohamed Haschisch eine Technik, mit der man dem Hauptwasserstrahl Schleifmittel hinzufügen konnte; daraus entstand die Abrasiv-Wasserstrahltechnik (AWJ).

Viele Arten von Wasserstrahlssystemen wurden in diesen Jahren entwickelt, darunter reine Wasserstrahlssysteme, abrasive Wasserstrahlssysteme, perkussive Wasserstrahlssysteme, Kavitations-Wasserstrahlssysteme und kyrogene Wasserstrahlssysteme. Der Grund, warum sich die Waterjet-Technologie (WJ) in den letzten Jahren so erfolgreich entwickelt hat, liegt in der Tatsache begründet, dass es sich um ein einfaches, vielseitiges und flexibles Bearbeitungswerkzeug handelt.

Dieses Kapitel enthält eine allgemeine Übersicht über die Wasserstrahltechnik. Danach konzentrieren wir uns auf die aktuellen Entwicklungstrends der Technologie, die sogenannte Mikro-AWJ, welche die Wasserstrahltechnik weiterentwickelt hat und die Bearbeitung feiner Strukturen und kleiner Werkstücke ermöglicht.

## 5.2 Erzeugung eines hocheenergetischen Flüssigkeitsstrahls

Der Wasserstrahl ist eine der leistungsstärksten und vielseitigsten Bearbeitungstechniken im Vergleich zu allen hocheenergetischen Flüssigkeitsstrahl-Technologien, wie Axinte, D. et al. berichtet haben [1].

Das physikalische Phänomen, das der WJ-Technologie zugrunde liegt, ist die Umwandlung einer durch Wasserfluss erzeugten Druckenergie in einen Hochgeschwindigkeitswasserstrahl mit kinetischer Energie. Diese Umwandlung wird erreicht durch die kapillare Begrenzung einer winzigen Öffnung, durch die der Wasserstrom fließt. Sobald der Strahl gebildet wird, stromabwärts der Öffnung, wird er direkt zum Werkstück (PWJ) geleitet oder er wird vermischt mit feinen Schleifpartikeln (AWJ), um seine Schneidleistung bei schwieriger Materialbearbeitung zu verbessern.

Die zur Erzeugung des Strahls benötigte Ausrüstung wird in diesem Kapitel beschrieben; die Beschreibung folgt dem Wasserstrom, vom speisenden Netz bis zur Bearbeitungszone, wie in Abbildung 5.1 dargestellt.

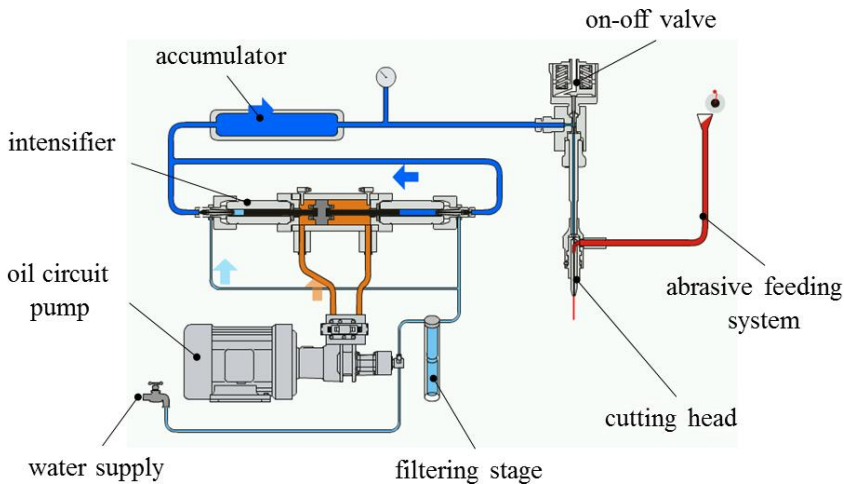


Abbildung 5.1: Allgemeine Anordnung eines Wasserstrahl-Bearbeitungssystems (mit freundlicher Genehmigung von Ingersoll-Rand).



### 5.2.1 Hochdruckpumpe

Im Pumpensystem wird der Wasserdruck erhöht vom Netzversorgungsdruck bis zum Arbeitsdruck ( $p_{\text{Wasser}}$ ). Das System besteht aus den folgenden Komponenten:

- Niederdruckkreislauf, der durch eine volumetrische Ölpumpe zur Einspeisung in den Niederdruckkreislauf angetrieben wird. Der typische Öl-Arbeitsdruck ( $p_{\text{Öl}}$ ) ist auf 20 MPa eingestellt.
- Hochdruckkreislauf, angetrieben durch die Wasserpumpe, gespeist durch Öl, das vom Niederdruckkreislauf kommt.

Das Öl wirkt auf die Primärkolbenfläche ( $A_{\text{Öl}}$ ) und schiebt den Kolben nach vorne und zurück. Ein Sekundärkolben mit kleinerem Querschnitt ( $A_{\text{Wasser}}$ ) ist mit dem Primärkolben verbunden. Der Wasserdruck wird proportional zum Verhältnis zwischen den Bereichen des primären und sekundären Kolbens erhöht.

Beispielsweise ermöglicht ein Verhältnis von 20:1 mit einem Ölkreislauf bei 19 MPa, dass der Druck 380 MPa im Hochdruckkreislauf erreicht, gemäß der Beziehung in Gleichung (1)

$$p_{\text{Wasser}} = p_{\text{Öl}} \cdot \frac{A_{\text{Öl}}}{A_{\text{Wasser}}} \quad (1)$$

Es gibt zwei Arten von Wasserdruckverstärkern: Einzeleffekt- und Doppeleffekt-Verstärker. Bei den Doppeleffekt-Verstärkern hat der Primärkolben zwei aktive Hübe; dabei wird das Wasser abwechselnd mit den linken und den rechten Bewegungen unter Druck gesetzt. Bei den Einzeleffekt-Verstärkern hat jeder Kolben nur einen aktiven Hub. Daher werden drei oder mehrere Kolben parallel betrieben, um  $p_{\text{Wasser}}$  so konstant wie möglich zu halten.

Wenn eine Doppeleffektpumpe verwendet wird, erzeugt ihre abwechselnde Bewegung Schwankungen in  $p_{\text{Wasser}}$ . Ein Akkumulator, z.B. ein Tank mit einer Kapazität von ca. 2 Litern, ist erforderlich, um die Druckschwankungen zu kompensieren und den nachgelagerten Kreislaufdruck einigermaßen konstant zu halten. Bei Einzeleffektpumpen werden durch eine angemessene Phaseneinstellung der einzelnen Kolbenhübe weniger Druckschwankungen erreicht. In diesem Fall ist kein Akkumulator erforderlich.

Für Mikro-Wasserstrahlssysteme werden in der Regel ebenfalls Standardpumpen eingesetzt. Darüber hinaus wird die Pumpe in Mikro-Anwendungen nicht beansprucht aufgrund der durch die verwendeten kleinen Öffnungen erforderlichen geringen Strömungsgeschwindigkeit (Kapitel 5.2.4).

### 5.2.2 Hochdruckkreislauf

Der Druckwasserstrom wird von der Hochdruckpumpe mit Hilfe einer spezifischen Pipeline zum Bearbeitungsbereich geleitet. Alle Rohre und Verbindungen sind aus massivem Edelstahl gefertigt, verstärkt durch die Autofrettage-Behandlung, damit sie bei Ultrahochdruck verwendet werden können.

Filter und Sensoren sind entlang der Pipeline angeordnet, um Schäden an den Pumpen- und Schneidkopf-Komponenten durch Partikel zu vermeiden und den tatsächlichen Druck entlang der Leitung zu überwachen. Zusätzliche Wasseraufbereitungsanlagen werden in der Regel vor allem dann eingesetzt, wenn die Wasserhärte eine vom Pumpenbauer definierte Grenze übersteigt. Kleine Öffnungen, wie sie in Mikro-Wasserstrahlssystemen verwendet werden, erfordern eine solche Behandlung des Wassers, um ein Verstopfen der Öffnungen zu vermeiden.

Ein Ein-Aus-Ventil wird unmittelbar stromaufwärts vom Schneidkopf angeordnet, um den Druckwasserstrom zu halten oder freizugeben. Diese Vorrichtung besteht aus einem Metallstift, der durch ein pneumatisches Stellglied bewegt wird und so die Wasseraustrittsöffnung schließt oder öffnet.

### 5.2.3 Handlingsysteme und Haltevorrichtungen

Das Rohrende in der Nähe des Schneidkopfs besitzt in der Regel einen kleinen Durchmesser, um flexibler zu sein und damit sich der Kopf frei im Bearbeitungsbereich bewegen kann. Das Handlingsystem, auf dem der Schneidkopf montiert ist, kann zwischen 2 und 5 Achsen haben und auf einer kartesischen oder einer anthropomorphen Armstruktur basieren, je nach den spezifischen Anforderungen des Kunden. Die Präzision dieser Handlingsysteme, gemessen als Wiederholgenauigkeit, kann zwischen 0,1 mm und 0,004 mm liegen. Diese zunehmende Genauigkeit ist umgekehrt proportional zu den Abmessungen des Bearbeitungsbereiches und der Achsenzahl des Handlingsystems. Dennoch ist sie direkt proportional zur volumetrischen Kompensationswirksamkeit und zum Gesamtpreis des Bearbeitungszentrums.

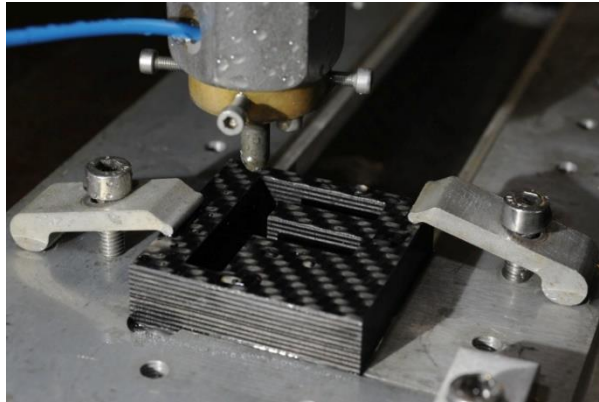


Abbildung 5.2: Haltevorrichtungen für Kleinteile am WJ\_Lab of Politecnico di Milano. Ein Hauptrahmen und eine Schiebeleiste halten das Werkstück über dem Pool und positionieren es entsprechend dem Referenzsystem der Maschine. Das Werkstück wird mit Hilfe einer geeigneten Klemme positioniert und am Rahmen befestigt; die Klemme darf sich nicht in der Bearbeitungsbahn befinden.

Handlingsysteme für Mikro-Wasserstrahl-Maschinen verwenden in der Regel Linearmotoren oder hochpräzise Kugelgewindespindeln und sind auf den Linearachsen mit Glasmaßstäben ausgestattet.

Große Werkstücke werden in der Regel einfach ohne Haltevorrichtungen auf den Arbeitstisch gesetzt, da ihr Eigengewicht ausreicht, um sie während der Bearbeitung in Position zu halten. Besonders kleine oder leichte Werkstücke, beispielsweise bei Mikro-Anwendungen, müssen jedoch mit Klemmen und seitlichen Referenzpunkten am Hauptrahmen des Bades befestigt werden, um Drift oder Vibrationen zu verhindern. Die Haltevorrichtungen können für alle spezifischen Anforderungen angepasst werden (Abbildung 5.2).

#### 5.2.4 Energieumwandlung

Die Energieumwandlung wird durch die Kapillaröffnung durchgeführt, die in der Komponente untergebracht ist und in der Regel "primäre Öffnung" oder "primäre Düse" genannt wird (siehe Abbildung 5.3). Der Kern dieser Komponente ist ein kleiner und harter Stein (in der Regel Saphir oder ein synthetischer Diamant), durchbohrt von einem Laser und veredelt durch Ultraschalltechnologien. Der charakteristische Kapillardurchmesser reicht von  $\varnothing 0,33$  mm bis  $\varnothing 0,05$  mm, aber in der Regel ist er gleich  $\varnothing 0,10$  mm oder  $\varnothing 0,05$  mm bei Mikro-Waterjets.



Abbildung 5.3: Primäre Öffnungen für WJ-Anwendungen.

Der Hochdruckwasserstrom fließt durch die Kapillare und wird gemäß folgender Gleichung beschleunigt (2):

$$v_j = c_v \cdot \psi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p_{\text{water}}}{\rho_0}} \quad (2)$$

wobei  $v_j$  die resultierende Strahlgeschwindigkeit ist,  $c_v$  der Geschwindigkeitskoeffizient ( $c_v = 0,98 \sim 0,99$ ),  $\psi$  der Wasserkompressibilitätskoeffizient ( $\psi = 0,90$  für  $p_{\text{Wasser}} = 300$  MPa),  $p_{\text{Wasser}}$  der Wasserströmungsdruck und  $\rho_0$  die Wasserdichte.

Die hydraulische Kraft  $P$ , die zur Erzeugung eines Hochgeschwindigkeitswasserstrahls durch eine Öffnung erforderlich ist, muss auf Maximum stehen (bezogen auf das Pumpensystem), um die Produktivität zu verbessern. Gleichung (3) zeigt den Zusammenhang zwischen der hydraulischen Kraft des Strahls  $P$  und dem Durchmesser der Primäröffnung do:

$$P = \frac{c_d \cdot \pi \cdot d_o^2 \cdot \sqrt{2} \cdot p_{\text{water}}^{3/2}}{4 \cdot \sqrt{\rho_0}} \quad (3)$$

Der dimensionslose Durchflusskoeffizient  $c_d$  bezieht sich auf den lokalisierten Energieverlust in der Primäröffnung; deshalb liegt er oft zwischen 0,65 für dünne und scharfkantige Kapillaren und 0,75 oder mehr für große Kapillaren und Kapillaren mit abgerundeten Kanten.

### 5.2.5 Bearbeitungsmechanismen und Schneidköpfe

Beim PWJ (Abbildung 5.4, links) trifft der durch die Primäröffnung erzeugte Strahl direkt auf die Werkstückoberfläche. Der Strahlkern und seine Umgebung aus Tröpfchen sind in der Lage, dank ihrer hohen Dynamik das Zielmaterial lokal zu entfernen. Da es sich bei dem Strahl um einen Hochenergiestrahls handelt, ist die makroskopische Wirkung ähnlich der Wirkung eines Schneidedrahtes, der das Werkstück schneidet und sich auf komplexen Bahnen bewegt.

Die soeben beschriebene PWJ-Lösung eignet sich für die Bearbeitung weicher Materialien, beispielsweise Gummi, Kunststofffolien und Schäumen, dünnes Sperrholz oder Lebensmittel. Zur Bearbeitung harter Materialien wird dem Hauptwasserstrom Schleifsand zugesetzt, um die Strahlschneidleistung zu verbessern. Beim AWJ (Abbildung 5.4, rechts) wird die Wasserdynamik auf die Schleifpartikel übertragen, die damit zu mikroskopischen Schneidwerkzeugen werden. Daher wird das Materialabtragungsverfahren beherrscht durch Erosions- und Abrasionsmechanismen.

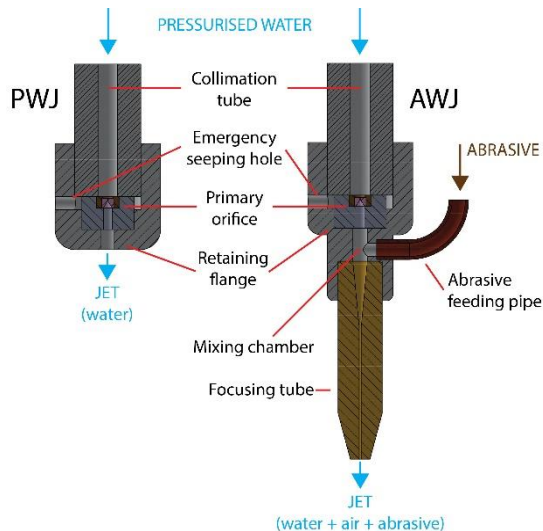


Abbildung 5.4: Vergleich der PWJ- und AWJ-Schneidköpfe.

### 5.2.6 Beschickungssystem für Schleifmittel

Entsorgbare Schleifpartikel dienen in der AWJ-Bearbeitung als Werkzeuge. Im Vergleich mit anderen Technologien ist dies ein Vorteil, da der Werkzeugverschleiß in diesem Fall

keine Rolle spielt. Nach der Bearbeitung werden die Partikel einfach in einer Fangeinrichtung unter dem Schneidkopf gesammelt. Die wichtigsten Eigenschaften der Partikel sind:

- homogene Größe
- keine Hygroskopizität
- hohe Dichte
- große Härte
- kein Staub, damit Verstopfen vermieden wird

Typische Maschenzahlen, die in Standardanwendungen verwendet werden, sind #80 und #120. Letztere wird verwendet, wenn eine bessere Oberflächenbeschaffenheit erforderlich ist. Für Mikro-AWJ sind feine Körner erforderlich; typische Maschenzahlen liegen in diesem Fall zwischen #200 und #350. Feine Schleifmittel wie diese bedeuten ernsthafte Probleme für den Transport zum Schneidkopf aufgrund ihrer Neigung zu verstopfen, wenn sie nicht vollkommen trocken sind. Darüber hinaus werden für die niedrigen abrasiven Massenströmungsraten, die in Mikro-AWJ-Anwendungen verwendet werden, spezielle Beschickungssysteme und Rohrleitungen benötigt.

Die am häufigsten verwendeten Schleifmittel sind Granat, Olivin und Aluminiumoxid. Granat wird wegen seiner guten Schneideigenschaften und seines niedrigen Preises verwendet. Er besitzt auch eine sehr geringe Hygroskopizität, so dass er in nassen Anwendungen verwendet werden kann. Olivin wird eingesetzt für Anwendungen, die sehr glatte Oberflächen erfordern; er besitzt allerdings auch einen hohen Pulvergehalt. Aluminiumoxid weist im Vergleich zu den anderen Schleifmitteln eine größere Härte auf; aufgrund seines hohen Preises wird es jedoch nicht so häufig eingesetzt.

### **5.2.7 Fangeinrichtung**

Nachdem der Strahl das Material abgetragen hat, muss stromabwärts vom Werkstück die Restenergie zusammen mit dem erzeugten Span und dem verbrauchten Schleifmittel entsorgt werden. Unter dem gesamten Bearbeitungsbereich befindet sich ein Wassertank, der die Restenergie dämpft und die festen Partikel auffängt. Da dieses Wasser durch Aufschlammung und Spanpulver erheblich verunreinigt ist, kann es nicht wiederaufbereitet werden. Daher werden Schmutzwasser und Schlämme getrennt gesammelt und entsprechend den örtlichen Vorschriften über industrielle Abfälle entsorgt. Manchmal ist es zweckmäßig, Schleifmittel zu recyceln. Dennoch ist die Abfallentsorgung in der Mikro-AWJ aufgrund der erforderlichen sehr niedrigen abrasiven Massenströmungsraten kein großes Problem, wie Tabelle 5.2 zeigt.

## 5.3 Qualitätsbewertung für AWJ

Verschiedene Parameter müssen in der WJ-Technologie definiert werden, um die gewünschte Qualität und Produktivität zu erreichen. Da die AWJ-Technologie die komplexeste Technologie ist, ist ein Ishikawa-Diagramm dieser Konfiguration, gezeichnet von Annoni, M. und Monno, M. [2] (Abbildung 5.5) ausreichend für die gesamte WJ-Palette, auch für Mikroanwendungen.

Das Diagramm konzentriert sich auf drei Parametergruppen zur Beurteilung der Schneidleistung: Verfahrens-, Werkstück- und Bearbeitungsparameter. Tabelle 5.1 zeigt Richtwerte für ein herkömmliches AWJ-Bearbeitungszentrum. Der Bearbeitungsparameter, der für Hersteller oft am wichtigsten ist, ist die Vorschubgeschwindigkeit ( $v_f$ ). Aus diesem Grund zeigt Tabelle 5.1 neben den möglichen Prozessparametern eine gewöhnliche  $v_f$  Wahl für eine bestimmte Konfiguration.

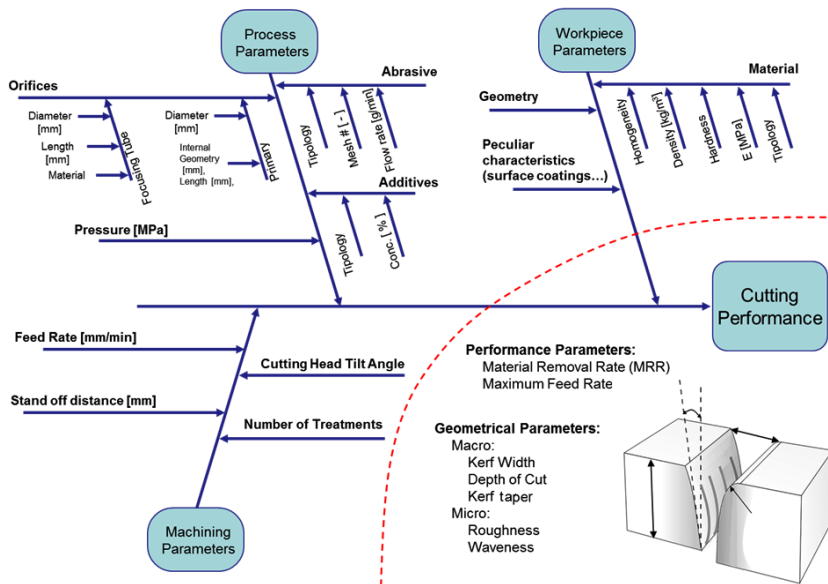


Abbildung 5.5: Ishikawa-Diagramm für AWJ.

Einige dieser Parameter werden in den folgenden Abschnitten besprochen. Im Allgemeinen können die meisten dieser Parameter vor oder während des Schneidvorgangs überwacht werden. Einige dieser Parameter können auch gesetzt werden, um die WJ typischen Mängel oder unvorhersehbare Ereignisse zu kompensieren.

Tabelle 5.1: Leitparameter für den AWJ-Prozess und vf-Ebenen

Herkömmliche AWJ-Prozessparameter		Richtwerte $v_f$
$p_{\text{Wasser}}$ [MPa]	80 - 600	AWJ-Konfiguration: $p_{\text{Wasser}}$ : 380 MPa $d_0$ : 0,33 mm $d_f$ : 1,02 mm Schleifgröße: #80 Maschen $Q_{\text{abr}}$ : 350 g/min Werkstückdicke: 1 mm  Fe-Legierungen: 800 mm/min Al-Legierungen: 2400 mm/min Ti-Legierungen: 1200 mm/min Kohlefaser: 3000 mm/min
$Q_{\text{Wasser}}$ Wasserdurchflussmenge [l/min]	1,0 - 2,5 je nach Primäröffnung $\emptyset$	
$d_0$ [mm]	0,10 - 0,25 (PWJ) 0,25 - 0,33 (AWJ)	
$d_f$ Fokussierrohr $\emptyset$ [mm]	0,76 - 1,20	
$l_f$ Länge des Fokussierrohrs [mm]	76 - 120 ( $100 \cdot d_f$ )	
Schleifmittelart	Granat, Olivin, Aluminiumoxid	
Schleifgröße [Maschen ( $\mu\text{m}$ )]	#80 (250) - #120 (74)	
$Q_{\text{abr}}$ abrasive Massenströmungsrate [g/min]	100 - 400	
Bearbeitungsbereich	Gewöhnlich 2000 mal 4000 mm	

### 5.3.1 Beschreibung der Bearbeitungsfehler

Typische AWJ-Mängel können durch einige geometrischen Parameter auf der Makro- und Mikroebene identifiziert werden.

Die Schnitttiefe hängt stark ab von  $p_{\text{Wasser}}$ ,  $v_f$  und  $Q_{\text{abr}}$ . Die Schnitttiefe muss größer oder gleich der Werkstückdicke sein. Die Wandrauigkeit der Komponente auf mikroskopischer Ebene ist abhängig von den abrasiven Eigenschaften (d.h. Typ, Maschen); sie wird in der Regel vor Beginn der Arbeiten eingestellt und während der Bearbeitung nie verändert.

Stattdessen sollten drei andere Mängel (Schnittfugen-Welligkeit, Schnittfugen-Verjüngung und Jetlag) genauer untersucht werden, weil sie auch während der einzelnen Bearbeitungsvorgänge gesteuert und variiert werden können.

Mit AWJ bearbeitete Werkstücke zeigen einige Unregelmäßigkeiten in der Schnittfugenoberfläche der unteren Zone. Diese erste Art von Mangel wird in der Regel als "Welligkeit" bezeichnet (Abbildung 5.6, Ansicht von unten), da es sich um eine makroskopische Niederfrequenzabweichung von der nominalen Wand des Werkstücks handelt. Das fehlerhafte Strahlverhalten wird durch den fortschreitenden Energieverlust verursacht, wenn man





Der einfachste Weg, um typische AWJ-Mängel zu reduzieren, ist  $v_f$  global zu senken, insbesondere an den Ecken oder dort, wo feine Strukturen bearbeitet werden müssen. Diese Strategie wird im Allgemeinen bei 3-Achsen-Maschinen durch CAM-Software angewendet. Daher hat der Strahl genügend Zeit, um das Werkstück in seiner ganzen Dicke zu bearbeiten, entsprechend der erforderlichen Wandqualität. Dennoch hat dieser Ansatz erhebliche Auswirkungen auf die Gesamtprozessproduktivität; er funktioniert nicht effektiv bei Werkstücken mit hoher Dicke (z.B. mehr als 15 mm).

Mehrere wissenschaftliche und industrielle Studien haben geeignete Lösungen zur Fehlerkompensation vorgeschlagen durch Verwendung moderner Handlingsysteme und Korrekturalgorithmen.

Hoogstrate, A. M. [3] nutzte einfache geometrische Parameter, wie 5-Achsen-Schnittköpfe mit Neigungswinkel, als Fehlerkompensationsstrategie. Der Schneidkopf wird gekippt, um die unerwünschte Wandneigung zu kompensieren, die auf die Verjüngung der Schnittfuge zurückzuführen ist (Abbildung 5.6, Ansicht von vorne). Der Schneidkopf wird auch entlang der Vorschubrichtung nach vorne geneigt, um den Jetlag zu kompensieren (Abbildung 5.6, Querschnitt). Durch die Verwendung des CAD-CAM-Tools können die neuen Maschinen geometrische Modelle verwenden, die das Strahlverhalten berücksichtigen und Kompensationsstrategien auch bei gekrümmten Geometrien anwenden, wie Westkämper, E. et al. berichten [4].

Mehrere Studien über die Kompensation kreisförmiger Werkstücke wurden veröffentlicht, z.B. von Matsui, S. [5] und Hlaváč, L.M. [6]; sie lieferten wertvolle Ergebnisse in Bezug auf Schnittfugen-Verjüngung und Jetlag-Fehlerreduzierung durch Kippen des Schneidkopfes.

Vor diesem wissenschaftlichen und industriellen Hintergrund hat das Waterjet Laboratory of Politecnico di Milano (WJ\_Lab) diese Art der geometrischen Kompensationsstrategien umgesetzt, um das Auftreten von Mängeln an Zielkomponenten zu reduzieren, wie in Abbildung 5.7 dargestellt.

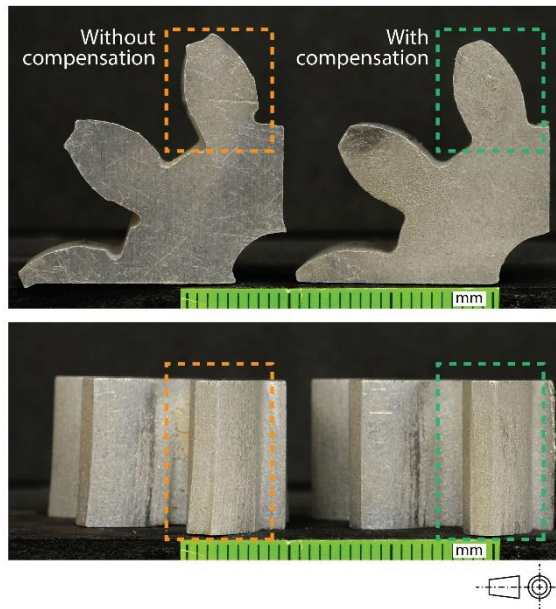


Abbildung 5.7: Fehlerkompensation an einer komplexen Form durchgeführt am WJ\_Lab of Politecnico di Milano.

Die industrielle Gültigkeit dieser Strategien, die tatsächlich wertvolle Leistungen anbieten, wird durch einige Patente bestätigt (z.B. FLOW<sup>®</sup> Dynamic Waterjet<sup>®</sup> [7] und OMAX<sup>®</sup> Tilt-A-Jet<sup>®</sup> [8]), sowie durch die zunehmende Verbreitung von 5-Achsen-Systemen mit integrierter Kompensation.

## 5.4 Mikro-AWJ-Technologie

Obwohl Qualität, Flexibilität und Leistungseigenschaften herkömmlicher AWJ wichtige Parameter sind, hängt eine untere Grenze für die erreichbaren Strukturabmessungen und Oberflächengüte ab vom typischen Strahl und den abrasiven Dimensionen. Eine weitere Grenze in Bezug auf die Präzision des gefertigten Werkstücks wird durch die großen Dimensionen konventioneller Bearbeitungszentren eingeführt. Daher wurde eine zunehmende Verkleinerung des Strahls vorgenommen, um ein Werkzeug zu erhalten, das in der Lage ist, feine Strukturen zu fertigen und dabei die eindeutigen Vorteile des Wasserstrahlverfahrens zu erhalten. Eine verbesserte Genauigkeit kann vor allem dadurch erreicht werden, dass man kleinere Bearbeitungsbereiche gestaltet und genauere Handlingsysteme

einsetzt, so dass man eine Wiederholgenauigkeit von 0,004 mm und weniger erreicht, wie in Abschnitt 2.3 erwähnt, und damit eine Near-Net-Shape-Bearbeitung erreicht.

Um diese Konfiguration von herkömmlichen Konfigurationen zu unterscheiden, wird die verkleinerte AWJ-Lösung in der Regel als Mikro-AWJ bezeichnet. Die wichtigsten Funktionen hängen nicht nur von den Dimensionen des Arbeitsbereiches und der Genauigkeit des Handlingsystems ab. Die für Mikro-AWJ wichtigsten Features werden in den folgenden Kapiteln besprochen.

## **5.5 Wesentliche Merkmale des Mikro-AWJ**

Da das allgemeine Layout der Mikro-AWJ-Anlage dem Layout einer herkömmlichen Anlage ziemlich ähnlich ist, wird diese Technik oft als verkleinerte Version des AWJ bezeichnet. Wesentliche Komponenten sind ähnlich, jedoch entstehen einige Probleme aufgrund der erheblichen Verkleinerung und der Notwendigkeit einer höheren Bearbeitungsgenauigkeit. Tabelle 5.2 zeigt die wichtigsten Merkmale des Mikro-AWJ. Einige dieser Features werden weiter unten ausführlich diskutiert.

Die primäre Öffnung und die Fokussierrohrdurchmesser sind deutlich kleiner als bei AWJ. Die Ausrichtung der Schneidkopf-Komponenten ist von größter Bedeutung, weil sogar ein kleiner Energieverlust oder ein elliptischer Strahlquerschnitt ernsthafte Auswirkungen auf die Schnittleistung und die Maßgenauigkeit der Werkstücke haben können. Daher muss die Fertigung der Schneidkopf-Komponente durchgeführt werden unter Verwendung von Standards und Verfahren, die in hochpräzisen industriellen Bereichen angewendet werden, z.B. In der Uhrenfertigung. Eine präzise Verbindung der Komponenten gewährleistet eine gute Ausrichtung zwischen der Primäröffnung, der Mischkammer und den Fokussierrohrachsen.

Tabelle 5.2: Mikro-AWJ Leitparameter für den Prozess und vf-Ebenen.

Mikro-AWJ-Prozessparameter		Richtwerte $v_f$
$p_{\text{Wasser}}$ [MPa]	80 - 380	<b>Mikro-AWJ-Konfiguration:</b> $p_{\text{Wasser}}$ : 380 MPa $d_o$ : 0,10 mm $d_f$ : 0,30 mm Schleifgröße: #220 Maschen $Q_{\text{abr}}$ : 70 g/min Werkstückdicke: 1 mm
$Q_{\text{Wasser}}$ Wasserdurchflussmenge [l/min]	0,3 - 0,8 je nach Primäröffnung $\emptyset$	
$d_o$ [mm]	0,05 - 0,10	
$d_f$ Fokussierrohr $\emptyset$ [mm]	0,20 - 0,30	
$l_f$ Länge des Fokussierrohrs [mm]	20 - 30 (100· $d_f$ )	
Schleifmittelart	Granat, Olivin, Aluminiumoxid	
<b>Schleifgröße</b> [Maschen ( $\mu\text{m}$ )]	#200 (74) - #350 (44)	
$Q_{\text{abr}}$ abrasive Massenströmungsrate [g/min]	10 - 80	<b>Fe-Legierungen:</b> 200 mm/min <b>Al-Legierungen:</b> 600 mm/min <b>Ti-Legierungen:</b> 260 mm/min <b>Kohlefaser:</b> 800 mm/min
Bearbeitungsbereich	Bis zu 800 x 800 mm	

Ein weiteres Problem hängt zusammen mit dem Beschickungssystem für Schleifmittel. Bei herkömmlichen Anwendungen genügt ein Trichter, der mit einem Austrittsloch ausgestattet ist. Mikro-AWJ benötigt ein spezielles Beschickungssystem, um geringe Massendurchflussraten für feine Schleifmittel zu bewältigen. Ein Beschickungssystem für Schleifmittel mit Entladeband, wie sie von Allfi konzipiert und von Daetwyler auf Microwaterjet®-Maschinen verwendet werden, werden bei diesen Anwendungen häufig eingesetzt. Diese Lösung vermeidet ein Verstopfen durch Schleifmittel aufgrund von Teilchen, die sich an kleine Löcher anlagern, und ermöglicht die Bewältigung des Massendurchsatzes durch Feineinstellung der Bandgeschwindigkeit. Darüber hinaus neigen feine Schleifmittel aufgrund ihrer Hygroskopizität dazu, die Zuleitungen und die Mischkammer zu verstopfen. Verfeinerte Schleifmittel mit geringem Staubanteil werden verwendet; außerdem werden vor der Bearbeitung Trocknungsvorgänge durchgeführt, um Verstopfung und Störungen bei Schneidvorgängen zu vermeiden.

Die geringen Wasser- und Schleifmittel-Flussraten führen zu einer Reduzierung der Schneidleistung. Aus diesem Grund kann an dicken Werkstücken keine effektive Mikro-AWJ-Bearbeitung durchgeführt werden. Als Richtwert kann das folgende Beispiel dienen: 20 mm Stahl können mit der  $\emptyset$  0,3 mm Fokussierrohr-Konfiguration bearbeitet werden, die in Tabelle 5.2 beschrieben wird. In jedem Fall sind die vorgeschlagenen  $v_f$  Werte

signifikant niedriger als die Werte, die derzeit in der herkömmlichen AWJ-Bearbeitung verwendet werden.

### 5.5.1 Erforderliche Eigenschaften für Mikro-AWJ

WJ-Technologie, insbesondere Mikro-AWJ, kann auf gleicher Basis sowohl mit bewährten als auch nicht-konventionellen Technologien konkurrieren im Hinblick auf die Near-Net-Shape-Bearbeitung von Werkstücken. In Tabelle 5.3 werden einige der Eigenschaften, die für Mikro-AWJ erforderlich sind, zusammengefasst; diese Tabelle bietet einen Überblick über die Technologie und ermöglicht Vergleiche mit den anderen verfügbaren Technologien.

Da Mikro-AWJ eine sich schnell entwickelnde Technologie ist, überwinden die akademische sowie industrielle Forschung und Entwicklung kontinuierlich die in Tabelle 5.3 aufgezeigten Grenzen. Beispielsweise erlaubt die mühsame Kontrolle bei Fräsoperationen nicht, dass man ein fertiges Werkstück durch Mikro-AWJ erhält, so dass die Operation durch konventionelles Fräsen abgeschlossen werden muss. Dieses Problem könnte in naher Zukunft überwunden werden, wenn eine bessere Strahlleistung und Orientierungssteuerung umgesetzt werden.

Tabelle 5.3: Mikro-AWJ Leitparameter für den Prozess und vf-Ebenen.

Erforderliche Eigenschaften für Mikro-AWJ	Wert / Beschreibung
Bearbeitbare Materialien	Fast jedes Material, wenn ein Schleifmittel ausgewählt wird, das härter als das Zielmaterial ist. Granat (8 Mohs) eignet sich für die meisten Anwendungen.
Erlaubte Operationen	Schneiden und Durchbohren. Oberflächenreinigung und Entschichten, Gravieren, Schruppfräsen.
Werkzeug einrichten	Ein einziges Werkzeug für alle erlaubten Bearbeitungsvorgänge.
Schnittstärke	Bis zu 20 mm bei Fe-Legierungen. Über diesem Wert verringert sich die Schnittqualität und die Bearbeitungszeit wird unerschwinglich.
Mindest-Strukturgröße	Scharfe Kanten und dünne Wände (bis 0,1 mm) können realisiert werden. Der Strahlradius definiert die Dimension der unteren konkaven Struktur. Bei Verwendung eines Ø 0,20 mm Fokussierrohrs liegt die erreichbare Schnittfugenbreite zwischen 0,23 und 0,28 mm.
Werkstück einrichten	Eine einfache Fixierung ist notwendig, um den kleinen Querkräften, die durch den Strahl erzeugt werden (in der Regel weniger als 1 N), zu trotzen. Spannsysteme müssen Schäden an Werkstücken verhindern, die durch ihre unkontrollierte Ablösung vom Ausgangswerkstück entstehen können. Entlang der Werkzeugbahn werden oft Brücken programmiert, um die Kleinteile in Position zu halten, bis der Schnitt abgeschlossen ist.
Werkstückgröße	Je nach Bearbeitungsbereich bis zu 800 x 800 mm.
Thermische / chemische Wechselwirkungen	Vernachlässigbar. Einige Metalle, wie Kohlenstoffstahl, können wegen der feuchten Umgebung oxidieren.

Mechanische Wechselwirkungen	Vernachlässigbar. Der Strahl wirkt schonend auf das Material ein, ohne hohe mechanische Belastungen zu verursachen, abgesehen von einer geringen Restkompression auf der Oberfläche.
Einhaltung der Toleranzen	Bis zu 0,004 mm, abhängig von der Präzision des Handlingsystems und der Strahlstabilität.
Oberflächenrauigkeit	Bis zu 500 nm Ra, abhängig von der Schleifmittelgröße und $v_f$ .

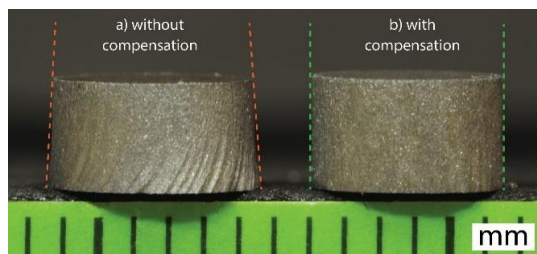
## 5.6 Mikro-AWJ Fallstudien

In diesem Abschnitt werden einige Fallstudien vorgestellt, um einige interessante Mikro-AWJ-Eigenschaften und anspruchsvolle Materialien und Funktionen zu diskutieren. Die beschriebenen Werkstücke wurden bei WJ\_Lab of Politecnico di Milano [9] und bei WatAJet S.r.l. [10], einem Ableger des WJ\_Lab, mit der  $\varnothing$  0,3 mm Fokussierrohr-Konfiguration gefertigt.

### 5.6.1 Präzision durch Fehlerkompensation

Die typischen AWJ-Mängel, die in Abschnitt 3.1 diskutiert werden, haben einen starken Einfluss auf die Präzision des bearbeiteten Werkstücks, wenn man bei hohen  $v_f$  Werten arbeitet, sogar im Mikro-AWJ beim nicht kompensierten Schneiden (Abbildung 5.8, a). Die wichtigsten Mängel können durch Kippen des Schneidkopfwinkels entsprechend den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Strategien kompensiert werden.

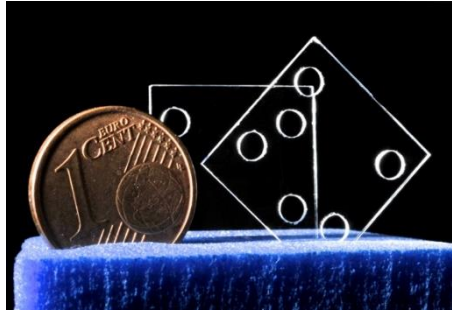
In dem speziellen Fall in Abbildung 5.8 beträgt die Differenz zwischen dem oberen und unteren Durchmesser 0,40 mm im ersten Zylinder (Abbildung 5.8, a); im kompensierten Zylinder wird sie auf 0,02 mm verringert (Abbildung 5.8, b), wobei mit den gleichen  $v_f$  Werten gearbeitet wird.



Material	$p_{\text{Wasser}}$	Schleifmittel	$Q_{\text{abr}}$	$v_f$
Ti 6Al 4V 3 mm	300 MPa	Granat #200 Maschen	12 g/min	80 mm/min

Abbildung 5.8: Vergleich zwischen nicht-kompensierten und kompensierten Werkstücken, die mit Mikro-AWJ hergestellt wurden.

Durch geometrische Kompensationsstrategien ist es daher möglich, Near-Net-Shape-Werkstücke zu erhalten ohne  $v_f$  zu reduzieren und somit die Produktivität zu erhalten.



Material	$p_{\text{Wasser}}$	Schleifmittel	$Q_{\text{abr}}$	$v_f$
Quarz 0,7 mm	100 - 300 MPa	Granat #200 Maschen	18 g/min	30 mm/min

Abbildung 5.9: Durchbohren von dünnem Quarz.

## 5.6.2 Feinheiten beim Bohren und Bearbeitung dünner Wände

Das Durchbohren spröder Materialien ist oft eine schwierige Aufgabe, vor allem bei Werkstücken mit sehr geringer Dicke, weil es sehr einfach ist, sie zu zerkratzen oder zu zerbrechen. Die in Abbildung 5.9 gezeigten Quadrate sind aus 0,7 mm dickem Quarz gefertigt, durch den vier Löcher gebohrt wurden. Vor der Bearbeitung wird das Werkstück mit einer polymeren Klebefolie abgedeckt, um die Oberfläche vor versehentlichem Verkratzen zu schützen und unerwünschte Schwingungen zu begrenzen. Dieser Schutz dämpft auch die Strahlwirkung beim anfänglichen Auftreffen, so dass das eigentliche Werkstück durch den Abrasiv-Wasserstrahl bearbeitet werden kann.

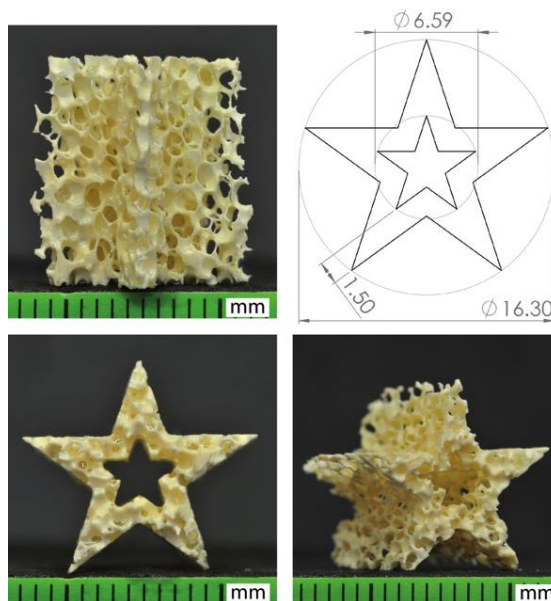
## 5.6.3 Inhomogene Materialien

Die Bearbeitung inhomogener Materialien ist an sich schwierig wegen des raschen Wechsels von Bereichen, die völlig unterschiedliche mechanische Eigenschaften aufweisen. Keramikschwämme sind ein extremes Beispiel für diese Art von Materialien.

Eine komplexe Werkstückform wird bearbeitet, um die Leistungsfähigkeit des Mikro-AWJ-Schneidens in Bezug auf Präzision und Feinheit an inhomogenen Materialien zu demonstrieren. Eine anspruchsvolle Geometrie, wie der in Abbildung 5.10 gezeigte Stern sowohl mit konvexen als auch konkaven Ecken ist eine Herausforderung für die Bearbeitung, bei der sogar Diamantdrähte oder Ultraschallbearbeitung eingesetzt werden.



In diesem Fall wird ein speziell entwickelter Poren-Füllvorgang benötigt. Nach dem Einbringen des Grundmaterials in Ethylen-Vinyl-Acetat wird das Werkstück geschnitten und dann entleert. Mikro-AWJ erwies sich als wirksam bei der Bearbeitung sowohl der scharfen Kanten des Außenprofils als auch der feinen Ecken des inneren Profils; dabei blieb eine 1,5 mm dicke Wand auf einem 15 mm dicken Keramikschwamm erhalten. Die Schnittfugen-Verjüngung und Jetlag-Mängel werden durch eine geeignete Auswahl der Bearbeitungsparameter reduziert (vor allem  $v_f$ ), wie in der Seitenansicht gezeigt. Da die fünf scharfen Kanten parallel sind, wird gezeigt, dass die Schnittfugen-Verjüngung und die Jetlag-Mängel vernachlässigbar sind.



Material	$p_{\text{Wasser}}$	Schleifmittel	$Q_{\text{abr}}$	$v_f$
Keramik 15 mm	300 MPa	Granat #200 Maschen	12 g/min	10 mm/min

Abbildung 5.10: Darstellung einer Geometrie auf einem 40 PPI (Poren pro Zoll) Aluminiumoxid-Keramik-Schwamm.

## 5.7 Referenzen

1. Axinte DA, Karpuschewski B, Kong MC, Beaucamp AT, Anwar S, Miller D, Petzel M (2014) High energy fluid jet machining (HEFJet-Mach): from scientific and technological advances to niche industrial applications. *CIRP Annals-Manufacturing Technol* 63(2):751–771.
2. Annoni M, Monno M (2000) A lower limit for the feed rate in AWJ precision machining. International conference on water jetting, in BHR group conference series publication, vol 41. Professional Engineering Publishing, Bury St. Edmunds, pp 285–296.
3. Hoogstrate AM (2000) Towards high-definition abrasive waterjet cutting—a model based approach to plan small-batch cutting operations of advanced materials by high-pressure abrasive waterjets. Delft University of Technology, TU Delft
4. Westkämper E, Henning A, Radons G, Friedrich R, Ditzinger T (2000) Cutting edge quality through process modeling of the abrasive waterjet. *CIRP, Proceedings of 2nd CIRP international seminar on intelligent computation in manufacturing engineering (ICME)*, Capri, Italy.
5. Matsui, S. (1991), “High precision cutting method for metallic materials by abrasive waterjet”, *Jetting Technology*.
6. Hlaváč LM (2009) Investigation of the abrasive water jet trajectory curvature inside the kerf. *J Mater Process Technol* 209:4154–4161
7. “Flow Dynamic-Waterjet”, patented technology by Flow International Corporation [Online]. Available at: <http://www.flowwaterjet.com/Cutting-Heads/Dynamic-Waterjet> 4 Dec 2015
8. “OMAX Tilt-a-jet” patented technology by OMAX Corporation [Online], Available: <https://www.omax.com/accessories/tilt-a-jet> [04.12.2015]
9. WJ\_Lab Laboratory web page on Department of Mechanical Engineering Department—Politecnico di Milano website, [Online]. Available at [http://tecnologie.mecc.polimi.it/water\\_jet\\_lab\\_en.htm](http://tecnologie.mecc.polimi.it/water_jet_lab_en.htm) 4 Dec 2015
10. WatAJet S.r.l. company website, detailing applications, performances and services [Online], Available: <http://www.watajet.com> [04.12.2015]

# 6 Mikrofunktenerosion ( $\mu$ EDM)

**Francesco Modica, Valeria Marrocco and Irene Fassi**

ITIA-CNR, Institute of Industrial Technology and Automation,  
National Research Council, Italy

## 6.1 Prinzip der Funkenerosion (EDM)

Die Funkenerosion (EDM) ist eine der am häufigsten verwendeten nicht-konventionellen Technologien zur Bearbeitung elektrisch leitender Materialien. Die berührungslose Methode dieser Technologie vermeidet mechanische Belastungen, Vibrationen und Schwingungsprobleme; dank dieser Eigenschaft ist diese Technologie dafür geeignet, Materialien mit hoher Festigkeit und Härte zu bearbeiten. Das Funktionsprinzip basiert auf dem Konzept der elektrischen Erosion. Eine Reihe diskreter elektrischer Entladungen findet zwischen den beiden Elektroden statt, dem Werkzeug und dem Werkstück, die beide in eine dielektrische Flüssigkeit eingetaucht sind. Beim Entladen wird die elektrische Energie in thermische Energie umgewandelt [1].

Die thermische Energie erzeugt einen Kanal aus Plasma zwischen der Kathode und Anode [2], bei einer Temperatur zwischen  $8000^{\circ}\text{C}$  bis  $12000^{\circ}\text{C}$  [3] oder bis zu  $20000^{\circ}\text{C}$  [4]. Dieser Mechanismus verursacht eine erhebliche Hitze und führt zum Schmelzen der Materialien an der Oberfläche jeder Elektrode. Sobald die pulsierende Gleichspannungsvorsorgung mit einer Rate von etwa 20-30 kHz abgeschaltet wird, bricht der Plasmakanal zusammen[5]. Ein Teil des abgetragenen Materials verdampft, während ein anderer Teil die Schmutzpartikel bildet und durch die dielektrische Flüssigkeit abgetragen wird, die üblicherweise in Bewegung gehalten wird [6]

Kürzlich wurde eine Variante dieses Verfahrens auf der Mikroebene umgesetzt [7]. Die wichtigsten Unterschiede zwischen Makro- und Mikro-EDM sind im Wesentlichen auf die Energiedichten, die Temperaturen und die Werkzeugabmessungen zurückzuführen, die am Prozess beteiligt sind. Beim Makro-EDM-Prozess ist der Spannungsgenerator, der für die elektrischen Entladungen verantwortlich ist, ein schalterartiger Generator, bei dem die erreichbare Pulsenergie bei ungefähr  $1\ \mu\text{J}$  liegt. Beim Mikro-EDM kann ein Entladungsgenerator (RC-Schaltung) verwendet werden. Die Energie wird in Kondensatoren gespeichert; die maximal mögliche Energie, freigesetzt durch elektrische Entladung in dem Funkenspalt, der zwischen Werkzeug und Werkstück besteht, liegt in der Größenordnung von  $3,5\ \text{nJ}$ . Um die Energie zu verringern und die Entladungsgeschwindigkeit zu

erhöhen, müssen die Kapazitäten der Schaltung reduziert werden, um kleine Pulsenergie und hohe Energiedichte zu erreichen, die für Mikro-EDM-Prozesse erforderlich sind. Darüber hinaus liegt die Temperatur der letzteren im Bereich zwischen  $\sim 4000^\circ\text{C}$  und  $\sim 50000^\circ\text{C}$ , der Werkzeugdurchmesser schwankt zwischen 0,5 mm und 0,005 mm, seine Polarität wird gewöhnlich auf negativ gesetzt (für EDM wird sie auf positiv gesetzt). Einige zusätzliche Effekte und Phänomene, die in der Regel bei der Makro-EDM-Bearbeitung vernachlässigt werden, müssen bei der EDM im Mikromaßstab sorgfältig beachtet werden. Beispielsweise könnten Größeneffekte, die Werkstückmaterialzusammensetzungen und Homogenität, sowie einen hohen Frequenzbereich in Betracht ziehen, den Erosionsprozess stark beeinflussen.

Es stehen unterschiedliche Mikro-EDM-Methoden zur Verfügung (Abbildung 6.1). Die Wahl einer Methode gegenüber einer anderen ist vor allem motiviert durch die spezifische Anwendung. In Kapitel 6.5 finden Sie einige Beispiele für die Vielseitigkeit der Verwendung und Kombination von Mikro-EDM-Methoden.

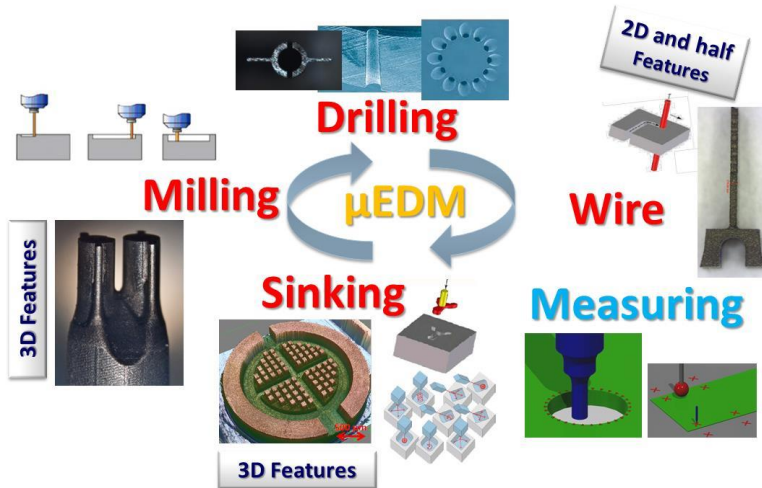


Abbildung 6.1: Mikro-EDM-Methoden und Anwendungen

Beim Mikro-Draht-EDM (wire) besteht das Werkzeug aus einem Draht, in der Regel aus Messing, mit einem Durchmesser im Bereich von 0,3 mm bis 0,02 mm. Der Draht wird durch Rotation zugeführt; er wird verwendet, um ein leitfähiges Werkstück zu schneiden. Diese Technik wird insbesondere zur Herstellung von Matrizen, mechanischen Teilen oder zum Formen von Werkzeugen eingesetzt.

Für das Senkerodieren (sinking) wird ein vorgeformtes Werkzeug benötigt (ein sogenanntes 'Formwerkzeug'), um das Spiegelbild der endgültigen Struktur zu reproduzieren. Die Formelektrode wird dann in das Werkstück eingeführt, um die endgültige Form zu prägen. Für diese Methode müssen vor der Herstellung der endgültigen Struktur spezifische Werkzeuge gefertigt werden. Das Mikro-EDM-Senkerodieren wird häufig zur Herstellung von Gießformen und komplexen Formen verwendet; dieses Verfahren ist gekennzeichnet durch kürzere Bearbeitungszeiten.

Das Bohren (drilling) ist im Allgemeinen die bevorzugte Methode zur Herstellung von Löchern bei schwer zu bearbeitenden Materialien oder von Mikrolöchern mit hohen Seitenverhältnissen. Durch Verwendung einfacher rohrförmiger oder zylindrischer Mikrowerkzeuge kann die Lochverjüngung beim Bohren besser gesteuert werden, d.h. Verringerung des Lochquerschnitts entlang seiner Tiefe aufgrund von Werkzeugverschleiß. Diese Technik ist bereits länger bekannt und in der Industrie weit verbreitet.

Beim Mikro-EDM-Fräsen (milling) werden einfache rohrförmige oder zylindrische Stäbe als Werkzeuge verwendet. Dadurch eignet sich diese Methode für die Bearbeitung von Mikrostrukturen mit komplexer Geometrie und hohem Seitenverhältnis, da sie ein hohes Maß an Flexibilität bei der Herstellung von Teilen bietet. Dennoch erlaubt dieser Ansatz eine bessere Kontrolle der Maß- und Oberflächengenauigkeit der fertigen Komponenten. Beim Mikro-EDM-Fräsen wird eine Schicht-für-Schicht-Strategie angewendet; sie umfasst die Einstellung einer Schichtdicke unter Berücksichtigung der Bearbeitungsmethode, d.h. die am Erosionsprozess beteiligte Entladungsenergie und eine korrekte Werkzeugbahn. Die Werkzeugbahn wird in der Regel in einer CAM-Umgebung definiert und ist so konzipiert, dass Tiefenfehler reduziert werden; dies sollte im Prinzip einen flacheren Boden der Struktur gewährleisten. Allerdings ist die industrielle Anwendung des Mikro-EDM-Fräsens derzeit sehr begrenzt; der Hauptnachteil dieses Ansatzes ist, dass die Bearbeitungszeiten exponentiell zunehmen, je höher die Komplexität der Struktur und die geforderte Genauigkeit sind.

## 6.2 Mikro-EDM-Prozessparameter

Obwohl das Mikro-EDM-Verfahren im Prinzip sehr einfach ist, müssen mehrere Fragen berücksichtigt werden, um eine gute Bearbeitungsleistung zu gewährleisten. Die Frage, wie man den Mikro EDM-Prozess optimal gestaltet, ist immer noch ein heiß diskutiertes Thema unter Wissenschaftlern, die auf diesem Gebiet arbeiten. Tatsächlich führt die willkürliche Natur des Mikro-EDM-Prozesses zu einer gewissen Unberechenbarkeit im Herstellungsverfahren. Die geeignete Wahl der Prozessparameter ist sicherlich der grundlegende erste Schritt. Diese Wahl wird durch die für das Werkstück und die Werkzeugelektroden verwendeten Materialien vorgegeben. Der Energiewert, der am Erosionspro-

zess beteiligt ist, definiert das Bearbeitungsverfahren: Schruppen, Schlichten, Feinschlichten. Je niedriger die Energie, desto langsamer der Prozess: die letztere Bedingung sorgt für eine hohe Maßgenauigkeit und eine gute Oberflächenrauigkeit. Der Energiewert, der an einem Mikro EDM-Prozess beteiligt ist, kann auf unterschiedliche Weise eingestellt werden, je nach der spezifischen Mikro-EDM-Maschine. Einige dieser Maschinen erlauben die direkte Einstellung der Kapazitätswerte des Entladungsgenerators. Andere berücksichtigen einige Indexwerte, die indirekt mit den Kapazitätswerten des Entladungsgenerators zusammenhängen. Zum Beispiel erlaubt die Sarix SX 200 HP die Einstellung eines Index E, für Energie, gefolgt von einer Zahl. Die höchste Zahl wählt den schalterartigen Generator und liefert eine Energiedichte, die für die Schruppbearbeitung geeignet ist. Die kleinsten Werte zeigen die Auswahl des Mikro EDM-Entladungsgenerators. In diesem Fall werden die maximal verfügbare Energiedichte während des Prozesses, sowie die maximalen Spannungs- und Stromwerte entsprechend begrenzt. In Bezug auf die Spannung, muss hervorgehoben werden, dass zwei Parameter unterschieden werden können: die Leerlaufspannung, d.h. die Spannung, die vom Mikro-EDM-Generator an die Elektroden angelegt wird, und die Entladungsspannung, d.h. die Spannung des Funkens, der zwischen den Elektroden auftritt. Ein weiterer wichtiger Prozessparameter ist die Impulsbreite; das ist das Zeitintervall, in dem der Mikro-EDM-Generator das Werkzeug und das Werkstück versorgt (oft als Ton oder Verzögerungszeit bezeichnet). Die Frequenz ist der Parameter, der erforderlich ist, um das Auftreten von Mikro-EDM-Generator-Impulsen zu setzen. Der Kehrwert der Frequenz definiert das Gesamtzeitintervall, in dem ein Funke entstehen kann ( $1/F = \text{Ton} + \text{Toff}$ ). Bei der Mikro-EDM wird die Elektrodenpolarität in der Regel wie folgt festgelegt: das Werkzeug ist negativ, das Werkstück positiv.

Weitere wichtige Parameter werden in der Regel durch das Servoregelkreissystem berücksichtigt, das für jede Mikro-EDM-Maschine spezifisch ist, wie beispielsweise Vorschubgeschwindigkeit und Werkzeugdrehzahl.

Eine Skizze des gesamten Erosionsprozesses, sowie der wichtigsten Verfahrensparameter und Spannungs- und Stromwellenformen, ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

Um Prozessstabilität zu erreichen und die gewünschte Strukturgenauigkeit zu erhalten müssen weitere Einstellungen und physikalische Phänomene berücksichtigt werden [8, 9]. Die Wahl der dielektrischen Flüssigkeit für die Spülung ist ein Schlüsselfaktor. Die dielektrische Flüssigkeit ist von grundlegender Bedeutung für die lokale Erhöhung der Energiedichte während des Erosionsprozesses; sie hilft, das geschmolzene Material aus dem Arbeitsbereich zu entfernen. Im Allgemeinen wird Kohlenwasserstofföl verwendet. Allerdings können, je nach den am Verfahren beteiligten Materialien und aus Sicherheits- und Umweltüberlegungen, auch Wasser und Luft als gute Alternativen zu Kohlenwasserstofföl in Betracht gezogen werden, obwohl die sich ergebende Oberflächenqualität der bearbeiteten Teile nicht so gut ist, wie die Qualität, die mit Kohlenwasserstofföl erzielt wird. Die

Steuerung der Werkzeugdrehzahl ermöglicht einen gleichmäßigen Verschleiß des Werkzeugs während der Bearbeitung und unterstützt die Schmutzentfernung. Dieses Thema ist sehr wichtig, da eine ineffektive Schmutzentfernung aus der Arbeitszone zu einer lokalen Ablagerung leitfähiger Partikel führt. In diesem Fall kann dieses Phänomen das Auftreten mehrfacher schädlicher Entladungen verursachen, die zu einer Instabilität des Verfahrens und zu Ungenauigkeiten in der endgültigen Struktur führen können. Außerdem kann die Temperaturerhöhung, die während eines Mikro-EDM-Prozesses auftritt, mehrere physikalische Phänomene und chemische Reaktionen auslösen wie zum Beispiel eine Erodierschicht und Wärmeeinflusszone. Diese können den Erosionsprozess beeinflussen und im schlimmsten Fall das Auftreten einer Entladung verhindern.

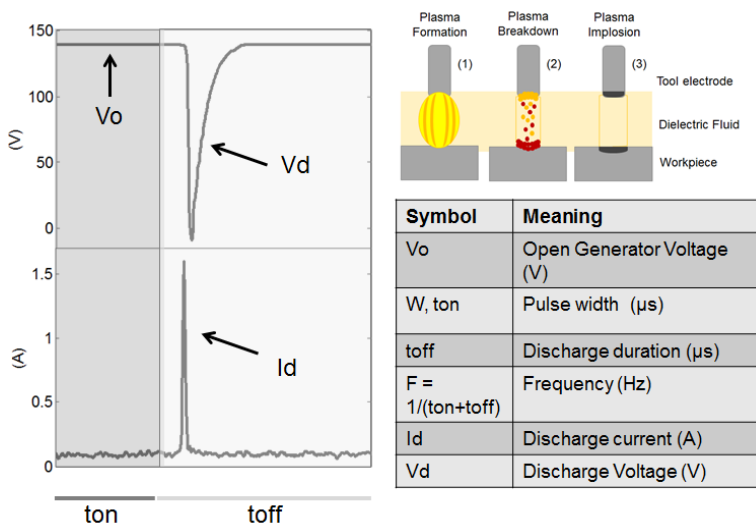


Abbildung 6.2: Beispiel von Spannungs- und Stromwellenformen während eines Mikro-EDM-Fräsvorganges an gehärtetem Stahl. Das Mikro-EDM-Verfahren umfasst folgende Schritte: Plasmabildung (1), Plasma-Abbau (2), Plasma-Implosion (3). Die Tabelle zeigt die wichtigsten Prozessparameter, die für alle Mikro-EDM-Maschinen gelten.

### 6.3 Durchführung des Mikro-EDM-Verfahrens: Qualitätsindizes

Die Bearbeitungsleistung wird in der Regel durch die Auswertung spezifischer Qualitätsindizes geschätzt:

- Materialabtragsrate (MRR), definiert als das Verhältnis zwischen dem Volumen des Materials, das vom Werkstück abgetragen wird, und der Erosionszeit
- Werkzeugverschleißverhältnis (TWR), definiert als das Verhältnis zwischen dem Werkzeugverschleißvolumen und dem Materialvolumen, das vom Werkstück abgetragen wird
- Oberflächenrauigkeit ( $R_a$ )
- Maßgenauigkeit: geschätzt als Tiefenfehler (Differenz zwischen der idealen Strukturtiefe und der realen bearbeiteten Strukturtiefe)

Die folgenden Abbildungen zeigen rasterelektronenmikroskopische (REM) Bilder der Oberflächenqualität nach dem Mikro-EDM-Verfahren. Abbildung zeigt 6.3a die Mikro-EDM-Oberfläche einer Düse, gefertigt aus gehärtetem Stahl. Die Überlappung der Krater ist sichtbar, insbesondere in Abbildung 6.3b, die eine Vergrößerung der Hohlraumwand zeigt. In diesem Fall ist die bearbeitete Oberfläche relativ homogen. Abbildung 6.4 zeigt ein Beispiel einer Säule, die in einem Hohlraum unter Verwendung eines Keramikverbundwerkstoffs,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ , gefertigt wurde. Die Eigenschaften dieses Materials werden später detailliert beschrieben. In diesem Fall wird eine sehr niedrige Energie während des Prozesses verwendet. Im Allgemeinen sorgt eine niedrige Energie für eine gute Oberflächenqualität bei identischen Prozessbedingungen unter Berücksichtigung der Metalle; in diesem Fall ist dies nicht der Fall. Der Grund liegt in der Materialzusammensetzung: dieser Keramikverbundwerkstoff ist nicht-homogen elektrisch leitend und seine Körner besitzen unterschiedliche Größen. Diese Tatsache hat eine erhebliche Auswirkung auf die Oberflächenqualität.



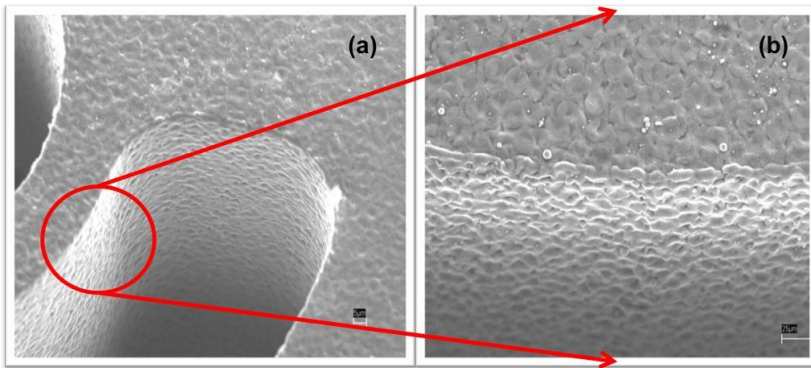


Abbildung 6.3: REM-Aufnahmen einer Düse, gefertigt aus gehärtetem Stahl durch Mikro-EDM-Fräsen. (a) Querschnitt der Düse; (b) Vergrößerung der Innenseite des Düsenhohlraums.

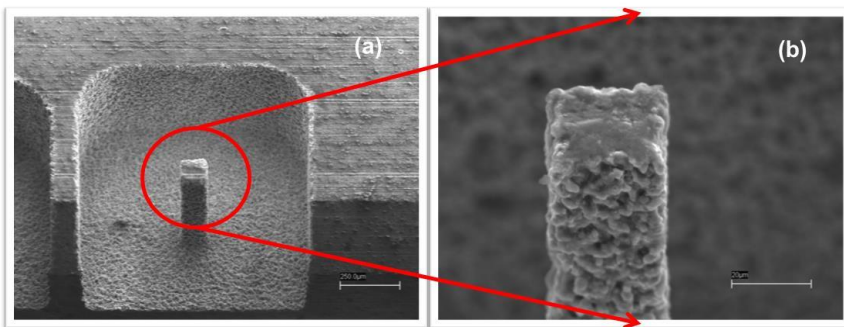


Abbildung 6.4: REM-Aufnahmen einer Säule, gefertigt aus Keramikverbundwerkstoff ( $\text{Si}_3\text{N}_4$  –TiN) durch Mikro-EDM-Fräsen. (a) Säule gefertigt in einem Hohlraum; (b) Vergrößerung der Säule.

Um die Auswirkungen der Prozessparameter auf die Bearbeitungsleistung und die Oberflächenqualität zu analysieren, müssen oft Experimente durchgeführt werden. Sobald die Materialien und Eigenschaften festgelegt wurden, werden Versuche mit unterschiedlichen Prozessparameterwerten durchgeführt, um zu einer Bewertung der Bearbeitungsleistung zu gelangen. Die Ergebnisse werden anschließend analysiert und unter Anwendung verschiedener Ansätze bearbeitet. YU Z. et al. [8] präsentieren die Ergebnisse der Experimente im Zusammenhang mit dem Mikro-EDM-Fräsen von Schlitzen. Die Autoren berichten, dass MRR, TWR, Oberflächenrauigkeit und Entladungsspalt durch eine Auswahl der Prozessparameter beeinflusst werden, wie Spannung, Mikro-EDM-Generator-Kapazität. Unterschiedliche Experimente wurden auch von PELLICER N. et al. vorgeschlagen [9]. Die Studie wurde unter Verwendung eines künstlichen neuronalen

Netzes und Regressionsmodellen durchgeführt, um die Mikro-Maß- und Formgenauigkeiten zu bewerten. In dieser Arbeit wurden Impulsstrom, Leerlaufspannung, Ton und Toff variiert. Das Werkstück bestand aus H13-Stahl; unterschiedlich geformte Kupferelektroden wurden verwendet.

In den folgenden Abschnitten finden Sie einige Beispiele zum Stand der Technik; dabei werden unterschiedliche Ansätze zur Durchführung von Mikro-EDM-Experimenten beschrieben. Die Wahl zwischen dem einen oder dem anderen Ansatz wird in der Regel davon abhängig gemacht, an welchen speziellen Aspekten des Mikro-EDM-Prozesses man mehr Interesse hat, z.B. Materialabtrag und Optimierung der Oberflächengenauigkeit, Reduzierung des Werkzeugverschleißes, Verhalten der Mikro-EDM-Dynamik und so weiter.

### **6.3.1 Optimierung des Mikro-EDM-FräSENS über Design of Experiment (DoE)**

Die Optimierung des Mikro-EDM-Fräsvorgangs in Bezug auf MRR und TWR, Ra und Tiefenfehler wurde von MODICA F. et al. durchgeführt [10]. Das Werkstück bestand aus gehärtetem Stahl. Ein zylindrischer Stab aus Wolframcarbid (WC) mit einem Nenndurchmesser von 0,4 mm negativer Polarität wurde als Werkzeug gewählt. Das Werkzeug und das Werkstück werden ständig in ein dielektrisches Bad aus Kohlenwasserstofföl getaucht, das die Spülung während der Bearbeitung gewährleistet. Die Struktur, die für den Optimierungsprozess ausgewählt wurde, war ein Mikrokanal, 5,5 mm lang, 0,42 mm breit und 0,05 mm tief. Das Schlichten, das einer niedrigen Entladungsenergie entspricht, wurde gewählt, um eine geringe Oberflächenrauigkeit zu gewährleisten. Folgende Prozessparameter wurden für die Prozessoptimierung in Betracht gezogen:

Impulsbreite  $W$ , Leerlaufspannung  $V$  und die Frequenz  $F$ , die jeweils zwischen zwei Werten variiert wurden. Insbesondere:  $W = 1 - 4 \mu\text{s}$ ,  $V = 100 - 140 \text{ V}$ ,  $F = 120 - 200 \text{ kHz}$ . Der Versuchsplan wurde dann unter Verwendung eines Design of Experiment (DoE) umgesetzt [11, 12].

Das DoE bietet eine Reihe von Versuchen, die nach der Anzahl der Prozessparameter und deren Variation durchgeführt werden: in diesem Fall wurde ein vollfaktorieller Plan ausgewählt unter Berücksichtigung von drei Prozessparametern, die sich jeweils zwischen zwei Werten bewegen. Jeder Versuch wird eine bestimmte Anzahl von Malen repliziert (3 im vorliegenden Fall), so dass insgesamt 48 Experimente durchgeführt werden. Am Ende der Versuche werden alle Qualitätsindexwerte aus jedem Versuch mit Hilfe statistischer Methoden (zum Beispiel ANOVA, Varianzanalyse) bearbeitet. In dieser Fallstudie wurden die folgenden Ergebnisse erhalten (siehe Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1: MRR, TWR, Ra Minimal- und Maximalwerte aus den drei Replikationen

Qualitätsindex	Min-Max-Werte
MRR (mm <sup>3</sup> /min)	0,0161-0,0165
TWR	0,1954-0,1981
Ra (µm)	0,12-0,15
Tiefenfehler (µm)	0,1-1,6
Qualitätsindex	Min-Max-Werte
MRR (mm <sup>3</sup> /min)	0,0161-0,0165
TWR	0,1954-0,1981
Ra (µm)	0,12-0,15
Tiefenfehler (µm)	0,1-1,6

Die Ergebnisse können verwendet werden, um die Auswirkungen zu bestimmen, welche durch die Variation der Prozessparameter auf die Qualitätsindizes verursacht werden, und auch um zu bestimmen, welcher Parameter mehr Einfluss auf die Bearbeitungsleistung in Relation zu den anderen Parametern hat. Die Optimierung ist abgeschlossen, wenn spezifische statistische Indikatoren die Prozessparameterkombination identifizieren, die den höchsten Wert für MRR und die niedrigsten Werte für TWR, Ra und Tiefenfehler ergeben [11].

### 6.3.2 Überwachung zur Bewertung der Mikro-EDM-Performance

Neuere Arbeiten nutzen die Mikro-EDM Überwachung der Entladungsspannung und der Stromwellenformen während der Experimente, um detailliertere Messungen und Informationen über das Materialabtragsverfahren und die Bearbeitungsleistung zu erhalten. Während der Prozessüberwachung kann eine Strategie zur Impulsdiskriminierung umgesetzt werden, um Spannungs- und Stromwellenformen in verschiedene Kategorien einzuteilen. Die Impulsdefinition basiert auf Überlegungen, welche die erfassten Impulse als gut oder schädlich für den Prozess einschätzen. Eine umfassende Studie über Mikro-EDM-Überwachung und Implementierung eines Pulstyp-Diskriminierungssystems wurde von LIAO et al. [13] vorgeschlagen. Die vorgestellte Klassifizierung der Impulse ist in der Lage, Entladungsspannung und Stromwellenformen in „normal“, „effektiver Lichtbogen“, „vorübergehender Kurzschluss“ und „komplex“ zu unterscheiden. Normale Impulse gelten als gut, da sie vom Mikro-EDM-Generator gesteuert werden und durch die maximal erreichbare Energie für einen Funken gekennzeichnet werden. Die anderen Kategorien hängen nicht vom Mikro-EDM-Generator ab, sondern von der zufälligen Natur des Verfahrens sowie örtlicher Gegebenheiten, welche die Funkenbildung fördern, so dass diese Art von Impulsen zufällig und gelegentlich auftreten kann und sich letztendlich auf

die Bearbeitungsleistung auswirken. Die Auswahl des Impulstyps [13] wird durch Setzen von Spannungsschwellen unter Berücksichtigung der Pulsdauer erreicht. Einige Experimente, die während des Mikro-Draht-EDM- und des Mikro-EDM-Fräsverfahrens an einem Stahlwerkstück durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass normale Impulse am häufigsten auftreten. Allerdings neigt die impulsartige Verteilung zu Schwankungen, wenn beispielsweise die Strukturtiefe erhöht wird, da komplexe Impulstypen beginnen, den Prozess zu beeinflussen.

Eine Strategie zur Impulsdiskriminierung für die Mikro-EDM von Mikrolöchern in einer Stahllegierung mit rotierender Elektrode wurde von S. H. YEO et al. [14] für die Entwicklung eines adaptiven Servosteuersystems durch Überwachung der Gap-Spannung und der Stromsignale vorgestellt. Der Impulstyp wird in einer etwas anderen Art und Weise als im vorhergehenden Fall klassifiziert: normal, verzögert, Lichtbogen und kurz. Die Impulsidentifizierung wurde durch Festlegung spezifischer Stromschwellen durchgeführt, deren Werte abhängig sind von der Beobachtung des Impulstyps. Die Studie und die Ergebnisse der Analyse des Impulstyps erlauben den Autoren die richtige Elektrodenbewegungsrichtung zu bestimmen und dementsprechend eine Anpassung der Elektrodenvorschubgeschwindigkeit zu entwickeln.

Die Impulstyp-Verteilung beim Mikro-EDM-Fräsen bei der Herstellung von Mikrokanälen in gehärtetem Stahl wurde von F. MODICA et al. [15] untersucht. Die impulsartige Verteilung, die in Bezug auf die Bearbeitungsleistung analysiert wurde, zeigt, dass die Prozessstabilität im Allgemeinen durch eine höhere Anzahl von Lichtbögen gekennzeichnet ist und dass die Lichtbogenbildung streng abhängig ist vom Funkenspalt, von der Erosionsgeschwindigkeit und der Schwankung der Vorschubgeschwindigkeit. Außerdem führt eine höhere Anzahl von Lichtbögen zu einer Zunahme des Werkzeugverschleißes (TWR); andererseits liefert die Materialabtragsrate (MRR) keine weiteren Informationen über den Erosionsprozess und dessen Optimierung in Bezug auf die Impulsklassifizierung.

Eine ähnliche Analyse eines Werkstücks aus einer  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -TiN-Keramiklegierung wird in MARROCCO et al. [16] beschrieben, wobei Parameter wie Frequenz, Pulsbreite und Spalt variiert werden. Ein Design of Experiment (DoE) wurde durchgeführt, um die Beziehung, die zwischen Prozessparametern, Bearbeitungsleistung (MRR, TWR und Oberflächenrauigkeit  $R_a$ ) und Impulstyp-Verteilung besteht, statistisch zu analysieren. In dieser Studie spielt das Werkstückmaterial eine entscheidende Rolle, da unerwartete Ergebnisse erhalten wurden: Pulstypen, die während eines Mikro-EDM-Fräsverfahrens allgemein als potentiell schädlich und unerwünscht angesehen werden, scheinen keine nachteiligen Auswirkungen zu haben und die MRR sogar zu unterstützen.

### 6.3.3 Werkzeugverschleiß und Werkzeugbahn: Wie man Oberflächen- und Profilgenauigkeit in Mikro-EDM-Strukturen erhält

Der Schlüssel zur Erzielung einer guten Oberflächen- und Maßgenauigkeit der bearbeiteten Strukturen ist die Steuerung und Reduzierung einiger Fehlerquellen. Die häufigsten Fehlerquellen in der Mikro-EDM sind:

- Die Positionierung des Werkzeugs und des Werkstücks, die auch die Wiederholgenauigkeit des Prozesses und der Messungen beeinflusst
- Abrichten von Werkzeugen; dazu gehören auch Temperaturstabilitätsfehler, Schwankungen infolge von Funkenspalten, Haltevorrichtungen
- Werkzeugauslauf, verursacht durch die Drehung des Werkzeugs; dieser Fehler beeinflusst den effektiven Wert des Werkzeugdurchmessers und damit die Genauigkeit der endgültigen Strukturen
- Werkzeugverschleiß: Die Schmelz- und Verdampfungsmechanismen führen zu einer Veränderung der Werkzeugform; dadurch schwankt der Werkzeugquerschnitt und die Arbeitslänge während der Bearbeitung.

Der Werkzeugverschleiß hat die besondere Aufmerksamkeit der Forschergemeinde geweckt; er gilt als eines der wichtigsten Themen im Mikro-EDM-Prozess. Während der Bearbeitung wird das Elektrodenwerkzeug abgenutzt, so dass sich seine Länge und sein Querschnitt verändern; folglich sind die tatsächliche Tiefe und Dimension der Strukturen weit davon entfernt, dem Design ähnlich zu sein. Strategien zur Kompensation des Werkzeugverschleißes sind erforderlich, um dieses Problem zu überwinden. Das gleichmäßige Abnutzungsverfahren (UWM) [17, 18], ist die beliebteste Methode der Verschleißkompensation. Da das UWM entsprechend einer Schicht-für-Schicht Bearbeitungsstrategie arbeitet, kann diese Strategie nur auf das Mikro EDM-Fräsen angewendet werden. Die Verwendung dünner Schichten wird empfohlen, um die Erosionsstabilität zu gewährleisten und eine gute Wirkung auf die Spülbedingung zu haben. UWM basiert auf einigen Annahmen: der Werkzeugquerschnitt unterliegt einem konstanten Verschleiß; dabei bleibt seine ursprüngliche Form erhalten und die Seitenerosion der Elektrode ist vernachlässigbar. Daher erfährt das Werkzeug während des Prozesses nur eine Verkürzung. Zu diesem Zweck wird entlang der Z-Achse (vertikale Richtung) eine Werkzeugzuführung vorgesehen und nach der Schätzung der abgenutzten Länge bestimmt. Diese Werkzeugzuführung zur Kompensation findet in Relation zur spezifischen Werkzeugbahn statt; dadurch soll der konstante Werkzeugquerschnitt während des Verschleißprozesses erhalten bleiben. Typischerweise wird der Verschleiß der Werkzeuglänge durch ein elektrisches Control-Touch-Verfahren abgeschätzt [19, 20]: Werkzeug und Werkstück werden bei jedem Schritt

kurzgeschlossen und die Differenz zwischen den vorherigen und den aktuellen Längenwerten ergibt dann den Verbrauch der Werkzeuglänge. Dieses Verfahren wird häufig verwendet, da die Messungen direkt während der Bearbeitung durchgeführt werden können. Dennoch zeigen verschiedene experimentelle Analysen, dass trotz Verwendung solcher kompensationsbasierten Strategien, die endgültig bearbeiteten Mikrostrukturen, aufgrund des Werkzeugverschleißes und der Komplexität der geometrischen Struktur, immer noch unter einer bemerkenswerten geometrischen Ungenauigkeit leiden. Daher werden in der Literatur alternative Lösungen vorgeschlagen unter Berücksichtigung der Rolle einer ordnungsgemäßen Implementierung der Werkzeugbahn. J. NARASIMHAN et al. (2005) [21] beschrieben ein theoretisches Modell, bei dem UWM für bestimmte Werkzeugbahnen kombiniert wird, um ein gewünschtes Oberflächenprofil des Werkstücks zu erzeugen; dadurch eignet sich die Kompensation des Werkzeugverschleißes für die Mikro-EDM von 3D-Mikrohohlräumen. DIMOV et al. [22] modifizierten das CAM-System, indem sie die Variation der Schichtdicke während der Kompensation des Werkzeugverschleißes berücksichtigten. ZHAO et al. [23] entwickelten ein neuartiges CAD/CAM-System auf der Basis einer Slicing-Strategie, die darauf ausgerichtet ist, Überbleibsel zu reduzieren und eine glatte Profilgenauigkeit der Oberfläche zu erreichen. Zhao et al., POPOV und PEKTOV [24] implementierten und verifizierten experimentell ein Verfahren, das einen Schichtbasierten Werkzeugbahn-Generator umfasst, der Slicing und Winkeländerungen für jede Schicht berücksichtigt, um so die Oberflächenqualität und Kantenschärfe zu optimieren. NGUYEN et al. [25] schlugen geometrische Modelle vor, die in der Lage sind, die durch Schwankungen des Eckenradius herbeigeführten Effekte, die durch Werkzeugverschleiß verursacht werden, zu simulieren und zu kompensieren.

Eine wirksame Kompensationsstrategie erfordert eine zuverlässige Schätzung des Werkzeugverschleißes; da die Materialmengen, die am Werkzeugverschleiß beteiligt sind, sehr klein und schwierig zu messen sind, wurden alternative Ansätze und Methoden vorgeschlagen. Zum Beispiel beschreiben YAN et al. [26] eine optische Messung des Werkzeugverschleißes; Front- und Eckenverschleiß des Werkzeugs werden gemessen und in direkter Weise auf einem Bildverarbeitungssystem bewertet. Das von den Autoren vorgeschlagene Kompensationsverfahren für den Elektrodenverschleiß basiert auf der direkten Messung des Frontverschleißes unter Verwendung der Bildverarbeitungstechnik. Die experimentellen Untersuchungen zeigen auch eine Verbesserung der Bearbeitungszeit beim Schicht-für-Schicht-EDM-Fräsen. ALIGIRI et al. [27] schlugen eine Echtzeit-Schätzfunktion für das Materialabtragsvolumen für das Mikro-EDM-Bohren von Mikrolöchern unterschiedlicher Tiefe vor, die aus verschiedenen Materialien (Edelstahl, Titan und Nickel-Legierung) gefertigt wurden. Die Strategie dient zur Kompensation der Werkzeuglänge nach der Abschätzung des Materialabtragsvolumens; dazu wird ein Verfahren eingesetzt, das auf dem theoretischen elektrothermischen Modell, der Anzahl der Entladungsimpulse und einem Impuls-Diskriminierungssystem basiert. Die Überwachung der Entladungsimpulse und ihre Analyse und Diskriminierung wurden von mehreren Autoren

(WANG et al. [28]) für eine genauere Abschätzung und Kompensation des Werkzeugverschleißes genutzt. Die Erfassung und Zählung der Impulsentladungen während des Mikro-EDM-FräSENS wurden von BISSACCO, et al. [29] vorgeschlagen; dabei werden mehrere Energieniveaus, unterschiedliche Bearbeitungsarten (Shape-up und Flat-head), verschiedene Bearbeitungsbedingungen (Spindeldrehung und Vibration der Werkzeugelektrode) berücksichtigt (MAHARDIKA und MITSUI [30]).

### **6.3.4 Hohlräume mit hohen Seitenverhältnissen: Die Rolle des Werkzeugverschleißes und der dielektrischen Spülung**

Die Herstellung von Mikrostrukturen mit hohem Seitenverhältnis stellt für die Mikrofertigung nach wie vor eine Herausforderung dar. Mikro-EDM-Bohr- und Fräsverfahren können die technologischen Grenzen herkömmlicher Top-down-Ansätze überwinden. Die einfachsten Strukturen mit hohem Seitenverhältnis sind Mikrolöcher und Mikrokanäle. Mikrolöcher werden häufig durch eine Verjüngung beeinträchtigt, die auf Werkzeugverschleiß und Verunreinigungen zurückzuführen ist, die durch dielektrische Spülung nicht ausreichend entfernt werden. Die umfangreiche experimentelle Analyse in Bezug auf das Mikro-EDM-Bohren, die von WANG et al [28] durchgeführt wurde, untersuchte die Beziehung zwischen der Genauigkeit in Abhängigkeit von der Tiefe der Mikrolöcher. Die Autoren konzentrierten sich auf die schwierige Beseitigung der Verunreinigungen, die in erster Linie für den Werkzeugverschleiß und das Auftreten mehrfacher Entladungen in bestimmten Tiefen verantwortlich sind. Wie bereits erwähnt, fördert die lokale Schmutzkonzentration die Lichtbogenbildung, so dass mehrere unvorhersehbare und unerwünschte Entladungen aufgrund günstiger Bedingungen für die Funkenzündung stattfinden können. Da die Lichtbogenbildung nicht kontrolliert werden kann, führt ein solches Ereignis zu einem instabilen Erosionsprozess, höherem Werkzeugverschleiß und Ungenauigkeiten im Erosionsprozess. Da die dielektrische Spülung zu versagen scheint, wenn das Werkzeug in erheblichen Tiefen arbeitet, kann die Schmutzentfernung dann durch Anwendung anderer Methoden unterstützt werden. Zum Beispiel kann eine Ultraschallvibrationsmaschine (USM) [31,32] eingesetzt werden, um die Sekundärentladungen und den Werkzeugverschleiß zu reduzieren. Auch die Veränderung der Kapazitätswerte, die verwendet werden, während sich das Werkzeug dem Ausgang des Lochs nähert, kann die Produktion gerader Mikrolöcher ermöglichen.

Das Mikro-EDM-FräSEN von Mikroschlitzten mit hohem Seitenverhältnis wurde von KARTHIKEJAN et al. [33] und PURANIK und JOSHI [34] beschrieben. Die experimentellen Untersuchungen zeigten die große Abhängigkeit der Materialabtragrate und des Werkzeugverschleißes von einigen elektrischen Parametern (Energie, Vorschubgeschwindigkeit, Werkzeuggeschwindigkeit) und den Seitenverhältniswerten, die eine weniger optimierte Leistung anzeigen, da diese geometrischen Parameter hoch sind ( $> 1,5$ ). In einer

kürzlich erschienenen Arbeit haben MODICA, F. et al [35] die Rolle des Füllfaktors (FF-Verhältnis zwischen Elektrodenquerschnittsfläche und Hohlraum-Querschnittsfläche) beim Mikro-EDM-Fräsen von Hohlräumen mit hohem Seitenverhältnis untersucht. Die Auswertung von MRR und TWR, zusammen mit der Wirkung des Werkzeugverschleiß-Kompensationsfaktors und der Erosionszeit, zeigte, dass die Bearbeitungsleistung sich nicht nur verschlechtert, wenn der Seitenverhältniswert hoch ist, sondern dass sie auch vom Füllfaktor abhängt. Die kombinierte Wirkung aus Füllfaktor und Seitenverhältnis beeinflusst die dielektrische Spülung und die Schmutzentfernung. Daher kann die Bearbeitung sehr großer Hohlräume zu einer guten Stabilität und Leistung führen. Unerwarteter Weise zeigte die Produktion kleinerer Hohlräume gute MRR- und TWR-Werte, trotz des anfänglichen und permanent kritischen Zustands (ein kleiner Hohlraum mit großer Tiefe bedeutet, dass das Spülen schwierig ist und der Prozess durch mehrfache Entladungen beeinträchtigt wird). Hingegen zeigt der dazwischenliegende Fall (Hohlraum mit mittlerem Füllfaktor) dramatische Veränderungen, da das Seitenverhältnis hoch ist (d.h. wenn die Bearbeitungstiefe erhöht wird); dies wird den Veränderungen der Spülbedingungen sowie dem Auftreten mehrfacher Entladungen im letzten Teil der Bearbeitung zugeschrieben.

### 6.3.5 Materialien und Auswirkungen auf den Mikro-EDM-Prozess

Der Mikro-EDM-Prozess verlangt, dass die Materialien, die als Elektroden dienen, eine gute elektrische Leitfähigkeit aufweisen müssen; aus diesem Grund werden dafür vorwiegend Metalle verwendet. Allerdings werden für bestimmte Anwendungen in aggressiven Umgebungen, in medizinischen Bereichen sowie der Luftfahrt andere Materialien eingesetzt, beispielsweise Keramik. Diese Materialien weisen ausgezeichnete mechanische Eigenschaften auf, wie hohe Härte, hohe Druckfestigkeit, chemische Beständigkeit und Abtragsfestigkeit. Allerdings ist Keramik ein Halbleiter, d.h. EDM kann für die Bearbeitung nicht ohne Weiteres eingesetzt werden, da der niedrige elektrische Widerstand eine einschränkende Bedingung darstellt. Daher muss eine zusätzliche elektrisch leitfähige Phase hinzugefügt werden, um keramische Verbundwerkstoffe zu erzeugen und diese Einschränkung zu überwinden (KÖNIG, et al. [36]).

Der elektrische Widerstand des gesinterten SiC ( $0,05 \Omega\text{m}$ ) und  $\text{B}_4\text{C}$  ( $0,01 \Omega\text{m}$ ) ist gerade leitfähig genug, um eine EDM-Bearbeitung zu ermöglichen. In der Praxis ist jedoch das Senkerodieren aufgrund der schwierigen Spül- und Kühlbedingungen sehr schwierig (LUIS et al. [37]). Siliciumcarbid (SiC) ist ein extrem hartes und schwierig zu bearbeitendes keramisches Material. Da jedoch dieses Material aufgrund seiner hervorragenden mechanischen Eigenschaften sowie seiner Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit auch bei höheren Temperaturen in der Industrie häufig eingesetzt wird, wird freies Si in der Regel in SiC infiltriert, um die Leitfähigkeit der Matrix zu verbessern und den EDM-Prozess zu erleichtern. CLIJSTERS et al. [38], entwickelten eine Senkerodier-



Technologie zur Herstellung von Komponenten in einem kommerziell erhältlichen Silizium-infiltrierten Siliziumcarbid (SiSiC) und untersuchten die Einflüsse der wichtigen elektrischen Parameter für den EDM-Betrieb auf MRR, TWR und Ra. Entladungsimpulse, die eine geringere Energiezufuhr haben, werden auch zur Verbesserung der Oberflächenqualität in Betracht gezogen.

Die zweite elektrisch leitfähige Phase erlaubt alle Arten der Mikro-EDM-Bearbeitung: TiN wird am häufigsten verwendet und dies ergibt  $ZrO_2$ -TiN,  $Si_3N_4$ -TiN,  $B_4C$ -TiB<sub>2</sub> (LAUWERS et al. [39]).

Experimente an SiC,  $B_4C$  und  $Si_3N_4$ -TiN, bei denen sowohl Senkerodieren und EDM-Fräsen eingesetzt sind, werden von LAUWERS et al. [40] beschrieben; sie zeigen, dass insbesondere für keramische Materialien mit geringer elektrischer Leitfähigkeit (SiC,  $B_4C$ ) die Fräsleistung in Bezug auf MRR und Oberflächenqualität wesentlich besser ist. Andererseits scheint das Senkerodieren für  $Si_3N_4$ -TiN, das eine relativ hohe Leitfähigkeit aufweist, eine schnellere Technik zu sein, als das EDM-Fräsen, wenn größere Hohlräume zu realisieren sind; allerdings ist die Oberflächenqualität deutlich schlechter.

Andere Experimente (LIU et al, 2003 [41]) zeigen, dass  $Si_3N_4$ -TiN-Verbundwerkstoffe mit einem höheren Gehalt an TiN, das eine höhere elektrische Leitfähigkeit aufweist, zu einer höheren MRR führt, wenn sie durch EDM bearbeitet werden. Wenn Mikro-EDM zur Bearbeitung von  $Si_3N_4$ -TiN-Verbundwerkstoffen verwendet wird, ist die richtige Auswahl der Prozessparameter wichtig, um einen stabilen Prozess zu erhalten. Liu et al. (2010, [42]) nutzten die Überwachung der Entladungsimpulse, um einen Zusammenhang zwischen Wellenformen und Prozessparametern zu identifizieren und optimierte Einstellungen für unterschiedliche Bedingungen für die Bearbeitung eines keramischen Verbundwerkstoffes ( $Si_3N_4$ -TiN) zu erreichen. Die Autoren berichten über einige interessante Ergebnisse bezüglich der Bearbeitungsleistung von  $Si_3N_4$ -TiN-Verbundwerkstoffen. Die Untersuchung der Verhaltenswirkung bei Verwendung unterschiedlicher Spannungen und Stromstärken (zum Schruppen, Vorschlichten und Schlichten) führt zur Definition der optimalen elektrischen Parameter. Darüber hinaus gleichen die Bearbeitungseigenschaften dieser keramischen Verbundwerkstoffe denen des rostfreien Stahls. Liu et al. [43], weisen darauf hin, dass die Erhöhung einiger Parameter, wie Spannung und Strom, sich positiv auf MRR und TWR auswirken; außerdem scheint die Spülung unter Verwendung eines Kohlenwasserstofföls geeigneter zu sein, um eine bessere Leistung in Bezug auf die Oberflächenrauigkeit zu erzielen, da es die immanente Zersetzung des Materials verringert.

## 6.4 Anwendungen

### 6.4.1 Geradverzahnte Mikro-Kegelradgetriebe

Ein Beispiel für ein Produkt, das durch Mikro-EDM-Fräsen hergestellt wird, ist das unten dargestellte geradverzahnte Mikro-Kegelradgetriebe. Die Bauteilabmessungen sind in Abbildung 6.5 dargestellt.

Dieses Mikrogetriebe wurde konzipiert für die filmische Komponente eines Roboterarms, der in der endoskopischen Chirurgie eingesetzt wird. Aufgrund der Anwendung im medizinischen Bereich wird als Material für die Realisierung des Bauteils Titan vorgeschlagen, das sich durch hohe Widerstandsfähigkeit, Leichtigkeit und Bioverträglichkeit auszeichnet. Üblicherweise werden Kegelmikrozahnräder mit einer Drahterodiermaschine hergestellt, die Maßgenauigkeit und feine Oberflächenqualität bei einer relativ kurzen Bearbeitungszeit liefert. Für diese Komponente ist der Einsatz einer Drahterodiermaschine aufgrund des Winkels des Primitivkegels ( $\delta = 100,94$  Grad) jedoch nicht geeignet, da dieser den Einsatz von Draht als Elektrodenwerkzeug verhindert. In diesem Fall ist das Mikro-EDM-Fräsen der geeignetste Ansatz für die Herstellung der Zahnradzähne, da man damit die Mikrostruktur unter Verwendung eines zylindrischen Mikrowerkzeugs mit reduziertem Durchmesser erreichen kann. Die Durchmesserreduzierung wird durch Drahterodieren durchgeführt.

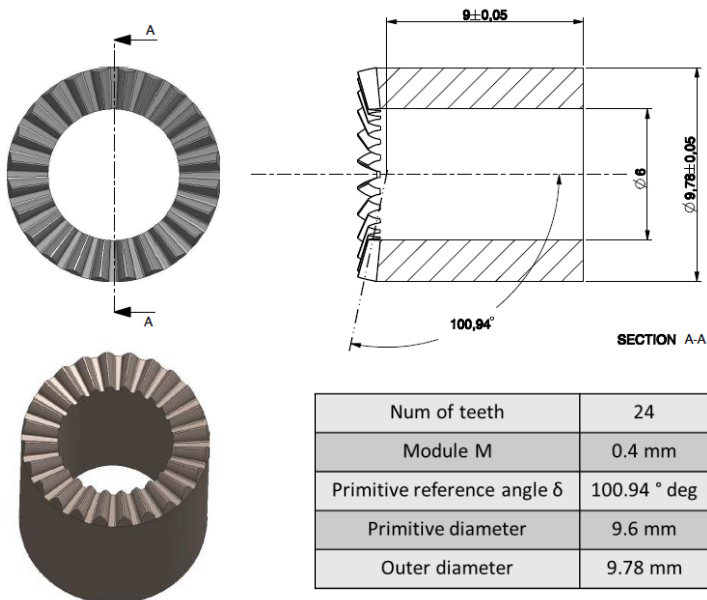


Abbildung 6.5: Geradverzahnte Mikro-Kegelradgetriebe: Design und Abmessungen

Ausgehend von einem zylindrischen Werkstück und einem ausreichenden Aufmaß, erhält man jeden Zahn des Zahnrads durch Erodieren der Hohlräume nach zwei Operationen (siehe Abbildung 6.6).

In der ersten Operation wird ein Elektrodenwerkzeug, hergestellt aus WC, mit einem Durchmesser von 0,4 mm verwendet. Der Abstand von Zahn zu Zahn ist dabei höher als der Werkzeugdurchmesser. Das eingesetzte Energieniveau ist das gleiche wie beim Semi-Schruppen-Verfahren. Da das Mikro-EDM-Fräsen unter Verwendung einer Schicht-für-Schicht-Strategie umgesetzt wird, wird eine Schichtdicke von 0,002 mm gewählt um eine glatte Oberfläche zu erhalten und stufenartige Effekte zu vermeiden. Unter Berücksichtigung des Werkzeugdurchmessers wird der Erosionsprozess durchgeführt, bis eine Hohlraumtiefe von 0,71 mm erreicht ist.

Die zweite Operation erfordert die Verwendung eines kleineren WC-Elektrodenwerkzeugs mit einem Durchmesser von 0,15 mm zur Bearbeitung des engeren Hohlraumbodens und des Abrundungsradius am Zahnfuß. Das in diesem Bearbeitungsschritt verwendete Funkenenergieniveau entspricht dem einer Schlichten-Operation. Die Schichtdicke ist gleich 0,0012 mm. Diese Operation beginnt durch Erodieren des Hohlraums, beginnend mit einer Tiefe von 0,71 mm und wird fortgesetzt, bis das endgültige Zahnprofil bei einer Tiefe von 1,032 mm abgeschlossen ist.

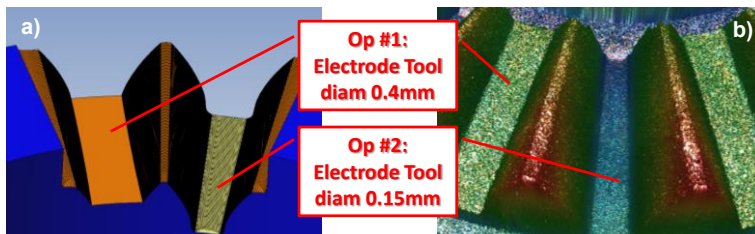


Abbildung 6.6: Zwei Operationen mit zwei Bearbeitungsparametern und Elektrodenwerkzeuggrößen wurden für die Bearbeitung der Zähne eingesetzt: (a) Simulation, (b) Bild der bearbeiteten Hohlräume eines geradzahnten Mikro-Kegelradgetriebes, aufgenommen mit einem Konfokalmikroskop.

Tabelle 6.2 gibt einen Überblick über die wichtigsten Parameter für beide Operationen und ihrer Leistung in Bezug auf MRR und Bearbeitungszeiten.

Tabelle 6.2: Wichtigste Parameter für die beiden Mikro EDM-Operationen und die entsprechende MRR und Bearbeitungszeit.

Op. N.	Werkzeug-durchmesser	Funkenenergie-Regime	Schichtdicke	MRR	Bearb.-zeit
#	[mm]	-	[mm]	[mm <sup>3</sup> /min]	[min]
1	0,4	Semi-Schruppen	0,0020	0,043	48
2	0,15	Schlichten	0,0012	0,006	66

Nach der ersten Operation wird eine höhere Materialabtragrate (MRR) aufgezeichnet, da mehr Material in weniger Zeit abgetragen wird. Die zweite Operation, die mit einem Werkzeug mit 0,15 mm Durchmesser ausgeführt wird, erzeugt einen kleineren MRR-Wert, da die Bearbeitungszeit für diesen letzten Schritt höher ist. Da beide Operationen mit zwei unterschiedlichen Bearbeitungsmethoden durchgeführt werden, sind unterschiedliche Oberflächenqualitäten zu erwarten:  $R_a = 0,9 \mu\text{m}$  für das Semi-Schruppen bzw.  $R_a = 0,6 \mu\text{m}$  für das Schlichten. Der minimale Unterschied in der Oberflächenqualität wurde vom Endbenutzer als akzeptabel bewertet. Die Bearbeitungszeit für die Herstellung eines einzigen Hohlraums beträgt bis zu 114 Minuten; für 24 Hohlräume zur Herstellung von 24 Zähnen beträgt die Gesamtbearbeitungszeit für das Getriebe 2436 Minuten, d.h. 46 Stunden.

### 6.4.2 Maßgeschneiderte interne Fixationsvorrichtungen für die orthopädische Chirurgie

Die Mikro-EDM kann erfolgreich zur Herstellung maßgeschneiderter orthopädischer Implantate, wie interne Mini-Fixationsvorrichtungen, eingesetzt werden. Diese Vorrichtungen werden routinemäßig weltweit zur Fixierung von Knochenbrüchen und Pseudarthrosen eingesetzt, da sie die Kraftübertragung von einem Ende des Knochens zum anderen ermöglichen; dabei wird der Bereich der Frakturen umgangen und somit geschützt. Mini-Fixationen halten die Bruchenden zusammen und gewährleisten die korrekte Ausrichtung zwischen den Fragmenten während des gesamten Heilungsprozesses. Da die Anatomie jedes Menschen einzigartig ist, kann eine maßgeschneiderte Fixationsplatte effektiver sein, als eine Standardplatte. Ihre Vorteile sind Verringerung der invasiven Chirurgie, Auswahl des am besten geeigneten biomechanischen Prinzips für jeden spezifischen Fall, sowie erhöhter Komfort für den Patienten. Gemeinsame Merkmale und Funktionalität dieser Komponenten sind:

- Zweieinhalb-dimensionale Form: auch wenn einige Komponenten eine oder mehrere Krümmungen aufweisen, kann man eine Kontur erhalten, ausgehend von einer entsprechend gebogenen Platte, als ob die Platte flach wäre. Zusätzliche Kurven können auch nach der Herstellung erhalten werden, wie sie in einigen chirurgischen Anwendungen beschrieben wird.
- Bohrungen für die temporäre und permanente Fixierung der Vorrichtung: Da Knochen und Frakturen alle einzigartig sind, erfordert die Chirurgie Flexibilität bei der Wahl und Anpassung der Position der Vorrichtung. Einige Löcher werden für die temporäre Fixierung der Vorrichtung verwendet, so dass die korrekte Knochenbohrung für die permanenten Befestigungsschrauben verwendet werden kann. Außerdem besitzen einige Löcher ein kugelförmiges Gehäuse an ihrer Oberseite zur Einstellung der Schraubenausrichtung ( $\pm 10$  Grad), um eine bessere Anpassung des Implantats zu ermöglichen (Abbildung 6.7).
- Bohrungen zur Unterstützung bei der Montagephase während des chirurgischen Eingriffs und zur Gewichtsentlastung der Vorrichtung.
- Dicke und Gesamtabmessungen der Vorrichtung können je nach Größe der Knochen und der Fraktur variieren. Im Allgemeinen kann die Dicke im Bereich zwischen 1 mm und 3 mm liegen; folglich können der Schraubendurchmesser und die Lochgrößen unterschiedlich sein.
- Knochenplatten werden aus einer Vielzahl von Materialien hergestellt, hauptsächlich jedoch aus rostfreiem Stahl (ASTM F-55 und -56), Kobalt-Chrom-Wolfram-Nickel-Legierung (ASTM F-90), Reintitan und einer seiner Legierungen (ASTM F-136). In letzter Zeit wurden neue Materialien, wie Keramik-Verbundwerkstoffe oder Technopolymere entwickelt.

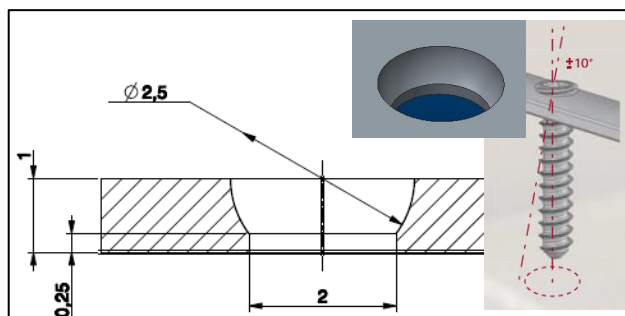


Abbildung 6.7: Kugelgehäuse für die Orientierungseinstellung der Schraube (Abmessungen in mm).

Mit geeigneter Mikro-EDM-Ausrüstung kann diese Technologie auch die Einschränkungen, die durch die Krankenhausumgebung auferlegt werden, überwinden. Unter Berücksichtigung der spezifischen Mikrostruktur, die bearbeitet werden soll, kann man den besten Ansatz für die Mikro-EDM, oder eine Kombination daraus, wählen, der am besten für die Anforderungen der endgültigen Vorrichtung und Bearbeitungsleistung passt.

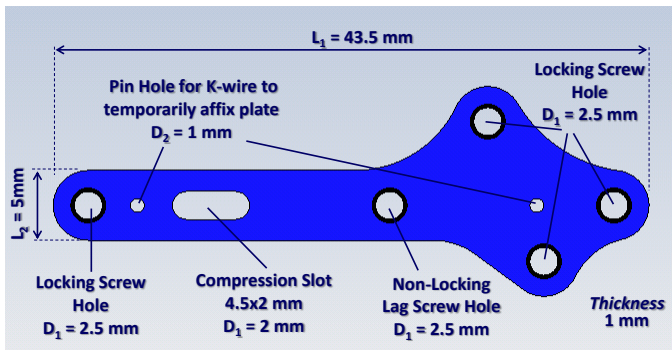


Abbildung 6.8: Testfall, Fixationsplatte für Frakturheilung, Osteotomie und Arthrodese im Fuß.

Ein Beispiel, vorgestellt von MODICA et al.[44], unterstreicht die Strategie, die für die Herstellung der Vorrichtung eingesetzt wird; insbesondere werden die Wahl unterschiedlicher Mikro-EDM-Verfahren, die zur Herstellung der Strukturen eingesetzt werden, sowie das Verfahren, auf dem der Herstellungsprozess basiert, erläutert. Abbildung 6.8 zeigt eine Fixationsplatte, frei inspiriert durch eine reale Komponente von Vilex ([www.vilex.com](http://www.vilex.com)); sie wird eingesetzt für die Frakturheilung, Osteotomie und Arthrodese im Fuß. Die Komponente ist aus chirurgischem Titan gefertigt. Die Platte enthält vier Löcher mit einem Durchmesser von je 2,5 mm für die dauerhafte Befestigung, ein nicht-verriegelndes Zugschraubenloch mit einem Durchmesser von 2,5 mm, zwei gerade Bohrungen mit einem Durchmesser von 1 mm für die temporäre Befestigung und einen Kompressionsschlitz (4,5 mm lang und 2 mm breit).

Sobald die Geometrie definiert ist, muss eine Strategie für die Herstellung entwickelt werden. Bearbeitungsfehler und -zeiten können durch Beachten einiger einfacher Regeln reduziert werden:

- Ausgehend von einer rechteckigen Platte mit der richtigen Dicke kann eine gerade Seite der Platte als Referenz für das Bohren der Löcher verwendet werden. Diese Referenz ermöglicht eine einfachere Neupositionierung zwischen Tisch und Z-Achse.

- Wo es möglich ist, sind Drahterodieren und das EDM-Bohrverfahren dem langsameren EDM-Fräsverfahren vorzuziehen.
- Wenn eine interne Bohrung durch Drahterodieren bearbeitet wird, müssen echte Vorlöcher gebohrt werden; daher sollte mit dem Bohrvorgang begonnen werden. Dadurch kann die geometrische Referenz für die Neupositionierung des Werkstücks eingestellt werden.

In Anbetracht der bisherigen Regeln und bei Verwendung einer Mikro-EDM-Maschine (in diesem Fall eine Sarix SX200 HP), ausgestattet mit zwei Arten von Elektrodenwerkzeugen (einer zylindrischen Stange aus WC mit einem Nenndurchmesser von 0,4 mm für die Fräsbearbeitung und einem zylindrischen Rohr aus Cu mit einem Nenndurchmesser von 0,4 mm für den Bohrvorgang), kann der Testfall gemäß den folgenden Schritten bearbeitet werden:

1. Das Werkstück wird auf die Z-Achse aufgespannt und auf das Maschinenkoordinatensystem referenziert. Das Außenprofil mit einem Umfang von 54,53 mm (Abbildung 6.9) wird durch Drahterodieren bearbeitet. Bei einer Prozessgeschwindigkeit von 1,8 mm/min beträgt die Gesamtbetriebszeit ca. 30 Minuten.



Abbildung 6.9: Profil gefertigt durch Drahterodieren.

2. Die Titanplatte wird auf den Maschinentisch gespannt, auf das Maschinenkoordinatensystem referenziert, und die Bohrung für 8 Durchgangslöcher, eines für jeden Hohlraum, mit einem Durchmesser von 1 mm, wird ausgeführt. Ein einzelnes Loch kann in einer Minute gebohrt werden; d.h. die Gesamtbetriebszeit beträgt 8 Minuten.
3. EDM-Fräsen wird eingesetzt für die Bearbeitung des kugelförmigen Gehäuses für die Schraubenköpfe; fünf Löcher mit einem Durchmesser von 2,5 mm werden angezeigt. Jeder Bearbeitungsvorgang benötigt 66 Minuten pro Gehäuse, d.h. die Gesamtbetriebszeit beträgt 330 Minuten (Abbildung 6.10).

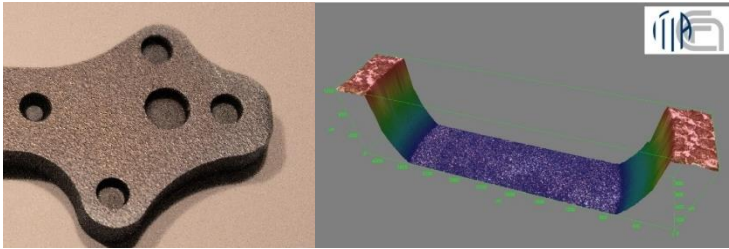


Abbildung 6.10: Bearbeitetes kugelförmiges Gehäuse, aufgenommen mit einem Axio-CSM 700 Konfokalmikroskop.

4. Das Werkstück wird auf die Z-Achse aufgespannt und auf das Maschinenkoordinatensystem referenziert. Der Kompressionsschlitz wird durch Drahterodieren bearbeitet (mit einem Umfang von 13,28 mm). Bei einer Prozessgeschwindigkeit von 1,8 mm/min beträgt die Betriebszeit ca. 7 Minuten.

Die Gesamtbearbeitungszeit zur Herstellung des Testfalls beträgt 375 Minuten.

Eine Auswertung der Bearbeitungszeit für die gleiche Komponente, hergestellt aus  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -TiN-Keramik-Verbundwerkstoff wurde ebenfalls durchgeführt. Tests unter Verwendung des Drahterodierverfahrens haben gezeigt, dass die maximale Prozessgeschwindigkeit 1,8 mm/min beträgt, die auch bei Titan-Tests erzielt wurden. Trotzdem haben vorläufige Tests mit einer  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -TiN-Keramikplatte für das Mikro-EDM-Fräsen eine höhere Materialabtragsrate ergeben. Die Herstellung eines einzigen kugelförmigen Gehäuses benötigt 39 Minuten, d.h. die Gesamtzeit für die Bearbeitung der fünf Gehäuse beträgt 195 Minuten. In diesem Fall beträgt die Gesamtbearbeitungszeit 245 Minuten. Für größere Größen und dickere Vorrichtungen mit vielen Löchern und Bohrungen kann sich die Bearbeitungszeit drastisch erhöhen. In diesem letzten Fall ist die gewählte Technik weniger geeignet für die Herstellung der Fixationsplatte.

### 6.4.3 Kombinierte Ansätze für Micro-EDM-Fräsen/Senkerodieren: Mikrofilterform

Methoden für das Mikro-Senkerodieren und EDM-Fräsen können kombiniert werden, um eine gute Oberflächenqualität in angemessenen Bearbeitungszeiten zu erreichen (MODICA et al [45]). Im Folgenden wird ein Beispiel für die von beiden Methoden erbrachten Leistungen zur Herstellung einer Mikroform geschildert, die zur Fertigung eines polymeren Mikrofilters eingesetzt wird, wie von SURACE et al. [47] beschrieben. Die Mikrofilterform hat einen Durchmesser von 2,3 mm und besteht aus 76 Stiften mit quadratischem Querschnitt, einer Seitenlänge von 80  $\mu\text{m}$  und einer Höhe von 0,15 mm. Der Pin-zu-Pin-



Abstand ist gleich  $70\ \mu\text{m}$ . Um die Extraktionsphase des Formfilters zu erleichtern, haben die Pinnwände eine nominale Neigung von 2 Grad. Die Sarix SX 200 HP wird als Mikro-EDM-Maschine verwendet; sie ist auch mit einer Drahterodiereinheit (Ariane) ausgestattet. Für beide Mikro-EDM-Methoden wird das Schlichten als Bearbeitungsmethode gewählt. Die Mikro-Pins werden hergestellt durch Bearbeitung eines Rasters aus Mikrokanälen, von denen acht eine Länge von  $0,4\ \text{mm}$  aufweisen, sechzehn Kanäle haben eine Länge von  $0,6\ \text{mm}$  und vierundzwanzig Kanäle sind  $0,8\ \text{mm}$  lang.

Das Mikro-Senkerodieren wurde auf folgende Art und Weise umgesetzt: Zunächst wird das Werkzeug durch Drahterodieren geformt; Abbildung 6.11 zeigt die endgültige Werkzeugform. Da der Werkzeugdurchmesser  $0,4\ \text{mm}$  beträgt, erhält man den Mikrokanal mit dieser Länge durch eine Vertikalbewegung, mit der die Werkzeugform eingepreßt wird. Die Arbeitslänge des Werkzeugs (Formteil) ist länger als die nominelle Kanaltiefe, da der Verschleiß der Werkzeuglänge in diesem Bearbeitungsschritt berücksichtigt werden muss. Die längeren Kanäle werden durch die Ausführung einer zusätzlichen horizontalen Bewegung erzeugt. Während der horizontalen Bewegung wird das Werkzeug anderen Werkzeugverschleißerscheinungen ausgesetzt. Da das Erodieren entlang der Kanallänge durchgeführt wird, wird die Vorderseite des Werkzeuges verkürzt und gerundet. Dieser Effekt kann die endgültige Kanaltiefe und die Maßgenauigkeit reduzieren. Um dieses Problem zu lösen, ist neben der oben erwähnten Strategie eine zusätzliche horizontale Bewegung erforderlich, um die Werkzeuglänge zu kompensieren. Obwohl die Vorderseite während der horizontalen Bewegung abgenutzt wird, ist der Rest des Werkzeuges, der weniger abgenutzt ist, immer noch in der Lage, die erforderliche Kanaltiefe und Breite zu erreichen. Wie bereits betont, steht für den Werkzeugverschleiß keine Kompensationsstrategie während des Mikro-Senkerodierens zur Verfügung. Daher ist die erforderliche Form des Werkzeugs, die Verschleißerscheinungen im Voraus in Betracht zieht, von wesentlicher Bedeutung.

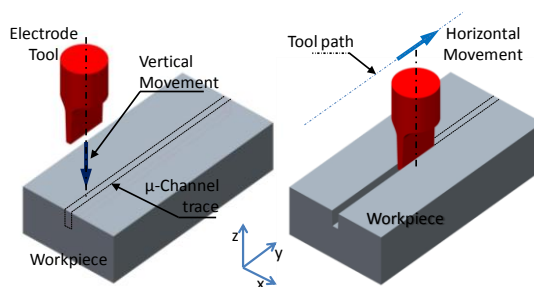


Abbildung 6.11: Die beiden Bewegungen (links - vertikal, rechts - horizontal), die für die Senkerodiermethode erforderlich sind

Das Mikro-EDM-Fräsen wird verwendet zur Herstellung der übrigen Strukturen des Filters; dabei wird ein Mikrowerkzeug mit einem Durchmesser von 0,15 mm unter Verwendung der Schicht-für-Schicht-Strategie eingesetzt.

In diesem Zusammenhang sei darauf verwiesen, dass beide Ansätze eine unterschiedliche Maßgenauigkeit aufweisen. Insbesondere gewährleistet das Mikro-EDM-Fräsen eine flachere Form der Kanäle und besser definierte Wände. Werkzeugverschleißprobleme, die während des Mikro-Senkerodierens auftreten, können hingegen weniger genaue Strukturen liefern. Die Hauptunterschiede in der Maßgenauigkeit beider Methoden werden in Abbildung 6.12 aufgezeigt; sie betreffen hauptsächlich die Rundung der Bodenflächen. Die durch  $L_0$  angegebene Tiefe ist gleich 0,15 mm. Die Bodenfläche wird beim Senkerodieren mehr abgerundet, als beim Fräsen ( $R_{\text{sink}} = 0,031$  mm und  $R_{\text{mill}} = 0,009$  mm). Die Entformungsschräge ist sehr ähnlich, 2,1 Grad. Der Abstand zwischen der oberen und idealen flachen Bodenfläche ( $L_1$ ) ist unterschiedlich: 0,130 mm beim Senkerodieren und 0,140 mm beim Fräsen.

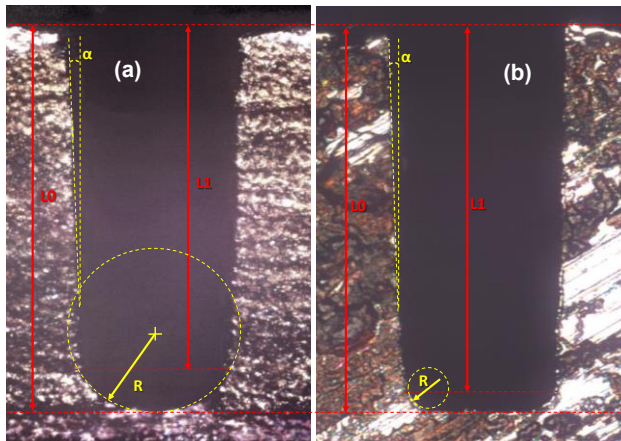


Abbildung 6.12: Mikrokanal-Querschnitt realisiert durch (a) Senkerodieren und (b) Fräsen.

Abbildung 6.13 zeigt die Form und den Teil der Form, der durch Senkerodieren und Fräsen bearbeitet wurde.

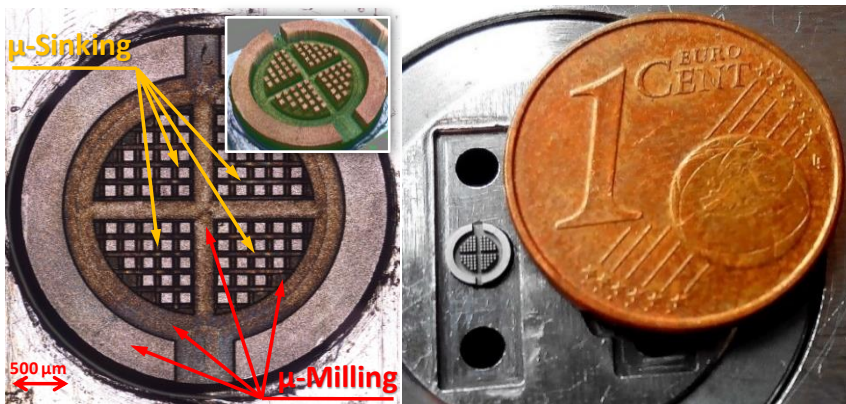


Abbildung 6.13: Konfokale Rekonstruktion der Mikrofilterform und des Einsatzes.

Tabelle 6.3 zeigt den Einfluss der einzelnen Operationen auf die Gesamtbearbeitungszeit; sie entspricht 18038s, d.h. etwa 5 Stunden. Die Bearbeitungszeit für das Mikro-EDM-Fräsen ist 114472s (31h 47min 52s). Durch Vergleich der Bearbeitungszeiten wird offensichtlich, dass die Anwendung der Senkerodiermethode vorteilhafter ist; sie erlaubt eine Einsparung von etwa 26 Stunden Bearbeitungszeit. Allerdings führt das Mikro-Senkerodieren zu zusätzlichen Bearbeitungsfehlern. Um diesen Nachteil zu bewältigen und zu minimieren, können weitere Operationen während des Feinschlichtens der Mikrokanäle hinzugefügt werden. Technisch gesehen können alle Operationen bei diesem Ansatz wiederholt werden unter Verwendung neuer Elektrodenwerkzeuge mit präziser Mikrokanalform, welche die gleiche Bearbeitungssequenz durchlaufen. In diesem Fall wird die Bearbeitungszeit nahezu verdoppelt (etwa 10 Stunden); im Vergleich zur Fräsmethode ist sie jedoch immer noch akzeptabel.

Tabelle 6.3: Bearbeitungszeiten für alle Operationen in der Mikro-EDM einer Mikrofilterform.

micro pins			other features		
Total sinking time	Erosion time by sinking	Electrode length used by sinking	Total milling time	Erosion time by milling	Electrode length used by milling
[s]	[s]	[mm]	[s]	[s]	[mm]
18038	4613	79	17017	8627	9
<b>5h 38s</b>	<b>1h 16min 53s</b>		<b>4h 43min 37s</b>	<b>2h 23min 47s</b>	

## 6.5 Referenzen

1. TSAI, H.C., YAN, B.H., HUANG, F.Y., (2003), "EDM performance of Cr/Cu based composite electrodes", *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 43 (3), pp. 245–252
2. SHOBERT, E.I., (1983), "What happens in EDM" in: E.C. Jameson (Ed.), *Electrical Discharge Machining: Tooling, Methods and Applications*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1983, pp. 3–4
3. BOOTHROYD G., WINSTON, A.K., (1989), "Non-conventional machining processes", in: *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Marcel Dekker, Inc, New York, 1989, p. 491
4. MCGEOUGH, J.A., (1988), "Electrodischarge machining", in: *Advanced Methods of Machining*, Chapman & Hall, London, 1988, p. 130
5. KRAR, S.F., CHECK, A.F., (1997), "Electrical discharge machining", in: *Technology of Machine Tools*, Glencoe/McGraw-Hill, New York, 1997, p. 800
6. KONIG, W., DAUW, D.F., LEVY, G., PANTEN, U., (1998), "EDM—future steps towards the machining of ceramics", *Ann. CIRP* 37 (2) (1988) 623–631
7. PHAM, D.T., DIMOV, S.S., BIGOT, S., IVANOV A. AND POPOV, K., (2004), "Micro-EDM-recent developments and research issues", *Journal of Materials Processing technology*, Volume 149, Issues 1-3, 10 June 2004, Pages 50-57, 14th International Symposium on Electromachining (ISEM XIV)
8. YU, Z., RAJURKAR, K. K.P., NARASIMHAN J., (2003), "Effect of machining parameters on machining performance of micro EDM and surface integrity", *Proceedings of ASPE*, October 26-31, 2003, Portland Oregon, Precision Machining, Annual
9. PELLICER, N., CIURANA J. AND OZEL T., (2009), "Influence of process parameters and electrode geometry on feature micro-accuracy in EDM of tool steel", *Materials & Manufacturing Processes*, 24, pp. 1282–1289
10. MODICA, F. ET AL., (2012), "Study on Depth Error in Fabrication of Micro Channels Via  $\mu$ EDM Milling", in *Proc. of ICOMM 2012*, march 12th-14th, Northwestern University, Evanston, CHICAGO, IL (USA), Paper MOB3
11. Montgomery D C 2001 *Design and analysis of experiments* 5th ed. (New York Wiley)
12. Minitab Inc. Available at: [www.minitab.com](http://www.minitab.com), Accessed on 2011
13. LIAO, Y. ET AL., (2008), "An on-line monitoring system for a micro electrical discharge machining (micro-EDM) process", *J. Micromech. Microeng.* 18 035009
14. S. YEO ET AL., (2009), "A New Pulse Discriminating System for Micro-EDM", *Mater. and Manufact. Proc.*, 24: 1297-1305
15. F. MODICA ET AL., (2014), "Evaluation of micro-edm milling performance using pulse discrimination", in *Proc. of ASME 2014, IDETC/CIE 2014*, August 17-20, 2014, Buffalo, NY, USA
16. MARROCCO, V., MODICA, F., BELLANTONE, V., FASSI, I., (2015), "Pulse monitoring and discrimination in micro-EDM milling of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiN micro-channels", in *Proc. of ICOMM 2015*, March 28-April 2nd 2015, Milan (Italy)
17. YU, Z., MASAZAWA T., FUJINO, M., (1998), "Micro-EDM for three-dimensional cavities – development of uniform wear method", *Ann. CIRP* 47 (1), pp. 169-172

18. YU, Z., MASAZAWA, T., FUJINO, M., (1998), "3D micro-EDM with simple shape electrode", *Int. J. Electr. Mach.*, 3, pp. 7-12 & 71-79
19. BISSACCO, G., TRISTO, G., VALENTINČIĆ J., (2010), "Assessment of electrode wear measurement in micro-EDM milling", *Proceedings of the 7th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, pp. 155-158
20. MODICA, F., MARROCCO, V. TROTTA, G. AND FASSI, I., (2011), "Micro electro discharge milling of freeform micro-features with high aspect ratio", in *Proc. of ASME 2011 the International Design of Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC Washington, DC, USA) DETC2011-4833*
21. NARASIMHAN, J., YU, Z., RAJURKAR, K. P., (2005), "Tool Wear Compensation and Path Generation in Micro and Macro EDM", *J. of Manuf. Proc.* 7(1), 75-82
22. DIMOV, S., PHAM, D.T., IVANOV, A., POPOV, K., (2003), "CAM system for layer based EDM", *Int. J. Manuf. Sci. Prod.* 5 (1-2), 27-31
23. ZHAO, W., YANG, Y., WANG, Z., ZHANG, Y., (2004), "A CAD/CAM system for micro-ED-milling of small 3D freeform cavity", *Journal of Mater. Proc. Technol.* 149, 573-578
24. POPOV, K., PETKOV, P., (2011), "Layer based micro-machining-New approach for tool-path generation", *CIRP Journal of Manuf. Sci. Technol.* 4, 370-375
25. NGUYEN, M. D., WONG, Y. S., RAHMAN, M., (2013), "Profile error compensation in high precision 3D micro-EDM milling", *Precision Engineering*, 37(2), 399-407
26. YAN, M.T., HUANG, K.Y., LO, C.Y., (2009), "A study on electrode wear sensing and compensation in micro-EDM using machine vision system", *Int. Journal of Adv. Manuf. Technol.*, 42, pp. 1065–1073.
27. ALIGIRI, E., YEO, S.H., TAN, P.C., (2010), "A new tool wear compensation method based on real-time estimation of material removal volume in micro-EDM", *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010), 2292–2303
28. WANG, J., FERRARIS, E., GALBIATI, M., QIAN, J. AND REYNAERTS, D., (2014), "Simultaneously counting of positive and negative pulse parts to predict tool wear in micro-EDM milling", in *Proc. ICOMM 2014, Singapore, March 25-28, 2014*
29. BISSACCO, G., VALENTINCIC, J.M, HANSEN, H. N. AND WIWE, B. D., (2010), "Towards the effective tool wear control in micro-EDM milling", *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 47, Issue 1-4, 3-9
30. MAHARDIKA, M. AND MITSUI, K., (2008), "A new method for monitoring micro-electric discharge machining processes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 48, Issues 3-4, March 2008, 446-458
31. YI, S. M., LEE, Y. S. AND CHU, C. N., (2006), "Straight hole micro EDM with a cylindrical tool using a variable capacitance method accompanied by ultrasonic vibration", *Journal of Micromechanic and Microengineering*, 16, 1092
32. KURIYAGAWA, T., ZHOU, L., YAN J., AND YOSHIHARA, N., (2008), "Fabrication of High-Aspect Ratio Micro Holes on Hard Brittle Materials -Study on Electrorheological Fluid-Assisted Micro Ultrasonic Machining", *Key Engineering Materials*, 389-390, 264

33. KARTHIKEJAN, G., RAMKUMAR, J., DHAMODARAN, S., (2010), "Micro electric discharge milling process performance: an experimental investigation", *International Journal of Machine Tools & Manufactures*, 50, pp. 718-727
34. PURANIK, M. S., JOSHI, S. S., (2008), "Analysis of accuracy of high-aspect-ratio holes generated using micro-electric discharge machining drilling", in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Volume 222, Number 11 (2008) , 1453-1464
35. MODICA, F., MARROCCO, V., TROTTA, G., FASSI, I., (2011), "Micro electro discharge machine milling of freeform micro-features with high aspect ratio", *ASME 2011-International Design Engineering Technical Conferences (IDETC) and Computers and Information in Engineering Conference (CIE) August 28-31, 2011 in Washington, DC (USA)*
36. KÖNIG, W., DAUW, D.F., LEVY, G., PANTEN, U., (1988), "EDM-Future Steps towards the Machining of Ceramics", *Annals of the CIRP*, 37/2:623-631
37. LUIS, C.J., PUERTAS, I., VILLA, G., (2005), "Material removal rate and electrode wear study on the EDM of silicon carbide", *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165:889-896
38. CLIJSTERS, S., LIU, K., REYNAERTS, D., LAUWERS, B., (2010), "EDM technology and strategy development for the manufacturing of complex parts in SiSiC", *Journal of Materials Processing Technology* 210, 631–641
39. LAUWERS, B., KRUTH, J.P., LIU, EERAERTS, W., SCHACHT, B., BLEYS, P., (2004), "Investigation of the material removal mechanisms in EDM of composite ceramic materials", *Journal of Materials Processing Technology*, 49/1-3/347-352
40. LAUWERS, B., KRUTH, J.-P., BRANS, K., (2007), "Development of technology and strategies for the machining of ceramic components by sinking and milling EDM", *Annals of the CIRP Vol. 56/1/2007*, 225-228
41. LIU, C.-C., HUANG, J.-L., (2003), "Effect of the electrical discharge machining on strength and reliability of TiN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites", *Ceramics International* 29, 679–687
42. LIU, K., LAUWERS, B., REYNAERTS D., (2010), "Process capabilities of Micro-EDM and its applications", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 47, Issue 1-4, 11
43. LIU, K., PARIS, J., FERRARIS, E., LAUWERS B. AND REYNAERTS, D., (2007), "Process investigation of precision Micro-Machining of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiN ceramic composites by electrical discharge machining (EDM)", in *Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining (ISEM)*, 23-27 April, 2007, Pittsburgh, PA, USA, 221-226
44. MODICA, F., PAGANO, C., MARROCCO, V., FASSI, I., (2015), "Micro-EDM studies of the fabrication of customised internal fixation devices for orthopedic surgery"; in *Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2015*, August 2-5, 2015, Boston, Massachusetts, USA
45. MODICA, F., MARROCCO, V., BASILE, V., FASSI, I., (2015), "Micro-EDM-milling and -sinking combined approach for the fabrication of micro-components", in *Proc. of ICOMM 2015*, March 28-April 2nd 2015, Milan (Italy)
46. SURACE, R., ET AL., (2015), "Design and fabrication of a polymeric microfilter", in *Proc. of ICOMM 2015*, March 28-April 2nd 2015, Milan (Italy)

# 7 Moulded Interconnect Devices

**Adrien Brunet, Ulrich Gengenbach, Tobias Müller,  
Steffen Scholz and Markus Dickerhof**

Karlsruher Institut für Technologie, IAI

## 7.1 Übersicht - Moulded Interconnect Devices

Moulded Interconnect Devices (MID) bezeichnen spritzgegossene Kunststoffbauteile mit zusätzlichen elektrischen (Leiter, Isolatoren, usw.) und mechanischen Funktionen (Trägermodul, Gehäuse, usw.). Üblicherweise werden die Teile aus mikrospritzgegossenen Thermoplasten mit strukturierten Leiterbahnen hergestellt. Dessen ungeachtet werden immer mehr Substratmaterialien zur Verfügung gestellt und das Spritzgießen ist nicht die einzige Methode, um sie herzustellen.

Einer der größten Vorteile der MID ist die Geometriefreiheit während des Herstellungsprozesses. Während die klassische Printed Circuit Board (PCB) Technologie nur planare Schaltungen ermöglicht, ist die MID-Technik in der Lage, vielfältige Oberflächen in unterschiedlichen Winkeln, d.h. regelmäßige Flächen (Zylinder) und Freiformflächen, zu erzeugen. Unter anderem ermöglicht ein Schaltungsmuster mit mehreren Ebenen eine bessere Bestückung der Schaltung sowie der angeschlossenen Schalter und Knöpfe. Abbildung 7.1 gibt einen Überblick über die zur Verfügung stehenden unterschiedlichen Geometrie-Klassifizierungen.

Im Hinblick auf die Integration ist die Geometriefreiheit ein enormer Vorteil; daher ist es nicht verwunderlich, dass Moulded Interconnect Devices in verschiedenen Branchen wie Telekommunikation (Antenne), Automobilindustrie (Motorradlenker), Medizintechnik (Hörgeräte) und vielen anderen verwendet werden.

### **Innovationspotenzial von 3D-MID**

3D-MID hat große Perspektiven aufgrund des verdoppelten Innovationspotenzials sowohl für Produkte und durch Prozesse.

Produktinnovationen unter Verwendung der Geometriefreiheit bieten folgende Vorteile:

- Gestaltungsfreiheit (verschiedene Winkel, Flächen, Hohlräume)
- Funktionsintegration (Schalter, Sensoren, Antennen)

- Miniaturisierung (Integration von Komponenten auf unterschiedlichen Oberflächen)
- Gewichtseinsparung (einschließlich Materialeinsparung)

Prozessinnovationen durch selektive Strukturierung und Metallisierung führen zu:

- Weniger Teilen (viele Teile in einem kombiniert)
- Verkürzung der Prozesskette (Reduktion der Montageschritte)
- Reduzierung der Herstellungskosten (schnellere Prozesse und weniger Materialverbrauch)
- Verbesserter Zuverlässigkeit (resultierend aus dem Vorherigen).


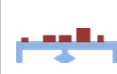





2D	2 ½ D		N x 2D	3D		
Planare Prozessfläche	Planare Prozessfläche 3D Elemente auf der gegenüber liegenden Seite	Planare Prozessfläche 3D Elemente auf der Prozessseite	Mehrere planparallele Prozessflächen	Mehrere planparallele Prozessfläche im Winkel	Regelflächen (z.B. Zylinderflächen)	Freiformflächen
						

Abbildung 7.1: Geometrie-Klassifizierung von 3D-Moulded Interconnect Devices (MID) [1]

Um die MID-Innovationspotenziale voll auszuschöpfen und ein MID-Projekt erfolgreich zu gestalten, müssen bestimmte zentrale Punkte erfüllt werden. Der erste Punkt ist ein breites und interdisziplinäres Verständnis der Technologie sicherzustellen, die innerhalb des Projektteams vorhanden ist, gefolgt von der Definition der Schnittstellen zwischen den Zuständigkeiten. Design-Erfahrung ist wichtig, um die Vorteile, die durch die MID-Technologie geboten werden, in vollem Umfang nutzen zu können. Weitere wichtige Faktoren für die Ausschöpfung des MID-Innovationspotenzials sind genaue Kostenschätzungen für die gesamte Prozesskette und für das System als Ganzes, sowie die Bereitschaft, Risiken im Allgemeinen einzugehen.

### Die aktuelle Forschung zu MID umfasst verschiedene Themen

- Substratmaterialien sind, wie bereits erläutert, vor allem Thermoplaste; allerdings konzentriert sich die aktuelle Forschung auf thermisch leitfähige Kunststoffe, Hochtemperatur-Kunststoffe, biokompatible, transparente oder kolorierte Materialien, Duroplaste und Keramik.



- Herstellung von Leiterbahnen oder Mehrlagenleiterbahnstrukturen durch Verfahren wie Drucktechnik oder Plasmastrukturierung
- Rapid-Prototyping
- 3D-Montage und Aufbau- und Verbindungstechnik, so wie Prüf- und Inspektionskriterien für MID, Standardisierung und Spezifikation, Prognosen über die langfristige Zuverlässigkeit, Simulationsmodelle
- Qualität und Zuverlässigkeit, z.B. mehrere Werkstückträger für Standard-Surface Mounted Technology (SMT), Chip-on-MID-Bestückungstechnologien, Embedded-Komponenten und MID-Gehäuse
- Planung und Entwicklung für Design-Tools, Entwicklungstechnologien, Wärmeabfuhrkonzepte und Recycling.
- Keramische Materialien

## 7.2 Materialien

### 7.2.1 Einführung

Die wichtigste Materialart für die Herstellung von Moulded Interconnect Devices MID Substraten sind Kunststoffe. Im Vergleich zu anderen Materialien, beispielsweise Keramik, sind Kunststoffe mechanisch fest, jedoch immer noch in der Lage Spannungen abzubauen, der durch mechanische Belastung verursacht wurde. Ein entscheidender Faktor für den Erfolg dreidimensionaler Teile, die Polymere als Substratmaterial verwenden, ist die Variabilität der Herstellungsverfahren. Dies erleichtert die Herstellung von entweder sehr kleinen oder sehr großen Mengen auf kosteneffiziente Weise.

Das Wort Plastik ist abgeleitet von dem griechischen Begriff plastikos, das heißt "in der Lage, geformt oder gegossen zu werden"; dies impliziert bereits die Eignung dieser Materialien durch Gießen, Pressen oder Extrusion in eine gewünschte Form gebracht zu werden. Kunststoffe bestehen aus großen, kettenartigen Molekülen, bestehend aus nicht-metallischen Elementen (Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Fluorid, Schwefel) [2]. Die interne Struktur, der Grad der vernetzten Molekülketten und die chemische Zusammensetzung werden häufig zur Klassifizierung unterschiedlicher Kunststoffmaterialien verwendet. Abbildung 7.2 bietet eine Übersicht über die unterschiedlichen Kunststoffklassen.

Die Struktur beeinflusst auch die Eigenschaften des Kunststoffes, wie beispielsweise Schmelzpunkt, Erweichungsverhalten oder Kristallisation. Die richtige Wahl des Polymermaterials ist entscheidend für den Erfolg sowohl in der Herstellung als auch im Vertrieb. Bei der Vermarktung von MID müssen zahlreiche Faktoren wie Kosten des Grundmaterials, Verarbeitbarkeit, Nachhaltigkeit und ökologische Auswirkungen berücksichtigt werden.

In den folgenden Abschnitten werden einige der wichtigsten Anforderungen an die Substratmaterialeigenschaften und Materialien beschrieben, die derzeit in der Herstellung von MIDs verwendet werden.

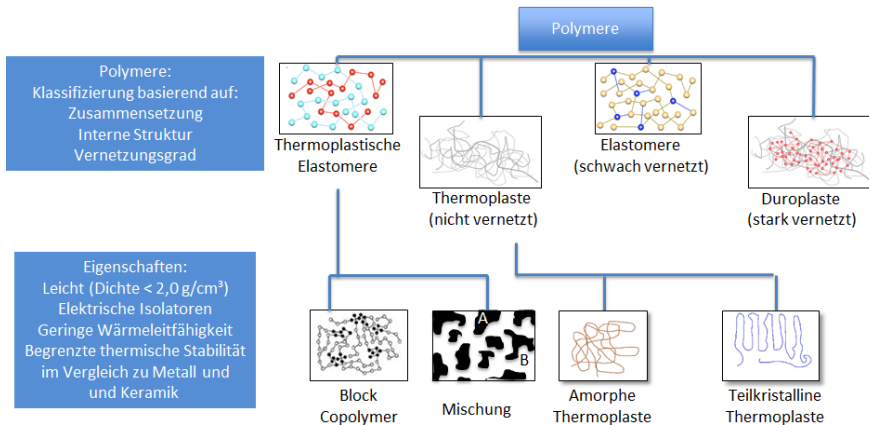


Abbildung 7.2: Klassifizierung von Kunststoffen auf Basis der internen Struktur und dem Grad der Vernetzungen [3]

## 7.2.2 Anforderungen an das Substratmaterial

Polymere müssen eine Vielzahl erforderlicher Parameter erfüllen, damit sie als Material für MID-Substrate geeignet sind:

- Temperaturbereich für die Montage und Nutzung
- Mechanische Eigenschaften (Kriechen, Zug- und Biegefestigkeit)
- Entzündbarkeit
- Metallisierungsfähigkeit
- Umweltbelastung
- Elektrische Eigenschaften
- Spritzgießeigenschaften
- Preis-Leistungsverhältnis

Diese Eigenschaften können einen großen Einfluss auf die Eignung des Materials für die Herstellung spritzgegossener Schaltungsträger (Moulded Interconnect Devices) haben. Um eine Entscheidung zwischen den verschiedenen verfügbaren Kunststoffen zu treffen, müssen außerdem die verfügbaren Eigenschaftswerte mit hinreichender Genauigkeit vergleichbar und messbar sein. Die Materialeigenschaften von Polymermaterialien hängen

oft von der tatsächlichen Verarbeitungsumgebung ab; deshalb ist es erforderlich, ein breites Spektrum an Eigenschaften zu beurteilen. Die wichtigsten Eigenschaften in dieser Hinsicht sind [3]:

- Rheologie
- Härte
- Degradation
- Schrumpfung und Toleranzen
- Anisotropie
- Kristallisation und Schmelzung

Für Thermoplaste und Duroplaste gibt es eine oder mehrere standardisierte Messverfahren, die zur Bestimmung der Kennwerte eingesetzt werden können. Die meisten dieser Standards enthalten auch eine Beschreibung des spezifischen Prüflings; beispielsweise beschreibt DIN ISO 10350 [4] die Bestimmung der rheologischen Werte. Ähnliche Standards sind für andere Materialeigenschaften anwendbar.

### 7.2.3 Typische MID-Materialien

Wie oben erwähnt, kann eine große Vielzahl von Polymermaterialien für die Herstellung von MIDs geeignet sein. In der Vergangenheit haben sich Thermoplaste als die am häufigsten verwendeten Substratmaterialien erwiesen, aber die Entwicklung neuer Materialien mit verbesserten Eigenschaften macht weiter Fortschritte. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die aktuell verwendeten Kunststoffe.

Abbildung 7.3 zeigt eine Zusammenfassung der typischen Substratmaterialien für MIDs, zusammen mit einigen Materialeigenschaften und den relativen Materialkosten.

Die Wahl des besten Materials ist auch stark abhängig vom gewählten Produktionsprozess für das Moulded Interconnect Device. Andererseits werden die von dem fertigen Produkt vorgegebenen Anforderungen direkt mit den Materialeigenschaften und dem gewählten Herstellungsverfahren verknüpft. Typischerweise werden kostengünstige und technische Thermoplaste den Hochleistungspolymeren vorgezogen. Der Grund dafür ist, dass sie für die bestehende Produktion ausreichen und sie weiter modifiziert werden können, indem man sie mit anderen Materialien kombiniert, so dass sie sich mit thermoplastischen Kunststoffen mischen, oder Additive/Füllstoffe hinzufügt oder Nachbehandlungstechniken einsetzt.

Eine detailliertere Beschreibung der verschiedenen Materialien, einschließlich ihrer Eigenschaften, die für das MID-Herstellungsverfahren relevant sind, findet sich in [3].

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

Material	Schäffestigkeit	Lötbarkeit
A: Commodity-Thermoplaste	+ > 0,8 N/mm	+ Standardprozess
B: Technische Thermoplaste	0 0,5-0,8 N/mm	0 Parametereinstellung
C: HT-Thermoplaste	- In der Regel nicht „plateable“ ??	- Spezielle Prozesse

Abbildung 7.3: Typische Substratmaterialien für Moulded Interconnect Devices (MID). [5]

## 7.3 Prozesse

### 7.3.1 Überblick

Die meisten MID-Prozesse beginnen mit einem Spritzgussprozess, um das Substrat zu erzeugen. Dieses erste Teil wird aus Thermoplasten durch (Mikro-) Spritzgießen hergestellt; verschiedene Technologien können angewendet werden, um anschließend die Leiterbahnen aufzubringen.

Die Laserdirektstrukturierungs-Technologie (LDS) ist die erste Option zur Erzeugung der Leiterbahnen; dabei wird die Substratoberfläche zunächst teilweise strukturiert entsprechend dem elektrischen Schaltungsmuster und anschließend metallisiert. Die zweite Option nutzt leitfähige Tinten für den Druck der Oberflächen. Aerosol-Jet-Printing ist ein

Beispiel für diese Drucktechnik. Die dritte Option ist das Heißprägen; dabei werden die Leiterbahnen mittels Metallfolie erzeugt.

Das Zwei-Komponenten-Spritzgießverfahren unterscheidet sich von den anderen Technologien dadurch, dass das Substrat zweimal mit verschiedenen Thermoplasten geformt wird. Der erste Schuss besteht aus einem metallisierbaren thermoplastischen Kunststoff. Der zweite Schuss besteht aus einem nicht metallisierbaren thermoplastischen Kunststoff oder umgekehrt (erster Schuss zunächst mit nicht metallisierbarem thermoplastischem Kunststoff und der zweite Schuss aus metallisierbarem thermoplastischem Kunststoff). Der zweite Schuss überspritzt den ersten Schuss nur teilweise, so dass die elektrischen Schaltungsmuster in den unbedeckten Bereichen erstellt werden. Das komplette Stück wird anschließend in Metallisierungsbäder eingetaucht und bildet aufeinanderfolgende Metallschichten auf der freien Oberfläche des metallisierbaren Materials.

Die Film Insert Moulding-Technologie nutzt die Integration einer bedruckten oder strukturierten Folie vor dem Spritzgießverfahren. Nach dem Einlegen der Folie in die Form werden die Thermoplaste hinzugefügt und die Folie bildet die gewünschte elektrische Schaltung.

In den folgenden Abschnitten 7.3.2 bis 7.3.5 konzentrieren wir uns auf die verschiedenen Technologien: Zwei-Komponenten-Spritzgießverfahren, LDS, Aerosol-Jet-Printing und Heißprägen, einschließlich der individuellen Nachteile und Vorteile. In Abschnitt 7.3.6 werden die einzelnen Technologien verglichen.

## **7.3.2 Zwei-Komponenten-Spritzgießverfahren**

Das Zwei-Komponenten-Spritzgießverfahren ist eine effiziente und kostengünstige Technik, die in der Herstellung von Kunststoffteilen weit verbreitet ist. Das in der MID-Technologie verwendete Verfahren unterscheidet sich jedoch in Bezug auf den Prozessablauf. Während beim typischen Kunststoffspritzgießen die Materialien die verschiedenen Teile des Endprodukts bilden (beispielsweise Einsätze, Dichtungen, Scharniere oder beweglichen Teile), überdeckt in der MID-Technologie das Material, das während des zweiten Formungsschrittes injiziert wird, die erste Komponente teilweise. Diese Schicht bestimmt die Leiterbahnen, die in den folgenden Prozessschritten erzeugt werden (Abbildung 7.4).

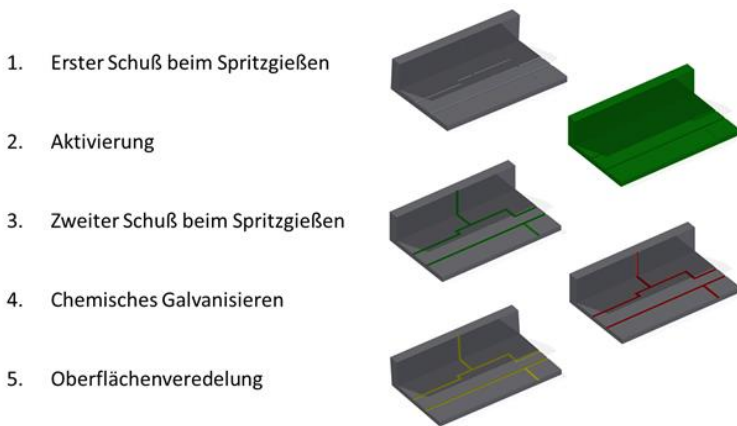


Abbildung 7.4: Hauptschritte des Zwei-Komponenten-Spritzgießverfahrens für MID am Beispiel des SKW Prozesses

Im Laufe der Zeit entwickelten sich verschiedene Varianten des Spritzgießverfahrens; die beiden wichtigsten Verfahren sind PCK (Printed Circuit Board Kollmorgen) und SKW (Sankyo Kasei Wiring Board) [5]. Sie werden in den folgenden Abschnitten ausführlich beschrieben.

Abbildung 7.5 zeigt den Ablauf des PCK-Verfahrens. Das PCK-Verfahren hat zwei verschiedene Varianten. In der ersten Version - dem PA-Prozess - (Abbildung 7.5, linkes Bild) wird zunächst ein nicht beschichtbares Material geformt, das dann mit einem beschichtbaren Polymer überspritzt wird, welches die Aussparungen auffüllt, die im ersten Schritt erzeugt wurden.

Die zweite Version ist der Standard-PCK-Prozess, wie in Abbildung 7.5 auf der rechten Seite dargestellt. Der Prozess beginnt mit einem metallisierbaren Material, das im zweiten Schritt mit einem nicht metallisierbaren Polymer überspritzt wird; dabei werden exponierte beschichtbare Bereiche ausgespart, welche die späteren Leiterbahnen darstellen. Dieses fertige Kunststoffteil wird zuerst aktiviert dann in ein Galvanikbad getaucht. Darin wird die gewünschte Schichtaufbau auf der aktivierten Oberfläche des MID-Substrats abgeschieden.

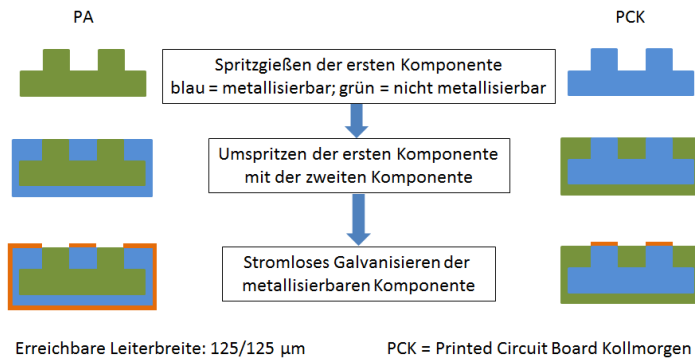


Abbildung 7.5: Zwei Varianten des Printed-Circuit-Board-Kollmorgen-Verfahrens (PCK)

Der SKW-Prozess führt einen zusätzlichen Verfahrensschritt zwischen den beiden Formschritten ein. Der erste Schuss wird in einer Palladium-Katalysatorlösung aktiviert, getrocknet und dann mit der zweiten Komponente überspritzt [6]. Der fertig geformte Prüfling wird dann auf die katalysierte Oberfläche aufgebracht, um die leitenden Bereiche zu erzeugen (Abbildung 7.6).

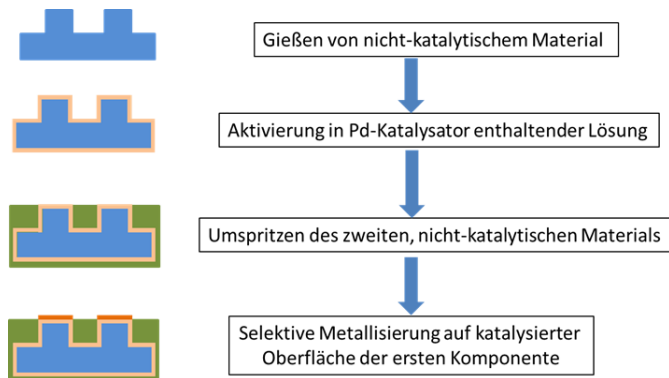


Abbildung 7.6: Das Sankyo-Kasei-Wiring-Board-Verfahren (SKW).

## Vorteile und Nachteile des Zwei-Komponenten-Spritzgießverfahrens

Das grundlegende Zwei-Komponenten-Spritzgießverfahren ist mehr oder weniger identisch mit typischen Spritzgusstechniken; dasselbe kann über die Vor- und Nachteile gesagt werden.

Das Zwei-Komponenten-Spritzgießen ermöglicht eine hohe geometrische Freiheit und bietet die Möglichkeit, sehr kleine Details mit hoher Genauigkeit und Wiederholbarkeit zu erzeugen. Kurze Zykluszeiten sorgen für eine kostengünstige Produktion, auch bei sehr hohen Stückzahlen, einschließlich der anfänglichen Produktionskosten für das Formwerkzeug. Da die ersten und zweiten Schüsse unterschiedliche Geometrien erzeugen, müssen zwei Formnester erzeugt werden und eine Formmaschine muss eingesetzt werden, die für das Zwei-Komponenten-Verfahren geeignet ist. Dies bedeutet, dass höhere Investitionskosten berücksichtigt werden müssen.

Tabelle 7.1: Typische geometrische Grenzen beim Zwei-Komponenten-Spritzgießen. Alle angegebenen Zahlen sind in mm[3]

Designlimit	LCP/SPS	PEI	PPA	PES	PA
Leiterbahn Breite	0,25	0,6	0,4	0,6	0,5
Leiterbahn Abstand	0,6	0,6	0,4	0,6	0,5
Min. Lochdurchmesser	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Seitenverhältnis, Länge/Durchmesser	<6:1	<6:1	<6:1	<6:1	<6:1
Min. Pindurchmesser	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Pinlänge zu Durchmesser	2	2	2	2	2
Querschnittdicke (1. Schuss)	0,25	0,8	0,8	0,8	0,8
Querschnittdicke (2. Schuss)		1	1	1	1

Die beim Zwei-Komponenten-Spritzgießen verwendeten Materialien müssen eine bestimmte Anzahl von Anforderungen erfüllen. Zunächst müssen beide Thermoplaste eine ausreichende Haftung (Adhäsion) aufweisen, um eine Trennung nach dem Formen zu vermeiden. Die zweite wichtige Eigenschaft bezieht sich auf die Fließeigenschaften der Polymer-schmelze. Um die feinen Details, welche die Spritzgusstechnik möglich macht, in vollem Umfang nutzen zu können, muss die Viskosität des Materials niedrig genug sein, um sehr feine Details erzeugen zu können, ohne dass sich das Material verfestigt, bevor der gesamte Hohlraum gefüllt wird. Dies erfordert eine ausgefeilte Koordination der Materialeigenschaften, Fließlänge und Werkzeugkonstruktion in Bezug auf die Anwendung von Heiz- und



Kühlelementen. Tabelle 7.1 zeigt einen Überblick über die gebräuchlichsten thermoplastischen Materialien, die beim Zwei-Komponenten-Spritzgießen zur Herstellung von MIDs eingesetzt werden, sowie die möglichen geometrischen Grenzen [7].

### 7.3.3 Laserdirektstrukturierung (LDS)

Das Laserdirektstrukturierungsverfahren (LDS) ist ein additives Verfahren zur Erzeugung von 3D-Leiterstrukturen. LPKF Laser & Electronics AG, ein Hersteller industrieller Lasertechnik mit Sitz in Garbsen, Deutschland, hat diese Technologie in den letzten Jahren entwickelt [8]. Sie kann hochauflösende Schaltungslayouts auf komplexen dreidimensionalen Bauteilen in einem mehrstufigen Prozessablauf erzeugen. Die LPKF-LDS-Technologie steht im Mittelpunkt der folgenden Abschnitte. Es gibt natürlich auch andere Laserprozesstechniken, wie ADDIMID [9] oder MIPTEC [10]-Technologie; allerdings sind diese weniger gebräuchlich.

#### Prozesskette

Das LDS-Verfahren ist ein Vier-Stufen-Prozess, der mit dem Spritzgießen beginnt, gefolgt von der Laserstrukturierung, Metallisierung und Oberflächenveredelung.

Das Polymersubstrat-Teil wird durch das Ein-Komponenten-Spritzgießverfahren hergestellt. Sobald das Teil fertiggestellt ist, wird das Muster des Schaltbilds mittels Laser auf die Oberfläche gezeichnet (Nd:YAG;  $\gamma = 1064 \text{ nm}$ ). Der Laser aktiviert gleichzeitig die Additive und zerstört die Polymermatrix; dies führt zu einer Abtragung von 1 bis 2  $\mu\text{m}$ . Dies öffnet die komplexen Verbindungen im dotierten Kunststoff und löst die Metallatome aus den organischen Liganden heraus.<sup>1</sup> Diese Metallatome wirken als Keime für die reduktive Metallbeschichtung. Als Ergebnis der Oberflächenstrukturierung werden mikroskopische Vertiefungen und Hinterschneidungen erzeugt, in denen das Metall während der Metallisierung fest verankert wird und dies führt wiederum zu einer überraschenden Schälfestigkeit.

Der Metallisierungsteil des LPKF-LDS-Verfahrens beginnt mit einem Reinigungsschritt, um Laserabtragungen zu entfernen, gefolgt durch einen additiven Aufbau der Leiterbahnen durch stromfreie Kupfer-Bäder (Cu) (sogenanntes Galvanisieren). Metall wird auf dem strukturierten Bereich abgeschieden; dadurch werden die Leiterbahnen gebildet. Die exponierten Teilchen aus dem Additiv, die durch den Laser aktiviert wurden, wirken dann als Keime für die reduktive Abscheidung im stromlosen Metallisierungsbad [11,12]. Anwendungsspezifische Beschichtungen wie Ni, Au, Sn, Sn/Pb, Ag, Ag/Pd, etc. auf der ursprünglichen Kupferbasis sind möglich [8]; der letzte Schritt beinhaltet die Oberflächenveredelung.

---

<sup>1</sup> Ein Ligand ist ein Ion oder ein Molekül, das durch koordiniertes Bonden an ein Metallatom gebunden ist.

Tabelle 7.2 unten zeigt ein Beispiel, wie Leiterbahnen derzeit produziert werden. Der Prozess beginnt mit einer dicken Schicht aus Kupfer, wie oben beschrieben, gefolgt von Schichten aus Nickel und Gold. Gewöhnlich werden Leiterbahnen aus Kupfer hergestellt und mit Gold überzogen, um Korrosion zu vermeiden. Eine zusätzliche Nickelschicht wird zwischen die beiden Schichten eingefügt, um die Diffusion von Gold in die Kupferschicht zu vermeiden.

Tabelle 7.2: Typisches Verfahren zur Erzeugung von Leiterbahnen durch stromlose Abscheidung.[8]

Stufe	Badtyp	T [min]	T[°C]	Schichtdicke [µm]
<b>Ultraschallreinigung</b>	H <sub>2</sub> O	5	50	-
<b>Chemisches Cu</b>	Enplate Cu872	40	43	4
<b>Aktivierung</b>	Degussa Aktivator 878	5	40	-
<b>Chemisches Ni</b>	Enplate MIS selec 9065	20	60	2
<b>Flash Au</b>	Immersion Gold 1	20	70	0.1
<b>Trocknung</b>	Trockenofen	60	100	.

### Substratmaterial

Materialien unterschiedlicher Qualität eignen sich für das LDS-Verfahren, je nach Anwendungsgebiet, thermischen Einschränkungen, Kosten oder mechanischen Anforderungen. Zum Beispiel ist PC/ABS (Mischung aus Polycarbonat und Acrylnitril-Butadien-Styrol) ein kostengünstiges amorphes Material mit geringer thermischer Stabilität, das üblicherweise für die Antennenproduktion in Smartphones verwendet wird [8]. Folglich ist PC/ABS eines der am häufigsten verwendeten Materialien [3]. Auf der anderen Seite ist LCP ein teures, semi-kristallines Material mit hoher thermischer Stabilität, das üblicherweise für Mikrogehäuse verwendet wird. Eine Auswahl an Materialien wird in Abbildung 7.7 nach ihrer thermischen Stabilität und ihrer Kristallinität dargestellt.

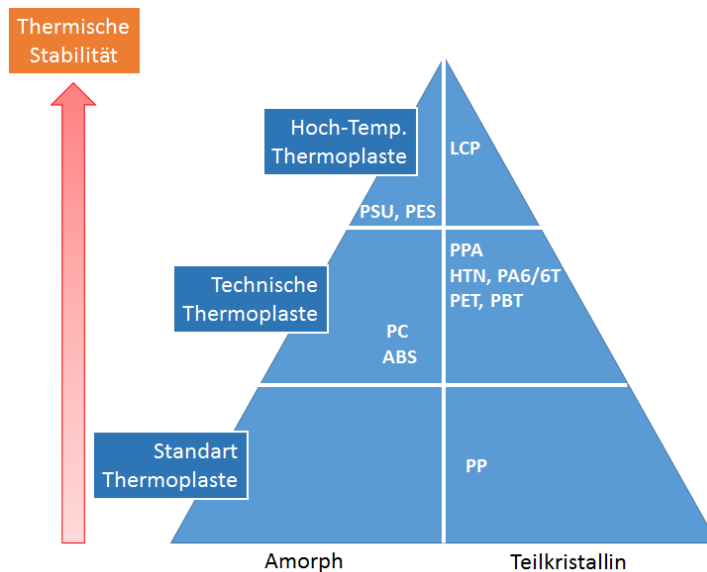


Abbildung 7.7: Qualitätsmaterial für die Laserdirektstrukturierungstechnologie [8]. PP polypropylen, PC polycarbonat, ABS acrylnitril-butadien-styrol, PA polyamide, PPA polyphthalamid, HTN hochtemperatur-nylon, PET polyethylenterephthalat, PBT polybutylenrephthalat, PES polysthersulfone, PSU polysulfon, LCP flüssigkristallpolymere.

### Anforderungen an die Metallisierungskeime

In der Mehrzahl der Fälle benötigen Kunststoffe, die für die LDS-Technologie verwendet werden, spezielle Additive (beispielsweise einen Chelatkomplex), die der Mischung vom Materialhersteller während des Compoundierens hinzugefügt werden. Obwohl sich die Eigenschaften des Kunststoffes aufgrund des Zusatzstoffes leicht ändern könnten, erleichtert seine extreme Hitzebeständigkeit trotzdem die Compoundierung und verhindert die Keimbildung während des Spritzgießprozesses. Daher müssen die Metallisierungskeime bestimmte Anforderungen erfüllen:

- Trennung von Metallkeimen unter dem Einfluss der Laserstrahlung
- Nichtleitende Materialien
- Fein verteilbar in technischen Polymeren mit Standard-Prozesstechniken
- Keine negativen Einflüsse auf die Eigenschaften des Polymers
- Thermisch stabil im Spritzgießverfahren
- ROHS (2002/95/EG) konform

## LDS-Fertigungsanlagen

Je nach Anwendung (Prototyping, Serienproduktion, niedrige Kosten, mikrofeine Struktur ...) stehen verschiedene LDS-Geräte (Fusion 3D 1100, 1200, 1500 und 6000) zu unterschiedlichen Kosten zur Verfügung. Einige der Systeme ermöglichen den Einsatz mehrerer Laserköpfe; bis zu vier Laserköpfe helfen die Prozesszeiten zu minimieren und den Durchsatz zu steigern durch gleichzeitige Strukturierung mehrerer Seiten der Komponenten. Eine automatische Komponentenmanipulation sorgt für präzise Ausrichtung und einen hohen Durchsatz [8].

### 7.3.4 Heißprägen

Das Heißprägen ist ein einfaches, preiswertes und schnelles Verfahren zur Herstellung von MIDs. Eines seiner Hauptmerkmale ist das Wegfallen des Galvanisierungsschritts, da die Metallisierung Teil des Prägeverfahrens selbst ist. Es ist besonders geeignet für Teile mit vorwiegend planaren Flächen und Leiterbahnbreiten über 300 µm.

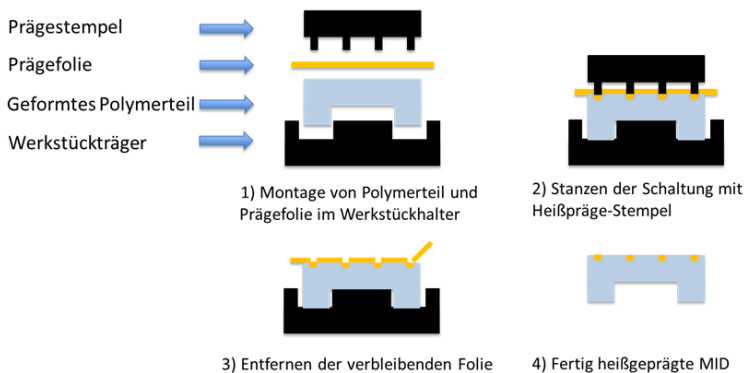


Abbildung 7.8: Schematische Darstellung des Heißprägeverfahrens nach[3].

Das Verfahren selbst wird in Abbildung 7.8 dargestellt. Ein spritzgegossenes Substrat wird in die Prägepresse eingelegt. Dann wird eine Kupferfolie mit einer speziellen Beschichtung durch Andrücken eines erhitzten Stempels (20 - 40°C über der Glasübergangs- oder Schmelztemperatur des Formteils), der das negative Layout (Gegenstück) der gewünschten Leiterbahn trägt, mit einem definierten mechanischen Druck auf das Substrat aufgebracht. Die Matrize schneidet den Kupferfilm und bindet gleichzeitig die Kunststoffschmelze des Substrats in den dafür vorgesehenen Bereichen. Nach dem Prägen wird das Ganze abgekühlt und die Matrize wird zurückgefahren, damit die überschüssige Folie entfernt und das fertig metallisierte Produkt entnommen werden kann.

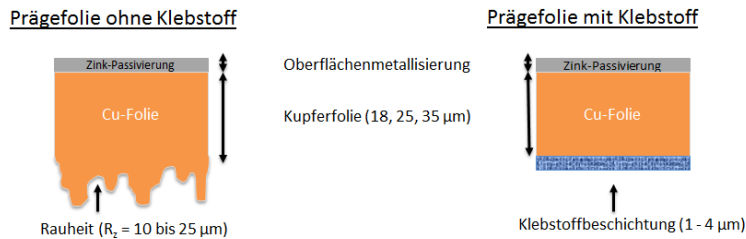


Abbildung 7.9: Verschiedene Folien für das Heißprägen von MID; mechanische Haftung (links) oder Haftung durch Kleben (rechts).

Der Prozess kann durchgeführt werden, in dem man einen Stempel vertikal auf die Folie/Substrat-Anordnung presst. Große ununterbrochene Bereiche können durch Verwendung eines strukturierten Rades oder einer Rolle hergestellt werden [7].

Die Folien werden entweder durch mechanische Haftung oder durch Kleben auf der Oberfläche des Polymer substratmaterials fixiert. Der Klebstoff wird durch die Temperatur aktiviert, die während des Prägeverfahrens aufgebracht wird, und garantiert eine enge Bindung zwischen der beschichteten Folie und dem Kunststoffträger. Im Falle der mechanischen Bindung ist die Unterseite der Folie strukturiert und die Oberfläche verzahnt sich während des Prägens mit dem Polymer und schafft dadurch eine starke mechanische Verbindung. Daher bestehen Kupferfolien hauptsächlich aus drei Schichten: einer Deckschicht, welche die Oxidation des Kupfers verhindert, der leitenden Kupferschicht und der verklebten oder verzahnten Schicht (Abbildung 7.9).

Tabelle 7.3: Leiterabmessungen vs. Kupferfoliendicke [7]

Foliendicke	Min. Leiterbahnbreite [ $\mu\text{m}$ ]	Min. Leiterbahnabstand [ $\mu\text{m}$ ]	Abstand vom Rand [ $\mu\text{m}$ ]
12	300	400	200
18	500	500	300
35	800	800	300
70	1000	1000	500
100	1200	1200	500

Die feinen Abmessungen der Stempel und die Abmessungen der Kupferfolien begrenzen auch die Strukturen, die realisiert werden können. Die derzeit machbaren Abmessungen sind in Tabelle 7.3 angegeben.

Allerdings müssen beim Heißprägen unterschiedliche Konstruktionsbeschränkungen berücksichtigt werden. Wie bereits erwähnt, ist das Verfahren hauptsächlich für planare Strukturen geeignet. Leichte Neigungen können verarbeitet werden; Hohlräume, Muster größer als 100 cm<sup>2</sup> und ein Länge-zu-Breite-Verhältnis von 4:1 sind zurzeit jedoch nicht möglich [3].

### 7.3.5 Aerosol-Jet-Printing

Wie die meisten Drucktechnologien besitzt das Aerosol-Jet-Printing eine relativ einfache Prozesskette. Nach dem Spritzgießen eines Substrats wird die Tinte direkt auf die Oberfläche aufgetragen und in einem Trocknungs- und Sinterprozess ausgehärtet.

Eine Vielzahl von Tinten ist für diese Technologie geeignet, von leitenden zu halbleitenden Tinten und von dielektrischen zu isolierenden Materialien. Sobald diese Technologie voll optimiert ist, können sehr feine Leiterstrukturen hergestellt werden, mit Bahnen von weniger als 10 µm bis zu mehr als 1 mm in der Breite [13].

Abbildung 7.10 zeigt das Prinzip des pneumatischen Aerosol-Jet-Druckverfahrens (Zerstäubung von Tinten durch Ultraschallwirkung ist ein alternatives Verfahren zum pneumatischen Verfahren). Im ersten Schritt wird die funktionale Tinte (eine Suspension mit einem Feststoffgehalt von etwa 60 bis 70%) in den Zerstäuber platziert und mit Hilfe der Gasströmung wird ein Aerosol erzeugt. Aufgrund der Schwerkraftwirkung fallen alle Aerosoltröpfchen, die größer als 5 µm sind, in die Tinte zurück, während der Rest der Aerosoltröpfchen mit einer Größe zwischen 1 bis 5 µm in der Schwebelage bleibt. Im nächsten Schritt wird das Aerosol in den Abscheidekopf transportiert, wo das überschüssige Gas entfernt wird. Im letzten Schritt 4 wird das Aerosol durch einen zweiten Gasstrom, auch Sheathgas genannt, in der Düse fokussiert. Die Oberfläche des Formteils wird dann gedruckt unter Verwendung eines berührungslosen, maskenlosen und Vektor-basierten Verfahrens. Die Standardhöhe einer solchen abgeschiedenen Schicht ist 2 µm. [13]

Der Druckvorgang kann durch Bewegen der Düse relativ zur Oberfläche durchgeführt werden, oder durch Bewegen der Komponente, während die Düse stationär bleibt. Da die Aerosolbildung ein kontinuierlicher Prozess (Atomisierung) ist, kann der Strahl nicht einfach abgeschaltet werden. Stattdessen muss der Tintenfluss am Ende der Düse mechanisch unterbrochen werden um die Tintendosierung zeitweise anzuhalten.

Aushärten ist der letzte Schritt des Druckprozesses; dieser Schritt wird normalerweise in einem Trockenofen durchgeführt. Hier wird die flüssige von der festen Phase (in der Regel

Metall) getrennt, während die Energiebelastung die metallischen Nanopartikel sintert, die dann eine zusammenhängende Schicht bilden. Bei der Einstellung der Härtungstemperatur muss der Wärmewiderstand des Substrats berücksichtigt werden, sowie die Tatsache, dass die Härtungstemperatur die elektrische Leitfähigkeit der leitfähigen Strukturen beeinflusst. Eine niedrigere Härtungstemperatur wird zu einer längeren Bearbeitungszeit führen.

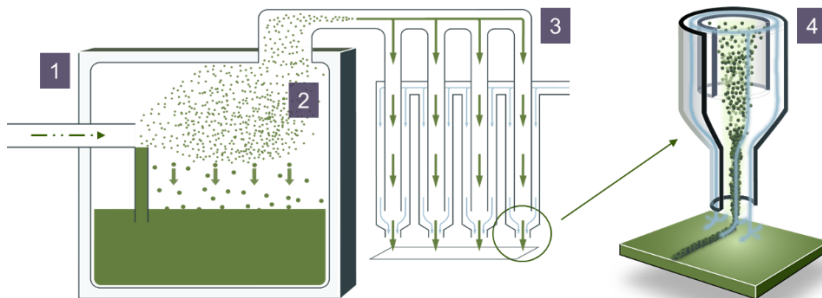


Abbildung 7.10: Schematische Darstellung des Aerosolstrahlverfahrens (pneumatische Zerstäubung).  
 Quelle: Optomec. 1: Zerstäubung der Tinte. 2: Tropfen durch Schwerkraftwirkung bei Tropfen größer als  $5\ \mu\text{m}$ . 3: Transport des Aerosols zum Abscheidekopf. 4: Fokussieren des Aerosols im Inneren der Düse durch Sheathgas.

Weitere Optionen für den letzten Aushärtungsschritt sind Lasersintern oder Lichtsintern, die selektiver sind, als die Trockenofenmethode. Die Herausforderung in beiden Fällen liegt in der Optimierung der Leistung des Systems. Wellenlänge und Intensität sind zwei weitere Faktoren, die für ein erfolgreiches Lichtsintern in Betracht gezogen werden müssen [3].

In diesem Absatz wird die Aerosol-Jet-Technologie mit dem Inkjet-Printing verglichen. Es gibt drei Hauptunterschiede zwischen beiden: Auflösung, Tintenviskosität und Abstand zwischen Druckkopf und Substrat. Zunächstbeträgt die Mindestauflösung für Aerosol-Jet-Druck rund  $10\ \mu\text{m}$ , für Ink-Jet dagegen etwa  $20\text{-}25\ \mu\text{m}$ . Ferner kann wegen des Zerstäubungsprozesses im Aerosol-Jet-Verfahren Tinte mit hoher Viskosität verwendet werden,  $1\text{-}1000\text{mPas}$  gegenüber  $1\text{-}20\text{mPas}$  für den Ink-Jet. Die letzte Überlegung ist der Abstand zwischen Druckkopf und Substratoberflächen.

Das Aerosol-Jet-Verfahren toleriert eine  $2\ \text{mm}$  Abweichung dieses Abstands (in Strahlrichtung) ohne Beeinträchtigung der Druckqualität; bei der Tintenstrahltechnologie muss der Druckkopf in einem konstanten Abstand von der Oberfläche bleiben. Folglich kann

eine raue Oberfläche mit einer Oberflächenänderung von weniger als 2 mm problemlos mit der Aerosol-Jet-Technik bedruckt werden, ohne vertikales Verfahren des Druckkopfs.

Andererseits sind die Inkjet-Technologien ausgereifter, leichter auf dem Markt verfügbar und kostengünstiger. Darüber hinaus ist der Aerosolstrahl kontinuierlich, das bedeutet, er muss abgeschaltet werden, um den Druckvorgang zu beenden; eine Abschaltung des Strahls führt zu Materialverlusten. In Anbetracht der hohen Kosten einer solchen Tinte können Materialverluste teuer sein.

### 7.3.6 Vorteile und Herausforderungen jeder Technologie

Das Zwei-Komponenten-Spritzgießen ist besser geeignet für hohe Produktionsvolumen als die drei bisher erwähnten Technologien. Diese Technologie erfordert eine hohe Anfangsinvestition; im Laufe der Zeit und bei steigendem Volumen wird der Preis pro Einheit jedoch immer günstiger. Dennoch muss die Zwei-Komponenten-Technologie im Vergleich zu den Aerosol-Jet- und LDS-Technologien mit gewissen Einschränkungen bezüglich der Abmessungen leben.

Tabelle 7.4: Vergleich der wichtigen MID-Strukturierungsprozesse basierend auf spezifischen Eigenschaften. [3]

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

Die Realisierung einer feinen Struktur ist schwierig, obwohl dies durch die Konstruktion des Teils und die Lage der Angüsse beeinflusst werden kann. Darüber hinaus ist jede Layoutänderung sehr teuer. Die Form muss neu gefertigt und die Angüsse müssen eventuell überprüft werden, was die Flexibilität der Technologie begrenzt.

Aerosol-Jet-Druck kann feinste Strukturen erzeugen und hat die höchste Materialvielfalt unter den vier Technologien; allerdings sind die Kosten pro Einheit relativ hoch. Obwohl die Technologie vielversprechend ist, ist sie noch nicht voll ausgereift.



Die Laserdirektstrukturierung kann als guter Kompromiss angesehen werden, da sie feine Strukturen im mittleren Maßstab zu einem angemessenen Preis erzielen kann. Sie profitiert auch von einer angemessenen Vielfalt an verwendbaren Materialien; allerdings sind die meisten Materialien teuer.

Die Heißprägetechnik kann zu einem niedrigen Preis und für große Stückzahlen implementiert werden; außerdem steht eine große Auswahl an Materialien für diese Technologie zur Verfügung. Die Haftung der Folie auf dem Substrat und das Entfernen der Restfolie sind für diese Technologie eine Herausforderung. Gleichwohl ist die Gestaltungsfreiheit begrenzt und jede Layoutänderung erfordert einen moderaten Aufwand. Tabelle 7.4 zeigt einen Überblick über die Vorteile und Herausforderungen der einzelnen Technologien

## 7.4 Bestückung von MID-Bauteilen

Wie beim Printed Circuit Board (PCB) können elektrische Komponenten auf eine MID-Komponente platziert werden, obwohl ihre 3D-Geometrie einige neue Herausforderungen mit sich bringt

### 7.4.1 Montagetechniken

Lötpaste, wie sie für die Leiterplattenmontage verwendet wird, ist ein etabliertes Material, um die Komponenten auf dem Substrat zu fixieren. Dennoch sind Roboter von der Art, wie sie zum Aufbringen von Lötpaste und für die Komponentenbestückung in PCB-Montagelinien verwendet werden entweder ungeeignet oder nur bedingt geeignet für die MID-Produktion [3].

Ein MID Produkt besitzt verschiedene planare Flächen, die sogenannten Prozessoberflächen. Normalerweise werden Lötpaste oder leitfähiger Kleber (eine Alternative zur Lötpaste) vor der Bestückung der Komponenten (Chip, Schalter ...) auf diesen Prozessoberflächen dosiert. Im ersten Fall wird das Bauteil erhitzt, bis die Lötpaste den Schmelzpunkt erreicht hat, dann wird abgekühlt, das Lotverfestigt sich, um eine elektrische Verbindung zwischen der Kontaktstelle der elektrischen Schaltung und dem Bauteil herzustellen. Im zweiten Fall wird der Leitkleber ausgehärtet (z.B. durch UV-Strahlung oder in einem Ofen).

Lötpaste besteht aus Metallpulver und einem Medium, genannt Flussmittel. Wird es erhitzt, so schmilzt das Metallpulver und das Flussmittel verflüssigt sich. Sobald das System abgekühlt ist, bleibt nur die gelötete Metallverbindung, das Flussmittel wurde entfernt. Leitfähige Klebstoffe bestehen aus metallischen Füllstoffen und einer Polymermatrix (Harz), die eine niedrigere Temperatur für die Aushärtung benötigen. Bei einem wärmeempfindlichen System ist diese Art von Verbindungsmedium vorzuziehen.

Neben Lötpaste oder leitfähiger Klebeverbindung gibt es noch andere Techniken, wie beispielsweise Drahtbonden, um eine elektrische Verbindung herzustellen. Drahtbonden ist ein kostengünstiges und flexibles Verfahren, das nicht die Erwärmung des gesamten Substrats erfordert. Die Drahtdurchmesser liegen im Bereich von 20 bis 500  $\mu\text{m}$ ; sie werden für Hochleistungsanwendungen eingesetzt. Drahtmaterialien sind entweder Aluminium, Silber oder Gold. Thermokompression gekoppelt mit Ultraschall ist vorzuziehen, um die Drähte zu bonden. In diesem Fall wird das Metall auf 100 - 500°C erhitzt, auf dem Chip gebondet und dann auf die Anschlussfläche bewegt, wo es erneut gebondet und schließlich vom Rest der Drahtrolle geschnitten wird.

### 7.4.2 Positionierung

Bei der automatisierten Bestückung elektronischer Komponenten unter Verwendung der Surface Mount Technology (SMT) nimmt ein Greifwerkzeug – in der Regel eine Vakuumpipette – die Komponente aus einer Zuführungsvorrichtung auf. Die Fügerichtung und die Oberfläche müssen senkrecht sein, um sicherzustellen, dass die Komponenten nicht kippen und schlecht positioniert werden. Zur Bestückung eines Surface Mount Device (SMD) werden in der Regel vier Achsen benötigt (3 linear  $[x, y, z]$  + 1 Rotationsfreiheitsgrad); allerdings benötigen Bauteile mit mehreren -Prozessflächen wie MID oft eine Anlage mit fünf bis sechs Achsen.

Es gibt zwei unterschiedliche Vorgehensweisen: der Schaltungsträger wird immobilisiert und die Bauteile werden gedreht, positioniert und bestückt; oder der Schaltungsträger wird gedreht und positioniert, während die Bauteile bestückt werden.

### 7.4.3 Herausforderungen

Die Besonderheiten der Verbindung eines elektronischen Bauteils mit einem Leiter müssen in Betracht gezogen werden in Bezug auf die Verbindungsprozesse, die angewandten Medien und die Parameter für die 3D-MID-Produktion. Für die MID-Herstellung gibt es eine Vielzahl von Herausforderungen [14]:

- Weiter Abstand zwischen den Lötstellen, kann zu Kurzschluss führen
- Rauigkeit der Leiterstruktur
- Delaminierung der Leiterbahnen
- Leiterrisse bei hoher thermischer Belastung

Delaminierung der Leiterbahnen und Leiterrisse aufgrund anisotroper Wirkungen und hohem Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK). Eine hohe thermische Belastung kann in einigen Fällen thermomechanische Spannungen an den Grenzflächen erzeugen, die zu Rissen oder Delaminierung führen.

Ein weiteres Problem, das mit dem WAK zusammenhängt, sind Diskrepanzen zwischen Chip und MID-Substrat. Elektronische Komponenten im Allgemeinen und keramische Komponenten im Besonderen besitzen niedrige Wärmeausdehnungskoeffizienten im Vergleich zu Polymeren. Folglich kann sich das Polymersubstrat unter Wärmebelastung weiter ausdehnen als der Chip, was zu einem Abscheren des Bumps von seinem Pad führt. Dies führt zu einer permanenten Abweichung wie in Abbildung 7.11 dargestellt.

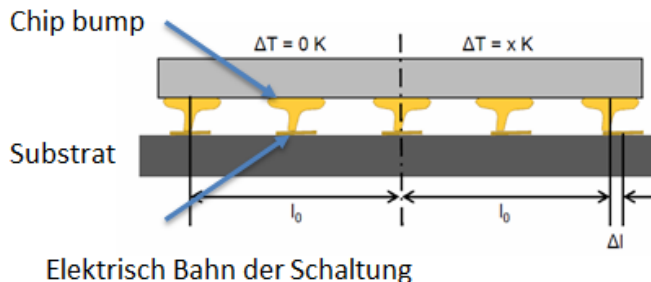


Abbildung 7.11: Abscherung zwischen Substrat und Chip-Bondinsel aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnung. [9]

## 7.5 Branchen und Anwendungen

Wenn man verschiedene MID-Anwendungen betrachtet, ist die Vielfalt der zur Verfügung stehenden Produkte, der Sektoren und Branchen, welche die MID-Technologien nutzen, offensichtlich (Abbildung 7.12). Insbesondere in zwei Branchen gibt es ein erhebliches Potenzial für High-End-MID-Anwendungen: in der Automobilindustrie und der Medizintechnik. Die IT- und Telekommunikationssektoren, andererseits, sind gekennzeichnet durch delokalisierte Massenproduktion in Asien [15].

Die Automobilindustrie ist ein sehr wettbewerbsorientierter Sektor, in dem MID sehr zuverlässig und kostengünstig sein muss. Dennoch sind diese Anforderungen erreichbar. Eine immer stärkere Nachfrage nach mehr Sicherheit und mehr Funktionen drängt die Designer dazu, MID-Produkte in ihre Fahrzeuge zu integrieren. Drucksensoren, entwickelt von Bosch, für ABS/ESP und 2D-Schaltmodule, die in das Lenkrad integriert sind, sind wichtige Beispiele für Anwendungen in diesem Sektor.

Der Telekommunikationssektor verlangt schlankere und leichtere Geräte. Antennen, integriert in das Smartphone-Gehäuse, wurden zum größten Markt für MID-Bauteile. Der Vorteil liegt in der Kombination der 3D-Designfreiheit mit elektromagnetischen Transceiver-Eigenschaften für verschiedene Wireless-Standards, einschließlich, zum Beispiel, Wi-

Fi, Bluetooth, UMTS und LTE-Antennen, die, wie zuvor erläutert, mit unterschiedlichen Technologien hergestellt werden können. Darüber hinaus werden immer mehr Antennen auch in Laptop-Gehäusen integriert.

Die Medizintechnikbranche zeigt Interesse an kleinen Gehäuselösungen, an der Integration elektronischer Geräte, vor allem in einer Gesellschaft, in der die Alterung der Bevölkerung und eine gesunde Lebensweise die Ausgaben für das Gesundheitswesen erhöhen. Hörgeräte sind wahrscheinlich das Vorzeigeprodukt aber auch andere Anwendungen, beispielsweise Insulinpumpen, werden an Bedeutung gewinnen.



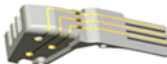
Sektoren	Anwendungen	Beispiel
Autoindustrie	Klimaanlage Positionierungssensoren Drucksensoren 2D Umschaltmodule	Drucksensor (Harting) 
Telekommunikation	Multibandantennen Passive UHF RFID Transponders	Multibandantennen (TE connectivity) 
Medizin	Multi LED Insulinpumpen Hörgerät	Hörgerät (Phonak) 

Abbildung 7.12: Zusammenfassung der MID-Anwendungen und Branchen

## 7.6 Anwendungsbeispiel

Das Bauteil, das gewählt wurde, um dieses Kapitel zu veranschaulichen und die zuvor diskutierte Theorie zu untermauern, ist ein Lab-on-Chip für ein Immunoassay. MicroWeb-Fab (ein KMU Mikrofabrikationsnetzwerk) hat dieses Bauteil entwickelt. Das MrBead-Gerät dient zum Nachweis von Antikörpern mit Hilfe paramagnetischer Beads und dem Giant Magnetoresistance (GMR) Effekt. Paramagnetische Beads werden durch die Ziel-Antikörper (ELISA-Test) auf der GMR-Sensorfläche gebunden. Unter dem Einfluss eines magnetischen Feldes, das in dem Gerät erzeugt wird, detektiert der GMR-Sensor die Verzerrung innerhalb eines Feldes, die durch die gebundenen Beads verursacht wird.

Das Bauteil hat die Abmessungen von  $27 \times 50 \times 3 \text{ mm}^3$  und besteht aus zwei Teilen. Der obere Teil trägt die Leiterbahnen und das fluidische Netzwerk. Das fluidische Netzwerk besteht aus dem Einlass, einer Reagenzkammer, dem Messbereich über dem Sensor, einer Abfallkammer und dem fluidischen Kanal zum Gerät, alle verbunden durch einen Mikrokanal.

Der obere Teil wird durch Zwei-Komponenten-Spritzguss hergestellt. Die erste Komponente besteht aus metallisierbarem Polymer (LCP 820 i PD), die zweite Komponente aus nicht metallisierbarem Polymer (LCP E 471). Die resultierenden Leiterbahnen haben eine Mindestbreite von  $120 \mu\text{m}$  und einen Abstand zwischen den Bahnen von  $340 \mu\text{m}$ . Abbildung 7.13 zeigt eine schematische Darstellung des Gerätes.

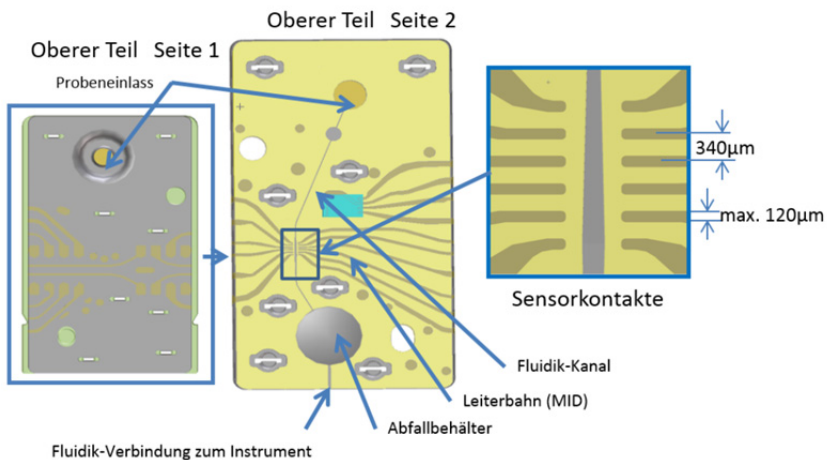


Abbildung 7.13: Lab-on-Chip für einen Immunoassay, entwickelt von MicroWebFab.

Der untere Teil bildet die Grundfläche des Kanals und enthält einen Hohlraum, in dem der GMR-Sensorchip so angebracht ist, dass die Sensorfläche auf gleicher Höhe mit der Grundfläche des Kanals ist, siehe Abbildung 7.14. Gold-Stud-Bumps auf den Kontaktstellen des GMR-Sensorchips sind die Schnittstelle zu den Leiterbahnen im oberen Teil. Sobald der obere und der untere Teil thermisch miteinander verbunden sind, wird der Fluidkanal abgedichtet und die Gold-Bumps verschmelzen mit der Goldbeschichtung der Leiterbahnen. Diese Lösung wurde gewählt, weil die Dosierung von Klebstoff kritisch war angesichts der Nähe des Fluidkanals und der möglichen Gefahr des Verstopfens durch überlaufenden Klebstoff.

Die Formherstellung war aufgrund der feinen Leiterbahnstrukturen und die resultierenden langen und engen Fließwege eine der größten Herausforderungen für die Produktentwicklung.

Sobald das Teil spritzgegossen wurde, müssen die Leiterbahnen realisiert werden. Das Verfahren wird als "stromlose Metallisierung" bezeichnet. Der erste Schritt, Beizen, ist das Eintauchen des Teils in eine Kalilauge, um die Oberfläche zu reinigen und die im Material eingebetteten Metallisierungskeime zu aktivieren. Während des zweiten Schritts wird das Teil in ein Kupferbad gelegt, bis 5  $\mu\text{m}$  auf dem metallisierbaren Polymer gewachsen sind. Das Verfahren wird mit Nickel- und Goldbädern wiederholt, um eine 2  $\mu\text{m}$  dicke Nickelschicht zu erhalten; dann wird eine 0,2  $\mu\text{m}$  Schicht aus Gold auf die Oberseite der Nickelschicht gelegt.

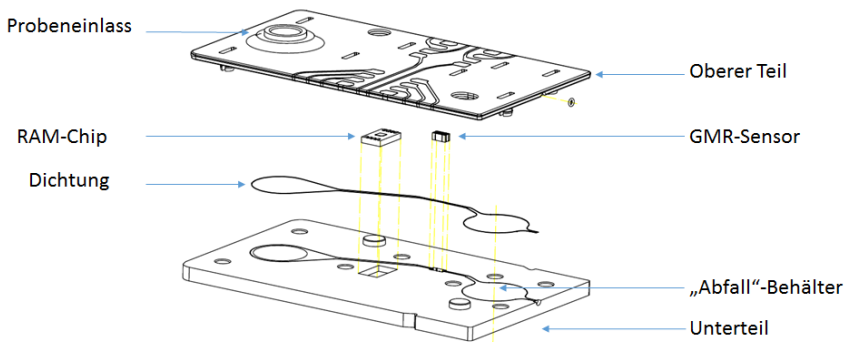


Abbildung 7.14: Lab-on-Chip für einen Immunoassay entwickelt von MicroWebFab. Montage

## 7.7 Referenzen

1. FRANKE, J., GAUSEMEIER, J., GOTH, C., DUMITRESCU, R., (2011): "MID-Studies 2011 – Markt- und Technologieanalyse". Eine Studie im Auftrag von Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e-v. (Ed), Erlangen.
2. FRANKE, J. (1995), "Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3D MID)", Hanser, Munich.
3. OSSWALD, T. A., BAUR, E., BRINKMANN, S. (2006), International Plastics Handbook, 4th edn, Hanser, München.
4. FRANKE J. (2014), "Three-dimensional moulded interconnect devices (3D-MID). Materials, manufacturing, assembly, and applications for injection molded circuit carriers", Hanser, München

5. ISO, 1133-1, (2011), "Plastics – Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics". International Organization for Standardization.
6. "3-D MID e.V. Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen", [Online], Available: <http://www.3d-mid.de/2/technology/manufacturing/two-shot-molding/molding-tool.html>. [21.09.2016]
7. DE ZWART, R. M., TACKEN, R. A., BOLT, P. J., (2006) "Development of a MID LED housing", proceeding of the global conference on micro manufacture, Grenoble.
8. FRANKE, J., (2013), "Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID)", Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger, Hanser, München.
9. LPKF laser & electronics, [Online], available: <http://www.lpkfusa.com/mid/materials.htm> [21.09.2016]
10. FAPS – Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, [Online], available: <http://www.faps.de>, [21.09.2016]
11. Panasonic, [Online], available: <https://www.panasonic.com>, [21.09.2016]
12. BARALI, L., ERNST, C., ELSPASS, S., (2006), "Lasergestützte MID-Technologien", In: Geiger, M. et al. (Ed): "Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik – Tagungsband", ninth Erlanger Seminars LEF, Meisenbach, Bamberg.
13. HEININGER, N., JOHN, W., BOßLER, H.-J., (2004), "Fertigung von MID-Bauteilen vom Rapid Prototyping bis zur Seriemit innovativer LDS-Technologie", Firmenschrift LPKF Laser & Electronics AG, Garbsen.
14. HOERBER, J., GOTH, C., FRANKE, J., (2012) "Potential of aerosoljet Prining For manufacturing 3-D MID", Innov'Days, PEP, Bellignat.
15. GOTH, C., (2013), "Analyse und optimierung der entwicklung und zuverlässigkeit räumlicher schaltungsträger (3D-MID)", Meisenbach, Bamberg.





# 8 Geometrievermessung im Mikrobereich

**Samanta Piano, Rong Su and Richard Leach**

Advanced Manufacturing Technology Research Group, Manufacturing Metrology Team,  
University of Nottingham, UK

## 8.1 Einführung

Die Fähigkeit komplexe, hochpräzise Miniatur-Komponenten herzustellen ist der Schlüssel für den Übergang zur hochwertigen Fertigung. Moderne Fertigungsindustrien, die Präzisionsbearbeitungstechniken wie beispielsweise Diamantdrehen, Spritzgießen, Mikrofräsen und Mikro-Elektroentladungsbearbeitung einsetzen, haben derzeit eine Reihe von Möglichkeiten zur Messung kleinformatiger Strukturen mit Toleranzen im Mikromaßstab, entweder mit taktilen oder nicht-taktilen Systemen [1].

Die Messtechnik ist von wesentlicher Bedeutung für die Verringerung der Maßtoleranzen, denn durch die Reduzierung von Spiel oder Verschleiß können effizientere Geräte hergestellt und ihre Langlebigkeit verbessert werden. Ein Beispiel sind kleinere und effizientere Einspritzdüsen in Verbrennungsmaschinen, die entscheidend von einer verbesserten dimensionellen Messfähigkeit abhängen. Weitere Beispiele sind Radiofrequenz- oder LWL-Stecker-Komponenten, wo Strukturgrößen und Toleranzen Messunsicherheiten im Bereich von 0,1  $\mu\text{m}$  erfordern, oder kleine asphärische/Freiformlinsen in Digitalkameras oder Mobiltelefonen [2]. Eine aufstrebende Branche sind medizinische Hightech-Produkte, die sehr oft entscheidend von kleinen Komponenten abhängen, beispielsweise Insulinpumpen, Herzschrittmacher, in-vivo-diagnostische Sensoren, oder medizinische endoskopische Abbildungssysteme.

In diesem Kapitel stellen wir Kontakttechniken und berührungslose Techniken vor, mit denen 3D-Strukturen im Mikrometerbereich gemessen werden können.

## 8.2 Kontakttechniken

Tastschnittgeräte und Koordinatenmessmaschinen sind als genaue und präzise dreidimensionale Messwerkzeuge in modernen Fertigungsverfahren weit verbreitet. In diesem

Abschnitt werden die wichtigsten Merkmale der Kontakttechniken beschrieben; dabei konzentrieren wir uns auf ihre Fähigkeit im Mikromaßstab gefertigte Teile zu messen.

### 8.2.1 Tastschnittgeräte

Ein Tastschnittgerät besteht aus einer scharfen Spitze, die mit der zu messenden Oberfläche in Kontakt gebracht wird. Durch Abtasten der Oberfläche mit der Spitze und Überwachen der Reaktion auf Oberflächenhöhen kann die Oberflächentopographie gemessen werden. Eine schematische Darstellung eines Tastschnittgerätes sehen Sie in Abbildung. 8.1.

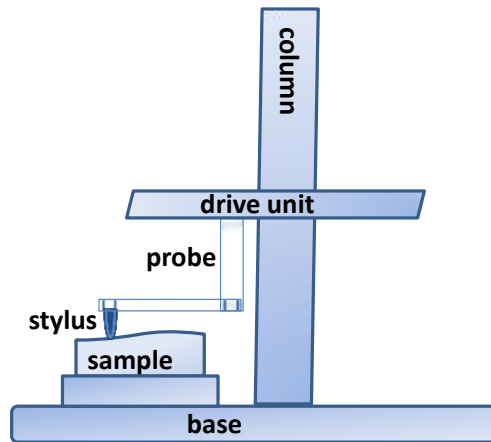


Abbildung 8.1: Schematische Darstellung eines Tastschnittgeräts.

Beim Abtasten der Oberfläche mit der Tastspitze wird ihre vertikale Verschiebung aufgezeichnet, eine Höhenkarte erzeugt und mit Hilfe eines elektromechanischen Messwandlers in ein elektrisches Signal umgewandelt [3-6]. Die Spitze spielt eine entscheidende Rolle bei der Leistung eines Tastschnittgeräts, da es physisch in Kontakt mit der Oberfläche kommt. Die Tastspitze ist in der Regel aus einem Diamanten gefertigt, aber auch andere Materialien, beispielsweise Aluminiumoxid, werden häufig verwendet, je nach dem Material der Oberfläche, die gemessen wird. Andere Parameter, die berücksichtigt werden sollten, sind Form und Größe der Tastspitze, die sich direkt auf den räumlichen Frequenzgang des Instrumentes auswirken. Je nach Anwendung kann die Tastspitze unterschiedliche Geometrien aufweisen; die am häufigsten verwendete hat eine konische Form mit einer abgerundeten Kontaktkante und einem Krümmungsradius im Bereich von 2  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$  und einem Neigungswinkel von 90° [7].

Ein Effekt, der berücksichtigt werden sollte, ist der systematische Fehler, verbunden mit der Form der Tastspitze, der die gemessene Topographie verzerrt [8,9]. Dieses Problem wurde intensiv untersucht und mathematische Modelle wurden vorgeschlagen, um die Verzerrungseffekt zu berücksichtigen und die Genauigkeit der Messung zu verbessern [10-12]. Die Fähigkeit eines Taststifts Proben mit steilen Oberflächen zu erkennen war ebenfalls Gegenstand der Untersuchung; dafür wurde kürzlich eine neue steigungsangepasste Methode zur Probenneigung vorgeschlagen, die zu einer signifikanten Verringerung des Messfehlers führt [13].

Tastschnittgeräte werden weithin für Oberflächenprofilmessungen eingesetzt; ein Tastschnittgerät, das mit einer kugelförmigen Spitze mit großem Radius ausgerüstet ist, kann auch zur Messung der Oberflächenform eingesetzt werden. Allerdings ist die Verwendung eines Tastschnittgeräts für 3D-Messungen in einem Produktionsprozess oder In-Line-Prozess aufgrund der Betriebszeit begrenzt, die für ein hochdichtes Gitter aus Punkten mehrere Stunden betragen kann.

## **8.2.2 Mikro-Koordinatenmessgeräte**

### **8.2.2.1 Einführung in Koordinatenmessgeräte**

Ein Koordinatenmessgerät (KMG) misst die physikalischen Abmessungen eines Objekts [14]. Wie in Abbildung 8.2 gezeigt, besteht ein KMG im Allgemeinen aus drei orthogonalen linearen Achsen für die genaue Steuerung einer Sonde in einem kartesischen Koordinatensystem.

Die Sonde auf einem KMG besitzt in der Regel eine kugelförmige Tastspitze, mit der sie Kontakt mit dem zu messenden Objekt aufnimmt. Die Koordinaten der Tastspitze werden aufgezeichnet, sobald ein Kontakt mit der Oberfläche des zu messenden Objekts besteht. Nach Verrechnung des Stift-Radius können die Koordinaten der Oberfläche bestimmt werden.

Es gibt viele verschiedene geometrische Konfigurationen von KMGs, die verschiedene fahrbare Brücken und Drehtische verwenden [4]. Einige Konfigurationen können zusätzliche Rotationsachsen aufweisen [15]. Ein modernes KMG wird in der Regel mit Hilfe einer CNC-Steuerungssoftware betrieben. Dies ermöglicht eine automatisierte 3D-Messung, wenn das KMG mit Input vom CAD-Modell des zu messenden Teils programmiert wird.

### **8.2.2.2 Leistungsfähigkeit kommerzieller Mikro-KMGs**

Die gestiegene Nachfrage nach Herstellung von Produkten im Mikromaßstab setzt voraus, dass KMGs in der Lage sind, Teile im Mikromaßstab genau zu messen. Sogenannte "Mikro-KMGs" wurden entwickelt, um diesem Bedarf gerecht zu werden. Im Allgemeinen kann ein Mikro-KMG durch Miniaturisierung eines herkömmlichen KMG oder unter

Verwendung einer Sonde, die optische Technologie einsetzt konstruiert werden. State-of-the-art-Mikro-KMGs arbeiten in der Regel im Bereich von zehntel Millimetern mit einer volumetrischen Genauigkeit von hundertstel Nanometer und können zur Messung von Strukturen mit Millimeter- bis Mikrometer-Abmessungen verwendet werden. Typische Beispiele für kommerzielle Systeme sind die Zeiss F25 Micro-CMM [16], die IBS Isara 400 Ultra precision CMM [17] und die SIOS Nanomessmaschine (NMM) [18]. Die Zeiss F25 CMM verfügt über ein Messvolumen von  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  und einer maximal zulässigen Fehlerangabe (MPE) von  $0,25 + L/666\text{ }\mu\text{m}$ , wobei L die Messlänge in Millimetern ist. Die Isara 400 minimiert den Abbe-Fehler [19] durch Ausrichtung von drei linearen Interferometern zum Zentrum der Tastspitze. Das Messvolumen beträgt  $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ , und die angegebene 3D-Messunsicherheit beträgt  $109\text{ nm}$  (bei  $k = 2$ ). Die NMM ist ein Laser-Interferometer-basiertes Mikro-KMG, das von der Technischen Universität Ilmenau entwickelt wurde. Der Messbereich beträgt  $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  mit einer Sub-Nanometer-Auflösung der Bewegung. Darüber hinaus gibt es weitere Mikro-KMGs; mehrere Bewertungen der bestehenden Mikro-KMGs finden Sie an anderer Stelle [4,20,21].

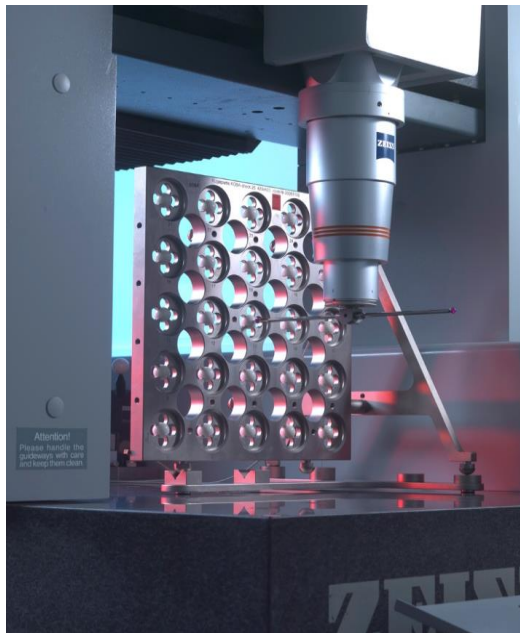


Abbildung 8.2: Bewegliches brückenförmiges KMG mit sphärischen Taststiften. (Foto mit freundlicher Genehmigung von Herrn David Flack vom National Physical Laboratory)

### 8.2.2.3 Mikrotastsysteme

Eine der wichtigsten Komponenten eines Mikro-KMG ist das Tastsystem. Das Tastsystem wird in ISO 10360, Teil 1 [22] für konventionelle taktile KMGs definiert. Abbildung 8.3 zeigt die Hauptkomponenten. Im Allgemeinen umfassen die Sondentechnologien für Mikro-KMGs mechanische Sonden, siliziumbasierte Sonden, optomechanische Sonden und Vibrationssonden. Eine umfassende Bewertung der Mikro-KMG-Sonden finden Sie an anderer Stelle [23].

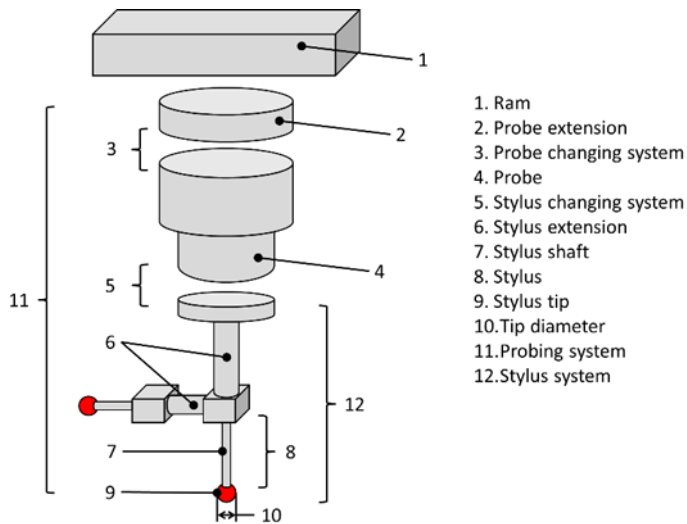


Abbildung 8.3: Typische taktile Sonde mit Tastsystem .

Mechanische Mikro-KMG-Sonden basieren auf den gleichen Konzepten wie klassische KMG-Sonden, sie sind jedoch für die empfindliche Detektion und geringe Antastkräften hochentwickelt und optimiert. Sobald Taststifte mit 100  $\mu\text{m}$  oder kleineren Durchmessern eingesetzt werden, reagiert die Messung hoch empfindlich auf die Antastkraft. Eine Reduzierung der Antastkraft kann mögliche Schäden mindern, die durch plastische Verformung verursacht werden und die Genauigkeit der Messung wesentlich verbessern.

Beispiele mechanischer Mikro-KMG-Sonden umfassen die Sonde, die am METAS entwickelt wurde, die auf Präzisionsfestkörpergelenken und induktiven Sensoren basiert [24], die IBS Triskelion (dreibeinige Konstruktion) und hochempfindliche Kondensatoren [17], sowie ein 3D-Sondendesign, das DVD-Aufnahmeköpfe als Sensorelement verwendet [25]. Die IBS Triskelion und METAS Sonden werden in Abbildung 8.4 gezeigt.



Abbildung 8.4: IBS Triskelion [17] und METAS Mikro-KMG-Sonden[24].

Der Vorteil siliziumbasierter Sonden ist die reduzierte Antastkraft durch Verwendung von Siliziumbiegevorrichtungen, Membranen oder Maschen, um den Taststift zu dämpfen [26]. Produktionstechniken aus der integrierten Leiterplatten-Industrie werden für die Entwicklung und Herstellung Silizium-basierter Mikrosonden verwendet. Hochkomplexe Designs werden durch Ätz- und Abscheidungsverfahren ermöglicht.

Die Verschiebung des Taststiftes kann durch den Einsatz optischer Detektionstechnik auf Grundlage der Ablenkung eines Laserstrahls, interferometrischen Messungen, einem kapazitiven Sensor oder einem piezoresistiven Dehnungssensor auf einem Silizium-Biegeelement oder einer Membrane nachgewiesen werden. Zum Beispiel hat die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) eine "Boss-Sonde" entwickelt, mit der piezoresistive Dehnungssensoren auf eine Silizium-Membrane geätzt werden (wie in Abbildung 8.5 gezeigt). Die Verformung, die sich aus dem Kontakt der Sonde mit der zu messenden Oberfläche ergibt, wird nachgewiesen [27].

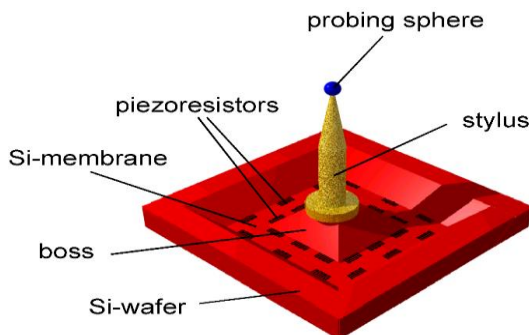


Abbildung 8.5: Prinzipschema der Boss-Sonde, die an der PTB entwickelt wurde [27].

Weitere Informationen zu anderen Silizium-basierten Mikrosonden finden Sie an anderer Stelle [28,29]. Ein Problem mit Silizium-basierten Mikro-KMG-Sonden ist die Anisotropie der Sondensteifigkeit. Opto-mechanische Sonden sind so konzipiert, dass sie dieses Problem und die Notwendigkeit mit geringen Antastkräften zu arbeiten lösen können. Opto-mechanische Sonden beruhen auf optischer Messung der Tastspitze, die in Kontakt ist mit der zu messenden Oberfläche, so dass keine Biegeelemente erforderlich sind.

Ein von der PTB [27] entwickeltes Tastsystem verwendet eine optische Faser mit einer sphärischen Spitze als Taststift. Wie in Abbildung 8.6 gezeigt, werden zwei Mikroskopobjektive zur Messung der Bewegung der Sondenspitze in der x-, y- und z-Achse verwendet. Die Messkraft dieses Fasertasters liegt in der Größenordnung von  $10 \mu\text{N}$ . Allerdings ist es möglich, dass die Sondenspitze an der zu messenden Oberfläche anhaftet und Antastkräfte nicht isotrop sind. Ein weiteres Beispiel einer optischen Fasersonde wurde am National Institute for Standards and Technology entwickelt [30].

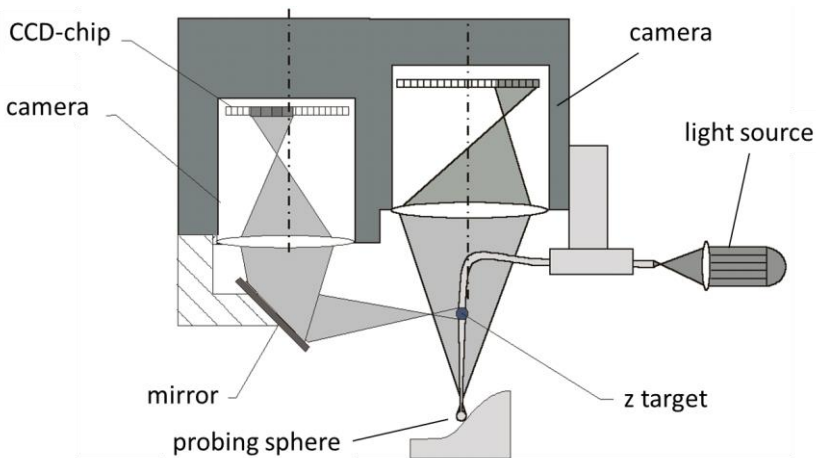


Abbildung 8.6: Prinzipschema der 3D PTB Fasersonde [27].

Mikro-KMG-Vibrationssonden wurden konzipiert und entwickelt, um das Problem der Oberflächenwechselwirkungskräfte zu lösen, die bei einem Durchmesser der Tastspitze in der Größenordnung von  $100 \mu\text{m}$  und weniger erheblich sein können. Die Einflüsse der Oberflächenwechselwirkungskräfte können durch die Verwendung einer schwingenden Sondenspitze verringert und das Problem der Haftung kann minimiert werden. Vibrationssonden messen die Oberfläche durch Analysieren des erfassten Schwingungsverhaltens.

Ein Beispiel einer handelsüblichen Mikro-KGM-Vibrationssonde ist das UMAP-System von Mitutoyo [23]. Die UMAP-Sonde schwingt den Taststift vertikal mit mehreren Kilohertz. Die geschätzte Wiederholbarkeit des Systems liegt bei etwa 100 nm; für eine hochgenaue Messung reicht dies allerdings oft nicht aus. Informationen zu weiteren Vibrationssonden mit Nanometer-Wiederholbarkeit und/oder Nano-Newton-Kontaktkraft finden sie an anderer Stelle [31,32]. Es gibt verschiedene Methoden, um die Sondenspitze in Schwingungen zu versetzen, beispielsweise durch Oszillationen bei einer Frequenz von mehreren zehn Kilohertz durch einen Quarzoszillator, oder durch Laser-Trapping einer Silikakugel mit einem Durchmesser von 8  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$  und Vibrieren der Sonde in die z-Achse bei Frequenzen bis zu 50 MHz [31].

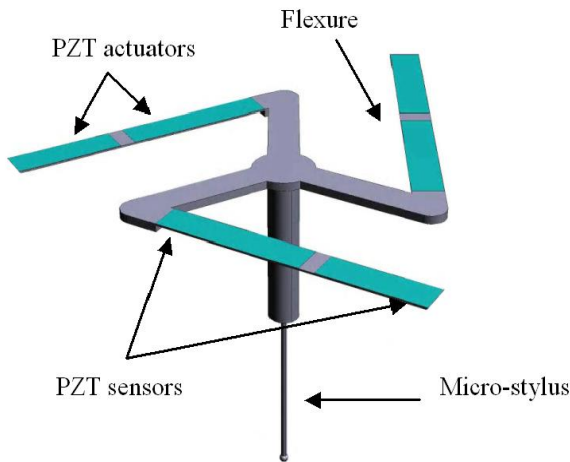


Abbildung 8.7: Mikro-Vibrationssonde des NPL [33].

Diese Vibrationssonden können nur in einer Dimension oszillieren. Eine 3D-Mikro-KMG-Vibrationssonde wurde am National Physical Laboratory (NPL) entwickelt [33], siehe Abbildung 8.7. Die NPL-Sonde besteht aus einem Triskelion-Biegeelement und einem Mikro-Taststift. Sie vibriert angeregt durch sechs piezoelektrische (PZT) Aktoren.

#### 8.2.2.4 Fehlerquellen in KMGs

Ein typisches KMG hat einundzwanzig Quellen geometrischer Fehler [4]. Jede Achse hat einen linearen Fehler, drei Rotationsfehler und zwei Geradheitsfehler (sechs pro Achse ergibt achtzehn). Die letzten drei Fehler sind die Orthogonalitätsfehler zwischen zwei beliebigen Achsenpaaren. Die geometrischen Fehler der KMG werden nach einer der vier folgenden Methoden gemessen:



- mit Instrumenten wie gerade Kanten, Autokollimatoren und Ebenen;
- mit einem Laserinterferometersystem und der zugehörigen Optik;
- mit einer kalibrierten Lochplatte [34]; und
- mit Hilfe eines Tracking-Laserinterferometers [35].

Mit modernen Computern können die Fehler der KMGs abgebildet werden (volumetrische Fehlerkompensation), wobei die Korrekturen der geometrischen Fehler in der Software durchgeführt werden [36,37]. Temperaturabhängige Messfehler können unter Verwendung eines parametrischen Ansatzes kompensiert werden [38]. Die Messunsicherheit einer KMG kann unter Verwendung eines Simulationsverfahrens beurteilt werden [39]; die KMG-Software muss ebenfalls auf der Basis von ISO 10360, Teil 6 getestet werden [40].

## 8.3 Berührungslose Techniken

Es gibt verschiedene Arten von kommerziellen berührungslosen Techniken. In diesem Abschnitt konzentrieren wir uns auf optische Instrumente, die für die Messung von 3D-Mikrosystemen geeignet sind: Mikroskopie mit Fokusvariation, Kohärenz-Scanning-Interferometrie, konfokale Mikroskopie, Laser-Triangulation und Mikrostreifenprojektion. Im Gegensatz zu den traditionellen Kontakttechniken sind optische Instrumente in der Lage 3D-Messungen durchzuführen, ohne die Oberfläche zu berühren; sie sind viel schneller bei der Bilderfassung einer Fläche und können Farbinformation bestimmen.

### 8.3.1 Mikroskopie mit Fokusvariation

Die Mikroskopie mit Fokusvariation (FV) liefert Informationen über die Topographie und Farbe einer gemessenen Oberfläche [41,42]. FV ist in der Lage, hochauflösende Form- und Texturmessungen durchzuführen [43]. In Abbildung 8.8 sehen Sie eine schematische Darstellung eines FV-Mikroskops.

In einem typischen FV-Mikroskop wird das von einer Breitbandquelle erzeugte Licht durch ein System von Objektivlinsen und einen Strahlteilungsspiegel auf die Probe fokussiert. Das Licht wird von der Probe in verschiedene Richtungen gestreut, je nach Topographie. Das gestreute Licht, das die Objektivlinsen erreicht, wird dann durch den Strahlteilungsspiegel übertragen und von einem lichtempfindlichen Detektor empfangen. Um eine vollständige 3D-Karte der Oberfläche der Probe zu erhalten, werden die Objektivlinsen vertikal entlang der optischen Achse verschoben. Aufgrund der Oberflächentopographie ist nur eine einzige Ebene im Fokus und dies führt zu einem Kontrastwechsel auf dem lichtempfindlichen Detektor. Mit Hilfe von Algorithmen wird die Fokusänderung in der vertikalen Achse analysiert, um die erfassten Daten in 3D-Informationen und ein Farbbild der Probe zu konvertieren [44,45]. Der vertikale Scanbereich, abhängig vom Arbeitsabstand

des Objektivs, kann zwischen 3,2 mm und 22 mm variieren, mit einer Auflösung von bis zu 10 nm. Der xy-Bereich variiert typischerweise von etwa  $0,1 \text{ mm} \times 0,1 \text{ mm}$  bis  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  für eine einzige Messung (je nach Objektiv), kann jedoch durch die Verwendung von Stitching-Algorithmen und einer Bewegungsstufe auf bis zu  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  erhöht werden. Die FV-Technik kann zur Messung von Proben mit einem hohen Neigungswinkel, der  $80^\circ$  übersteigt, eingesetzt werden [46].

Wenn man den Fokuspunkt über den Kontrast und die Schärfe der Bilder bestimmen möchte, die während der Messungen gemacht wurden, dann ist die FV-Technik beschränkt auf Oberflächen mit einem gewissen Grad an Rauheit (oder man benötigt einen anderen kontrasterzeugenden Mechanismus).

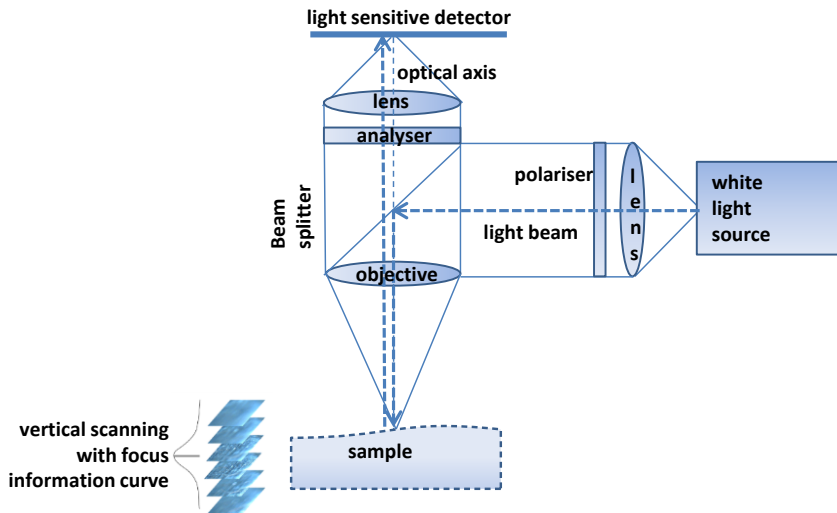


Abbildung 8.8: Prinzipschema eines Mikroskops mit Fokusvariation, nach [42].

### 8.3.2 Kohärenz-Scanning-Interferometrie

Die Kohärenz-Scanning-Interferometrie (CSI) bezieht sich auf niedrige Kohärenz-Interferometrie-Techniken, auch bekannt als Scanning-Weißlichtinterferometrie, Kohärenz-Korrelations-Interferometrie und Vertikal-Scanning-Interferometrie [47-49]. Viele andere Begriffe werden im Zusammenhang mit CSI verwendet; alle beziehen sich jedoch auf das gleiche Grundprinzip, das die Kohärenzeigenschaft des Lichts zur Messung der Oberflächentopographie und der Objektgeometrie nutzt.

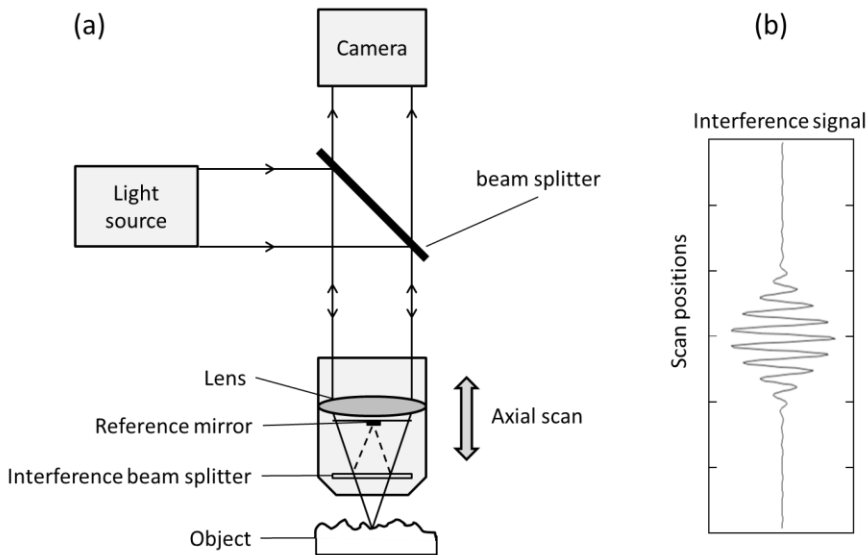


Abbildung 8.9: Prinzipschema eines CSI-Systems mit Mirau Objektiv (a) und Simulation des von einem Pixel aufgezeichneten CSI-Signals (b).

Wie in Abbildung 8.9 dargestellt, umfasst ein typisches CSI-System eine Breitbandquelle für die Erzeugung einer geringen zeitlichen Kohärenzbeleuchtung, eine CCD-Kamera für die Bildaufnahme und ein Interferometer mit einem hochpräzisen Bewegungssystem (oft PZT) zum axialen Abtasten des Referenzspiegels [48]. Normalerweise wird eine Mirau-Interferometer-Konfiguration verwendet, wenn eine Objektivlinse mit starker Vergrößerung verwendet wird und ein Michelson-Interferometer bei einer Linse mit geringer Vergrößerung.

Das Funktionsprinzip der CSI basiert auf einer niedrigen Kohärenz-Interferometrie; wobei das Interferenzsignal erzeugt wird, wenn der Referenz- und Probenstrahl die gleiche optische Weglänge haben. Die Spitzenposition des Interferenzsignals entspricht der Position der Probenoberfläche. Durch Abtasten des Referenzspiegels wird die Probenoberfläche in axialer Richtung abgetastet und eine Höhenkarte wird erstellt. Weitere Einzelheiten zum Funktionsprinzip finden Sie an anderer Stelle [48]. Üblicherweise ist das Interferenzsignal, das von einem Bildpunkt der Kamera empfangen wird, ähnlich dem, das in Abbildung 8.9 (b) gezeigt wird. Das Signal ist ein sinusförmiger Träger, der durch eine langsam veränderliche Modulationshüllkurve moduliert wird. Die Oberflächenposition kann als Spitzenposition der Hüllkurve des Interferenzsignals oder durch das Schwerpunktbildungsverfahren extrahiert werden, das in einigen Fällen robuster gegenüber Rauschen ist [47]. Die meisten modernen CSI-Instrumente kombinieren Hüllkurvenerfassung mit Interferenzphasenin-

formation, um die Genauigkeit zu verbessern [50]. Nach der Signalverarbeitung bildet die extrahierte Höhe bei jedem Pixel die gemessene Höhenkarte der Oberfläche. Typischerweise reicht das Sichtfeld (FOV) von etwa 0,1 mm x 0,1 mm bis 4 mm x 4 mm (je nach Objektiv), und die Abtasttiefe liegt bei einigen hundert Mikrometern. Größere Sichtfelder können auf Kosten der lateralen Auflösung erzielt werden [51]. Stitching-Techniken können den Messbereich in den lateralen und axialen Richtungen erhöhen [52], aber die Genauigkeit verschlechtert sich und sie wird von der Genauigkeit des Bewegungssystems und der Datenverarbeitung abhängen.

Sub-Nanometer axiale Auflösung und Wiederholbarkeit können mit modernen CSI-Systemen erreicht werden, die absolute Genauigkeit ist jedoch schwierig zu bestimmen [53]. Die Genauigkeit wird durch die Wechselwirkung zwischen Licht und unterschiedlichen Materialien mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften beeinflusst. Zum Beispiel kann für eine flache Oberfläche, die aus mehreren Materialien besteht, ein Pseudo-Höheneffekt beobachtet werden, der durch die Phasenänderung bei der Reflexion verursacht wird [48].

CSI-Techniken können auch ohne mechanische axiale Abtastung arbeiten, die mittels spektroskopischer Analyse oder Wellenlängenabtastung durchgeführt wird [54,55]. Die Wellenlängen-Scan-Interferometrie kann die Messgeschwindigkeit erhöhen und für In-Line-Anwendungen eingesetzt werden, die eine hohe Immunität gegenüber externen Vibrationen erfordern [56].

Eine neuere Entwicklung ist die modellbasierte CSI. Diese Entwicklung ermöglicht die Messung einer semi-transparenten dünnen Filmdicke und ist gekennzeichnet durch laterale kritische Abmessungen im Nanometerbereich, die kleiner sind, als die Beugungsgrenze [57]. Die modellbasierte CSI findet Anwendung in der Halbleiter- und Flachbildschirmindustrie [58].

### **8.3.3 Konfokalmikroskopie**

Das Prinzip der konfokalen Mikroskopie (CM) wurde ursprünglich von Minsky in der Mitte der 1950er Jahre entwickelt [59,60]. Im Jahr 1987 erschien das erste Instrument auf dem Markt. Die Entwicklung der CM wurde möglich dank Fortschritten in der Optik und Elektronik; heute ist sie eine optische 3D-Imaging-Technik, die in vielen Anwendungen eingesetzt wird, von Halbleitermaterialien bis zu Life-Science-Systemen [61-63]. Je nach Anwendung wurden verschiedene CM Konfigurationen vorgeschlagen und realisiert. Sie unterscheiden sich in der Art und Weise, wie sie die Probe beleuchten und/oder den zurückkehrenden Strahl detektieren. Drei Kategorien von CM können unterschieden werden: Laser-Scanning, Disc-Scanning und Array-Scanning [64]. Das Prinzip der CM ist in Abbildung 8.10 dargestellt.

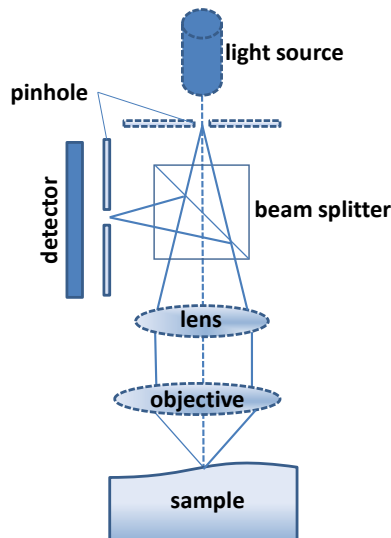


Abbildung 8.10: Konfokalmikroskopie-Setup mit der Probe im Fokus.

Bei einer typischen Laser-Scanning-CM fällt das von einem Laser emittierte Licht auf die Probe, nachdem es eine Lochblendenöffnung, einen Strahlteiler und eine Objektivlinse passiert hat. Das von der Probe zurück reflektierte Licht fällt auf den Detektor, nachdem es eine zweite Lochblende passiert hat, welche die Wirkung des unscharf eingestellten Lichts minimiert. Auf diese Weise wird nur das scharf gestellte Licht aufgezeichnet und trägt zur Rekonstruktion der Probentopografie bei. Das durch CM erstellte Bild ist ein flacher Abschnitt der Probe; die 3D-Topografie der Probe erhält man durch Abtasten der Probe entlang der optischen Achse und Rekonstruieren der 2D-Bilder.

Die Auflösung einer CM hängt ab von der Beugungsgrenze und kann durch Reduzieren der Größe der Lochblenden weiter verbessert werden, über den sogenannten "Pinhole-Effekt" [64]. Bei größeren Lochblenden wird die Konfokalität schlechter und das Signal wird erweitert; andererseits kann die Lochblendengröße nicht beliebig verringert werden, weil dies auch die einfallende Lichtintensität und folglich das Signal-Rausch-Verhältnis verringert [65]. Insbesondere für Lochblendengrößen über 0,25 AU (AU = Airy unit, definiert als der Durchmesser eines beugungsbegrenzten Flecks auf der Ebene des Objektivs), ist das Instrument im Regime der geometrisch-optischen Konfokalität und die laterale Auflösung ist durch den Radius des Airy-Scheibchens gegeben, definiert als Abstand von der Mitte des hellen Flecks bis zur Mitte des ersten dunklen Rings [64,66,67]

$$R_{Airy} = 0.61 \frac{\lambda}{A_N},$$

wobei  $\lambda$  die Wellenlänge des Lichts und AN die numerische Apertur ist. Für Lochblenden-  
größen kleiner als 0,25 AU ist das Instrument im wellenoptischen Konfokalitätsregime,  
wobei die Beugungseffekte berücksichtigt werden müssen, was zu einer erhöhten lateralen  
Auflösung führt und ist gegeben durch [64]

$$R_{Airy} = 0.37 \frac{\lambda}{A_N},$$

wobei  $\lambda$  die Wellenlänge des einfallenden Lichts und AN die numerische Apertur ist.

Die laterale Auflösung variiert somit typischerweise zwischen 0,25  $\mu\text{m}$  (blaue Lichtquel-  
le) und 1,5  $\mu\text{m}$  (rote Lichtquelle) [4]. Die axiale Auflösung wird dagegen definiert durch  
die Halbwertsbreite der Punktverteilungsfunktion des Airy-Scheibchens und ist gegeben  
durch [64]

$$R_{axial} = \sqrt{\left(\frac{0.88\lambda}{1 - \sqrt{1 - A_N^2}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{2}d_{hole}}{A_N}\right)^2},$$

im geometrisch-optischen Konfokalitätsregime (wobei  $d$  Loch die Größe der Detektions-  
lochblende ist) und

$$R_{axial} = \frac{0.64\lambda}{1 - \sqrt{1 - A_N^2}},$$

im wellenoptischen Konfokalitätsregime.

Die Messgeschwindigkeit der CM hängt ab von der Zeit, die für eine Abtastung in der xy-  
Richtung benötigt wird; ein Laser-Scanning-Mikroskop muss Punkt für Punkt scannen und  
kann in der Regel 5 bis 10 Bilder pro Sekunde ( $512 \times 512$  Pixel pro Bild) erzeugen [64].  
Disc-Scannen und Mikro-Display-Scanning CMs sind oft viel schneller als ein Abtastsys-  
tem, das Galvo-Spiegel verwendet [4].

Im Gegensatz zu den anderen optischen Techniken, die in diesem Kapitel beschrieben  
werden, hat CM eine hohe numerische Apertur, und dies führt zu einer hohen lateralen  
Auflösung. Darüber hinaus kann die Auflösung aufgrund des Pinhole-Effekts über die  
durch das Abbe-Kriterium definierten Grenzen hinaus erhöht werden [4]. Die CM ist auch  
in der Lage hohe lokale Neigungswinkel zu messen, die für raue Oberflächen nahe  $90^\circ$   
sein können [64]. Weiterhin können CM-Instrumente Oberflächen messen, die unähnliche  
Materialien enthalten, ohne die Messungen korrigieren zu müssen.

### 8.3.4 Laser-Triangulation

Bei der Laser-Triangulation (LT) wird ein Lichtmuster, das von einem Laser erzeugt wird, auf ein Objekt projiziert und die Reflexion wird durch eine digitale Kamera aufgenommen [68]. Eine typische Konfiguration eines LT-Systems sehen Sie in Abbildung 8.11.

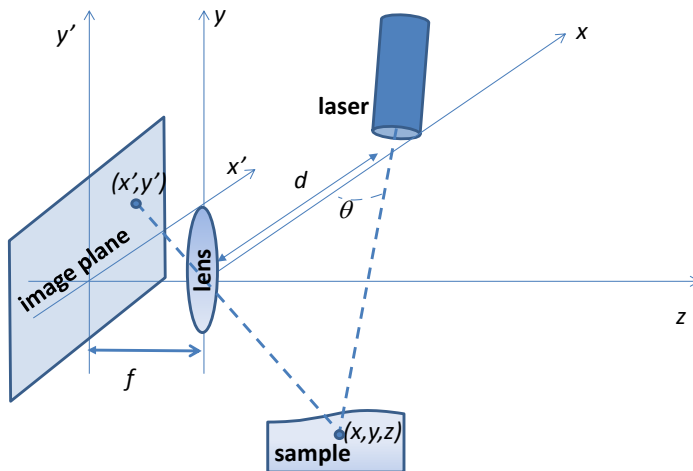


Abbildung 8.11: Prinzip der Laser-Triangulation

Mit Bezug auf Abbildung 8.11, falls  $(x, y, z)$  ein 3D-Punkt auf dem Objekt ist, das durch Laserlicht beleuchtet wird und  $f$  die Brennweite der Linse, so ist deren Projektion  $(x', y')$  auf der Bildebene  $x' = xf/z$ ,  $y' = yf/z$ . Wenn man den Grundlinienabstand  $d$  und den Winkel  $\theta$  zwischen dem Laser und der Linse kennt, gemäß der Bedingung

$$d = \frac{z}{\tan \theta},$$

dann ist es möglich, die tatsächlichen Koordinaten  $(x, y, z)$  in Bezug auf die Brennweite  $f$  und den Winkel  $\theta$  zu definieren,

$$x = \frac{d x'}{f \cot \theta - x'}, \quad y = \frac{d y'}{f \cot \theta - x'}, \quad z = \frac{d f}{f \cot \theta - x'}.$$

Um eine vollständige Karte des Objekts zu erhalten, werden die Bilder für verschiedene Werte von  $\theta$  erfasst und für jedes Bild werden die Werte von  $x'$  und  $y'$  auf der CCD-

Kamera bestimmt. Die tatsächlichen Koordinaten werden unter Verwendung der Gleichung berechnet.

Aufgrund seiner Einfachheit wird das LT-Verfahren in vielen Sensoren verwendet, z.B. in Anwendungen im Bereich der Messung von Oberflächen mit großen Strukturen [4], in Brennstoffzellen [69] und Pflanzen-Phänotypen [70]. Unterschiedliche Konfigurationen von LT wurden zur Verbesserung der Auflösung und der Genauigkeit der Messungen vorgeschlagen. Einige Autoren schlugen beispielsweise die Verwendung von zwei Farbbläsern vor, um das Okklusionsproblem in der Bewegungsrichtung der Kamera zu minimieren [71]. Die größten Vorteile der LT sind: die Messgeschwindigkeit, also Datenraten von bis zu 10.000 Messungen pro Sekunde, und die Genauigkeit, da einige Sensoren eine Auflösung von 2000:1 bis 20000: 1 aufweisen [72]. Mit anderen Worten, für einen Bereich von wenigen Millimetern ist es möglich, eine vertikale Auflösung im Sub-Mikrometer-Bereich zu erzielen [4].

Trotz ihrer Vorteile hat die LT-Technik einige Einschränkungen, die berücksichtigt werden sollten, um verlässliche Informationen aus den Messdaten zu erhalten. Grundsätzlich sollte der Laserpunkt unendlich klein sein, in der Praxis hat er jedoch eine endliche Größe. Auch aufgrund des Fokus des Laserstrahls kann sein Durchmesser entlang der vertikalen Abtastung variieren. Außerdem können infolge einiger Unvollkommenheiten des Lasersystems Unschärfe- [73] und Schatten-Effekte [74] im Bild erscheinen. Weitere Fehlerquellen hängen zusammen mit dem Neigungswinkel der Oberfläche, Randeffekten und Linearitätsfehlern [27]. Eine umfassende Kenntnis und Verständnis der Fehlerquellen sollten dazu beitragen, einige der Einschränkungen dieser Sensoren zu überwinden, so dass sie in vielen Anwendungen in der Mikrofertigung eingesetzt werden können.

### **8.3.5 Mikrostreifenprojektion**

Bei einem Streifenprojektionssystem (FP = fringe projection) wird von einem Computer ein strukturiertes Muster erzeugt, beispielsweise ein sinusförmiges Streifenmuster, und auf das zu messende Objekt projiziert [75]. Die durch die Topographie der Objektoberfläche verformten Streifen werden von einer Kamera erfasst und an einen Computer übertragen. Die Streifendaten werden analysiert, um 3D-Form-Informationen über das Objekt zu erhalten. Abbildung 8.12 zeigt ein typisches Prinzipschema eines FP-Systems.



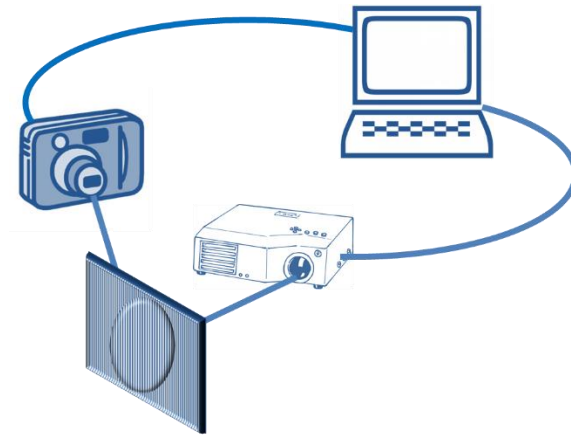


Abbildung 8.12: Prinzipschema eines Streifenprojektionssystems

Die FP-Technik wird in der Regel zur Messung von Objekten im Meter- bis zum Millimeterbereich verwendet. Die erste Anwendung dieser Technik im Mikromaßstab wurde von Leonhardt et al. vorgeschlagen. [76]. Obwohl die Verwendung von FP im Mikromaßstab zunimmt, gab es bisher nur eine kleine Anzahl von Anwendungen, über die bis heute berichtet wurde (siehe zum Beispiel [77-82]). Die Mikro-FP basiert im Allgemeinen auf der Modifikation eines Stereomikroskops [81], oder auf dem Einsatz einer Objektivlinse mit langem Arbeitsabstand [83]. Weil verschiedene Arten von Linsen verwendet werden können, ist die letztere Technik flexibler und kann in vielen verschiedenen Anwendungen eingesetzt werden [82].

Die FP-Techniken unterscheiden sich in der Art, wie sie Streifenmuster erzeugen und in den Methoden, die zur Analyse des Streifenmusters verwendet werden [75]. Ein weiterer wichtiger Aspekt der FP-Technik ist die Kalibrierung des Systems, um eine Messung der 3D-Höhenverteilung zu ermöglichen. Verschiedene Ansätze wurden vorgeschlagen [75,82].

Einige Autoren haben gezeigt, dass es durch die FP-Technik möglich ist, eine Mikro-V-Nut mit einer Größe von  $150 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$  und einem Winkel größer als  $45^\circ$  mit einem Fehler von unter 1% des kompletten Messbereichs zu messen [78]. Andere Autoren berichten, dass mit einer Methode zum Nachweis der Phasenverschiebung eine Genauigkeit erreicht werden kann, die besser ist als ein Teil in zehntausend des Sichtfeldes (FOV) [78]. Die Auflösung der Optik und der Kamera bestimmen die laterale und vertikale Auflösung bei der Streifenprojektion. Die vertikale Auflösung wird auch durch die Frequenz des Projektionsmusters bestimmt. Eine typische vertikale Auflösung für FP-Systeme liegt in der Größenordnung von  $1 \mu\text{m}$  [82].

## 8.4 Tomographische Verfahren

Der Begriff Tomographie ist abgeleitet aus dem altgriechischen Wort "tomos", was so viel bedeutet wie in Scheiben schneiden. Gewöhnlich wird die tomographische Bildgebung als 3D-Bildgebungsverfahren bezeichnet, das in der Lage ist, Dimensions- und Materialinformationen der internen und externen Strukturen eines Objekts zu erhalten. In diesem Abschnitt werden zwei tomographische Verfahren vorgestellt, die für mikrogefertigte Teile geeignet sind: die optische Kohärenztomographie und die Röntgen-Computertomographie.

### 8.4.1 Optische Kohärenztomographie

Die optische Kohärenztomographie (OCT) erfreut sich seit 1991 wachsender Beliebtheit [84]. OCT nutzt die nicht-invasive Detektion und liefert tiefenaufgelöste hochauflösende 2D- oder 3D-Bilder der Rückstreuung von internen Mikrostrukturen in einem Objekt. Im Allgemeinen basiert die OCT auf dem Prinzip der Niederkohärenz-Reflektometrie und misst die "Echos" von zurückgestreutem Licht. Bei einem tomographischen Bildgebungsverfahren werden eine Reihe von 1D-Tiefen z-Scans, ähnlich wie Ultraschall-A-Scans, punktweise entlang einer Linie in lateraler x-Richtung durchgeführt. Durch die Kombination dieser Scans für eine gegebene Y-Position erhält man ein 2D-Querschnittsbild (B-Scan) in der xz-Ebene. Durch die weitere Kombination dieser Querschnittsbilder, die in benachbarten y-Positionen aufgezeichnet wurden, erhält man ein vollständiges 3D-Tomographie-Bild. Die OCT ist ein komplementäres Verfahren zu anderen hochauflösenden 3D-Bildgebungstechniken, wie beispielsweise Ultraschallbildgebung, Röntgen-Computertomographie (XCT) und Magnetresonanztomographie (MRI).

Biomedizinische und klinische Anwendungen sind üblicherweise die treibende Kraft der OCT-Entwicklung, beispielsweise Echtzeit-in vivo-Visualisierung von Gewebemikrostrukturen in den Augen, Arterien und im Nervengewebe [84]. Allerdings sind neue Anwendungen außerhalb des biomedizinischen Bereichs, z.B. für Materialuntersuchungen, inzwischen weit verbreitet. Detaillierte Übersichten der OCT-basierten Methoden und Anwendungen in den Bereichen dimensionelle Messtechnik, Materialforschung, zerstörungsfreie Prüfung, Kunst-Diagnostik, Botanik, Mikrofluidik, Datenspeicherung und Sicherheitsanwendungen finden Sie in [85]. Insbesondere ist die OCT geeignet zur Detektion von unterirdischen und eingebetteten Strukturen innerhalb dielektrischer Materialien, wie Glas, Kunststoffen, Polymeren, Keramiken und additiven Herstellungsmaterialien [86]. Die Signalerfassungsrate der OCT ist hoch und ist von zwei A-Scans pro Sekunde in der ursprünglichen Version im Jahre 1991 auf das heutige Level der Megahertz-Technologie gewachsen [87]. Dieser Vorteil der High-Speed-Bildgebung besitzt Potential für die Roll-to-Roll-Herstellung keramischer Mikrogeräte, druckbarer Elektronik [88] und Polymersolarzellen [89]. Die typische Auflösung der OCT liegt in der Größenordnung von 10  $\mu\text{m}$  sowohl für die axialen als auch die lateralen Richtungen.

Die OCT wird in der Regel in zwei Gruppen eingeteilt: Time-Domain-OCT (TD-OCT) und Fourier-Domain-OCT (FD-OCT). Das Prinzip der TD-OCT ist sehr ähnlich der CSI (siehe Abschnitt 1.3.2); sie arbeitet jedoch im Infrarotbereich des Spektrums. In den letzten zehn Jahren hat FD-OCT mehr Aufmerksamkeit auf sich gezogen und hat sich rasch entwickelt. Der wichtigste Vorteil gegenüber herkömmlicher TD-OCT ist, dass FD-OCT viel schnellere Belichtungsgeschwindigkeiten und höhere Nachweisempfindlichkeiten bietet. Ein mechanisches Abtasten eines Referenzspiegels ist in der FD-OCT nicht mehr erforderlich. Einen A-Scan erhält man durch eine Fourier-Transformation der spektral aufgelösten Interferenzstreifen, die mit einem Spektrometer, beispielsweise einer Zeilenarray-Kamera, detektiert wurden. Ein solches System wird Spectral-Domain-OCT (SD-OCT) genannt. Eine weitere Option ist die Swept-Source-OCT (SS-OCT), die eine Swept-Laserquelle (Wellenlängenabstimmung) mit einem einzelnen Photodetektor verwendet, um die spektral aufgelösten Interferenzstreifen nacheinander aufzunehmen, während der Feineinstellung der Wellenlängen. Weitere Einzelheiten zum Funktionsprinzip der OCT finden Sie an anderer Stelle [84]. Ein Prinzipschema der SS-OCT ist in Abbildung 8.13 dargestellt und ein typisches volumetrisches OCT-Bild in Abbildung 8.14.

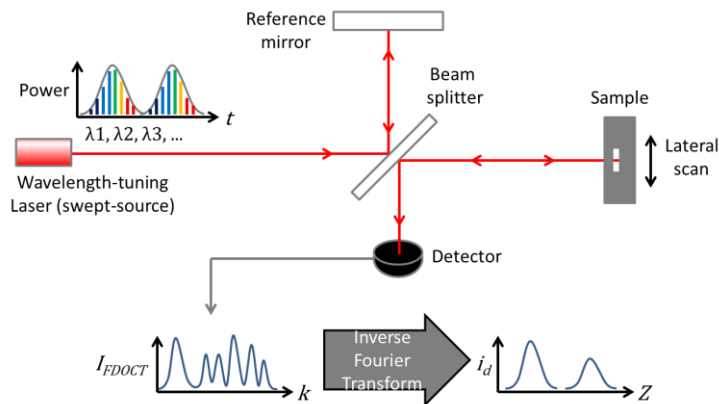


Abbildung 8.13: Schematischer Aufbau einer Swept-Source-OCT

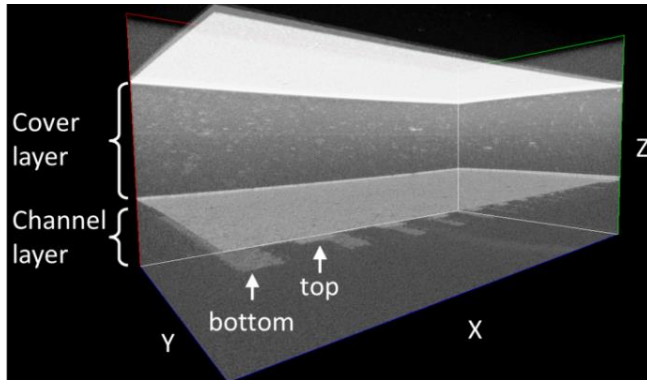


Abbildung 8.14: Volumetrisches OCT-Bild eines zweischichtigen -Keramik-Stapels (Bild zur Visualisierung wiedergegeben). Eine mikrobearbeitete Kanalschicht ist unter einer Zirkoniumdioxid-Schicht eingebettet. Die z-Achse stellt den optischen Abstand dar [90].

Verschiedene funktionelle OCTs wurden entwickelt, einschließlich Doppler-OCT [91], die die Verschiebung eines Objekts oder Flows misst, polarisationsempfindliche OCT [92], die die Doppelbrechungseigenschaften von Materialien misst, höchstauflösende Vollfeld-OCT, die tomographische Bilder in der en-face-Orientierung mit Mikrometer-Auflösung sowohl für axiale und laterale Richtungen erzeugt [93], endoskopische OCT, die radiale Abtastung durchführt [94] und ein Second Harmonic Generation (SHG) Mikroskop kombiniert mit OCT zur Untersuchung von unterirdischen Regionen von Korrosionsstellen, die sich auf Metallen unter organischen Beschichtungen gebildet haben [95].

Das Hauptproblem in Bezug auf dimensionelle Messtechnik und Fehlererkennung bei der Verwendung von OCT ist das begrenzte Eindringen von Licht aufgrund der hohen Streuung. Die Zentralwellenlängen moderner kommerzieller OCT-Setups liegen in der Regel bei etwa 800 nm, 1300 nm oder 1550 nm, die für das optische Transparenzfenster in biomedizinischem Gewebe optimiert sind und bereits etablierte optische Kommunikationstechnologien nutzen. Allerdings können für industrielle Anwendungen andere Wellenlängen besser geeignet sein, beispielsweise der mittlere Infrarotbereich für keramische Materialien [96].

Die Unsicherheit der dreidimensionalen Messung mit OCT ist schwierig zu bestimmen. Flecken verschlechtern die Bildqualität erheblich [97]. Die Dispersion der Gruppengeschwindigkeit kann die axiale Auflösung und die Nachweisempfindlichkeit verschlechtern [98]. Wellenfrontverzerrung durch die Scanoptik, Bildunklarheiten aufgrund der Inhomogenität des Brechungsindex des zu messenden Materials und Mehrfachreflektionseffekte wurden beobachtet [90]. Die Bildanalyse ist auch wichtig, um die Genauigkeit der Oberflächensegmentierung zu gewährleisten [99].

## 8.4.2 Röntgencomputertomographie

Die Röntgencomputertomographie (XCT) ist ein leistungsfähiges 3D-Imaging-Tool, das seit Jahrzehnten in klinischen und industriellen Anwendungen eingesetzt wird. Die industrielle XCT hat in den letzten Jahren große Beachtung gefunden, da sie ein viel versprechendes Verfahren ist für die zerstörungsfreie dimensionelle Messtechnik mikrogefertigter Teile mit komplexen inneren Hohlräumen und Gitterstrukturen, für die Qualitätskontrolle komplexer zusammengesetzter Produkte sowie die Überprüfung der Schnittstellen von Multimaterialkomponenten [100,101]. XCT wird weithin für verschiedene Anwendungen eingesetzt, aufgrund der guten Durchdringung von Röntgenstrahlen auch bei vielen technischen Materialien.

Ein XCT System besteht in der Regel aus einer Röntgenröhre, einem Manipulationssystem, einem Detektor und einem Computer [102]. Elektronen werden in der Röntgenröhre beschleunigt und treffen auf eine Anode (üblicherweise aus Wolfram) um Röntgenstrahlen zu erzeugen [103]. Die höchste Energie der Röntgenstrahlen wird durch die Spitzenröhrenspannung bestimmt, die in handelsüblichen XCT-Systemen in der Regel von 20 keV bis 450 keV reicht [101]. Synchrotron-Quellen, die monochromatische Röntgenstrahlen erzeugen, können auch für die tomographische Bildgebung verwendet werden [104], jedoch zu wesentlich höheren Kosten.

XCT-Detektoren bestehen in der Regel aus einem 1D- oder 2D-Array von Pixeln, die Zeilendetektoren und Flachbilddetektoren entsprechen. Ein typischer Flachbilddetektor umfasst  $2048 \times 2048$  Pixel für eine Fläche von  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ . Die meisten Detektoren verwenden einen Szintillator, um Röntgenstrahlen in sichtbares Licht umzuwandeln, das mit einer Kamera aufgenommen werden kann [105]. Als Alternative können Ionisationsdetektoren verwendet werden, die auf die Energiedeposition pro Masseneinheit reagieren [105].

Das Manipulationssystem wird eingesetzt zum Verschieben und Drehen des zu messenden Objekts. Ein paar tausend 2D-Röntgenaufnahmen, aufgenommen aus unterschiedlichen Winkeln eines Objekts, werden für eine weitere 3D-Rekonstruktion des tomographischen Bildes unter Verwendung des Fourier-Scheiben-Theorems aufgenommen. Die Rekonstruktion wird üblicherweise durch gefilterte Rückprojektion durchgeführt, die auf dem von Radon entwickelten linearen Integraltransformationsmodell basiert [102,106]. Unterschiedliche Mengen an Röntgenstrahlen werden beim Durchgang durch verschiedene Materialien absorbiert, entsprechend der linearen Schwächungskoeffizienten der Materialien auf einem bestimmten Röntgenenergieniveau. Der lineare Abschwächungskoeffizient ist der Sollwert nach der Rekonstruktion und bezieht sich auf die Materialmassendichte.

Unter den XCT-Systemen ist die poly-energetische Cone-Beam XCT (CBCT) weit verbreitet, sowohl bei medizinischen und industriellen Anwendungen (wie in Abbildung 8.15

gezeigt). Die Vergrößerung des Objekts basiert auf einem einfachen Prinzip der geometrischen Optik, d.h. eine Punktquelle wird angenommen und die vergrößerte Projektion des Objekts ist abhängig vom Abstand zwischen Quelle und Objekt. Eine Übersicht über verschiedene Rekonstruktionsmethoden für CBCT ist in [106] beschrieben. Die Abtastzeit für CBCT liegt üblicherweise im Bereich von 30 Minuten bis einigen Stunden. Es ist sehr schwierig, Rückverfolgbarkeit in der XCT zu erreichen aufgrund der hohen Anzahl von Einflussfaktoren und der Stabilität vieler Konfigurationen. Die am häufigsten auftretenden systematischen Fehler sind geometrische Fehler [107], Strahlaufweitungen aufgrund der thermischen Ausdehnung der Röntgenröhre [108], Strahlaufhärtungseffekte verursacht durch Fehler in der Abschätzung des Schwächungskoeffizienten des Materials [109], Teilvolumenartefakte verursacht durch das begrenzte Sichtfeld des XCT-Systems [110] und Fehler aufgrund von Streueffekten [111] und Bildverzögerung [112]. Kürzlich wurden mehrere Studien und internationale Vergleiche über die Unsicherheitsbewertung von XCTs für dimensionelle Messungen durchgeführt [113-115].

Die industrielle XCT ist eine rasch wachsende Technik. Die Scanzeit wird aufgrund der Fortschritte bei XCT-Komponenten und der Rechenleistung deutlich reduziert. Mehrere Verfahren stehen für die Erweiterung des Scanfeldes zur Verfügung [116]. Die Multi-Energie-XCT kann Materialien durch Verwendung unterschiedlicher Röntgenspektren oder energieaufgelöster Detektoren unterscheiden [117]. Die phasensensitive XCT kann eingesetzt werden, um Bildkontrast und Strukturkanten zu verbessern [118].

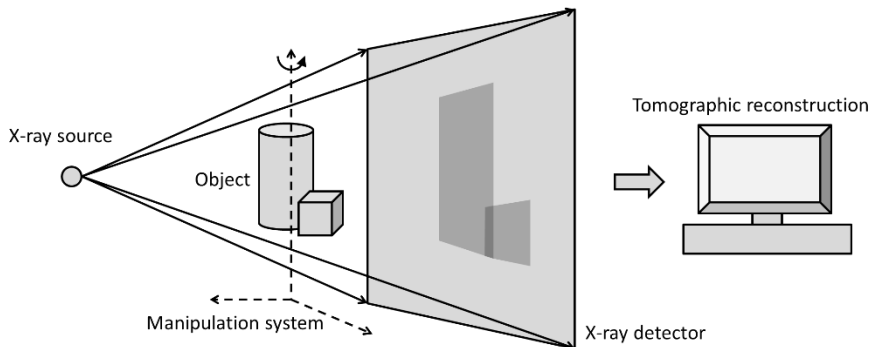


Abbildung 8.15: Prinzipschema eines CBCT-Systems.

Für die Mikrofertigung ist die räumliche Auflösung der XCT wichtig. Die Auflösung wird durch viele Faktoren beeinflusst, beispielsweise Brennfleckgröße der Röntgenstrahlquelle, die Qualität und die Pixelgröße des Detektors, Vergrößerung des Bildes und Rekonstruktionsalgorithmen [119]. Bildgebungsaufösungen im Mikro- oder Nanometer-Bereich werden

mit hochmodernen XCT-Systemen erreicht [120]. Durch die Anwendung der Kirkpatrick-Baez-Optik kann eine Synchrotron-XCT eine Auflösung von 40 nm erreichen [104].

## 8.5 Referenzen

1. Tosello G, Hansen HN, Marinello F, Gasparin S (2010) Replication and dimensional quality control of industrial nanoscale surfaces using calibrated AFM measurements and SEM image processing. *Ann CIRP* 59:563-568
2. Fang FZ, Zhang XD, Weckenmann A, Zhang GX, Evans C (2013) Manufacturing and Measurement of Freeform Optics. *Ann CIRP* 62: 823–846
3. ISO 25178 part 601 (2010) Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal–Part 601: Nominal characteristics of contact (stylus) instruments. International Organization for Standardization
4. Leach RK (ed) (2014) *Fundamental principles of engineering nanometrology*. , 2nd edn. Elsevier, Amsterdam
5. Whitehouse DJ (2010) *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd edn. CRC Press, Florida
6. Thomas TR (1999) *Rough surfaces*. 2nd edn. Imperial College Press, London
7. Leach RK (2001) *The measurement of surface texture using stylus instruments*. NPL Good Practice Guide. National Physical Laboratory, UK,
8. Radhakrishnan V (1970) Effect of stylus radius on the roughness value measured with tracing stylus instruments. *Wear* 16:325
9. McCool JI (1984) Assessing the effect of stylus tip radius and flight on surface topography measurements. *ASME J Tribol* 106:202-209
10. Mendeleyev V (1997) Dependence of measuring errors of rms roughness on stylus tip size for mechanical profilers. *Appl Opt* 36:9005-9009
11. Lee C-O, Park K, Park BC, Lee YW (2005) An algorithm for stylus instruments to measure aspheric surfaces. *Meas Sci Technol* 16:1215
12. Lee DH (2013) 3-Dimensional profile distortion measured by stylus type. *Measurement* 46:803-814
13. Fang H, Xu B, Chen W, Tang H, Zhao S (2015) A slope-adapted sample-tilting method for profile measurement of microstructures with steep surfaces. *J Nanomater* ID 253062 (in press)
14. Hocken RJ, Pereira PH (eds) (2011) *Coordinate measuring machines and systems*. 2nd edn. CRC Press, New York
15. ISO 10360 part 3 (2000) Geometrical product specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 3: CMMs with the axis of a rotary table as the fourth axis. International Organization for Standardization.
16. Vermeulen MMPA, Rosielle PCJN, Schellekens PHJ (1998) Design of a High-Precision 3D-Coordinate Measuring Machine. *Ann CIRP* 47:447-450
17. Widdershoven I, Donker RL, Spaan HAM (2011) Realization and calibration of the “Isara 400” ultra-precision CMM. *J Phys: Conf Ser* 311:012002

18. Jäger G, Manske E, Hausotte T, Büchner H-J, Grünwald R, Schott W (2001) Nanomeasuring technology - nanomeasuring machine. In: Proc. ASPE, Crystal City, VA, Nov. 2001. pp 23-27
19. Leach RK (2015) Abbe error/offset. In: LAPERRIÈRE L, REINHART G (eds) CIRP Encyclopaedia of Production Engineering. Springer, Berlin,
20. Fan K-C, Fei Y-T, Wang W, Chen Y, Chen Y-C (2008) Micro-CMM. In: Smart devices and machines for advanced manufacturing. pp 319-335
21. Claverley JD, Leach RK (2015) A review of the existing performance verification infrastructure for micro-CMMs. *Precis Eng* 39:1-15
22. ISO 10360 part 1 (2001) Geometrical product specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). International Organization for Standardization.
23. Weckenmann A, Estler T, Peggs G, McMurtry D (2004) Probing systems in dimensional metrology. *Ann CIRP* 53:657-684
24. Küng A, Meli F, Thalmann R (2007) Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe. *Meas Sci Technol* 18:319-327
25. Chu C-L, Chiu C-Y (2007) Development of a low-cost nanoscale touch trigger probe based on two commercial DVD pick-up heads. *Meas Sci Technol* 18:1831-1842
26. Haitjema H, Pril WO, Schellekens PHJ (2001) Development of a silicon-based nanoprobe system for 3-D measurements. *Ann CIRP* 50:365-368
27. Brand U, Kleine-Besten T, Schwenke H (2000) Development of a special CMM for dimensional metrology on microsystem components. In: Proc. ASPE, Scottsdale, AZ, Oct. 2000. pp 542-546
28. Ruther P, Bartholomeyczik J, Trautmann A, Wandt M, Pau O, Dominicus W, Roth R, Seitz K, Strauss W (2005) Novel 3D Piezoresistive Silicon Force Sensor for Dimensional Metrology of Micro Components. *Proc IEEE Sensor*:1006-1009
29. Dai G, Bütefisch S, F. Pohlenz, Danzebrink H-U (2009) A high precision micro/nano CMM using piezoresistive tactile probes. *Meas Sci Technol* 20:084001
30. Muralikrishnan B, Stone J, Stoup J (2007) Roundness measurements using the NIST fibre probe. In: Proc. ASPE, Dallas, TX, Oct. 2007. pp 89-92
31. Takaya Y, Takahashi S, Miyoshi T, Saito K (1999) Development of the nano-CMM probe based on laser trapping technology. *Ann CIRP* 48:421-424
32. Seugling R, Darnell I (2008) Investigating scaling limits of a fibre based resonant probe for metrology applications. In: Proc. ASPE, Livermore, CA, Oct. 2008.
33. Claverley JD, Leach RK (2013) Development of a three-dimensional vibrating tactile probe for miniature CMMs. *Precis Eng* 37:491-499
34. Lee ES, Burdekin M (2001) A hole plate artifact design for volumetric error calibration of a CMM. *Int J Adv Manuf Technol* 17:508-515
35. Schwenke H, Franke M, Hannaford J, Kunzmann H (2005) Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer. *Ann CIRP* 54:475-478
36. Schwenke H, Knapp W, Haitjema H, Weckenmann A, Schmitt R, Delbressine F (2008) Geometric error measurement and compensation for machines - an update. *Ann CIRP* 57:660-675
37. Zhang G, Veale R, Charlton T, Borchardt B, Hocken R (1985) Error Compensation of Coordinate Measuring Machines. *Ann CIRP* 34:445-448



38. Krutha J-P, Vanhercka P, Van den Bergha C (2001) Compensation of static and transient thermal errors on CMMs. *Ann CIRP* 50:377–380
39. Aggogeri F, Barbato G, Barini EM, Genta G, Levi R (2011) Measurement uncertainty assessment of coordinate measuring machines by simulation and planned experimentation. *CIRP-JMST* 4:51-56
40. ISO 10360 part 6 (2001) Geometrical product specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 6: Estimation of errors in computing Gaussian associated features. International Organization for Standardization
41. Danzl R, Helml F, Rubert P, Prantl M (2008) Optical roughness measurements on specially designed roughness standards. *Proc SPIE* 7102:71020M
42. Hemli F (2011) Focus-variation instruments. In: Leach RK (ed) *Optical measurement of surface topography*. Springer, Berlin,
43. Scherer S (2007) Focus-variation for optical 3D measurement in the micro- and nano-range. In: Bauer N (ed) *Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart,
44. Zhang Y, Zhang Y, Wen CY (2000) A new focus measure method using moments. *Image and Vision Comput* 18:959-965
45. Helml F, Scherer S (2001) Adaptive shape from focus with an error estimation in light microscopy. In: *ISPA 2001*, Pula, Croatia, June 2001. pp 188-193
46. Danzl R, Helml F, Scherer S (2011) Focus variation – a robust technology for high resolution optical 3D surface metrology. *J Mech Eng* 57:245-256
47. ISO 25178 part 604 (2001) Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Areal – Part 604: Nominal characteristics of non-contact (coherence scanning interferometry) instruments. International Organization for Standardization.
48. de Groot P (2011) Coherence scanning interferometry. In: Leach RK (ed) *Optical measurement of surface topography*, vol 9. Springer, Berlin,
49. de Groot P (2015) Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography. *Adv Opt Photon* 7:1-65
50. de Groot P, Colonna de Lega X, Kramer J, Turzhitsky M (2002) Determination of fringe order in white-light interference microscopy. *Appl Opt* 41:4571-4578
51. Colonna de Lega X, Biegen J, de Groot P, Häusler G, Andretzky P (2003) Large field-of-view scanning white-light interferometers. In: *Proc. ASPE*, Portland, OR, Oct. 2003. p 1275
52. Wyant JC, Schmit J (1998) Large field of view, high spatial resolution, surface measurements. *Int J Mach Tools Manufact* 38:691-698
53. Gao F, Leach RK, Petzing J, Coupland JM (2008) Surface measurement errors using commercial scanning white light interferometers. *Meas Sci Technol* 19:015303
54. Schwider J, Zhou L (1994) Dispersive interferometric profilometer. *Opt Lett* 19:995-997
55. Marron JC, Gleichman KW (2000) Three-dimensional imaging using a tunable laser source. *Opt Eng* 39:47-51
56. Jiang X (2012) Precision surface measurement. *Phil Trans R Soc A* 370:4089-4114
57. Paz VF, Peterhänsel S, Frenner K, Osten W (2012) Solving the inverse grating problem by white light interference Fourier scatterometry. *Light: Science & Appl* 1:e36

58. Colonna de Lega X, de Groot P (2005) Optical topography measurement of patterned wafers. *AIP Conf Proc* 788:432-436
59. Minsky M (1961) Microscopy apparatus. US patent, vol US3013467A.
60. Minsky M (1988) Memoir on inventing the confocal microscope. *Scanning* 10:128-138
61. Wilson T (ed) (1990) *Confocal microscopy*. Academic Press, London
62. Diaspro A (ed) (2002) *Confocal and two-photon microscopy: foundations, applications, and advances*. Wiley-Liss, New York
63. Hibbs AR (2004) *Confocal microscopy for biologists*. Kluwer Press, New York
64. Artigas R (2001) *Imaging confocal microscopy*. In: Leach RK (ed) *Optical measurement of surface topography*. Springer, Berlin,
65. Semwogere D, Weeks ER (2005) *Confocal microscopy*. In: *Encyclopedia of Biomaterials and Biomedical Engineering*. Taylor&Francis, London,
66. Brakenhoff GJ, Blom P, Barends P (1976) Confocal scanning light microscopy with high aperture immersion lenses. *J Microsc* 117:21932
67. Wilson T (2011) Resolution and optical sectioning in the confocal microscope. *J Microsc* 244:113-121
68. Leach RK (ed) (2011) *Optical measurement of surface topography*. Springer, Berlin, Germany
69. Muralikrishnan B, Ren W, Everett D, Stanfield E, Doiron T (2011) Dimensional metrology of bipolar fuel cell plates using laser spot triangulation probes. *Meas Sci Technol* 22:075102
70. Kjaer KH, Ottose C-O (2015) 3D laser triangulation for plant phenotyping in challenging environments. *Sensors* 15:13533-13547
71. Peiravi A, Taabbodi B (2010) A reliable 3D laser triangulation-based scanner with a new simple but accurate procedure for finding scanner parameters. *J Am Sci* 6:80
72. Clarke TA, Grattan KTV, Lindsey NE (1991) Laser-based triangulation techniques in optical inspection of industrial structures. *Proc SPIE* 1332:474-486
73. MacKinnon D, Beraldin J-A, Cournoyer L, Picard M, Blais F (2012) Lateral resolution challenges for triangulation-based three-dimensional imaging systems. *Opt Eng* 51:021111
74. Zeng L, Matsumoto H, Kawachi K (1997) Two-directional scanning method for reducing the shadow effects in laser triangulation. *Meas Sci Technol* 8:262-266
75. Gorthi SS, Rastogi P (2010) Fringe projection techniques: whither we are? *Opt Lasers Eng* 48 (2):133-140
76. Leonhardt K, Droste U, Tiziani HJ (1994) Micro shape and rough-surface analysis by fringe projection. *Appl Opt* 33:7477-7488
77. Quan C, Tay CJ, He XY, Kang X, Shang HM (2002) Microscopic surface contouring by fringe projection method. *Opt Laser Techn* 34 (7):547-552
78. Chen L-C, Liao C-C, Lai M-J (2005) Full-field micro surface profilometry using digital fringe projection with spatial encoding principle. *J Phys: Conf Series* 13:147-150
79. He X, Sun W, Zheng X, Nie M (2006) Static and dynamic deformation measurements of micro beams by the technique of digital image correlation. *Key Eng Mater* 326-328:211-214

80. Chen L, Chang Y (2008) High accuracy confocal full-field 3-D surface profilometry for micro lenses using a digital fringe projection strategy. *Key Eng Mater* 364-366:113-116
81. Li A, Peng X, Yina Y, Liua X, Zhao Q, Körner K, Osten W (2013) Fringe projection based quantitative 3D microscopy. *Optik* 124:5052-5056
82. Yin Y, Wang M, Gao BZ, Liu X, Peng X (2015) Fringe projection 3D microscopy with the general imaging model *Opt Express* 23:6846
83. Chen J, Guo T, Wang L, Wu Z, X. Fu, Hu X (2013) Microscopic fringe projection system and measuring method. *Proc SPIE* 8759:87594U
84. Drexler W, Fujimoto JG (eds) (2008) *Optical coherence tomography: technology and applications*. Springer, Berlin
85. Stifter D (2007) Beyond biomedicine: a review of alternative applications and developments for optical coherence tomography. *Appl Phys B* 88:337-357
86. Guan G, Hirsch M, Lu ZH, Childs DT, Matcher SJ, Goodridge R, Groom KM, Clare AT (2015) Evaluation of Selective Laser Sintering Processes by Optical Coherence Tomography. *J: Mater Design* (accepted)
87. Wieser W, Biedermann BR, Klein T, Eigenwillig CM, Huber R (2010) Multi-megahertz OCT: High quality 3D imaging at 20 million A-scans and 4.5 GVoxels per second. *Opt Express* 18:14685-14704
88. Czajkowski J, Vilmi P, Lauri J, Sliz R, Fabritius T, Myllylä R (2012) Characterization of ink-jet printed RGB color filters with spectral domain optical coherence tomography. *Proc SPIE* 8496:849308
89. Thrane L, Jørgensen TM, Jørgensen M, Krebs FC (2012) Application of optical coherence tomography (OCT) as a 3-dimensional imaging technique for roll-to-roll coated polymer solar cells. *Solar Energy Mater and Solar Cells* 97:181-185
90. Su R, Kirillin M, Ekberg P, Mattsson L (2015) Three-dimensional metrology of embedded microfeatures in ceramics by infra-red optical coherence tomography – advantages and limitations. In: *Proc. 11th LAMDAMAP*, March 2015. Swindon, UK, pp 74-83
91. Ahn Y, Jung W, Chen Z (2008) Optical sectioning for microfluidics: secondary flow and mixing in a meandering microchannel. *Lab on a Chip* 8:125-133
92. Stifter D, Leiss-Holzinger E, Major Z, Baumann B, Pircher M, Götzinger E, Hitzenberger CK, Heise B (2010) Dynamic optical studies in materials testing with spectral-domain polarization-sensitive optical coherence tomography. *Opt Express* 18:25712-25725
93. Dubois A, Grieve K, Moneron G, Lecaque R, Vabre L, Boccara C (2004) Ultrahigh-resolution full-field optical coherence tomography. *Appl Opt* 43:2874-2883
94. Chen T, Zhang N, Huo T, Wang C, Zheng. J, Zhou T, Xue P (2013) Tiny endoscopic optical coherence tomography probe driven by a miniaturized hollow ultrasonic motor. *J Biomed Opt* 18:086011
95. Prylepa A, Duchoslav J, Keppert T, Luckeneder G, Stellnberger K-H, Stifter D (2013) Nonlinear imaging with interferometric SHG microscopy using a broadband 1550 nm fs-fiber laser. In: *CLEO EUROPE/IQEC*, Munich, Germany, May 2013. p 1
96. Su R, Kirillin M, Chang EW, Sergeeva E, Yun SH, Mattsson L (2014) Perspectives of mid-infrared optical coherence tomography for inspection and micrometrology of industrial ceramics. *Opt Express* 22:15804-15819

97. Schmitt JM, Xiang SH, Yung KM (1999) Speckle in optical coherence tomography. *J Biomed Opt* 4:95-105
98. Hitzenberger CK, Baumgartner A, Fercher AF (1998) Dispersion induced multiple signal peak splitting in partial coherence interferometry. *Opt Commun* 154:179-185
99. Su R, Ekberg P, Leitner M, Mattsson L (2014) Accurate and automated image segmentation of 3D optical coherence tomography data suffering from low signal-to-noise levels. *J Opt Soc Am A* 31:2551-2560
100. Chiffre LD, S. Carmignato, Kruth J-P, Schmit R, Weckenmann A (2014) Industrial applications of computed tomography. *Ann CIRP* 63:655-677
101. Kruth JP, Bartscher M, Carmignato S, Schmitt R, Chiffre LD, Weckenmann A (2011) Computed tomography for dimensional metrology *Ann CIRP* 60:821-842
102. Hsieh J (2009) *Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances*. 2nd edn. SPIE press, Bellingham
103. Boone JM (2000) X-ray production, interaction, and detection in diagnostic imaging. In: J. Beutel HLK, and R. L. Van Metter (ed) *Handbook of medical imaging, physics and psychophysics*. SPIE Press, Bellingham, pp 1-78
104. Requena G, Cloetens P, Altendorfer W, Poletti C, Tolnai D, Warchomickaa F, Degischera HP (2009) Sub-micrometer synchrotron tomography of multiphase metals using Kirkpatrick–Baez optics. *Scripta Materialia* 61:760-763
105. Yaffe MJ, Rowlands JA (1997) X-ray detectors for digital radiography. *Phys Med Biol* 42:1-39
106. Smith BD (1990) Cone-beam tomography: recent advances and a tutorial review. *Opt Eng* 29:524-534
107. Ferrucci M, Leach RK, Giusca C, Carmignato S, Dewulf W (2015) Towards geometrical calibration of x-ray computed tomography systems—a review. *Meas Sci Technol* 26:092003
108. Flay N, Sun W, Brown S, Leach RK, Blumensat T (2015) Investigation of the focal spot drift in industrial cone-beam x-ray computed tomography. In: *Proc. DIR 2015*, Ghent, Belgium, June 2015.
109. Brooks RA, Di Chiro G (1976) Beam hardening in x-ray reconstructive tomography. *Phys Med Biol* 21:390-398
110. Santiago P, Gage HD (1995) Statistical-models of partial volume effect. *IEEE Trans Image Processing* 4:1531-1540
111. Schorner K, Goldammer M, Stephan J (2011) Comparison between beam-stop and beam-hole array scatter correction techniques for industrial X-ray cone-beam CT. *Nucl Instrum Meth B* 269:292-299
112. Mail N, Moseley DJ, Siewerdsen JH, Jaffray DA (2008) An empirical method for lag correction in cone-beam CT. *Med Phys* 35:5187-5196
113. Carmignato S, Pierobon A, Savio E (2011) First international intercomparison of computed tomography systems for dimensional metrology. In: *Proc. 11th euspen Int. Conf.*, Como, Italy, May 2011. pp 84–87
114. Dewulf W, Kiekens K, Tan Y, Welkenhuyzen F, Kruth J-P (2013) Uncertainty determination and quantification for dimensional measurements with industrial computed tomography. *Ann CIRP* 62:535-538

115. Hiller J, Maisl M, Reindl LM (2012) Physical characterization and performance evaluation of an X-ray micro-computed tomography system for dimensional metrology applications. *Meas Sci Technol* 23:085404
116. Hsieh J, Chao E, Thibault J, Grekowitz B, Horst A, McOlash S, Myers TJ (2004) A novel reconstruction algorithm to extend the CT scan field-of-view. *Med Phys* 31:2385-2391
117. Krämer P, Weckenmann A (2010) Multi-energy Image Stack Fusion in Computed Tomography. *Meas Sci Technol* 21:045105
118. Fitzgerald R (2007) Phase-sensitive x-ray imaging. *Phys Today* 53:23-26
119. Flay N, Leach RK (2012) Application of the optical transfer function in x-ray computed tomography - a review. NPL Report ENG 41
120. Landis EN, Keane DT (2010) X-ray microtomography. *Mater Charact* 61:1305-1316



# 9 Mikromontage

Serena Ruggeri, Gianmauro Fontana and Irene Fassi

National Research Council of Italy, Institute of Industrial Technologies and Automation (CNR-ITIA)

## 9.1 Einführung

Der Trend zur Miniaturisierung im letzten Jahrzehnt hat eine wahre Revolution in der Herstellung vieler Produkte und Systeme in mehreren Bereichen ausgelöst. Dieser Trend versucht Volumen und Gewicht zu reduzieren und mehr Funktionen in einen kleineren Raum zu integrieren. Neben den verschiedenen Herstellungstechniken, die in den vorherigen Kapiteln vorgestellt wurden, ist das Interesse an der Herstellung solch komplexer Systeme durch die Manipulation und Montage verschiedener Mikrokomponenten gewachsen. In diesem Zusammenhang bietet dieses Kapitel einen Überblick über verschiedene Aspekte der Mikromontage. Zuerst werden in Abschnitt 9.2 Hybrid-Mikroprodukte vorgestellt und die Notwendigkeit der Mikromontage aufgezeigt. Dann werden in Abschnitt 9.3-9.4 Mikromontageverfahren klassifiziert und beschrieben. Roboter für die Mikromontage mit damit verbundenen tatsächlichen Beispielen werden in Abschnitt 9.5 vorgestellt. Abschnitt 9.6 enthält eine Einführung in die Probleme der Manipulation von Mikrokomponenten. Danach werden Strategien und Instrumente für die Mikromanipulation diskutiert und eine Überprüfung auf mögliche Freigabemethoden durchgeführt. Die Bedeutung der visuellen Kontrolle und der Kraftmessung für die Mikromontage wird in Abschnitt 9.7 behandelt, einschließlich einer Bemerkung über umweltbedingte Konditionierung. Zum Schluss wird in Abschnitt 9.8 das Beispiel einer robotergesteuerten Mikromontage-Arbeitszelle vorgestellt, die im Labor der Autoren entwickelt wurde.

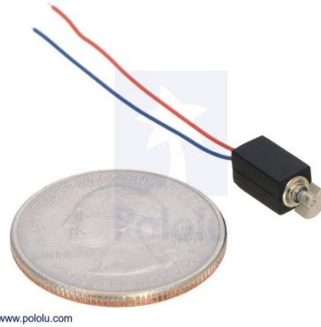
## 9.2 Herstellung von Hybrid-Mikrosystemen

Eine Vielzahl von Mikroprodukten, *Hybrid-Mikrosysteme* genannt, ist vor kurzem auf dem Markt erschienen: sie zeichnen sich durch höhere Leistung und mehr Funktionalitäten aus und werden aus zusammengesetzten nicht-Halbleiterbauelementen hergestellt. Diese Komponenten können metallisch, keramisch oder aus Polymer sein; jede wird mit dem am besten geeigneten Verfahren hergestellt [1]. Die Herstellungsverfahren umfassen Mikrofer-

tigungstechniken wie sie in den vorherigen Kapiteln beschrieben werden. Einige Beispiele für diese Produkte sind Mikropumpen, Mikromotoren und Mikrokameras (Abbildung 9.1).



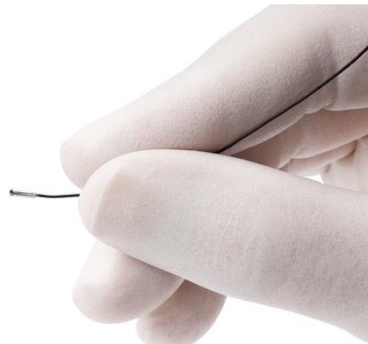
(a) Mikro-Planetengetriebe mit bürstenlosem DC-Servomotor: Durchmesser 3,4 mm. (Mit freundlicher Genehmigung von Faulhaber, <http://www.faulhaber.com>)



(b) Schwingungsgleichstrommotor. (Mit freundlicher Genehmigung von Pololu, <https://www.pololu.com>)



(c) Sub-Micro-Servo. (Mit freundlicher Genehmigung von Pololu, <https://www.pololu.com>)



(d) Micro-ScoutCam™ 1.2: CMOS-Kamera, 1,2 mm Durchmesser. (Mit freundlicher Genehmigung von Medigus, [www.microscoutcam.com](http://www.microscoutcam.com))

Abbildung 9.1: Beispiele für Mikroprodukte.

Allerdings haben diese sogenannten *Hybriden dreidimensionalen Mikroprodukte* ihren Markt noch nicht konsolidiert, vor allem aufgrund der Grenzen der Mikrofertigungsprozesse, die sowohl hochpräzise Herstellungstechniken und genaue Montage der Mikrokomponenten erfordern. Die Mikromontage hat einen großen Einfluss auf die Herstellungskosten: Montagekosten können 60% bis 90% der Gesamtkosten des Endproduktes ausmachen.

Die aktuell verfügbare Fertigungstechnik ist in der Tat noch nicht bereit für die Massenproduktion von Hybrid-Mikroprodukten. Auf der anderen Seite ist die automatische



Montage schwierig und teuer, da Standard-Automaten nicht geeignet sind, um mit Teilen im Submillimeterbereich umzugehen [2], [3].

In vielen Fällen wird die manuelle Montage der Komponenten gewählt. Dies erfordert hochqualifizierte menschliche Bediener, die die Mikroteile mit Hilfe sehr empfindlicher Mikropinzetten und Mikroskope mit starker Vergrößerung handhaben müssen; dies bedeutet, dass diese Phase des Prozesses zeitaufwändig, schwierig und sehr teuer ist. Darüber hinaus führt der kleine Maßstab zu neuen Problemen und Herausforderungen im Zusammenhang mit der Dominanz von Oberflächenkräften, so dass sich die Handhabung von Arbeiten auf der Makroskala auf jeden Fall unterscheidet (siehe Abschnitt 9.6.1).

Aus diesem Grund sollte die Entwicklung innovativer computergestützter automatisierter Mikromontage-Methoden „die Effizienz und Zuverlässigkeit steigern und Kosten senken“ [4]. Tatsächlich werden flexible Stationen, welche die automatische Montage der Komponenten ermöglichen, profitieren und die MST weiter voranbringen [5]. Die Strategien und ihre Einstufung für die aktuelle Mikromontage von Hybrid-Mikroprodukten werden in Abschnitt 9.4 besprochen.

## 9.3 Definition der Mikromontage

Nach [6] ist die Mikromontage die "Fachrichtung der Positionierung, der Orientierung und des Zusammenbaus von Komponenten im Mikrometermaßstab zu komplexen Mikrosystemen". Ziel der Mikromontage ist, Hybridgeräte von hoher Komplexität im Mikromaßstab herzustellen und dabei gleichzeitig auf hohe Ausbeute und niedrige Kosten zu achten [6].

Die Mikromontage ist eine Technologie zum Aufbau komplexer dreidimensionaler Hybrid-Mikrosysteme [2], [7], [8], die über die Sachzwänge der Siliziumtechnologien hinausgeht.

Wie wir später sehen werden können unterschiedliche Ansätze zur Mikromontage verfolgt werden. Wenn wir uns zuerst jedoch die intuitivste Strategie betrachten – wir nehmen eine Komponente und bauen sie mit einer anderen Komponente zusammen – dann kann man einen leichten Unterschied zwischen Mikromanipulation und Mikromontage erkennen, auch wenn beide Begriffe sich auf die Handhabung von Teilen mit Submillimeter-Strukturen beziehen. Es ist interessant zu sehen, indem diese Unterscheidung gemacht wird, in [8] das Konzept für die Gestaltung aller Mikroteile und Mikrogreifvorrichtungen entwickelt.

„Mikromanipulation ist in der Regel der Akt des Übersetzens und Drehens von Mikroteilen von einem Ort und einer Orientierung an einen anderen bzw. in eine andere“ [8]. Daher bedeutet Mikromanipulation nicht die Montage dieser Mikroteile, die nur für Untersuchungszwecke manipuliert werden könnten. Da Mikroteile unterschiedliche Formen und variable Eigenschaften aufweisen können, sind die Werkzeuge so gestaltet, dass sie mit

vielen Arten von Mikroteilen umgehen können. Mikromontage, andererseits, "ist der Akt des Bauens, Konstruierens oder Kombinierens von zwei oder mehr Mikroteilen in eine Mikrostruktur, und zwar dauerhaft" [8]. Sie ermöglicht die Herstellung von Hybrid-Geräten im Mikromaßstab, die mit Hilfe von Standardtechniken nicht hergestellt werden können. Die Geometrie der gewünschten endgültigen Mikrostruktur wird durch das Design festgelegt; das bedeutet, dass die Mikroteile völlig neue Strukturen haben. Deshalb wurde vorgeschlagen, dass "die Endeffektoren für die Mikromontage mehr spezialisiert sein können, als für die allgemeine Manipulation" [8].

"Die allgemeine Domäne, die sowohl mit der manuellen und automatisierten Montage von Mikrogeräten zu tun hat, nennt man Mikrogerätemontage (in Englisch: Micro Device Assembly (MDA))" [4]. Den neuen aufstrebenden Bereich der Entwicklung computergestützter Methoden für die Montage von Mikroteilen nennt man dagegen automatisierte Mikrogerätemontage (in Englisch: Automated Micro Device Assembly (AMDA)) [4].

## 9.4 Mikromontage Methoden

Wenn man mit extrem kleinen Komponenten arbeitet, dann stellt der Montagevorgang aufgrund vieler Faktoren besondere Herausforderungen dar, darunter [9]:

- Submikrometer-Präzision ist oft erforderlich,
- Oberflächenkräfte sind stärker als die Schwerkraft
- schwierige manuelle Handhabung

Aus diesen Gründen ist die Forschung an immer besseren Lösungen noch nicht abgeschlossen, obwohl man in vielen Beiträgen, die sich zum Beispiel auf Manipulationsstrategien und Werkzeuge konzentrieren, innovative automatische Plattformen und damit verbundene Kontrollverfahren finden kann.

### 9.4.1 Klassifizierung

Informationen zur Klassifizierung der Montagemethoden finden Sie in der Literatur [6-8, 10-12].

Ein strukturierter Ansatz für Mikromontageverfahren zieht in Betracht, dass die Klassifizierung beispielsweise auf der Grundlage von [7]:

- Durchsatz: serielle oder parallele Montage;
- Grad des menschlichen Eingreifens: manuell, ferngesteuert oder automatisiert;
- bewusste Intervention: deterministisch oder stochastisch.

Vorgenommen werden kann. Im Hinblick auf das erste Klassifizierungsverfahren unterscheidet man zwei Arten von Mikromontagestrategien:

- serielle Mikromontage;
- parallele Mikromontage.

Die serielle Mikromontage besteht aus dem "Zusammenfügen von einem Teil nach dem anderen gemäß der traditionellen Pick-and-Place-Methode" [6] (auch "Micro Pick and Place" genannt [10]). Es ist ein sequentieller Vorgang, der eine Reihe von Aufgaben umfasst, wie zum Beispiel: Teil 1 des komplexen Mikrogerätes identifizieren, Teil 1 aufnehmen, Teil 1 im Montagebereich platzieren, Teil 2 identifizieren, Teil 2 aufnehmen, Teil 2 und Teil 1 montieren, und so weiter, bis das letzte Teil zusammengebaut worden ist. Die Roboterontage, auf die später in diesem Kapitel im Detail eingegangen wird, fällt in der Regel in diese Kategorie, auch wenn einige Anwendungen unter den parallelen Ansatz fallen. Sie gilt als wichtiger Ansatz für die komplexe Montage mit hoher Flexibilität.

Wenn "mehrere Mikroteile von gleichem oder unterschiedlichem Design gleichzeitig zusammengebaut werden" [6, 10], dann wird dieser Ansatz parallele Mikromontage genannt. Auf diese Weise kann der Durchsatz eines Systems stark erhöht werden [13].

Je nach dem Grad der Automatisierung können die Ansätze in der Mikromontage unterteilt werden:

- manuelle Montage mit Spezialwerkzeugen (z.B. Pinzetten) und Mikroskopen;
- ferngesteuerte Montage mit Hilfe eines Joysticks/einer haptischen Schnittstelle;
- automatisierte Montage, basierend auf der Verwendung von hochleistungsfähigen Robotern, Präzisionstischen und Mikrogreifwerkzeugen, die eine Montagezelle bilden. Das System könnte visuelles Feedback, Kraft-Feedback oder eine Kombination aus beiden nutzen.

Bei der manuellen Montage ist es notwendig, hochpräzise Aufgaben auszuführen. Mikroskope oder Lupen müssen zur Verfügung stehen, damit die Bediener eine klare Sicht auf die Teile und die Szene haben. Die Teile sind in der Regel sehr empfindlich; deshalb dürfen nur geringe Kräfte aufgebracht werden, die während des Betriebs nicht wahrgenommen werden. Einerseits kann ein zu geringer Kraftaufwand dazu führen, dass die Teile unzureichend gehalten werden; andererseits kann zu hoher Kraftaufwand zu Beschädigungen oder Verformungen der Teile oder der Greifwerkzeuge führen.

Ferngesteuerte Systeme arbeiten mit einer Mensch-Maschine-Schnittstelle, welche die Aktionen des Bedieners an die Aktoren einer Maschine überträgt, die dann mit den Komponenten in Wechselwirkung tritt. Diese Schnittstelle ermöglicht eine Skalierung sowohl der Bewegungen als auch der Kräfte. Auf diese Weise und mit Hilfe von visuellem Feedback und Krafrückmeldung (z.B. haptische Schnittstelle), kann der Bediener die Montageaufgabe im Mikromaßstab auf ähnliche Weise ausführen, wie Arbeiten auf der Makroskala.

Die automatisierte Montage könnte weiter unterteilt werden in halbautomatische bzw. vollautomatische Montage, wenn es ein teilweises Eingreifen des Bedieners gibt, um bestimmte Operationen auszuführen, oder der Betreiber vollständig außen vor bleibt. Im letzteren Fall arbeitet das System, sobald es eingerichtet und die Aufgaben definiert wurden, autonom unter Open-Loop oder häufiger unter Closed-Loop-Steuerung.

Gemäß der dritten Klassifikationsmethode kann die Montage:

- deterministisch;
- stochastisch.

sein. Bei der deterministischen Montage "ist die Beziehung zwischen Mikroteil und seinem Ziel von vorneherein bekannt" [6].

Die deterministische Montage kann sowohl seriell als auch parallel stattfinden. Neben dem seriellen Ansatz kann die parallele deterministische Montage auf verschiedene Weise erreicht werden. Ein möglicher Ansatz ist der Wafer-to-Wafer-Transfer. Um dies zu verdeutlichen, stellen wir uns die Montage von zwei Gruppen von Mikrokomponenten vor: die erste Gruppe liegt ordentlich angeordnet auf einem Wafer, während ein anderer Wafer den zweiten Satz Mikrokomponenten enthält. Dieser zweite Wafer wird auf den ersten gedrückt, um den Transfer und die Zusammensetzung seiner Komponenten mit der ersten Gruppe zu ermöglichen und wird dann entfernt. Eine weitere Möglichkeit eine parallele deterministische Montage durchzuführen ist die Verwendung von Mikrogreifer-Arrays, die in der Lage sind Pick & Place Operationen parallel auszuführen [14, 15].

Bei der stochastischen Montage "ist die Beziehung zwischen Mikroteil und seinem Ziel unbekannt oder zufällig" [6]. Hier bauen sich die Teile spontan selbst zusammen; daher nennt man diese Art der Montage auch Selbstmontage oder Selbstorganisation (im Englischen: Self-Assembly, SA).

Die Selbstmontage wird in der Regel als "die strukturelle Selbstorganisation physischer Einheiten ohne externe Führung" definiert [16], d.h. sie werden einfach dem Einfluss einer äußeren Antriebskraft unterworfen. "Es ist ein reversibler Prozess, in dem ungeordnete bereits bestehende Komponenten stabile und klar definierte Muster oder Strukturen einer

höheren Ordnung bilden" [16]. Einige praktische Beispiele der Selbstmontage sind die Bildung von Molekulkristallen und vieler Proteine.

Zwei Hauptklassen der Mikromontagetechniken können unterschieden werden [11] und werden in diesem Kapitel ausführlich behandelt: Selbstmontage und Roboterontage.

Zum Schluss werden mehrere Fügeverfahren in der Mikromontage angewendet, darunter Löten, Schweißen, Keramik, Polymerklebstoffe, Waferbonden, Galvanik und mechanische Befestigungselemente (einschließlich Mikro-Klettverschluss und Druckknöpfe) [10]. Die ersten fünf werden allgemein als geeignet in einer Reinraumumgebung angesehen, während die letzten beiden als Zukunftstechniken gelten [17]. Heute sind auch "Snap-together"-Komponenten üblich [7].

Das Konzept der mikromechanischen Montage, gut beschrieben in [18], ist ein Montageverfahren, bei dem "die relative Position der Komponenten beibehalten wird durch den Austausch von Kontaktkräften, die durch mechanische Belastungen erzeugt werden". Mikromechanische Montagemethoden werden dann nach der mechanischen Belastung und dem Verfahren, welches das Material durchläuft, bis es zur Montage gelangt (Materialbelastung) klassifiziert. Für die erstere Gruppe wird die Möglichkeit der Demontage in Erwägung gezogen, während für die letztere Gruppe die Eigenschaften von keiner Verformung, elastischer Verformung, plastischer Verformung bis zu Fließen und Erstarrung reichen. Die wichtigsten mikromechanischen Fertigungsmethoden sind: Schnappverschlüsse, Schrauben, Velcro, Mikroverbindung (z.B. Schwalbenschwanz-Mikrogelenk), Mikrospritzgießen und Mikrovernietung, Falzen und Clinchen. Kleben ist das am weitesten verbreitete Verfahren, insbesondere für die Montage optischer Komponenten. Es ist jedoch nicht auf die mikromechanische Montage begrenzt [19].

## 9.4.2 Roboter-Mikromontage

Die Roboter-Mikromontage wird mit Robotersystemen durchgeführt, die aus einer Greifvorrichtung, Sensorsystemen, einem Roboter und einem Controller bestehen. Sie umfasst drei Phasen: Aufnehmen, Handhaben und Abgeben.

Die Roboter-Mikromontage besitzt einige Merkmale, die für Standard- oder mesoskalige Roboter-Montage typisch sind [13]. Gemeinsame Aspekte umfassen die Steuerung von Roboterbewegungsgrößen, Kraftsteuerung und Feedback sowie kooperative Manipulation. Arbeiten auf der Mikroskala führen zu weiteren Herausforderungen, wie komplexere und teurere Ausrüstung, damit anspruchsvolle Präzisionsspezifikationen, Schwierigkeiten bei der Verwendung eines einzelnen mechanischen Greifers und häufige Unzulänglichkeit von Lösungen, die aus einer Abwärtsskalierung von Makro-Konzepten abgeleitet wurden. Tatsächlich könnte ein erster Ansatz für die Mikromontage sein, Lösungen zu miniaturisieren, die auf der Makroskala richtig funktionieren, indem man einfach die Abmessungen

des Systems reduziert. In der Regel funktioniert dies auf der Mikroskala jedoch nicht, aufgrund der nicht machbaren Fertigungstoleranzen und Handling-Lösungen [18].

Bei der Produktion von Kleinserien wird die ferngesteuerte Mikromontage aufgrund der aktuellen hohen Kosten für automatische Stationen oder wegen mangelnder Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit, die für häufige Produktwechsel erforderlich sind, oft den vollautomatischen Systemen vorgezogen [20]. Allerdings würden verbesserte Konzepte dafür sorgen, dass bessere automatische Systeme die erste Wahl für Ingenieure wären.

In [13] findet man eine interessante Tabelle mit einem Vergleich verschiedener Überlegungen zur Montage (z.B. Bewegung, kraftbezogene Faktoren, Durchsatz, Art der Manipulation) im Mesomaßstab, im Mikromaßstab und im Nanomaßstab. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Mikromontage eine echte Grenze zwischen den benachbarten Domänen darstellt, weil die meisten Entscheidungen nicht eindeutig und klar sind, sondern stark von den spezifischen Anwendungen abhängig sind.

Die Roboter-Mikromontage kann oft als serieller automatisierter Ansatz angesehen werden, der in einer Mikromontage-Arbeitszelle oder einem bestimmten Raum einer Mikrofabrik durchgeführt wird, deren Hauptvorrichtungen miniaturisierte Roboter sind (fest oder mobil), andere Mikropositionierungsvorrichtungen (z.B. Mikrostopfen), Mikrogreifer, Mikro-Zuführungssysteme, Sensor- und Steuergeräte.

Ein Beispiel einer seriellen Mikromontage wird in [21] geschildert; dabei werden zwei Aufgaben für die Mikromontage dreidimensionaler Strukturen demonstriert: die erste baut zwei identische Puzzleteile zusammen, die zweite jedoch zwei unterschiedliche Teile. Alle Teile besaßen eine quadratische Form mit 40  $\mu\text{m}$  langen Seiten und einer Dicke von 5  $\mu\text{m}$ . Die Station bestand aus einer Roboterstruktur, einem optischen Mikroskop und einem piezoelektrischen Zweifingergreifer.

### 9.4.3 Selbstmontage

Die Selbstmontage ist ein paralleles stochastisches Verfahren zur Montage von Mikrobau-teilen basierend auf dem Prinzip der minimalen potentiellen Energie, die besagt, dass ein Mikroteil in den Zustand bewegt wird, in dem die gesamte potentielle Energie des Systems am kleinsten ist. Die Selbstmontage nutzt die für den Mikromaßstab typische Oberflächenenergie und eine externe Kraft, um die Mikroteile aufzuschütteln. Der entscheidende Punkt für eine erfolgreiche Montage ist, dass Teil und Rezeptor so gestaltet sein müssen, dass sie einen Zustand minimaler potentieller Energie darstellen, wenn sie verbunden werden.

Die Anwendung der Selbstmontage für die Mikromontage begann vor etwa 30 Jahren; in der Chemie oder Biologie ist dies ein altbekanntes Phänomen.

Verschiedene Selbstmontagetechniken können verwendet werden, beispielsweise: geometrische Formanpassung, kapillare Selbstmontage in Flüssigkeit oder in Luft, magnetische oder elektrostatische Selbstmontage [22] (siehe Abbildung 9.2).

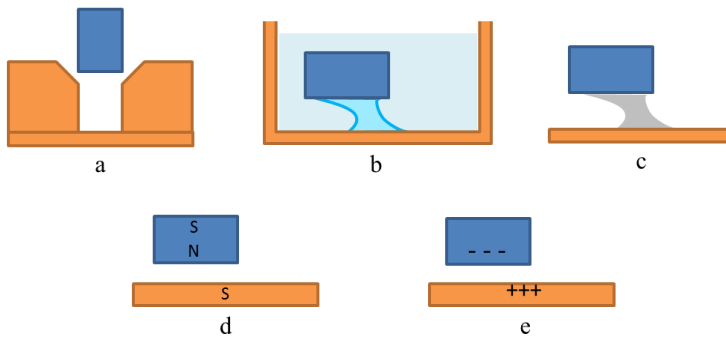


Abbildung 9.2: Beispiele für Selbstmontagetechniken: (a) geometrische Formanpassung; (b) kapillare Selbstmontage in Flüssigkeit; (c) kapillare Selbstmontage in der Luft; (d) magnetisch; (e) elektrostatisch.

Beim geometrischen Form-Matching erreicht man die Montage, wie der Name schon sagt, wenn das Teil und die Stelle, in die das Teil passen muss, passende Formen besitzen, wie in einer Stift-in-einem-Loch-Montage. Passende Teile besitzen besondere Formen, welche die Endmontage erleichtern, z.B. geneigte Wände. Der Prozess findet unter Einwirkung einer äußeren Kraft statt, wie der Schwerkraft, zufälligen Vibrationen oder Zentrifugalkraft [23].

Die kapillare Selbstmontage kann unter Ausnutzung der Oberflächenwechselwirkung erreicht werden. In diesem Fall kann man die Wechselwirkungen zwischen Metallen ausnutzen oder Klebefluid in einer flüssigen Umgebung verwenden, beispielsweise Wasser oder Ethylenglykol [24]. Kapillarkräfte können auch in der Luft verwendet werden; ein Beispiel ist die Selbstausrichtung der Komponenten durch flüssiges Lötmedium [25]. Die Kombination von Kapillarität und geometrischer Formanpassung ermöglicht eine effektive Montage.

Magnetische Kräfte können auch genutzt werden. Tatsächlich ziehen entgegengesetzte Pole einander an und dadurch kann ein Teil die vorgesehene Stelle erreichen. Schließlich wurde auch die elektrostatische Selbstmontage demonstriert, die hauptsächlich auf Dielektrophorese und Kontaktelektrisierung basiert.

### 9.4.4 Vergleich von Roboter-Mikromontage und Selbstmontage

Die Eigenschaften der Selbstmontage unterscheiden sich grundlegend von denen der Roboter-Montage, die ein deterministisches Verfahren ist. Die Selbstmontage nutzt Mikrokräfte und beruht auf dem Prinzip der minimalen potentiellen Energie, während die Roboter-Montage meistens unerwünschte Kräfte zu bewältigen hat, die unerwünschte Wirkungen beim Greifen und Loslassen eines Mikroteils verursachen.

Das Roboter-Mikro-Handling nutzt die guten Fähigkeiten und die Flexibilität der Robotertechnik aus: Tatsächlich kann ein gut konzipiertes System dreidimensionale Teile handhaben und durch Neuprogrammierung können viele verschiedene Operationen durchgeführt werden. Auf der anderen Seite ist die Selbstmontage weniger flexibel, da die meisten Verfahren zweidimensional sind und Teile und Rezeptorstellen neu gestaltet werden müssen, wenn sich der Prozess ändert [22].

Eine Zusammenfassung der verschiedenen Komponenten der Roboter-Mikromontage und Selbstmontage finden Sie in [26]. Der Vergleich basiert auf der Analyse der Phasen des Mikromontageverfahrens (Zuführung, Positionierung, Lösen, Ausrichten und Fixieren). Er behandelt auch unterschiedliche Aspekte in Bezug auf die Umgebung, Oberflächeneigenschaften, externe Störung und Anregung. Außerdem wird gezeigt, dass beide Technologien Ähnlichkeiten in Prozessphasen, verknüpften Aspekten und physikalischen Prinzipien aufweisen.

Obwohl beide Methoden auf die Montage von Mikroteilen abzielen, werden sie meistens in unterschiedlichen Zusammenhängen verwendet: die Selbstorganisation wird historisch gesehen in der Biologie und Chemie für die Montage extrem kleiner Teile und Zellen (oft in flüssigem Medium) verwendet, während die Roboter-Montage viel öfter für die Montage von Mikrogeräten im Bereich der Mechanik, Elektronik, Optik oder Biomedizin eingesetzt wird.

### 9.4.5 Hybrid-Mikromontage

Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben besitzen sowohl die Roboter-Mikromontage als auch die Selbstmontage bestimmte Vorteile und Grenzen. An diesem Punkt könnte man aus der Kombination beider Strategien großen Nutzen ziehen und die jeweiligen Vorteile nutzen. Dieser Ansatz wird Hybrid-Mikromontage genannt. Die Selbstmontage kann Lösungen für Haftungsprobleme in Roboteranwendungen bieten, während die Flexibilität der Robotertechnik die Montagemöglichkeiten erweitern kann. Wie in [26] dargelegt, kann die Roboter-Mikromontage helfen die Ausbeute der Selbstmontage zu verbessern, und dabei stochastische Fehler ausgleichen; darüber hinaus kann



auch die Einführung von klar gestalteten Wechselwirkungen zwischen Teilen und Rezeptoren die Zuverlässigkeit und die Leistungsfähigkeit des Montagevorgangs verbessern.

Ein Beispiel einer Hybridmontage wird in [27] beschrieben; die Selbstausrichtung von Tröpfchen und das Mikrohandling durch Roboter werden kombiniert, um 300  $\mu\text{m}$  große Teile zusammenzubauen. In diesem Fall wird die Zuführung und Positionierung durch das Robotersystem durchgeführt, das mit Mikropinzetten ausgerüstet ist. Sobald die Mikropinzette ein Teil ergriffen hat und sich der Abgabestelle (einem anderen Teil) nähert, wird ein Tropfen Wasser zwischen Teil und Abgabestelle abgegeben. Das ergriffene Teil berührt den Tropfen, der das Teil benetzt. An diesem Punkt öffnet sich die Pinzette und das Teil wird durch Kapillarkräfte angezogen und auf das andere Teil ausgerichtet. Diese Methode hat sich bei der Ausrichtung von Teilen unterschiedlicher Größe (das obere quadratische Teil besitzt eine Seitenlänge von 100  $\mu\text{m}$ ) und beim Stapeln mehrerer Teile auch als nützlich erwiesen.

## 9.5 Roboter für die Mikromontage

In einer Mikro-Fabrik (siehe Kapitel 1), und insbesondere in einer Roboter-Mikromontage-Arbeitszelle, spielen Mikroroboter eine wichtige Rolle.

Ein Mikroroboter integriert Mikroaktoren und Sensoren, besitzt eine gewisse Intelligenz und ist in der Lage, Kräfte anzuwenden, um Objekte zu manipulieren, usw. [5]. Mikroroboter müssen, je nach Anwendung, bestimmte Anforderungen erfüllen, darunter: Komplexität, Genauigkeit, Geschwindigkeit, Bewegungsumfang, Robustheit, Beweglichkeit, Fähigkeit verschiedene Teile zu manipulieren, Umfeld, in dem sie arbeiten müssen, verfügbarer Raum. Zuverlässigkeit und Kosten sind ebenfalls wichtige Aspekte.

Viele Studien unterstreichen die Notwendigkeit der Mikromontage, um den Endeffektor präzise und über große Entfernungen zu positionieren [19].

Forscher arbeiten an der Entwicklung von Systemen, die geeignet sind für die effektive und zuverlässige Ausführung unterschiedlicher Aufgaben des Mikromontageprozesses. Einerseits basieren diese Systeme auf der Idee der Miniaturisierung von Robotern im Makromaßstab und, andererseits, auf innovativen Ansätzen, die speziell für den Mikromaßstab entwickelt wurden. Dies führte zu einer Reihe von Mikrorobotern, die für verschiedene Anwendungen getestet wurden. Ihre Klassifizierung und einige Beispiele werden im nächsten Abschnitt geschildert.

### 9.5.1 Definition

Ein Mikroroboter kann als kleiner Roboter definiert werden, der auf der Mikroebene arbeitet. Diese Definition umfasst zwei Arten von Mikrorobotern: Miniaturroboter, mit charakteristischen Abmessungen von weniger als 1 mm, und Roboter, die in der Lage sind, mikrometergroße Komponenten zu handeln (auch als Mikromanipulatoren bezeichnet).

Die wichtigsten Merkmale der Mikrorobotertechnik sind eine Größe im Bereich von Mikrometern bis Zentimetern, eine mechanische, chemische und elektromagnetische Wechselwirkung mit der Umgebung, sowie Mikromontage als Hauptanwendung [28].

Laut [5] "zeichnet sich ein Mikroroboter durch seine Programmierfunktion, durch aufgabenspezifische Sensoren und Aktoren, sowie in der Regel durch uneingeschränkte Mobilität aus". Die Manipulationsfähigkeit des Mikroroboters wird bestimmt durch die Aktoren für die Manipulation von Objekten (Roboterarme und -hände), während seine Beweglichkeit durch die Aktoren zum Bewegen der Roboterplattform (Roboterantrieb) bestimmt wird.

Für [29] ist der Mikroroboter nicht nur eine miniaturisierte Maschine, sondern auch ein integriertes System, bestehend aus Sensoren, Aktoren und einer Logikschaltung. Auch wenn sich der Begriff "Mikro" auf eine Maschine von einer Größe unter einem Millimeter bezieht, muss sie nicht so klein sein; das Problem ist jedoch, dass die Größe im Vergleich zu Standardmaschinen extrem klein ist. Die wichtigsten Merkmale eines Mikroroboters sind: Einfachheit, Vormontage, Funktionsintegration, Vielfalt und autonome Dezentralisierung.

Ein Mikromanipulator muss in der Lage sein in der Umgebung zu arbeiten, die von der Anwendung verlangt wird (z.B. trockene oder flüssige Medien, Anwesenheit elektrischer Felder). Darüber hinaus muss die erforderliche Genauigkeit, die im allgemeinen sehr eng definiert ist, garantiert werden; daher muss die Struktur ausreichend steif und unempfindlich gegenüber sich verändernden Umweltbedingungen (z.B. Temperatur) sein, sonst müssen Kompensationen vorgenommen werden [30]. Die Systeme sollten auch kompakt sein, um in den zur Verfügung stehenden Raum einer kleinen Station zu passen. Schließlich sind die Kinematik der Struktur und die Anzahl der Freiheitsgrade wichtig für die Definition der Fähigkeiten eines Mikromanipulators.

### 9.5.2 Klassifizierung

Mikroroboter können auf Basis von Größe, Funktionalität und Aufgabenstellung klassifiziert werden [5].

Was die Funktionalität anbetrifft, besitzt ein Mikroroboter Sensoren und Aktoren für die Positionierung und den Betrieb (AP und AO), einer Steuereinheit (CU) und eine Stromquelle (PS); eine andere Kombination dieser Komponenten definiert die Kategorie von

Mikrorobotern. In diesem Fall müssen drei Kriterien berücksichtigt werden: ist Mobilität vorhanden oder nicht, Stromquelle an Bord oder nicht, Steuerung mit oder ohne Kabel.

Die Aufgabenstellung wird definiert als das Verhältnis zwischen den Roboterabmessungen und dem Einsatzbereich des Roboters. Wenn das Verhältnis deutlich kleiner als 1 ist, handelt es sich um einen mobilen mikroskopischen Roboter; ist jedoch das Verhältnis viel höher als 1, dann ist der Roboter stationär, jedoch sehr präzise. Wieder wird die Notwendigkeit zur sehr präzisen Manipulation von Mikroteilen und ihrer Bewegung über lange Strecken unterstrichen.

Auf der Grundlage verschiedener Lösungen, die in der Literatur beschrieben werden, kann man zwischen mobilen oder stationären Mikrorobotern, sowie seriellen oder parallelen Roboterstrukturen unterscheiden [30].

Mobile Mikroroboter sind attraktiv, weil sie lange Strecken zurücklegen können; sie sind kompakt, autonom und können für Mikromanipulationsaufgaben eingesetzt und eingerichtet werden. Es gibt viele Beispiele für diese Art von Mikrorobotern (siehe Abschnitt 9.5.4); allerdings leiden sie im Grunde an zwei Einschränkungen: Energieautonomie und begrenzte Genauigkeit.

Andererseits ist die Entwicklung stationärer Mikroroboter ebenfalls ein Thema, das von großem Interesse ist. Sie besitzen einen relativ großen Arbeitsraum, können erhebliche Verschiebegeschwindigkeiten erreichen und ihr Modell ist bekannt und kann durch die Steuerung genutzt werden. Allerdings sind wichtige Fragen verknüpft mit dem Spiel und der Empfindlichkeit gegenüber Umgebungsbedingungen, die zu einer Verschlechterung der Genauigkeit des Systems führen; daher ist ihr Einsatz auf Anwendungen beschränkt, bei denen die geforderte Genauigkeit mehr als einige Mikrometer beträgt.

Mikroroboter können eine serielle oder parallele Kinematik aufweisen. Im ersteren Fall besitzt der Mikroroboter eine offene Kinematik, bei der Elemente in Serie durch ein Dreh- oder Lineargelenk verbunden sind. Dies könnten zum Beispiel SCARA Roboter sein. Diese Roboter haben ein großes Arbeitsvolumen, sind einfach und modular; allerdings sind sie nicht starr genug und das unvermeidbare Auftreten von Fehlern in der gesamten Kette von Elementen ergibt eine begrenzte Genauigkeit auf dem Endeffektor.

Parallelkinematik-Mikroroboter besitzen eine geschlossene kinematische Kette. Die Steifigkeit der Struktur ist höher als bei seriellen Strukturen, und sie können genauer sein, obwohl das Arbeitsvolumen im Allgemeinen klein ist. Aus diesen Gründen werden parallele Strukturen für Mikromontage-Anwendungen oft bevorzugt. Beispiele für diese Art von Robotern sind zweiarmlige SCARA-Roboter (auch Parallel-SCARA genannt) oder Delta-Roboter (siehe Abbildung 9.3).

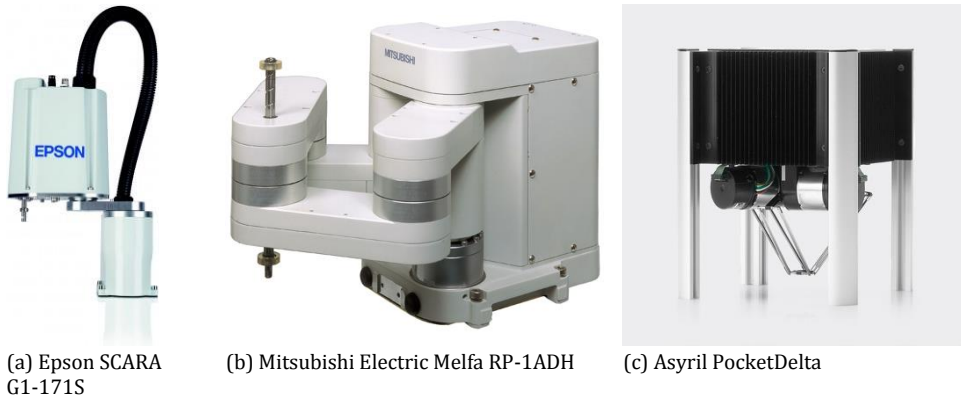


Abbildung 9.3: Beispiele für Roboter-Strukturen: (a) SCARA-Roboter (von EPSON, [31]); (b) Zweiarm-SCARA-Roboter (von Mitsubishi, [32]); (c) Delta-Roboter (von Asyriil SA [33]).

Eine interessante Zusammenfassung der industriellen Mikromanipulatoren finden Sie in [34]. In einer Tabelle werden 15 Roboter in Bezug auf Arbeitsbereich, Genauigkeit, Geschwindigkeit und Nutzlast verglichen, die als die wichtigsten Parameter gelten. Die Tabelle zeigt, dass die am häufigsten verwendeten Strukturen SCARA und kartesische Roboter sind, wobei die erstgenannten schneller, allerdings auch weniger genau sind als die letztgenannten.

### 9.5.3 Designüberlegungen

Die Gestaltung und Verwendung miniaturisierter Roboter bringt eine Reihe von Herausforderungen mit sich: vorherrschende Kräfte, Skalierbarkeit der Teile, bewegte Massen, Nichtlinearitätseffekte, Verkabelung. Die verschiedenen Faktoren, die das Design und den Einsatz von Robotern in einer Mikro-Fabrik beeinflussen, werden in [35] geschildert. Die wichtigsten Faktoren sind:

- **Größe:** Die Erlangung kleiner Größen, auch wenn dies oft wünschenswert ist, schränkt einige Lösungen ein. Tatsächlich könnte es schwierig sein, kommerzielle Komponenten zu finden und oft sind ihre Kosten auch ziemlich hoch. Außerdem wird bei kleiner werdenden Abmessungen die Integration von Aktoren und Sensoren immer schwieriger. Schließlich könnten zu enge Fertigungstoleranzen, die vom Design gefordert werden, für aktuelle Herstellungsverfahren nicht machbar oder zu teuer sein.
- **Leistungsfähigkeit:** Bezieht sich auf die Genauigkeit, Geschwindigkeit, Nutzlast, Freiheitsgrade, Arbeitsraum. Die Leistungsfähigkeit ist eng verknüpft mit dem folgenden Faktor, d.h. der Art der Roboterstruktur.

- **Struktur:** Sie kann parallel oder seriell sein auf Grundlage eines Drehgelenks oder einer Linearachse. Wie in Abschnitt 9.5.2 bereits erwähnt werden parallele Strukturen wegen ihrer höheren Steifigkeit und Geschwindigkeit für miniaturisierte Roboter öfter verwendet; ihr Hauptnachteil ist jedoch der begrenzte Arbeitsraum. Beachten Sie bitte, dass Nichtlinearitäten wie beispielsweise Reibung oder Spiel in der Struktur die Leistung des Roboters merklich beeinflussen können.
- **Integration:** Dieser Faktor kann auf mehreren Ebenen betrachtet werden. Wie oben erwähnt, kann die Integration der Sensoren und Aktoren in den Roboter schwierig sein; daher muss sie richtig ausgelegt werden, aber auch die Integration des Roboters in die Arbeitszelle muss berücksichtigt werden. Tatsächlich müssen die Steuerung und die zugehörigen Hilfsgeräte die geringste Abmessungsanforderung erfüllen; dabei sind die Modularität sowie die anderen Prinzipien für eine flexible Roboter Montage in der Mikro-Fabrik zu beachten.
- **Kosten:** Nicht zuletzt müssen die Kosten für den Roboter und die Geräte sich als günstig erweisen, damit die Industrie ihre Verwendung tatsächlich in Erwägung zieht und Mikromontagestation die Chance bekommen, den Markt zu erobern.

Ferner umfassen die Überlegungen zur Mikromontage die Entwicklung von Mikrorobotern, die auf dem gleichen Wafer wie die Teile hergestellt werden könnten, so dass die Notwendigkeit eines externen Montagesystems entfallen könnte. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Herstellung und Integrationen von Sensoren und Aktoren muss das Design der Mikroroboter einfach sein [13].

#### **9.5.4 Beispiele von Robotern für die Mikromontage**

Beispiele für kommerzielle serielle Roboter für die Mikromontage sind der Yamaha YK120X SCARA-Roboter mit Wiederholgenauigkeit von 5  $\mu\text{m}$ , oder der EPSON G1-171S SCARA-Roboter (Abbildung 9.3.a) mit der gleichen Wiederholgenauigkeit, einer Reichweite von 175 mm und vier Achsen [31].

Der Sysmelec Autoplace 411 [36] ist ein Beispiel für einen kartesischen seriellen Roboter; er besteht aus Linearachsen, besitzt eine sehr gute Auflösung und kann eine Wiederholgenauigkeit von weniger als 3  $\mu\text{m}$  erreichen.

In der Literatur findet man viele Beispiele für Roboter mit Parallelstruktur. Die Tampere University of Technology (TUT) hat verschiedene Prototypen für Roboter entwickelt. Sie entwickelten den TUT H-Portalroboter, einen riemengetriebenen parallelen kartesischen

Manipulator, bei dem das Band ein H-Muster bildet, das die x- und y-Bewegung ermöglicht, während die z-Bewegung durch eine Kugelumlaufspindel zur Verfügung gestellt wird.

TUT entwickelte auch die H-SCARA (Abbildung 9.4.a) mit 4 Freiheitsgraden; sie besteht aus zwei in Serie montierten Parallelstrukturen: der erste Teil ist eine H-riemengetriebene Struktur für die Bewegung in der xz-Ebene, der zweite Teil ist eine parallele SCARA für die Bewegung in der xy-Ebene. Der vierte Freiheitsgrad ist eine Drehung, die am Endeffektor der Parallel-SCARA verfügbar ist. Darüber hinaus wurde das TUT Parallel-SCARA entwickelt; es besitzt drei Freiheitsgrade und eine verbesserte Steifigkeit. Sie entwickelten auch einen kostengünstigen Kartesianer, dessen Struktur im Wesentlichen einen Kartesianer mit einer Kugelumlaufspindel kombiniert. Einen Vergleich der Eigenschaften des H-Portals, H-SCARA, Low-Cost-Cartesian, TUT Parallel-SCARA und Pocket Delta finden Sie in [37].

Die Universität Braunschweig - Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) [38] hat in Zusammenarbeit mit der Micromotion GmbH den PARVUS-Roboter mit 4 Freiheitsgraden und einer Genauigkeit von 10  $\mu\text{m}$  und einer Grundfläche von 170 x 130  $\text{mm}^2$  entwickelt.

Ein kommerzielles Beispiel eines Parallel-SCARA-Roboters ist der Mitsubishi RP-1AH (Abbildung 9.3.b) mit 4 Freiheitsgraden und einer Wiederholgenauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  in der xy-Ebene (siehe auch Abschnitt 9.8).

Ein weiteres Beispiel einer Parallelstruktur für die Mikromontage ist der IWF Micabo, entwickelt in zwei Strukturvarianten: planar und volumetrisch. IWF entwickelte auch den Triglide-Roboter [39] mit einer Wiederholgenauigkeit besser als 1  $\mu\text{m}$ .

Ein weiteres wichtiges Beispiel eines Parallel-Mikroroboters ist die PocketDelta [40], eine Art Miniaturisierung der Makro-Delta-Struktur. Sie wurde entwickelt von der CSEM<sup>1</sup> und wird derzeit von Asyrl SA vermarktet (Abbildung 9.3.c). Sie verfügt über verringerte Massen in Bewegung und Direktantriebsmotoren, die eine höhere Geschwindigkeit ermöglichen. Sie besitzt drei Freiheitsgrade, eine Wiederholgenauigkeit von  $\pm 2,5 \mu\text{m}$  und einen zylindrischen Arbeitsbereich mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 27 mm [33].

Physik Instrumente vertreibt 6-achsige Miniatur-Hexapoden (Abbildung 9.4.b) mit einer Wiederholgenauigkeit von weniger als 0,5  $\mu\text{m}$  in allen Achsen, die als Mikropositionierungssystem in Mikromontageanwendungen verwendet werden können [41].

---

<sup>1</sup> Centre Suisse d'Électronique et Microtechnique (Schweizer Zentrum für Elektronik und Mikrotechnologie)

Viele mobile Mikroroboter wurden bisher entwickelt. Innerhalb des MiCRoN-Projekts wurden mobile Mikroroboter mit den Abmessungen 12 x 12 x 17,5 mm entwickelt [42, 43]. Das Funktionsprinzip basiert auf Stick-Slip-Piezoaktoren, die eine planare Bewegung erzeugen (zwei Übersetzungen und eine Umdrehung) mit einer Genauigkeit für die absolute Positionierung von etwa 5  $\mu\text{m}$ . Der Mikroroboter kann zur Manipulation von starren oder flexiblen Komponenten mit einer Mindestgröße von einigen zehn Mikrometern und für die Montage von Endoskopen verwendet werden.

Ein mobiler Mikroroboter, genannt MINIMAN, wurde an der Universität Karlsruhe im Rahmen des ESPRIT-Projekts "MINIMAN" entwickelt. MINIMAN kann automatisch oder im Tele-Betrieb arbeiten. Er besteht aus einer beweglichen Plattform, die von drei röhrenförmigen Piezokeramik-Beinen [44] angetrieben wird; das Laufen basiert auf Trägheitskräften. Er kann mit verschiedenen Werkzeugen ausgestattet werden, z.B. mit Greifern, die durch piezoelektrische Betätigung angetrieben werden. Ein weiterer Prototyp ist der RobotMan, der mit einem Greifer mit zwei Fingern, die durch drei Mikromotoren betätigt werden, sowie einer CCD-Kamera ausgestattet ist [44].

In [45] wird ein elektrostatischer MEMS-Mikroroboter mit den Abmessungen 60 x 250 x 10  $\mu\text{m}$  vorgestellt. Dieses Gerät besitzt zwei Freiheitsgrade und besteht aus einem gekrümmten auskragenden Steuerarm mit einem elektrostatisch angetriebenen Scratch-Drive Actuator (SDA).

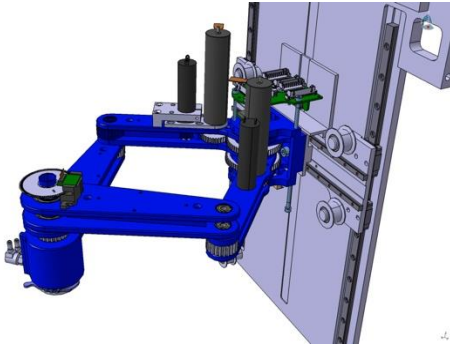
Ein weiteres Beispiel ist das programmierbare Mikro-autonome Robotersystem (PMARS), entwickelt von der Nagoya University [46]. Es ist weniger als 20 x 20 x 20 mm groß und kann mit dem Host-Computer und anderen Mikrorobotern kommunizieren.

[47] beschreibt einen präzisen Stellungsregler für einen Mikrospiegel in hochdichtem optischem Disk-Drives-Tracking, der durch vier thermische bimorphe Aktoren angetrieben wird.

Ein Beispiel eines mobilen Mikroroboters mit Drehachse ist der Kleindiek Nanotechnik Mikromanipulator für Elektronenmikroskopie (MM3A) [48]: der Roboter ist äußerst kompakt und präzise und kann in REMs, FIBs und anderen Mikroskopen verwendet werden. Seine Abmessungen sind etwa 60 x 20 x 25 mm. Die Nutzlast beträgt wenige Gramm und Greifwerkzeuge unterschiedlicher Art können auf dem Endteil montiert werden.

Vor kurzem hat die Abteilung für Physische Intelligenz in Deutschland begonnen mit mobilen Millirobotern und mobilen Mikrorobotern zu arbeiten, die aus intelligenten und weichen Materialien hergestellt wurden [49]. Insbesondere eines der Forschungsthemen ist verknüpft mit der magnetischen mobilen Robotik und Fortbewegung im Mikromaßstab, basierend auf rotierender Stick-Slip- und Rolldynamik. Auch UTARI (University of Texas

at Arlington Research Institute) arbeitet derzeit an Mikrorobotern, die durch ein fokussiertes permanentes Magnetfeld betätigt werden [50], wenn Moleküle sich annähern.



(a) H-SCARA von TUT (reproduziert aus [37] mit freundlicher Genehmigung)



(b) H-811 6-Achsen-Miniatur-Hexapod von Physik Instrumente (PI) [41]

Abbildung 9.4: Beispiele für Mikroroboter.

## 9.6 Mikromanipulationssysteme

Das Design und die Entwicklung geeigneter Werkzeuge sind von wesentlicher Bedeutung für eine korrekte Handhabung und Montage der Komponenten mit mikrometrischen Abmessungen oder mit mikrometrischen Funktionen. Entsprechend dem in Abschnitt 9.3 diskutierten Unterschied zwischen allgemeiner Handhabung und Montage können diese Werkzeuge mehr oder weniger spezialisiert sein und können optimale Eigenschaften für eine spezifische Komponente und die gewünschte Anwendung aufweisen. Im Zusammenhang mit der Mikromontage manipulieren diese Werkzeuge die Objekte so, dass sie "in einer gewünschten Weise zum Zielort gelangen" [26]. Sie können auf manuellen, ferngesteuerten oder automatischen Systemen montiert werden. Wenn die zusammenzubauenden Komponenten unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, wie Form, Material, Oberflächenrauigkeit usw., kann ein Mikrowerkzeug allein möglicherweise nicht ausreichen. Denken wir in diesem Fall beispielsweise an die Notwendigkeit von zwei verschiedenen kontaktbasierten Werkzeugen (siehe Abschnitt 9.6.2.1); dann wäre eine gemeinsame Schnittstelle und ein einfaches System für den Werkzeugwechsel wünschenswert.

In den folgenden Abschnitten werden wir zuerst einige Probleme im Zusammenhang mit der Mikromanipulation vorstellen. Danach werden wir eine Klassifizierung der möglichen Methoden beschreiben und über Lösungen für die Abgabe berichten, wenn diese durch Oberflächenkräfte behindert wird.



## 9.6.1 Probleme bei der Mikromanipulation

Viele Fragen müssen bei der Entwicklung der Mikrogreifsysteme berücksichtigt werden. Bei der Mikromanipulation gehen die Komponenten aufgrund von Aufladungseffekten in ihren energetisch vorteilhaftesten Zustand über; dadurch wird die präzise Steuerung der Greif- oder Abgabephasen beeinflusst [51]. Wenn das Mikrowerkzeug mit den Mikroteilen in Kontakt kommt, haften die Mikroteile aufgrund der Oberflächenkräfte am Mikrowerkzeug. Da das Gewicht der Teile wesentlich kleiner ist als die Resultate dieser Kräfte, ist keine Abgabe möglich, wenn diese nicht korrekt unterstützt wird. Insbesondere elektrostatische, kapillare und Van der Waals-Kräfte haben erhebliche Auswirkungen auf der Mikroebene (siehe Kapitel 1).

Man darf nicht vergessen, dass nicht alle Mikrogreifer für ein Mikroteil geeignet sind; genauso wenig können alle Teile mit einem einzigen Typ von Mikrogreifer manipuliert werden.

Daher müssen bei der Wahl einer Strategie und der Gestaltung eines Mikrowerkzeuges viele Aspekte berücksichtigt werden, um Inkompatibilitäten zu vermeiden und die beste Kombination aus Teil, Werkzeug und Abgabemethode zu finden (falls erforderlich) [2].

Dazu gehört die Bewertung von Bauteileigenschaften, wie beispielsweise:

- Material (z.B. weich/hart, hydrophob/hydrophil);
- Oberflächeneigenschaften;
- Empfindlichkeit gegenüber elektrischen Feldern, magnetischen Feldern oder thermischen Gradienten;
- Zerbrechlichkeit;
- Geometrie und verfügbare Kontaktflächen.

Zum Beispiel ist eine aus einem porösen Material hergestellte Komponente mit einer Vakuumpipette schwierig zu handhaben, oder sehr fragile Komponenten mit Pinzetten, die eine erhebliche Kraft aufbringen.

## 9.6.2 Mikromanipulationsstrategien

Die Konzeption, Entwicklung und Prüfung effektiver, effizienter und zuverlässiger Mikrowerkzeuge hat sich seit einigen Jahrzehnten bei vielen Forschern zu einem Thema von Interesse entwickelt. Die Notwendigkeit der Manipulation von Mikroteilen unterschiedlicher Art für verschiedene Anwendungen hat zu einem raschen Anwachsen der Literatur über eine Reihe von Manipulationsstrategien, Werkzeugen und deren Betätigungs- und Erfassungsverfahren geführt, mit dem Ziel, hohe Leistung, einfachere Herstellung, geringe Kosten und hohe Produktivität zu erreichen.

Für die Mikromanipulation gibt es zwei Ansätze:

- Verfahren, die Oberflächenkräfte nutzen oder
- Verfahren, die versuchen, die Auswirkungen dieser Kräfte zu minimieren.

In beiden Fällen kann die Handhabung wahlweise mit oder ohne Kontakt zwischen Werkzeug und Mikroteil erfolgen; daher kann man unterscheiden zwischen [52]:

- Kontaktmethoden;
- berührungslosen Methoden;

Entsprechend dieser Einteilung werden wir in den folgenden Abschnitten einen Überblick über einige mögliche Lösungen anbieten, die in der Literatur zu finden sind.

### 9.6.2.1 Kontakt-Manipulation

In diesem Fall ist der Mikrogreifer während der Manipulation in Kontakt mit dem Mikroteil (siehe Abbildung 9.5). Im Allgemeinen können Kontaktmikrogreifer Mikroteile mit einer Vielzahl von Formen und Materialien manipulieren; sie können Kräfte ausüben, die beispielsweise bei Mikromontagevorgängen nützlich sind.

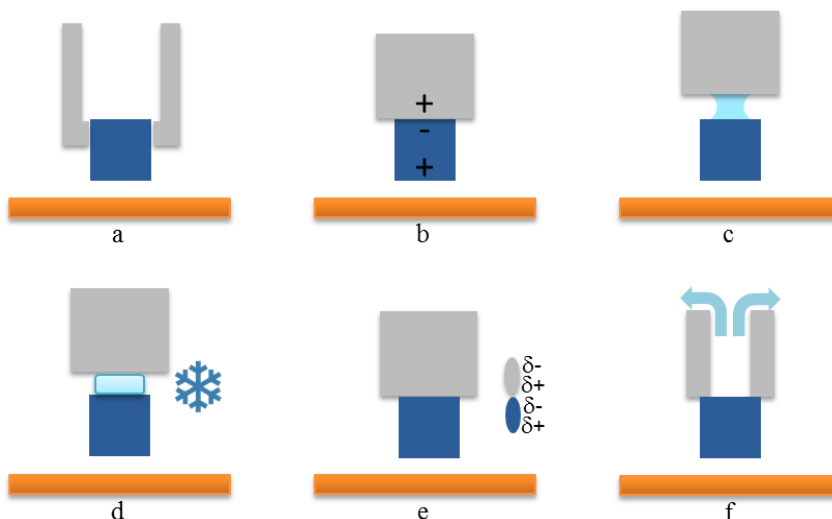


Abbildung 9.5: Strategien für die Kontakt-Manipulation: (a) Reibungsgreifer; (b) elektrostatisch; (c) kapillar; (d) Phasenwechsel; (e) Klebstoff; (f) Vakuum.

## Reibungsgreifer

Viele Arten von Reibungsmikrogreifern, bestehend aus zwei öffnenden und schließenden Fingern (Mikropinzetten) wurden hergestellt, um Mikroteile zu manipulieren, ähnlich der Vorgehensweise auf der Makroebene. Sie sind weit verbreitet in der Mikrohandhabung, Mikromontage und Biomanipulation, sowohl für Mikro- und Nano-Anwendungen.

Mehrere Arten von Aktoren können für Mikrogreifer verwendet werden; sie können in zwei Hauptklassen eingeteilt werden: miniaturisierte konventionelle Aktoren und eigens dafür vorgesehene Mikroaktoren. Zur ersten Klasse gehören pneumatische oder hydraulische Aktoren und Elektromotoren, obwohl deren Implementierung aufgrund der geringen Präzision und Schwierigkeiten beim Downscaling kritisch sein kann [53].

Aus diesen Gründen ist es oft effizienter, verschiedene Aktoren-Typen zu verwenden, die physikalische Effekte ausnutzen, die auf der Makroebene nicht relevant sind. Dazu gehören:

- piezoelektrische Betätigung: z.B. wird in [54] ein modularer Greifer auf Basis piezoelektrischer Betätigung vorgestellt. Er ist mit auswechselbaren Spitzen ausgestattet, die unterschiedliche Formen aufweisen und aus unterschiedlichen Materialien hergestellt sind.
- elektrostatische Betätigung: ein kommerzielles Beispiel ist der FT-G Mikrogreifer von Femtotools; er besteht aus zwei Teilen: einem elektrostatischen lateralen Kammantrieb-Aktor, der eine Verschiebung eines betätigten Arms bewirkt, und einem kapazitiven Kraftsensor, montiert auf dem Sensorarm mit einer Auflösung von 50 nN [55];
- thermische Betätigung: z.B. wird in [56] ein thermischer Gradient verwendet, der von einem Widerstand erzeugt wird, um die Finger zu biegen und dadurch deren Öffnen und Schließen zu verursachen. Ein kommerzielles Beispiel ist der Bent Beam Greifer von der Firma Zyvex [57], auf Basis eines thermischen Gradienten Mikroaktors.
- Formgedächtnislegierungen (in Englisch: Shape Memory Alloys (SMA)): auf Basis des Zweiwege-Formgedächtniseffekts. Ein Beispiel wird in [58] vorgestellt; der Greifer besteht aus zwei kleinen Fingern, einem aktiven Teil, der beim Erwärmen seine Form ändert und einer parallelen elastischen Struktur, die als Vorspannfeder verwendet wird.

Es ist zu beachten, dass SMA und thermische Greifer in der Regel eine lange Reaktionszeit haben.

In den obigen Beispielen ist die Verwendung aktiver Materialien für die Mikroaktoren (siehe Kapitel 1) bemerkenswert. Wenn der physikalische Effekt umkehrbar ist (d.h. die mechanische Arbeit erzeugt beispielsweise ein elektrisches oder magnetisches

Feld/Signal), dann kann das Material auch zur Messung verwendet werden. In diesem Fall wird der Begriff Selbstmessung verwendet. Diese Eigenschaft kann im Falle von Mikropinzetten ausgenutzt werden; wenn eine Closed-Loop-Positionsregelung implementiert ist, kann damit eine ausgezeichnete Auflösung erzielt werden.

Fast alle mechanischen Greifer sind sehr zerbrechlich und sollten mit Vorsicht verwendet, aufbewahrt und transportiert werden. Diese Greifer sind für sehr fragile Teile nicht geeignet und haben unerwünschte Klebeeffekte gezeigt, die eine Abgabe oder die genaue Platzierung des Teils verhindern.

### **Elektrostatische Greifer**

Elektrische Felder können ebenfalls zur Handhabung von Teilen verwendet werden, um die elektrostatische Kraft zu steuern. In [59] wird die Entwicklung eines elektrostatischen Zentrier-Mikrogreifers beschrieben.

### **Kapillargreifer**

Die Kapillarkraft kann ebenfalls in geeigneter Weise genutzt werden. Mit Hilfe eines kleinen Tropfens an der Oberfläche des Greifers kann man eine Flüssigkeitsbrücke und einen Flüssigkeitsmeniskus schaffen, um diese Kraft zwischen Greifer und Teil zu erhöhen. Das kapillare Greifen wurde von vielen Forschern untersucht [60, 61], mit interessanten Ergebnissen.

### **Phasenwechsel**

Die Verwendung der sogenannten Phasenänderungsverfahren ist durchaus üblich. In diesem Fall wird der Flüssigkeitsmeniskus zwischen Greifer und Mikroteil verfestigt, so dass ein Aufgreifen des Teils möglich wird. Die Flüssigkeit ist in der Regel Wasser, das gefroren wird, um das Teil greifen zu können [62], [63].

### **Adhäsionsgreifer**

Unter den Manipulationswerkzeugen auf Basis eines mechanischen Kontakts mit der Komponente stellt die Handhabung durch Adhäsionskontakt eine einfache Lösung dar. Eine Mikromontageplanung unter Verwendung eines Van-der-Waals-Greifers wird in [64] beschrieben.

### **Vakuumgreifer**

Eine Strategie, die aus der Makrowelt übernommen und sozusagen verkleinert wurde, ist die Verwendung der Kraft, die durch den Druckunterschied zwischen Greifer und Atmosphäre erzeugt wird. Tatsächlich werden Vakuumgreifer üblicherweise bei der Montage

zerbrechlicher Makrokomponenten verwendet [65]. Sie lassen sich einfach und kostengünstig miniaturisieren, da sie hauptsächlich aus einer Mikrodüse bestehen, die mit einem Vakuumejektor verbunden ist. Allerdings können sie leicht verstopfen und sowohl der Greifer und das Teil müssen glatte Oberflächen aufweisen, um Luftaustritt zu verhindern.

Eine Übersicht über die am häufigsten verwendeten kontaktbasierten Techniken finden Sie in [51]; dort werden auch ihre Vorteile und Grenzen hervorgehoben, wobei der Fokus auf den Kapillar-Mikrogreifern liegt.

### 9.6.2.2 Berührungslose Handhabung

Wie bereits erwähnt leiden Kontakt-Handling-Lösungen in der Regel unter Adhäsionseffekten, d.h. das Mikroteil klebt am Greifer und die Abgabe des Teils oder seine genaue Positionierung werden verhindert. Die Kontaktkraft zwischen Greifer und Teil kann sogar das Teil selbst beschädigen, verkratzen oder verformen. Um diese Beschränkungen zu überwinden, wurde der Einsatz anderer Arten von Greifern auf der Grundlage berührungsfreier Lösungen erforscht (Abbildung 9.6). Die erzeugten Kräfte sind relativ schwach, aber ihre Verwendung ist beschränkt auf Teile mit speziellen Eigenschaften in Bezug auf Form und Material.

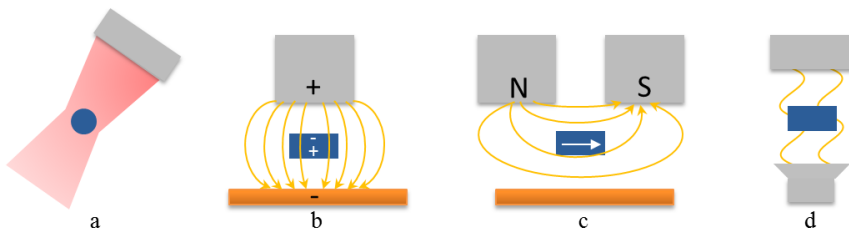


Abbildung 9.6: Berührungslose Manipulationsstrategien: (a) optischer Druck, (b) elektrostatisch, (c) magnetisch, d) Schalldruck.

#### Optischer Druck

Eine mögliche berührungslose Strategie beruht auf der Verwendung optischer Pinzetten. Sie nutzen den optischen Druck, der auftritt, wenn Licht reflektiert, absorbiert oder durch die Komponente gebrochen wird. Wenn ein transparentes Teil einen höheren Brechungsindex als der Brechungsindex des Mediums aufweist, in dem die Manipulation durchgeführt wird, so wird das Teil von der Region mit der höchsten Lichtintensität angezogen [52]. Ein Laserstrahl, der auf das Teil ausgerichtet ist, kann somit als optische Falle verwendet werden, so dass das Teil bewegt werden kann [66]. Dieses Verfahren kann eingesetzt werden, um Teile mit einer Größe von Hunderten von Nanometern bis zu Zehntel

oder Hunderten von Mikrometern zu manipulieren. In der Regel wird es für die Manipulation biologischer Proben, wie Zellen, DNA-Strängen verwendet. Mehrere Teile können gleichzeitig bewegt werden, in dem man mehrere optische Fallen bewegt [67].

### **Elektrostatische Kräfte**

Elektrostatische Kräfte können mit Hilfe eines elektrischen Feldes ebenfalls zur Manipulation von Mikrokomponenten verwendet werden, ohne die Komponenten berühren zu müssen. Ein dielektrisches Mikroteil kann manipuliert werden durch Ausnutzung der Dielektrophorese-Kraft und des angewendeten Drehmoments.

Dielektrophorese wird weitgehend in der Mikromanipulation von Zellen eingesetzt, um Zellen zu sortieren oder einzelne Zellen einzufangen. In [68] werden dielektrophoretische Montageprinzipien der MEMS/NEMS-Vorrichtungen vorgestellt und mit Mikropinzetten und Nanoelektroden für die Montage von Kohlenstoff-Nanoröhrchen experimentell überprüft. Zuführungen für Mikroteile auf Basis von elektrostatischen Feldern wurden ebenfalls entwickelt [69].

### **Magnetkraft**

Die Manipulation ferromagnetischer Mikroteile ist durch Steuerung der Magnetfelder möglich. Ein magnetisches Pinzettensystem wird in [70] vorgestellt. In [71] werden magnetisch angetriebene Mikrowerkzeuge auf einem Chip vorgestellt, mit denen eine berührungslose Zellmanipulation in einem geschlossenen Raum möglich ist.

### **Schalldruck**

Akustische Levitation erlaubt ebenfalls das Handling von Mikrobauteilen. [72] beschreibt eine „Handlingtechnik auf Grundlage der Ultraschall-Luft-Film-Technologie und ihre Anwendungen für das berührungslose Handling in der PV-Dünnschicht- und Mikromontage“. In [73] werden die verschiedenen Vorteile dieses berührungslosen Handlingverfahrens besprochen und die am häufigsten verwendeten Modelle der akustischen Levitation werden untersucht.

## **9.6.3 Freigabestrategien**

In der Mikromontage ist die Abgabephase aufgrund der Tatsache, dass die Klebeeffekte oft stärker sind als die Schwerkraft, oft die kritischste Phase. Aus diesem Grund wurden viele Lösungen vorgeschlagen, um die Leistung während der Abgabephase zu verbessern.

Diese Freigabetechniken können in passive und aktive Freigabe unterteilt werden. Laut [74] sind "passive Freigabetechniken von den Adhäsionskräften zwischen Mikroteil und Substrat abhängig, um das Mikroteil vom Endeffektor zu lösen"; andererseits beabsichti-

gen "aktive Freigabeverfahren das Mikroteil vom Endeffektor zu lösen, ohne das Substrat zu berühren". Eine allgemeinere Definition wird in [75] vorgestellt und hier besprochen: bei passiven Freigabestrategien "ermöglichen geeignete Greiferfunktionen oder Umgebungsbedingungen die Reduzierung der Adhäsionskräfte zwischen Greifer und Mikroteilen". Andererseits spricht man von aktiven Freigabestrategien, wenn "Teile durch zusätzliche Maßnahmen gelöst werden können".

### 9.6.3.1 Aktive Techniken

In diesem Fall können zusätzliche Kräfte eingesetzt werden, um das Mikrobauteil vom Greifer zu lösen, oder die Fläche, in der der Greifer wirkt, kann reduziert werden [20].

Eine aktive Freigabetechnik nutzt mechanische Schwingungen sowie Trägheitseffekte des Endeffektors und des Mikroteils, um die Adhäsionskräfte zu überwinden [76].

Darüber hinaus kann ein kurzer Druckimpuls angewendet werden, um die Abgabe des Mikrobauteils zu unterstützen, auch wenn dies die Genauigkeit der Positionierung beeinflusst [65]. Die Autoren haben auch alternative Freigabestrategien vorgeschlagen: „anhafende Teile können an einer scharfen Kante abgestreift" werden, oder ein Hilfsmittel kann verwendet werden, um "das Teil vom Hauptwerkzeug wegzuschieben".

Eine weitere Freigabestrategie ist das Verschwinden des Greifmediums, wie zum Beispiel im Fall von Greifern aus Eis [63], wobei das Eis durch Erhitzen geschmolzen wird.

In [77] wurde ein elektrisches Feld erzeugt, um das Teil von der Sonde zu trennen, indem eine Spannung zwischen Sonde und Substrat angelegt wurde.

Die Abgabe kann durch Rollen erreicht werden, d.h. die Positionierung eines Mikroteils, indem man es in seine erforderliche Position rollt. In [78] werden eine theoretische Analyse des Rollens von Mikroteilen sowie Experimente zur Abgabe durch Rollen vorgestellt.

Eine gängige Methode ist auch das Kleben des Teils auf das Substrat an der korrekten Stelle [79].

Die Konstruktion einer geeigneten mechanischen Einrastung, beispielsweise Schnappverschlüsse, kann die Abgabe ebenfalls unterstützen; dabei handelt es sich um "verformbare Vorrichtungen, die aus einem Paar zusammenpassender Oberflächen bestehen, die bei der Montage ineinander einrasten" [17].

### 9.6.3.2 Passive Techniken

In diesem Fall kann die Abgabe durch bestimmte Eigenschaften des Mikrogreifers oder Umweltbedingungen begünstigt werden [20]. Beispielsweise kann die Haftung durch die elektrostatische Kraft verringert werden, indem die zum Ansaugen verwendete Glaspipette

mit einer leitfähigen Schicht aus Gold überzogen wird, die mit Masse verbunden ist [80]. Der Greifer kann mit einer hydrophoben Beschichtung überzogen werden, um die Feuchtigkeitsadsorption zu verhindern, oder er kann auch aus dem gleichen Material wie das Mikroteil hergestellt werden, um die Kontaktwechselwirkungskräfte zu reduzieren [20].

Eine schematische Darstellung der Grundprinzipien der genannten Freigabestrategien sehen Sie in Abbildung 9.7.

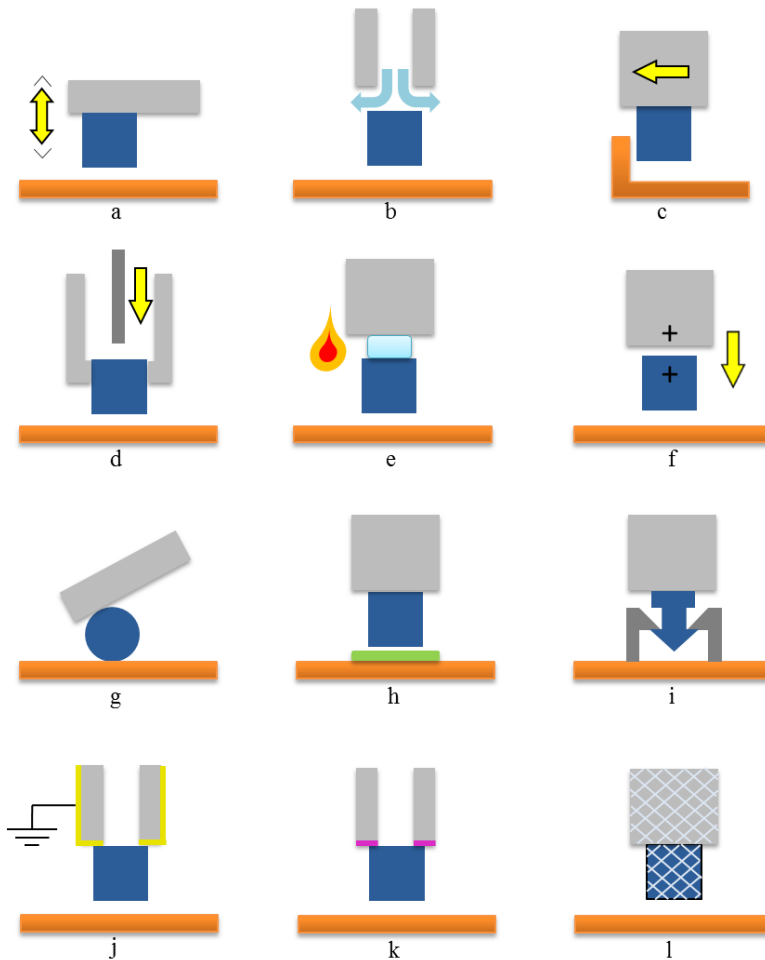


Abbildung 9.7: Freigabestrategien: (a) Schwingung; (b) Druckimpuls; (c) Kante; (d) zusätzliches Werkzeug; (e) Verschwinden des Mediums; (f) elektrische Abstoßung; (g) Rollen; (h) Kleben; (i) mechanisches Einrasten; (j) Beschichtung; (k) hydrophobe Beschichtung; (l) gleiches Material.



Eine Bewertung der Freigabestrategien für das Handling von Mikroteilen finden Sie in [75]; dort wird auch ein Schema zur Klassifizierung verschiedener Freigabestrategien für die Mikromontage vorgeschlagen. Die Autoren konzentrierten sich insbesondere auf mögliche Strategien für die Freigabe kapillarer Mikrogreifer und lieferten nützliche Informationen für die Auswahl geeigneter Greif- und Abgabe-Paare in Abhängigkeit von der Mikrokomponente. Eine allgemeinere Studie wurde vor kurzem veröffentlicht [20].

[2] untersuchte das Problem bei der Wahl des am besten geeigneten Verfahrens entsprechend der Funktionen der Mikroteile. Ein Entscheidungsunterstützungssystem (in Englisch: Decision Support System, DSS) wurde entwickelt und getestet, um die Designer zu unterstützen und ihnen die besten Techniken für die Durchführung der Montage mikromechanischer Komponenten vorzuschlagen.

## **9.7 Sensoren und Steuerungsverfahren für die Mikromontage**

### **9.7.1 Sichtsystem**

Die Integration eines Sichtsystems in Roboterarbeitszellen ist wegen der verschiedenen Themen, für die es Lösungen anbieten kann, besonders nützlich, z.B. Inspektion, Qualitätskontrolle, Überwachung oder sichtbasierte Robotersteuerung, zur Durchführung der sogenannten Maschinvision. In diesem letzten Fall werden die aus den Bildern extrahierten visuellen Informationen, Features genannt, zur Steuerung und Führung des Roboters verwendet; dies erhöht seine Flexibilität und Autonomie in einer nicht strukturierten oder schlecht strukturierten Umgebung. Dies gilt insbesondere in der Mikromanipulation, egal ob ferngesteuert oder vollständig automatisiert, bei der die physikalischen Abmessungen der Teile die Verwendung von Vergrößerungswerkzeugen erfordern.

Die Art der Mikromanipulation begrenzt den Bereich der verfügbaren Bildverarbeitungstechniken auf Videos mit Standardobjektiv, Videos mit konventioneller optischer Mikroskopie und REM-Video.

REMs werden aufgrund ihrer begrenzten Atmosphäre in der Vakuumkammer und ihrer hohen Kosten nur für spezielle Anwendungen verwendet. Im Gegensatz dazu findet man die Video-Bildgebung mit Standardobjektiv und die Video-Bildgebung mit konventioneller optischer Mikroskopie in einem weiten Anwendungsbereich in der Mikromanipulation und Mikromontage. Diese Techniken bieten einen Kompromiss zwischen Auflösung und einfacher Bedienung; sie können in einer feuchten Umgebung, in Flüssigkeiten oder auch im Vakuum betrieben werden [30]. Dieser Abschnitt befasst sich nur mit diesen Arten von

Sichtquellen; der allgemeine Begriff "Sichtsystem" wird nur im Kontext der Kamera-Objektiv-Technologie verwendet.

Ein Sichtsystem ist ein Sensor, der aus einer Linse oder eine Reihe von Linsen besteht, die mit einer Kamera verbunden sind, die eine Quelle numerischer Bilder bereitstellt. Um den Kontrast der Bilder zu verbessern, müssen geeignete Beleuchtungssysteme verwendet werden. Die Kamera gibt zweidimensionale Bilder aus; daher können nur zweidimensionale Informationen extrahiert werden. Um Informationen über die dritte Dimension, Tiefe oder Aussparung, zu erhalten, ist es erforderlich, eine Art von Stereovisionsstrategie mit einer oder mehreren Bildquellen zu verwenden.

Mehrere Parameter können zur Charakterisierung des Verhaltens eines Sichtsystems verwendet werden: Auflösung, optische Blende, Vergrößerung, Brennweite, Kontrast, Tiefenschärfe, Sichtfeld, Arbeitsabstand (Abbildung 9.8). Die Auflösung des Sichtsystems muss mit der Größe der manipulierten Mikroobjekte kompatibel sein. Um ein hohes Maß an Auflösung und damit die maximale Detailtreue der Bilder zu erreichen, muss die Optik des Sichtsystems eine starke Vergrößerung bereitstellen. Diese Anforderung führt zu einem kleinen Sichtfeld des Systems, das den sichtbaren Mikromontagebereich begrenzt. Dies führt zu einem Kompromiss zwischen Auflösung und Sichtfeld. Außerdem erfordert die starke Vergrößerung einen kleinen Arbeitsabstand; dieser Abstand muss jedoch groß genug sein, damit die Komponenten zugänglich sind und mit Werkzeugen und Robotern manipulierbar sind. Darüber hinaus ist unter normalen Einsatzbedingungen eines Sichtsystems bei Mikromontageaufgaben (Luft, sichtbares Licht, große numerische Blende, starke Vergrößerung), die Tiefenschärfe recht klein. Ein weiterer Kompromiss zwischen Auflösung und Schärfentiefe muss eingegangen werden, da diese beiden Parameter gegenläufigen Trends folgen.

Um die Probleme zu überwinden, die sich aus dem begrenzten Sichtfeld ergeben können verschiedene Lösungen in Betracht gezogen werden. Die erste Lösung ist eine Lösung mit mehreren Quellen. Dies beinhaltet die Kombination von Sichtsystemen mit unterschiedlichen Auflösungen und Sichtfeldern. Es gibt mindestens zwei Quellen: eine hochauflösende Quelle mit einem kleinen Sichtfeld (lokalisierte Bilder innerhalb der Szene), und eine andere Quelle mit niedriger Auflösung mit einem breiten Sichtfeld (globale Bilder der Szene) [81]. Eine Alternative ist ein Single-Source-Lösung, bei der ein optisches System mit mehreren Zoomeinstellungen verwendet wird: niedrige Zooms ergeben Bilder mit niedriger Auflösung über weite Sichtfelder, während hohe Zooms hochauflösende Bilder über kleine Sichtfelder liefern [82]. Außerdem können anstatt das Sichtfeld direkt zu vergrößern neue Ansichten der Szene erstellt werden unter Verwendung mehrerer Ansichten derselben Szene, die aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen wurde, um mehr Informationen extrahieren zu können. Mit zwei frontalen Bildern einer Szene kann man beispielsweise eine Seitenansicht berechnen und ist damit in der Lage zusätzlich zu den

Messungen in der Brennebene die Tiefe dieser Szene zu messen. Viele 3D-Techniken stehen zur Verfügung, die für diese Aufgabe ideal sind, z.B. Interpolation, Triangulation, Epipolartransfer, Trifokaltransfer usw. [30], [83]. Die Anwendung dieser 3D-Techniken im mikroskopischen Maßstab ist aufgrund der geringen Tiefenschärfe der Sichtsysteme für die Mikromanipulation schwierig. Zur Verbesserung der Tiefenschärfe der Sichtsysteme können automatisierte Fokussierungstechniken (Autofokus) verwendet werden [84].

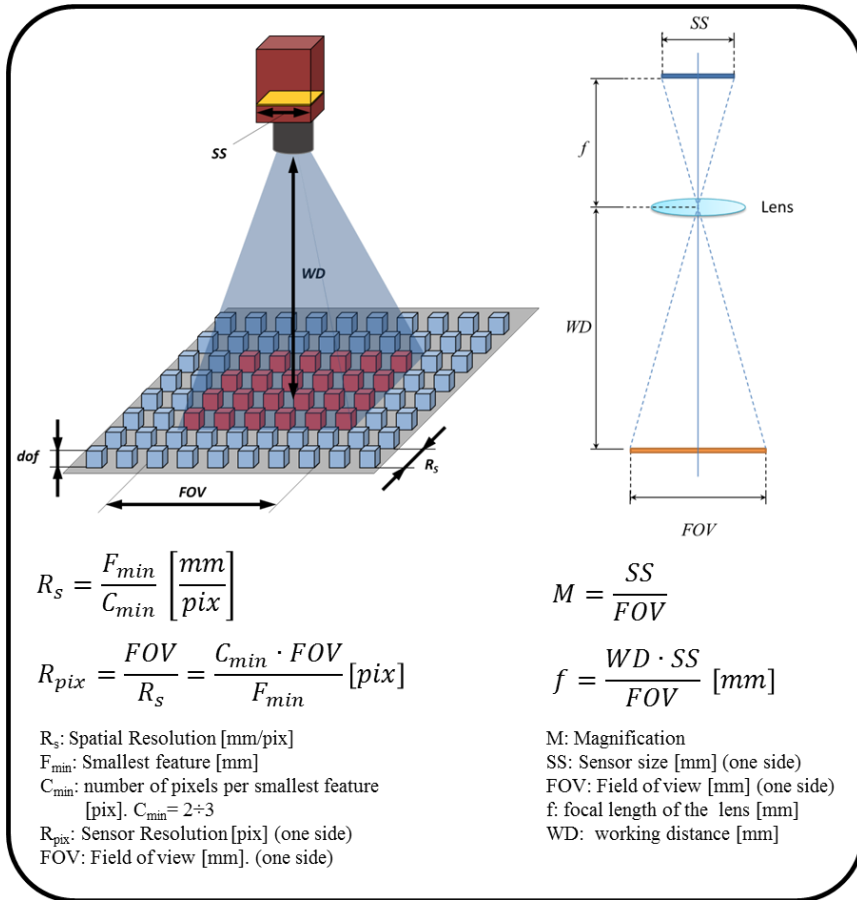


Abbildung 9.8: Parameter eines Sichtsystems.

Um Bildpixel in Einheiten der realen Welt umzuwandeln und Perspektive, Verzeichnung und räumliche Referenzierungsfehler zu kompensieren, muss eine Kalibrierung des Sichtsystems durchgeführt werden [85]. Typischerweise führt das Kameraobjektiv radiale Verzeichnung ein; das bedeutet, dass die Bildinformation relativ zur optischen Mitte der

Linse verlegt wird [86]. Da das Sichtsystem eine Quelle optischer Bilder ist, kann es durch ein traditionelles Lochkameramodell und ein Objektivverzeichnungsmodell modelliert werden. Üblicherweise wird die Kamerakalibrierung durchgeführt, indem ein Bild eines Objekts bekannter Form und Größe (Kalibrierungstestmuster) aufgenommen und die Position einiger Bildmerkmale, gemessen in Bildpixeln, mit der bekannten tatsächlichen Position, angegeben in Mikrometern oder anderen geeigneten Einheiten, verglichen wird. Dieses Kalibrierverfahren, das gemeinhin auf der Makroebene verwendet wird, ist auf der Mikroebene sehr schwierig durchzuführen. Daher umfasst eine weit verbreitete Methode im Mikrobereich den Aufbau eines virtuellen Kalibrierungstestmusters unter Verwendung der hohen Positionsauflösung der Verdrängungswerkzeuge (beispielsweise der Roboter). Ein Ziel wird über das Sichtfeld verfolgt. Die erhaltenen Punkte werden direkt in den Kalibrieralgorithmen verwendet.

Da in Mikromontagesystemen ein Sichtsystem absolut unverzichtbar ist, ist die Verwendung einer sichtbasierten Steuerung die offensichtliche Wahl. Der Schlüssel zur visuellen Kontrolle liegt in der Verwendung von Bildinformation in der Bewegungssteuerungsschleife der Geräte (z.B. Roboter). In der Literatur zum Thema Mikromanipulation kommt Pose-basiertes Visual Servoing nicht vor, andererseits jedoch Visual Servoing im Bild, auch Look-and-move-Techniken werden oft verwendet [30]. Diese werden manchmal mit alternativen Steuerungsverfahren kombiniert, basierend auf der Verwendung von beispielsweise Kraftsensoren [82], [87] oder optischen Positionssensoren [88]. Die Look-and-move-Technik ist eine Pseudoservoing-Technik in Open-Loop: anstatt den vollständigen Prozess der Extraktion von Informationen aus dem Bild durchzuführen, die Befehle zu berechnen und sie für jeden Abtastschritt auszuführen, wird jede dieser Aktionen in einem anderen Zeitschritt durchgeführt (z.B. wenn ein Teil aufgenommen oder abgegeben werden muss). Dies ist ein empirischer Ansatz, der keiner Modellierung bedarf [82], [89]. Der Hauptvorteil liegt in der Einfachheit der Implementierung. Stattdessen ist das Visual Servoing eine Closed-Loop-Regelungstechnik; während des Visual Servoing in einem Bild werden die Befehle im Bildraum in Form von Attributen der visuellen Indikatoren wie Punkte, Linien und Regionen ausgedrückt. Visual Servoing setzt voraus, dass eine kinematische Beziehung zwischen Szene und Bild hergestellt wird [90].

### **9.7.2 Kraftmessung**

Auf der Mikroebene müssen die Roboter die unerwünschten Effekte des Kräftemaßstabs überwinden, entweder technologisch oder durch ihre Steuerlogik; alternativ kann es möglich sein, diese Effekte zu ihrem Vorteil zu nutzen [91]. Die Messung und Kontrolle der Kräfte, die auf die manipulierten Mikrokomponenten einwirken, ist, auch um Schäden zu vermeiden, sehr wichtig.

Die Kraftmessung kann in zwei Hauptkategorien eingeteilt werden, je nachdem, ob eine direkte oder indirekte Messstrategie eingesetzt wird. Der Begriff "direkt" bezieht sich auf Messverfahren, bei denen die Sensoren so nah wie möglich am zu messende Objekt integriert sind; der Begriff "indirekt" bezeichnet berührungsfreie Messmethoden, Remote-Methoden und solche, die statische und dynamische Modelle verwenden.

In der Literatur wird eine Reihe indirekter Kraftmessverfahren beschrieben. Entsprechend der Klassifikation von [30] können sie auf der Grundlage ihrer Position in der Mikromanipulationsvorrichtung unterteilt werden:

- Berührungslose Fernmessung: Derzeit werden Sichtsysteme oder berührungslose Sensoren verwendet. Die Messgröße ist die Verformung oder Biegung des Werkzeuges. Detaillierte Kenntnisse über die Steifigkeit des Werkzeuges sind erforderlich, um die Kraft zu bestimmen, die auf das Werkzeug einwirkt.
- Der Manipulationstisch (Fläche) ist instrumentiert: Sensoren sind auf dem Tisch installiert, um die Wechselwirkungen zwischen den zu manipulierenden Teilen und dem Mikrogreifer zu messen. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass sich Messmittel nicht direkt an der Arbeitsstelle befinden müssen, aber eine Messung Greifkraft ist nicht möglich. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens ist es, unerwünschte Kollisionen zwischen Werkzeug und Tisch zu vermeiden, oder alternativ, Einsteckkräfte zu messen.
- Die Grundplatte oder der Endeffektor-Flansch des Mikromanipulators ist instrumentiert: Dieses Verfahren ist in der herkömmlichen Robotertechnik üblich. Es erfordert eine hohe Steifigkeit, um Informationen über die Kräfte zu übertragen, die entlang der Messpunkte in der Grundplatte oder im Endeffektor-Flansch des Mikromanipulators auf den Greifer einwirken. Leider sind die Mikromontagesysteme (Roboter, Greifer, manipulierte Teile, etc.) nicht sehr steif, so dass die Durchführung dieses Messverfahrens schwierig ist.
- Der Mikrogreifer ist instrumentiert. Solche Mikrogreifer verwenden häufig aktive Materialien (SMAs, piezoelektrische Materialien); es ist möglich, ihr Verhaltensmodell oder ihre physikalischen Eigenschaften, wie Schwankung des spezifischen Widerstandes oder Ladungsmessung, zur Bestimmung der einwirkenden Kräfte zu nutzen.

Anders als die indirekten Verfahren verwenden die direkten Messmethoden Sensoren, die direkt in das Gerät integriert sind. Diese Konfiguration ist eine der effizientesten Metho-

den, die es gibt, da es die Sensoren näher an die zu messenden Kräfte bringt. Anhaltende Fortschritte in den Mikrofertigungstechniken machen es möglich, Sensoren sogar in den Mikrogreifer zu integrieren. Diese Vorrichtungen, die es in vielen unterschiedlichen Ausführungen gibt, können in Bezug auf die in der Messung verwendeten physikalischen Prozesse kategorisiert werden. Die häufigsten sind resistive Dehnungsmessstreifen und kapazitive Sensoren. Weitere Techniken sind z.B. Sensoren, die Ladungsänderungen über den piezoelektrischen Effekt messen, oder alternativ, Frequenzschwankungen mit Hilfe eines mechanischen Oszillators bestimmen. In [56] wird ein thermischer Mikrogreifer vorgestellt, der einen resistiven Dehnungsmessstreifen zur Messung und Steuerung der Greifkraft verwendet. Die Dehnungen, die durch die Beugung der Tragarme erzeugt werden, führen zu einer Veränderung in den Widerständen der Dehnungsmessstreifen, die proportional zur Kraft ist. Für dieses Beispiel ist der messbare Bereich 10  $\mu\text{N}$ .

### 9.7.3 Umweltbedingungen bei der Mikromontage

Änderungen der Umgebungstemperatur, der Feuchtigkeit, der Anzahl der suspendierten Teilchen und mechanischen Schwingungen sind Umwelteinflüsse, die negative Auswirkungen auf die Gesamtleistung des Mikromontagesystems haben können. Insbesondere können diese Effekte die Genauigkeit der relativen Positionierung von zwei Komponenten betreffen, sowie die Geschicklichkeit, mit der ein Mikromanipulationsvorgang durchgeführt werden kann. Tatsächlich hängen viele oberflächliche Kräfte, wie kapillare, elektrostatische und Van-der-Waals, von der Temperatur und Feuchtigkeit ab (siehe Kapitel 1); diese Kräfte können die Manipulation von Mikroteilen und damit den Prozess erheblich beeinflussen. Außerdem führen Temperaturschwankungen beispielsweise zur Ausdehnung verschiedener Systemelemente und Veränderungen in den charakteristischen Koeffizienten einiger Aktoren und Detektoren.

Die Luft um eine Mikromanipulationsstation enthält viele Schwebstoffe und Mikroorganismen in einer Größe, die oft vergleichbar ist mit den Abmessungen der Komponenten, die zusammengebaut werden sollen: Staubpartikel können eine Größe von weniger als einem Mikrometer bis zu einigen hundert Mikrometern aufweisen. Das Vorhandensein dieser Partikel kann das Verfahren behindern oder verhindern. Daher ist es ratsam, das Verfahren in gefilterter Luft in einem Reinraum auszuführen, der mindestens der Reinraumklasse ISO 5 nach dem Standard ISO14644-1 entspricht. Aufgrund der reduzierten Größe der Teile und Geräte in der Mikromontage ist jedoch der tatsächliche Raum, der rein sein muss, viel kleiner als ein herkömmlicher Reinraum. Eine solche Lösung ist daher nicht effizient, auch angesichts der hohen Kosten der Reinnräume, und entspricht nicht dem Mikro-Fabrik-Paradigma. In diesem Zusammenhang wurde der Begriff "Einhausung" in Verbindung mit der Mikro-Fabrik eingeführt; er basiert auf der Idee der Konditionierung der Umgebung, nur wenn dies erforderlich ist, und lässt den Benutzer außen vor [92]. Dies hat offensichtliche Vorteile, z.B. muss weniger Luftvolumen aufbereitet werden, kleinere

Abmessungen, kein Staub wird durch den Benutzer eingeführt (keine Verunreinigung durch Menschen), und die Einstellung der optimalen Bedingungen für die Anwendung müssen nicht mehr mit menschlichen Bedürfnissen kompatibel sein. Darüber hinaus kann man durch die Integration eines Systems für eine reine und konditionierte Umgebung, wenn dies von der Anwendung gefordert wird, vermeiden, dass man Mikro-Arbeitszellen in großen und teuren Reinräumen installieren muss.

Um die Effizienz und Zuverlässigkeit des Verfahrens zu erhöhen ist es daher wichtig, während der Gestaltung der Arbeitszelle die Integration folgender Punkte zu berücksichtigen:

- Ein Schutzkasten, um Verschmutzung durch externe Partikel zu begrenzen;
- Geeignete Filter, um die suspendierten Partikel zu verringern;
- Ionisierende Systeme zur Reduzierung und Beseitigung elektrostatischer Aufladung;
- Konditionierungssysteme für Temperatur und Feuchte zur Kontrolle dieser Umweltparameter in einem geeigneten Bereich für die Mikromontage;
- Mechanische Isolationssysteme zur Beseitigung von Schwingungen, beispielsweise durch Montieren der Arbeitszelle auf einer Grundplatte oder auf einem schwingungsisolierten Tisch (passiv oder aktiv).

Nur wenige Systeme, die eine Kontrolle der lokalen Umgebung einer Mikromanipulationsstation ermöglichen, stehen zur Verfügung [93]. Ein Beispiel wird in [92] geschildert; dort werden miniaturisierte Reinraumproduktionseinheiten für Mikrosysteme vorgestellt. Die Größe dieser miniaturisierten Reinräume ist 1 dm<sup>3</sup> für jedes Modul und sie arbeiten in einem normalen externen Umfeld. Jedes Modul ist mit einem Luftfiltersystem ausgerüstet, das aus einem kompakten Laminarströmungsgenerator (ISO 5) besteht und Eintrittsöffnungen besitzt, die an die Teileablagen (z.B. Paletten) angepasst sind, die eine saubere Übertragung zwischen Mikrokästen und der externen Umgebung ermöglichen.

Ein weiteres Beispiel stammt von der Universität Aalto, Finnland: das Mikro- und Nanorobotik-Labor entwickelte ein Mikromontagesystem mit kontrollierter Umgebung [94], das aus einer Mikromontageplattform und einem Umweltkontrollsystem besteht. Es steuert die Temperatur im Bereich von -10/+ 40°C und die relative Luftfeuchtigkeit im Bereich von 5 bis 80% RH. Die Anordnung wird auch durch eine schwingungsisolierte Umgebung unterstützt.

## 9.8 Eine Fallstudie: die ITIA Mikromontage-Arbeitszelle

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die wichtigsten Aspekte und Geräte für die Mikromontage von Hybrid-Mikroprodukten vorgestellt. In diesem Abschnitt wird eine von den Autoren entwickelte Fallstudie beschrieben, mit dem Ziel, einen praktischen Einblick in die wichtigsten Themen und Herausforderungen im Zusammenhang mit Mikromanipulation und Mikromontage zu gewähren.

In den letzten Jahren hat die Micro-Enabled Devices and Systems (MEDIS) Gruppe am Institute of Industrial Technologies and Automation (ITIA) des CNR eine flexible und rekonfigurierbare Arbeitszelle für die automatische Manipulation und Serienmontage von Mikrokomponenten entworfen und entwickelt [95], einschließlich eines Roboters mit 4 Freiheitsgraden mit Schönflies-Motion (Mitsubishi Melfa RP-1AH), auswechselbaren Mikrogreifern, sowie einem Dreikamerasichtsystem, eingebaut in ein isolierendes Gehäuse (Abbildung 9.9).

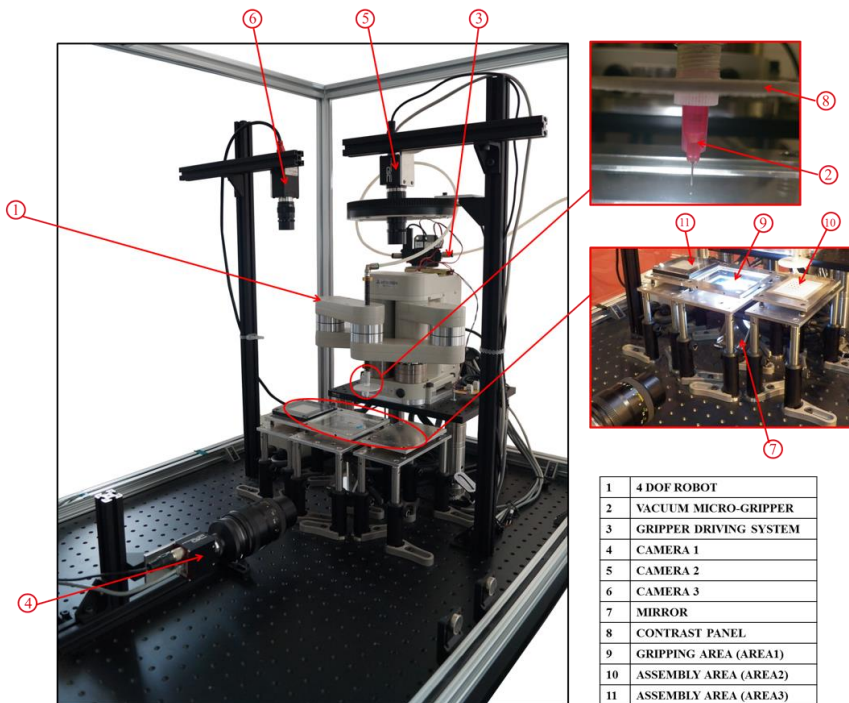


Abbildung 9.9: ITIA Mikromontage-Arbeitszelle.



Die Arbeitszelle wurde so konzipiert, dass sie die Möglichkeit bietet, verschiedene Layouts von Arbeitszellen für die Mikromanipulation zu reproduzieren, so dass ein Prüfstand geschaffen wird, der die Entwicklung geeigneter automatischer Mikromanipulationstechniken in unterschiedlichen Umgebungen und unter unterschiedlichen Bedingungen unterstützt. Jedes Modul in der Arbeitszelle wurde unter Berücksichtigung der Probleme mit Bezug auf den Mikromaßstab, dem unterschiedlichen physikalischen Szenario und den hohen Anforderungen an die Genauigkeit, entwickelt, um ein vollständiges, flexibles und hochleistungsfähiges System zu erhalten.

Der Aufbau der Arbeitszelle ist anpassungsfähig und rekonfigurierbar für viele Aufgaben und Anwendungen: zum Beispiel, mit einfachen Modifikationen an der Hardware können Funktionalitäten hinzugefügt oder herausgenommen werden.

In der Arbeitszelle ist der Roboter-Endeffektor mit zwei Arten von Mikrogreifern ausgestattet. Der erstere besteht aus Vakuummikrogreifern und der letztere aus miniaturisierten Zwei-Finger-Greifern. Insbesondere wurde ein innovatives Vakuummikrogreifwerkzeug konzipiert, gestaltet und ein Prototyp in der ITIA gebaut, um die Begrenzung kommerziell erhältlicher Vakuummikrogreifer bei der Abgabe der Mikrokomponenten zu überwinden. Eine Patentanmeldung wurde im März 2013 eingereicht und vor kurzem veröffentlicht [96]. Ähnlich wie ein Standard-Vakuummikrogreifer basiert diese Vorrichtung auf dem Druckunterschied zwischen Greifer und Atmosphäre; im Wesentlichen besteht sie aus einer Kanüle, die mit einem Vakuum erzeugungssystem verbunden ist, mit dem eine Komponente ergriffen werden kann. Ein innovatives mechanisches System zur präzisen, zuverlässigen und sicheren Unterstützung der Abgabephase von Mikrokomponenten wurde in das Gerät integriert. Ein Hauptmerkmal dieses Mikrogreifers besteht darin, das Aktorenprinzip für die Aufnahme der Komponenten zu nutzen, um das Abgabesystem zu bewegen, ohne zusätzliche Aktoren, da dies das System komplexer, schwerer, größer und teurer machen würde [97]. Abbildung 9.10 zeigt einen Längsschnitt des Greifers. Man sieht das Detail des Abgabesystems, das in die Greiferkanüle eingeführt ist.

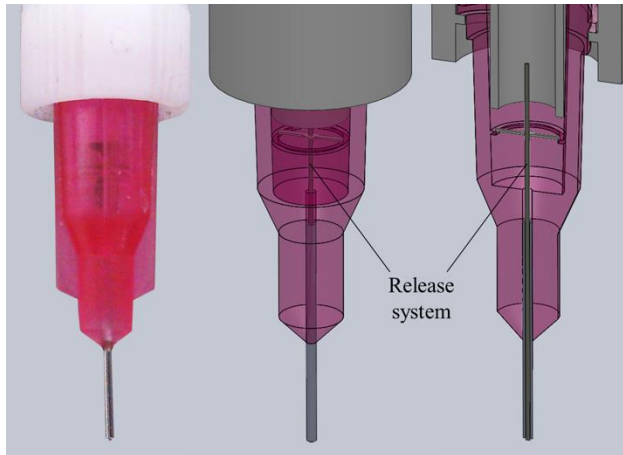


Abbildung 9.10: Mikrogreifer mit integriertem Abgabesystem: Schnittansicht auf der rechten Seite.

Wie oben erwähnt, ist die Integration geeigneter Sichtsysteme sehr vorteilhaft.

In dieser Arbeitszelle wird die Look-and-move-Strategie verwendet. Das entwickelte Maschinen-Sichtmodul der Arbeitszelle umfasst drei verschiedene Such- und Matching-Algorithmen: Pattern-Matching, geometrische Anpassung und Partikelanalyse zur Identifikation, Messung und Ausrichtung [98].

Die verschiedenen Geräte in der Arbeitszelle müssen in der Lage sein, automatisch zu interagieren, um Mikromanipulation und Mikromontageaufgaben auszuführen. Arbeitszellen für die Mikromanipulation müssen auf jeden Fall mit einem Steuer- und Überwachungssystem ausgestattet werden. Deshalb wurde ein modulares und rekonfigurierbares Steuersystem geschaffen, gemäß der Plug-and-produce-Philosophie, das in der Lage ist, sich mit verschiedenen Geräten zu verbinden und unterschiedliche Mikromanipulationsaufgaben zu steuern [99]. Darüber hinaus ist die Arbeitszelle vollständig rekonfigurierbar in Bezug auf die Zeitplanung der durchzuführenden Arbeiten. Die Idee war, eine Programmierumgebung zu entwickeln, die so weit wie möglich geräteunabhängig war, so dass die Mikromanipulationsaufgaben unabhängig von der verwendeten Hardware (Roboter, Greifer, Sichtsystem, etc.) programmiert werden können. Insbesondere ist es möglich, Geräte zu ersetzen, hinzuzufügen und herauszunehmen, ohne die Steuerungssoftware zu modifizieren, sowie die Operationen über das HMI (Human Machine Interface) zu planen.

Aufgrund der Grenzen der Standardkalibriermethoden wurden in diesen Arbeitszellen zwei nicht-konventionelle Kalibrierstrategien entwickelt.

Erstere stellt eine Anpassung der Standardmethode dar und wird deshalb Hybridstrategie genannt, während die letztere ein vollständiges nicht-konventionelles Verfahren ist, genannt virtuelle Raster-Strategie. Diese Kalibrierverfahren wurden in der MEDIS-Arbeitszelle getestet; sie können jedoch für jede robotisierte Mikromanipulation und Montage-Arbeitszelle mit Sichtsystemen verwendet werden. Die mit den unterschiedlichen Ansätzen erzielten Ergebnisse, die Leistungen und Einschränkungen werden in [100] diskutiert und analysiert.

Mehrere Aufgaben wurden mit der Arbeitszelle durchgeführt. Erstens wurde die Funktionalität der Arbeitszelle verwendet, um die Leistung der zur Verfügung stehenden Vakuummikrogreifer zu untersuchen. Insbesondere berücksichtigte die Untersuchung die Aufnahme- und Abgabephasen bei der Ausführung von Pick-and-place-Aufgaben von Mikrokugeln mit unterschiedlichen Durchmessern und SMD-Widerständen. Die Leistung der getesteten Mikrogreifer wurde kritisch analysiert und die Grenzen, vor allem in der Abgabephase, wurden hervorgehoben. Die Ergebnisse zeigten die bessere Leistung des patentierten Vakuummikrogreifers mit integriertem Abgabesystem im Vergleich zu der Leistung der anderen [97], [101], [102]. Schließlich wurde die ITIA-Arbeitszelle für die Durchführung tatsächlicher Pick-and-place-Aufgaben, wie die Palettierung von Mikrokomponenten, verwendet (siehe Abbildung 9.11).

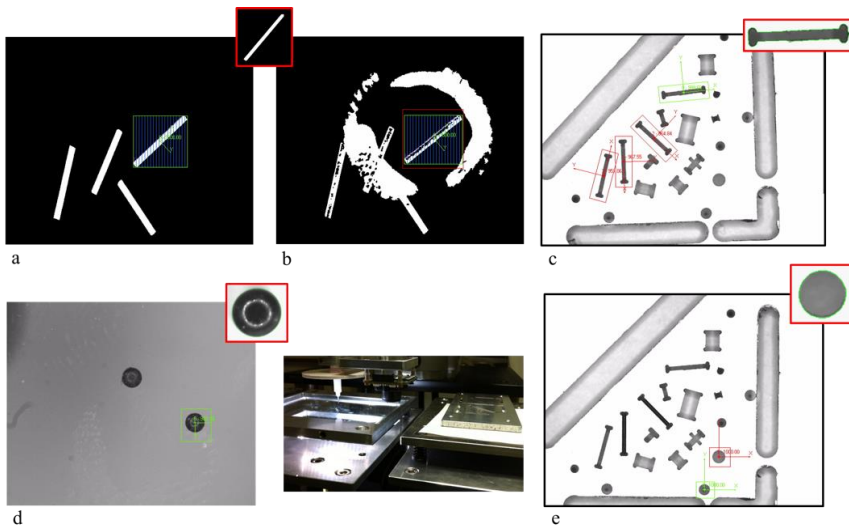


Abbildung 9.11: Beispiele für Pick-and-Place von Mikrokomponenten: (a) Aufnahmen des Fasersegments; (b) Prüfung des Fasersegments; (c) Abgabe des Fasersegments; (d) Aufnahmen der Kugel; (e) Abgabe der Kugel.

## 9.9 Referenzen

1. Ruggeri S (2013) *Advanced robotic applications: performance improvement techniques for industrial robots acting at the macro- and micro-scale*, Scholar's Press, Germany. ISBN 978-3-639-51557-2.
2. Antonelli, D, Fantoni G, Porta M, Santochi M (2010) A Methodology for the Selection of Micro-Assembly Techniques. *Am. J. Eng. Applied Sci.*, 3: 718-722.
3. Santochi M, Fantoni G, Fassi I (2005) Assembly of micro-products: state of the art and new solutions. In *Proceedings of the AMST'05, Udine, Italy, 8–9 June 2005*, pp.99–115.
4. J. Cecil, D. Powell and D. Vasquez. Assembly and manipulation of micro devices-A state of the art survey. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(5):580-588, 2007.
5. Fatikow S, Rembold U (2010) *Microrobotics*. In: *Microsystem Technology and Microrobotics*, Springer-Verlag, Berlin.
6. Böhringer KF, Fearing RS, Goldberg KY (1999) *Microassembly*. In: Shimon Y. Nof (ed) *Handbook of Industrial Robotics*, 2nd edition, Wiley & Sons Inc., New York.
7. Popa DO, Lee WH, Murthy R, Das AN, Stephanou HE (2007) High-yield automated MEMS assembly. In *Proc. of the 3rd Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, Scottsdale, AZ, USA, Sept 22-25.
8. Dechev N (2010) *Robotic microassembly of 3d MEMS structures*. In: M. Gauthier and S. Régnier (ed.) *Robotic Micro-Assembly*. John Wiley and Sons Ltd, Great Britain.
9. Van Brussel H, Peirs J, Reynaerts D, Delchambre A, Reinhart G, Roth N, Weck M, Zussman E (2000) *Assembly of Microsystems*, *CIRP Annals* 2000, 49(2):451–472.
10. Cohn MB, Boehringer KF, Noworolski JM, Singh A, Keller CG, et al. (1998) *Microassembly technologies for MEMS*. In *Proceedings of SPIE 3514, Micromachined Devices and Components IV*, 8 September 1998. doi:10.1117/12.323891
11. Gauthier M, Régnier S (2010) *Preface*. In: M. Gauthier and S. Régnier (ed) *Robotic Micro-Assembly*. John Wiley and Sons Ltd, Great Britain.
12. Mayyas MA (2007) *Methodologies for automated microassembly*. PhD Thesis, The University of Texas at Arlington, 2007.
13. Popa DO, Stephanou HE (2004) *Micro and Mesoscale Robotic Assembly*. *Journal of Manufacturing Processes*, 6(1):52-71.
14. Keller C, Howe RT (1997) *Hexsil Tweezers for Teleoperated Micro-assembly*. In *Proceedings of IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, Nagoya, Japan, January 1997. p 72–77.
15. Randall J, Hughes G, Geisberger A, Tsui K, Saini R, Ellis M, Skidmore G (2004) *Realizing Complex Microsystems: A Deterministic Parallel Assembly Approach*. In: *Proceedings of the 2004 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show 2004*, 3(11):499-502. ISBN 0-9728422-9-2.
16. Nelson B (2010) *Self-assembly*. Lecture slides, Summer school in microrobotics and self-assembly for hybrid MEMS, Besançon, France, 29 June - 2 July, 2010.

17. Prasad R, Böhringer KF, MacDonald NC (1995) Design, Fabrication, and Characterization of SCS Latching Snap Fasteners for Micro Assembly. In Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE), San Francisco, California, November 1995.
18. Hansen HN, Arentoft M, Tosello G, Gegeckaitė A (2010) Micro-Mechanical-Assembly. In: Yi Qin (ed) *Micro-Manufacturing Engineering and Technology*, William Andrew Publishing, Boston.
19. Lutz P, Régnier S (2010) Future Prospects. In: N. Chaillet and S. Régnier (ed) *Microrobotics for Micromanipulation*. Wiley-ISTE, Great Britain.
20. Fantoni G, Santochi M, Dini G, Tracht K, Scholz-Reiter B, Fleischer J, Lien TK, Seliger G, Reinhart G, Franke J, Hansen HN, Verl A (2014) Grasping Devices and Methods in Automated Production Processes. *CIRP Annals 2014 – Manufacturing Technology*, 63(2):679-701.
21. Gauthier M (2010) Microhandling strategies and microassembly in submerged medium. In: M. Gauthier and S. Régnier (ed) *Robotic Micro-Assembly*. John Wiley and Sons Ltd, Great Britain.
22. Sariola V (2010) Hybrid microassembly. Lecture slides, Summer school in microrobotics and self-assembly for hybrid MEMS, Besançon, France, 29 June - 2 July, 2010.
23. Fang J, Böhringer KF (2005) High yield batch packaging of micro devices with uniquely orienting self-assembly. In Proceedings of IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Miami, USA, 30 January - 3 February 2005.
24. Stauth SA, Parviz BA (2006) Self-assembled single-crystal silicon circuits on plastic. In Proceedings of National Academy of Sciences of United States of America, 103(38):13922-13927, USA, 2006.
25. Harsh KF, Bright VM, Lee YC (1999) Solder self-assembly for three-dimensional microelectromechanical systems, *Sensors and Actuators A*, vol. 77, pp. 237–244.
26. Zhou Q, Sariola V (2010) Unified view of robotic microhandling and self-assembly. In: M. Gauthier and S. Régnier (ed) *Robotic Micro-Assembly*. John Wiley and Sons Ltd, Great Britain.
27. Zhou Q, Chang B (2006) Microhandling Using Robotic Manipulation and Capillary Self-Alignment. In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2006, Oct. 2006, pp. 5883–5888.
28. López Tarazón R (2010) Chapter 19 - Robotics in Micro-Manufacturing and Micro-Robotics, In *Micro and Nano Technologies*, edited by Yi Qin, William Andrew Publishing, Boston, 2010, Pages 315-323, *Micro-Manufacturing Engineering and Technology*, ISBN 9780815515456.
29. Fukuda T, Arai F (1999) *Microrobotics*. In: Shimon Y. Nof (ed) *Handbook of Industrial Robotics*, 2nd edition, Wiley & Sons Inc., New York.
30. Agnus J, Boukallel M, Clévy C, Dembélé S, Régnier S (2010) Architecture of a Micromanipulation Station. In N. Chaillet and S. Régnier (ed) *Microrobotics for Micromanipulation*. Wiley-ISTE, Great Britain.
31. G1-171S SCARA robot by EPSON ROBOTICS, Available: <http://robots.epson.com/product-detail/1> [11-10-2016]

32. RP-1ADH robot by Mitsubishi Electric, Available: <https://www.mitsubishielectric.it/en/> [11-10-2016]
33. PocketDelta robot by ASYRIL SA, Available: <http://www.asyрил.com/en/products/delta-robots.html> [11-10-2016]
34. Sánchez AJ (2010) Chapter 18 - Handling for Micro-Manufacturing, In *Micro and Nano Technologies*, edited by Yi Qin, William Andrew Publishing, Boston, 2010, Pages 298-314, *Micro-Manufacturing Engineering and Technology*, ISBN 9780815515456.
35. Prusi T, Vuola A, Siltala N, Heikkilä R, Tuokko R (2010) Robots for Micro and Desktop Factories: Examples and Experiences. In *Proceedings of 41st International Symposium on Robotics (ISR 2010) and 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK 2010)*, 7-9 June 2010, pp 1-7.
36. Hesselbach J, Wrege J, Raatz A, Heuer K, Soetebier S (2005) Microassembly - Approaches to Meet the Requirements of Accuracy. In: D. Löh and J. Haubelt (ed) *Proceedings of Microengineering of Metals and Ceramics: Teil II. Special Replication Techniques, Automation and Properties*, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany, 2005.
37. Siltala N, Vuola A, Prusi T, Heikkilä R, Tuokko R (2012) Comparison of Five Low Cost Manipulators for Microfactories, In *Proceedings of 8th International Workshop on Microfactories (IWMF 2012)*, Tampere, Finland, 8-20 June, 2012, pp 1-8.
38. Burisch A, Wrege J, Raatz A, Hesselbach J, Degen R (2007) PARVUS – miniaturised robot for improved flexibility in micro production, *Assembly Automation*, 27(1):65-73.
39. Hesselbach J, Raatz A, Wrege J, Soetebier S (2004) Design and Analysis of a Macro Parallel Robot with Flexure Hinges for Micro Assembly Tasks. In *Proceedings of 35th International Symposium on Robotics (ISR)*, Paris, France, 23-26 March, 2004.
40. Codourey A, Perroud S, Mussard Y (2006) Miniature reconfigurable assembly line for small products, *Precision Assembly Technologies for Mini and Micro Products*. In: Svetan Ratchev (ed) *Proceedings of International Precision Assembly Seminar (IPAS'06)*, Precision Assembly Technologies for Mini and Micro Products, Springer, Bad Hofgastein, Austria, 19-21 February, 2006, pp 193-200.
41. Hexapods by Physik Instrumente, Available: <http://www.physikinstrumente.com/products/parallel-kinematic-hexapods.html> [11-10-2016]
42. Driesen W, Varidel T, Régnier S, Breguet JM (2005) Micro manipulating by adhesion with two collaborating mobile micro robots, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15(10):S259–S267.
43. Driesen W, Varidel T, Mazerolle S, Bergander A, Breguet JM (2005) Flexible micro manipulation platform based on tethered cm3-sized mobile micro robots. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Shatin, N.T., China, 5-9 July, 2005.
44. Woern H, Seyfried J, Fahlbusch S, Buerkle A, Schmoeckel F (2000) Flexible microrobots for micro assembly tasks. In *Proceedings of IEEE Symposium on Micromechanics and Human Science*, Nagoya, Japan, 22-25 October, 2000, pp 135–143.

45. Donald B, Levey C, Mcgray C, Paprotny I, Rus D (2006) An untethered, electrostatic, globally controllable MEMS micro-robot. *Journal Of Microelectromechanical Systems* 15(1):1-15.
46. Mitsumoto N, Fukuda T, Arai F, Tadashi H, Idogaki T (1996) Self-organizing multiple robotic system (a population control through biologically inspired immune network architecture). In *Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, MN, 1996, pp. 1614-1619 vol.2.
47. Yang JP, Deng XC, Chong TC (2005) An electro-thermal bimorph-based microactuator for precise track-positioning of optical disk drives. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15(5):958–965.
48. Micromanipulator for Electron Microscopy by Kleindiek Nanotechnik, Available: <http://www.nanotechnik.com/mm3a-em.html> [11-10-2016]
49. Physical Intelligence Department, Germany. <http://pi.is.mpg.de/index.html>
50. Torres NA, Ruggeri S, Popa DO (2014) Untethered microrobots actuated with focused permanent magnet field. In *Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 14*, Buffalo, New York, USA, August 17-20, 2014.
51. Pagano C, Fassi I (2013) Devices and Techniques for Contact Microgripping. In D. Zhang (ed.) *Advanced Mechatronics and MEMS Devices, Microsystems*, vol 3. Springer Science+Business Media, New York.
52. Gauthier M, Lambert P, Régnier S (2010) Microhandling and Micromanipulation Strategies. In N. Chaillet and S. Régnier (ed) *Microrobotics for Micromanipulation*. Wiley-ISTE, Great Britain.
53. Hubert A (2010) Actuators and micro-actuators for robotics applications. Lecture slides, Summer school in microrobotics and self-assembly for Hybrid MEMS, Besançon, France, 29 June - 2 July, 2010.
54. Agnus J (2003) Contribution à la micromanipulation. Étude, réalisation, caractérisation et commande d'une micropince piézoélectrique. PhD thesis, University of Franche-Comté, 2003.
55. Boudaoud M, Haddab Y, Le Gorrec Y (2010) Modelling of a MEMS-based microgripper: application to dexterous micromanipulation. In *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'10)*, Taipei, Taiwan, 18-22 October, 2010.
56. Mølhave K, Hansen O (2005) Electro-thermally actuated microgrippers with integrated force-feedback. *J. Micromech. Microeng.* 15:1265–1270.
57. Micro-gripper by Zyvex, Available: <http://www.zyvex.com/Documents/9703.PDF> [11-10-2016]
58. Zhang H, Burdet E, Huttmacher DW, Poo AN, Bellouard Y, Clavel R, Sidler T (2002) Robotic Micro-assembly of Scaffold/Cell Constructs with a Shape Memory Alloy Gripper. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'02)*, vol 2, Washington, DC, USA, 11-15 May 2002.
59. Hesselbach J, Buettgenbach S, Wrege J, Buetefisch S, Graf C (2001) Centering electrostatic microgripper and magazines for microassembly tasks. In *Proceeding of SPIE 4568, Microrobotics and Microassembly III*, pp 270-277, Boston, MA, USA, 28 October 2001.

60. Biganzoli F, Fassi I, Pagano C (2005) Development of a Gripping System Based on Capillary Force. In Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning: From Nano to Macro Assembly and Manufacturing (ISATP 2005). pp 36-40, Canada, 19-21 July, 2005.
61. Lambert P, Seigneur F, Koelemeijer S, Jacot J (2006) Design of a Capillary Gripper for a Submillimetric Application. In: Svetan Ratchev (ed) Proceedings of International Precision Assembly Seminar (IPAS'06), Springer, Bad Hofgastein, Austria, 2006, pp 3-10.
62. Kochan A (1997) European project develops "ice" gripper for micro-sized components. *Assembly Automation* 17(2):114-115.
63. Lang D, Tichem M, Blom S (2006) The investigation of intermediates for phase changing microgripping. In Proceedings of International workshop on microfactories (IWMF), Besancon, France, October 2006.
64. Feddema JT, Xavier P, Brown R (1999) Micro-assembly planning with Van der Waals force. In Proceedings of International Symposium on Assembly and Task Planning, Porto, Portugal, 1999.
65. Zesch W, Brunner M, Weber A (1997) Vacuum tool for handling microobjects with a NanoRobot. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Albuquerque, New Mexico, USA, 20-25 April 1997, vol 2, pp 1761-1776.
66. Arai F, Endo T, Yamuchi R, Fukuda T (2006) 3D 6DOF Manipulation of Micro-object Using Laser Trapped Microtool. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Orlando, Florida, USA, 15-19 May 2006.
67. Chapin SC, Germain V, Dufresne ER (2006) Automated trapping, assembly, and sorting, with holographic optical tweezers. *Optics express*, 14(26):13095-13100.
68. Subramanian A, Vikramaditya B, Nelson BJ, Bell D, Dong L (2005) Dielectrophoretic Micro/Nanoassembly with Microtweezers and Nanoelectrodes. In Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Seattle, USA, 18-20 July 2005.
69. Fantoni G, Santochi M (2005) A modular contactless feeder for microparts. *CIRP Annals* 2005, 54(1):23-26.
70. Gosse C, Croquette V (2002) Magnetic tweezers: Micromanipulation and force measurement at the molecular level. *Biophys. Journal*, 82(6):3314-3329.
71. Sakuma S, Yamanishi Y, Arai F (2009) Magnetically Driven Microtools Actuated by a Focused Magnetic Field for Separating of Micro-particles. *J. Robotics and Mechatronics*, 21(2):209-215.
72. Reinhart G, Heinz M, Stock J, Zimmermann J, Schilp M, Zitzmann A, Hellwig J (2011) Non-contact handling and transportation for substrates and microassembly using ultrasound-air-film-technology. In Proceedings of Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), 22nd Annual IEEE/SEMI, Saratoga Springs, NY, USA, 16-18 May 2011, pp 1-6.
73. Vandaele V, Lambert P, Delchambre A (2005) Non-contact handling in microassembly: Acoustical levitation. *Precision Engineering*, 29(4):491-505.



74. Chen BK, Zhang Y, Sun Y (2009) Active Release of Microobjects Using a MEMS Microgripper to Overcome Adhesion Forces. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 18(3):652- 659.
75. Fantoni, G, Porta, M (2008) A critical review of releasing strategies in microparts handling. In: Ratchev S and Koelemeijer, S (ed) *Proceedings of International Precision Assembly Seminar (IPAS'08), Micro-Assembly Technologies and Applications*, Springer, Chamonix, France 10-13 February, 2008, pp. 223-234.
76. Haliyo DS, Régnier S, Guinot JC (2003)  $\mu$ mad, the adhesion based dynamic micro-manipulator. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 22:903-916.
77. Saito S, Himeno H, Takahashi K (2003) Electrostatic detachment of an adhering particle from a micromanipulated probe. *J. Appl. Phys.*, 93(4):2219-2224.
78. Haliyo DS, Dionnet F, Regnier S (2006) Controlled rolling of microobjects for autonomous manipulation. *Journal of Micromechatronics*, 3(2):75-101.
79. Bark C, Binnenboese T (1998) Gripping with low viscosity fluids. In *Proceedings of the IEEE Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'98)*, Heidelberg, Germany, 25-29 January, 1998, pp 301-305.
80. Petrovic D, Popovic G, Chatzitheodoridis E, Del Medico O, Almansa A, Sümecz F, Brenner W, Detter H (2002) Gripping tools for handling and assembly of microcomponents. In *Proceedings of 23rd International Conference on Microelectronics (MIEL 2002)*, Niš, Yugoslavi, 12-15 May, 2002, 1:247-250.
81. Schacklock A, Sun W (2005) Integrating microscope and perspective views. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'05)*, Barcelona, Spain, 18-22 April 2005, pp 454-459.
82. Chen H, Xi N, Li G, Saeed A (2004) CAD-guided manufacturing of nanostructures using nanoparticles. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'04)*, Sendai, Japan, 28 September - 2 October, 2004, pp. 595–600.
83. Bert J, Dembélé S, Lefort-Piat N (2006) Trifocal transfer based novel view synthesis for micromanipulation, *Advances in Visual Computing. Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Berlin, 4291:411–420.
84. Yang G, Nelson BJ (2003) Wavelet-based autofocusing and unsupervised segmentation of microscopic images. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, NV, USA, 27-31 October, 2003.
85. Zhang Z (2000) A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11):1330-1334.
86. Fryer JG, Brown DC (1986) Lens distortion for close-range photogrammetry, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52:51–58.
87. Nelson BJ, Ralis S, Zhou Y, Vikramaditya B (1999) Force and vision feedback for robotic manipulation of the microworld. In: *Experimental Robotics VI, Lectures Notes in Control and Information Sciences*, Springer, Berlin, 250:433–442.
88. Enikov E, Nelson BJ (2000) Three-dimensional microfabrication for a multi-degree-of-freedom capacitive force sensor using fibre-chip coupling, *Journal of Micromechatronics and Microengineering*, 10(4):492-497.

89. Rougeot P, Dauge M, Dembélé S, Chaillet N (2003) Vision-based control of AFM-based micromanipulation, Acte du International Advanced Robotique Program, Moscow, Russia, 2003.
90. Ralis S, Vikramaditya B, Nelson BJ (2000) Micropositioning of a weakly calibrated microassembly system using coarse-to-fine visual servoing strategies, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 23(2):123-131.
91. Haliyo D, Rollot Y, Regnier S (2001) Dynamical strategies for the micro-manipulation by adhesion. In *Proceedings of SPIE 4568, Microrobotics and Microassembly III*, pp. 261–269, Boston, MA, USA, 28 October 2001.
92. Verettas I, Clavel, R Codourey A (2005) Pocket Factory: Concept of miniaturized modular cleanrooms. In: 1st Topical Meeting on Microfactories "Desktop MEMS and Nano Factories" TMMF2005, Tsukuba, Japan, 17-19 October 2005.
93. Verettas I (2006) Microfabrique: méthodologie de conception de systèmes de production miniaturisés et modulaires, disposant d'un environnement salles blanches. PhD thesis, EPFL, Lausanne, 2006.
94. Zhou Q, Aurelian A, Chang B, del Corral C, Koivo HN (2002) Microassembly system with controlled environment. *Journal of Micromechatronics*, 2(3):227-248.
95. Fontana G, Ruggeri S, Fassi I, Legnani G (2014) A mini work-cell for handling and assembling microcomponents. *Assembly Automation Journal*, Emerald, 34(1):27-33, ISSN: 0144-5154, doi: 10.1108/AA-11-2012-087.
96. Ruggeri S, Fontana G, Fassi I, Legnani G, Pagano C, Dispositivo di manipolazione e metodo per manipolare a vuoto un componente (A vacuum manipulation device and a method for manipulating a component by means of a vacuum). Italian Patent No. MI2013A000451, filed on March 26, 2013, Milan. Publication date: September 27, 2014. Released on July 20, 2015. PCT (Patent Cooperation Treaty) pending, International Application No. PCT/IB2014/060105, filed on March 24, 2014. International Publication Number WO2014155277-A1. Publication date: October 2, 2014.
97. Fontana G, Ruggeri S, Fassi I, Legnani G. Precision Handling of electronic components for PCB rework. In: Svetan Ratchev (ed) *Precision Assembly Technologies and Systems - 7th IFIP WG 5.5 International Precision Assembly Seminar, IPAS 2014*, Chamomix, France, February 16-19, 2014, Proceedings Series: *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Vol. 435, pp. 52-60, Ed. Springer-Berlin. ISBN: 978-3-662-45585-2, doi: 10.1007/978-3-662-45586-9\_8.
98. Fontana G, Ruggeri S, Fassi I, Legnani G (2013) Flexible vision based control for micro-factories. In *Proceeding of the ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/MNS 2013)*, Portland, OR, USA, 4-7 August 2013. ISBN: 978-0-7918-5584-3, doi: 10.1115/DETC2013-12643.
99. Fontana G (2014) *Assembly at the Microscale: Design and Implementation of a Robotised Work-cell*. PhD thesis, University of Brescia, 2014.
100. Fontana G, Ruggeri S, Fassi I, Legnani G (2012) Calibration Strategies for a Manipulation Work-Cell. In *Proceeding of 8th International Workshop on Microfactories (IWMF 2012)*, Tampere, Finland, 18-20 June 2012.

101. Ruggeri S, Fontana G, Pagano C, Fassi I, Legnani G. Handling and Manipulation of Microcomponents: Work-Cell Design and Preliminary Experiments. In: Svetan Ratchev (ed) Precision Assembly Technologies and Systems - 6th IFIP WG 5.5 International Precision Assembly Seminar, IPAS 2012, Chamonix, France, February 12-15, 2012, Proceedings Series: IFIP Advances in Information and Communication Technology, Vol. 371, pp. 65-72, Ed. Springer-Berlin. ISBN: 978-3-642-28162-4, doi: 10.1007/978-3-642-28163-1\_9.
102. Ruggeri S, Fontana G, Fassi I, Legnani G (2014) Performance evaluation methods for microgrippers. In Proceeding of the ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2014), Buffalo, New York, USA, 17-20 August, 2014. ISBN: 978-0-7918-4635-3, doi: 10.1115/DETC2014-35162.



# 10 Marktanalyse, technologische Zukunftsforschung und Geschäftsmodelle für die Mikrofertigung

**Golboo Pourabdollahian and Giacomo Copani**

National Research Council of Italy, Institute of Industrial Technologies and Automation (CNR-ITIA)

## 10.1 Einführung

Produkte auf der Basis von Mikroteilen und Mikrosystemen werden in vielen Industriezweigen in Europa als entscheidender Wertschöpfungsfaktor betrachtet und damit als zunehmend wichtiger Faktor für die industrielle und wirtschaftliche Zukunft Europas. Der Trend begann im späten 20. Jahrhundert, angetrieben durch Entwicklungen in der Silizium-basierten Mikroelektronik, und setzte sich in der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts fort. Der Trend fokussierte sich stärker auf die Einführung von Mikro- und Nano-Fertigungstechnologien (MNT) durch Anwendung einer Vielzahl von Materialien, Teilen, Komponenten und wissensbasierten Technologien, die zur Intelligenz und Funktionalität von Mikrosystemen beitragen [1].

In diesem Zusammenhang ist es durchaus relevant und wichtig, die bestehenden und zukünftigen Trends der Mikrofertigung nicht nur aus technologischer Sicht zu verstehen, sondern auch aus nicht-technologischer und betriebswirtschaftlicher Sicht. Ziel dieses Kapitels ist es daher, dem Leser das erforderliche Wissen in Bezug auf Marktanalyse, technologische Zukunftsforschung und Geschäftsmodelle für die Mikrofertigung zur Verfügung zu stellen. Im ersten Abschnitt werden wir den aktuellen Markt der Mikrofertigung untersuchen und eine Marktanalyse präsentieren, wobei wir uns auf die Marktnachfrage und Business-Treiber, Hauptanwendungsbereiche, wichtige Interessenvertreter und Akteure auf dem Markt konzentrieren und eine abschließende SWOT-Analyse (Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken) durchführen. Dann werden wir einen Blick auf die künftige Marktentwicklung werfen und einen technologischen Ausblick wagen, um Zukunftstrends, Zukunftsmärkte, zukünftige Anwendungsbereiche und die Zukunft der Technologien zu identifizieren. Wir schließen das Kapitel ab mit der Einführung von

Geschäftsmodellen für die Mikrofertigung. Dabei werden Beispiele bestehender und zukünftiger innovativer Geschäftsmodelle vorgestellt.

## 10.2 Marktanalyse für die Mikrofertigung

Die wirtschaftliche Bedeutung von Mikroteilen und Komponenten wurde bereits früher untersucht und in mehreren Marktanalysen bestätigt [2, 3]. Laut diesen Berichten werden viele Bereiche und Sektoren, in denen die Mikrofertigung eine Rolle spielt, eine kontinuierliche Steigerung ihrer Marktanteile erfahren. Innovative und kostengünstigere Produkte, angefangen von Gesundheit, Sicherheit und Kommunikation bis hin zu Umwelt, Wohnen und Mobilität, wurden dank der Mikrofertigungstechnologien bereits entwickelt. Auf der Grundlage der offiziellen Berichte wird geschätzt, dass der Markt für mikroelektronische und mechanische Systeme (MEMS) im Jahr 2019 ein Volumen von fast 25 Milliarden Dollar erreichen wird [4]. Diese große wirtschaftliche Bedeutung war der Auslöser für viele Branchen, neue Technologien für die Mikrofertigung zu erforschen, anzuwenden und zu entwickeln.

Inzwischen wird allgemein akzeptiert, dass die Entwicklungen in den Mikro- und Nanofertigungstechnologien von entscheidender Bedeutung für die industrielle Basis der Europäischen Gemeinschaft sind und es europäischen Unternehmen ermöglichen, ihre Schlüsselrolle im drastisch zunehmenden globalen Markt der Mikro- und Nanoteile und Fertigungsprozesse zu erhalten.

In den folgenden Abschnitten werfen wir einen genaueren Blick auf den Mikrofertigungsmarkt. Wir analysieren die Nachfrage des Marktes und die Treiber, die wichtigsten Branchen für Mikrofertigungsanwendungen, die wichtigsten Interessenvertreter auf dem Markt, und schließlich die wichtigsten Merkmale des Mikrofertigungsmarktes in Bezug auf Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken.

### 10.2.1 Business-Treiber und Marktanforderungen

Seit den ersten Entwicklungen der Mikrofertigungstechnologien und der Entstehung des Mikrofertigungsmarktes gab es mehrere Business-Treiber, die einen solchen Markt nicht nur geschaffen, sondern auch sein schnelles Wachstum gefördert haben. Ein Unternehmen, das in diesem Markt tätig ist, muss diese Treiber verstehen, damit es in der Lage ist, sich einen Wettbewerbsvorteil zu erarbeiten. Die wichtigsten Business-Treiber für die Mikrofertigung sind:

- **Marktnachfrage nach Mikroteilen:** Es gibt eine zunehmende Nachfrage nach Mikroteilen wie Mikroaktoren, Mikrooptik, usw.

- **Bedarf nach Wettbewerbsfähigkeit der Produkte:** Die Kunden erwarten leistungssteigernde Produkte, Anpassbarkeit, Zuverlässigkeit und Funktionalität.
- **Fertigungsmöglichkeiten:** Aufkommende Technologien haben die Produktionskapazitäten in Bezug auf Zuverlässigkeit, Agilität, Flexibilität, Pünktlichkeit und Leistung erhöht.
- **Gesetzgebung und Umweltfragen:** Eine steigende Zahl von Vorschriften, die von Regierungen erlassen werden, um Grenzwerte und Ziele für ökologische Nachhaltigkeit zu erreichen.
- **Kosten:** Die Hersteller müssen kosteneffizient sein, um wirtschaftlich nachhaltig arbeiten zu können.
- **Neue Chancen und mögliche Märkte:** Es gibt mehrere mögliche Märkte, die von den Playern im Bereich Mikrofertigung als Ziel gesetzt wurden.

Neben den Business-Treibern für die Mikrofertigung gibt es mehrere Nachfragefaktoren in diesem Markt. Im Folgenden werden die wichtigsten Anforderungen im Mikrofertigungsmarkt aufgeführt [5]:

- **Nachfrage nach präziseren Fertigungssystemen bei höheren Produktionsraten und präziseren Teilen:** Die Miniaturisierung ist ein Auslöser für die Entwicklung neuer Technologien mit dem Ziel der effizienten Herstellung von Mikrokomponenten. Es besteht ein zunehmender Bedarf an Mikrofertigungssystemen, die nicht nur eine präzise Herstellung von Mikrobauteilen erleichtern, sondern auch die Effizienz verbessern und damit die Produktionsleistungen erhöhen. Einige der wichtigsten Beispiele sind Rolle-zu-Rolle Heißprägen und Mikrospritzgießen von Multi-Materialien, die hohe Durchsatzraten und präzise Fertigungssysteme ermöglichen.
- **Nachfrage nach Multi-Material-Herstellungsverfahren:** Derzeit gibt es eine nennenswerte Nachfrage im Mikrofertigungsmarkt für die Entwicklung von Verfahren, welche die Verwendung einer Vielzahl von Materialien, wie Legierungen und Verbundwerkstoffen, ermöglichen. In besonderen Fällen, in denen bestimmte physikalische Eigenschaften eines Produkts abgedeckt werden sollten, ist die Entwicklung dieser Multi-Material-Herstellungsverfahren relevant und von entscheidender Bedeutung.
- **Nachfrage nach Mikroteilen:** Die Mikrofertigungstechnologie ermöglicht die Herstellung und Entwicklung kleinerer und besserer Sensoren, wie Mikrobeschleunigungsmesser und Drucksensoren, die

in der Automobilindustrie weithin verwendet werden. In den letzten Jahren ist die Nachfrage nach MEMS-Sensoren aus dem Consumer Electronics-Markt stark angestiegen. Es gibt ein breites Anwendungsgebiet für diese Sensoren und Mikroteile in Handys, Kameras, Laptops, etc.; dies führt zu einer rasch wachsenden Nachfrage nach Mikroteilen von Seiten der Hersteller dieser elektronischen Geräte.

## 10.2.2 Hauptanwendungsgebiete

Mikrokomponenten beeinflussen derzeit zahlreiche Aspekte unseres täglichen Lebens. Wir finden sie in den meisten Produkten, die uns umgeben. Ein hervorragendes Beispiel ist die Automobilindustrie. Laut Automobilherstellern und Zulieferern gibt es mehr als 200 Mikroaktoren und Sensoren, die in modernen Fahrzeugen und Automobilen eingebaut sind [6]. Die breite Palette der Anwendungen in der Mikrofertigungstechnik ist jedoch nicht nur auf die Automobilindustrie begrenzt. Angesichts der Tatsache, dass Mikrofertigungstechnologien die Integration funktionalisierter Mikrooberflächen und Mikroteile in Makroprodukten ermöglichen und erleichtern, ist der Endmarkt für diese Technologien ziemlich groß. Dementsprechend steigt die Zahl der Branchen, die von dieser Technologie profitieren kontinuierlich und umfasst Branchen wie: Gesundheitswesen, IKT, Energie, Luft- und Raumfahrt, Konsumgüter, etc. Die wesentlichen Auswirkungen von Mikrokomponenten können in vielen Anwendungsbereichen beobachtet werden. Sie kann uns helfen, Energie zu sparen, ältere Menschen zu unterstützen und dazu beitragen, unser Leben komfortabler zu gestalten. Abbildung 10.1 zeigt die Bereiche, in denen die Mikro- und Nanotechnik voraussichtlich einen wesentlichen Beitrag leisten wird.

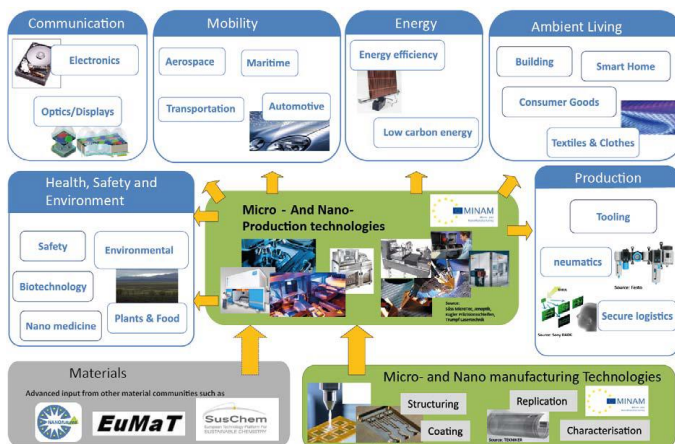


Abbildung 10.1: Anwendungsbereiche für Mikro- und Nano-Fertigungstechnologien [6]



Wie in Abbildung 10.1 dargestellt ist der Zielmarkt für die Mikrofertigung sehr breit und deckt mehrere Branchen ab. Laut einem EU-finanzierten Roadmapping-Report über Mikro- und Nanofertigung ( $\mu$ -Sapient) liegen die größten Chancen in den folgenden Bereichen: Automobil / Transport, Kommunikation, Computer / Wirtschaft, Verbraucher / Unterhaltung, Energie / Wasser / Chemie, Essen und Trinken, Medizin / Pharma, Militär / Luft- und Raumfahrt sowie Sicherheit.

Unter diesen Branchen sind Gesundheitswesen (Medizin / Pharma) und Militär / Luft- und Raumfahrt die führenden Branchen mit einem erwarteten Prognosewert von mehr als 4 Milliarden Euro, gefolgt von Energie, Unterhaltungselektronik und Lebensmitteln mit einem möglichen Wert von jeweils rund 3,5 Milliarden Euro.

In den folgenden Abschnitten finden Sie eine kurze Beschreibung der drei Hauptbereiche der Mikrofertigung.

### 10.2.2.1 Gesundheitswesen

Das Gesundheitswesen gilt als einer der wichtigsten Märkte für die Mikrofertigungstechnik. Die Größe des Marktes selbst und sein Potenzial für Mikrofertigungsanwendungen machen es zu einem äußerst attraktiven Ziel für die Mikrofertigung. Im Jahr 2010 belief sich der Marktwert von Medizinprodukten auf rund 300 Milliarden US-Dollar [7]. Bei einer jährlichen erwarteten Wachstumsrate von 8% wird der Marktwert im Jahr 2015 420 Milliarden US-Dollar erreichen. Mit einem Marktanteil von 26% ist die EU der zweite Hauptakteur (nach den USA) auf dem Markt. In Anbetracht der Größe des Gesundheitsmarktes kann die Mikrofertigung selbst bei einem kleinen Marktanteil erhebliche Einnahmen generieren. Dies macht das Gesundheitswesen zu einer äußerst wichtigen und attraktiven Branche für die Mikrofertigung. Derzeit machen Anwendungen im Gesundheitswesen etwa 25% des Gesamtwerts des MEMS-Marktes aus. Tabelle 10.1 zeigt Anwendungen der MNT im Gesundheitswesen [7].

Tabelle 10.1: MNT-Anwendungen im Gesundheitswesen

Anwendung	Beispiel
Hochentwickelte Oberflächen	Kodierte Selbstmontage, Reparatur, bioinspirierte Materialien
Drug Delivery (Medikamenten-freisetzung)	Gezielte Lieferung und Freigabe, strukturierte Materialien, Bio-Medikamente, Krebstherapie
Medizinische Geräte	Implantierbare Geräte, Bewegungsvorrichtungen, personalisierte Geräte
Diagnostik	Mikrofluidik-System, Remote & intelligente Sensorik, Bio-Sensing
Drug Discovery	Zellbasierte Analyse, Toxikologie, Biochips
Hybrid-Biogeräte	Gewebezüchtung, Organentwicklung

### 10.2.2.2 Energie

Der Energiemarkt gilt als einer der wichtigsten Märkte für Mikrofertigungstechnologien. Der mögliche Einfluss von Mikrofertigungstechnologien auf den Energiesektor ist beeindruckend. Nach Ansicht von Experten werden Mikrofertigungstechnologien eine kritische und entscheidende Rolle bei der Massenproduktion von Energie und Energiesystemen spielen. Ein konkretes Beispiel dafür ist die Photovoltaik. Die Photovoltaik ist eine der vielversprechendsten Technologien im Energiesektor und ein erhebliches Marktwachstum wird in diesem Bereich erwartet. Die Herstellung von Photovoltaiksystemen hängt von einer breiten Nutzung der Oberflächen-Mikrostrukturierung sowie der Dünnschichtabscheidung ab. Inzwischen können neue Trends im Energiesektor durch die Anwendung von MNT realisiert werden [6]. Unter Technologie-Experten besteht breites Einverständnis darüber, dass neue Mikro- und Nanotechnologien (mit neu entwickelten Verfahren und Komponenten) eine profitable Wertschöpfungskette von der Entwicklung der Primärenergieträger über die Umwandlung, Speicherung, Transport und Nutzung von Energie ermöglichen können. Beispielsweise gibt es in Bezug auf den Energietransport langfristige Optionen wie drahtlosen Energietransport durch Laser, Mikrowellen oder elektromagnetische Resonanz. Mikro- und Nano-Technologien können diese Vision durch den Einsatz von Mikro-/Nano-Sensoren und elektronischen Leistungskomponenten unterstützen und dazu beitragen, die komplizierte Steuerung und Überwachung der riesigen Stromnetze zu bewältigen. Tabelle 10.2 zeigt mögliche Anwendungen der MNT im Energiesektor.

Tabelle 10.2: MNT-Anwendungen im Energiesektor [6]

Anwendung	Beispiel
Stromproduktion und -umwandlung	Oberflächen-Mikrostrukturierung für Lichtmanagement in 3G-Photovoltaik, intelligente Mikro-Designs für CPV-Optik, neue Materialien und Prozesse für organische Elektronik und OPV.
Elektrochemische Speicherung	Batterien mit höheren Leistungs- und Energiedichten, langlebige und sicherere Batterien.
Wasserstoff-Produktion und -Lagerung	Mikro-fractionierte Materialien und Verbindungen für eine schnelle und reversible H <sub>2</sub> -Speicherung in festen Phasen, Katalysatoren für die Gasreformierung.
Wärmeaustausch, Wärmegewinnung und Wärmeisolierung	Oberflächenmikrostrukturierung für eine verbesserte Wärmeübertragung. Oberflächenmikrostrukturierung für eine verbesserte Wärmegewinnung. Bulk-Mikrostrukturierung für Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit.
Beleuchtung	Mikro integrierte elektro-photonische Eigenschaften, Energieeffizienz durch MM-fähige LED-Quellen und Optiken.
Effiziente fossile Brennstoffe	Oberflächen-Mikrostrukturierung für hydrophobe Funktionalität, Mikro-Materialien zur Verbesserung der Wärmebeständigkeit.

### 10.2.2.3 Luft- und Raumfahrt

Der Luft- und Raumfahrtsektor ist eine der führenden Branchen bei der Anwendung neuer Mikrofertigungstechnologien. Die Lieferanten und Teilehersteller sind ständig bemüht, die Kosten zu minimieren, während sie versuchen, die Zykluszeiten und die Produktionseffizienz zu verbessern. Um dieses Ziel zu erreichen, wendet sich eine zunehmende Anzahl von Akteuren der MNT zu. Technologien wie mikro-additive Fertigung stehen bei Herstellern in der Luft- und Raumfahrtbranche im Mittelpunkt. Die Anwendung der MNT in diesem Bereich kann in zwei Kategorien unterteilt werden: MNT-Materialien und MEMS.

Für MNT-Materialien gibt es folgende Hauptanwendungen [8]:

- Leichtere und stärkere Materialien
- Oberflächenbehandlungen führen zu einer besseren Leistung des Flugzeugs
- Kraftstoffadditive führen zur Verbesserung der Kraftstoffeffizienz und niedrigeren Emissionen
- Mögliche Anwendungen für MEMS sind [8]:
- Ölsteuerung für die Full Authority Digital Engine Control
- Drucksensoren für die Energieerzeugung
- Durchfluss-, Temperatur- und Feuchte-Sensoren in der Flugzeugkabine
- Beschleunigungsmesser für die Avionik und Flugsteuerung
- Drucksensoren für die Messung von Luftdaten
- Airbag-Sensoren

Darüber hinaus wird erwartet, dass die MNT in Zukunft ein breiteres Anwendungsspektrum in der Luft- und Raumfahrt und im militärischen Bereich haben wird. Einige dieser zukünftigen Anwendungen sind in Tabelle 10.3 aufgeführt.

Tabelle 10.3: Zukünftige MNT-Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt [8]

Anwendung	Beispiel
Navigation und Höhe	Radar, Luftdaten, Instrumente, GPS-Empfänger und Antennen, inertielle Messeinheiten
Mensch-Maschine-Schnittstellen	Displays, Sichtung, integrierte Helm-Displays, Head-up-Displays
Navigation, Optronik	Radar, Aufklärungssensoren
Mission-Optronik und Elektronik	Zielerkennung, (elektrooptische) EO-Raketenlenkung, IFF-Systeme
Motor und Reaktoren	Hydraulik, Einlassflusskontrolle
Energiemanagement	Erzeugung, Überwachung, Druck, Feuchtigkeit
Strukturüberwachung	Stabilisierung, Vibration, Korrosionsüberwachung, strukturelle Ermüdung
Landesysteme	Hydraulikdruck, Reifendruck

### 10.2.3 Wichtige Akteure

Wie in jedem anderen Markt gibt es auch im Mikrofertigungsmarkt eine Reihe wichtiger Akteure. Dies sind Akteure, die den Markt auf irgendeine Art und Weise beeinflussen und deren Rolle als kritisch für die Zukunft der Mikrofertigungsmärkte angesehen wird. Abbildung 10.2 zeigt die wichtigsten Akteure auf dem Mikrofertigungsmarkt.



Abbildung 10.2: Wichtige Akteure im Mikrofertigungsmarkt

- Anbieter von Fertigungstechnik: Unternehmen, welche die wichtigsten Mikrofertigungstechniken wie Lasermikrofertigung, Rolle-zu-Rolle-Technologie, Mikrospritzgießen, Mikro-additive Technologien, usw. anbieten.
- Materialanbieter: Lieferanten von Materialien, die in Mikrofertigungsmaschinen verwendet werden, z.B. Polymermaterialien, Pulver-Metall, Papier, Glas, usw.
- End-User-Unternehmen: Hersteller von Mikrofertigungsprodukten, z.B. Unternehmen, die Mikrofluidik, Mikroaktoren, Mikrooptik, Mikro-Brennstoffzellen und MEMS, usw. herstellen.
- Regierung: gilt als wichtiger Akteur unter Berücksichtigung der zunehmenden Zahl von Initiativen von Regierungen, mit dem Ziel, die Mikrofertigungsdomäne zu verbessern.
- Wissensanbieter: Organisationen, die in Bezug auf die Mikrofertigung Innovation und Forschung vorantreiben und Innovationsinitiativen wie akademische Institutionen und Forschungseinrichtungen schaffen.

#### 10.2.4 Stärken, Schwächen, Chancen, Risiken

In den vorangegangenen Abschnitten haben wir einen Überblick über den aktuellen Markt für die Mikrofertigung präsentiert, wobei wir uns auf die Anforderungen des Marktes, Business-Treiber und die Bereiche konzentriert haben, die von der Anwendung der Mikrofertigungstechnologien profitieren. Um ein besseres Verständnis für die Situation des Mikrofertigungsmarktes in Europa zu erhalten, stellen wir unten eine SWOT-Analyse vor. Die SWOT-Analyse ist ein weit verbreitetes System, das zur Identifizierung und Analyse der Rahmenbedingungen für Unternehmen sowohl aus interner als auch externer Perspektive eingesetzt wird. Sie gilt als eines der wirksamsten Werkzeuge zur Durchführung einer Marktanalyse. Die SWOT-Analyse liefert Informationen, die hilfreich sind, um die Ziele eines Unternehmens abzugleichen. Darüber hinaus ist sie ein Instrument für die strategische Planung. Aus interner Sicht hebt die SWOT-Analyse Stärken und Schwächen hervor. Sie zeigt die positiven materiellen und immateriellen Eigenschaften einer Organisation, sowie Faktoren, welche die Organisation davon abhalten, ihre Kernziele zu erreichen. Sowohl Stärken wie auch Schwächen unterliegen der Kontrolle der Organisation. Von außen betrachtet unterstreicht die Analyse externe attraktive Faktoren, die einen Grund für die Existenz einer Organisation darstellen und eine besondere Strategie entwickeln, sowie auch externe Faktoren, die dazu führen könnten, dass die Mission oder der Betrieb der Organisation gefährdet werden könnten. Sowohl Chancen und Risiken liegen außerhalb der Kontrolle der Organisation.

Die Ergebnisse der SWOT-Analyse für den Mikrofertigungsmarkt in Europa werden im Folgenden beschrieben [1].

Die wichtigsten Stärken sind:

- Geschultes Personal und technisches Know-how
- Technologievielfalt und viele neue Ideen
- Umfassende Fachkompetenz in Basistechnologien
- Technologiereife
- Etablierte Werkzeugmaschinenindustrie
- Führend in der Feinmechanik
- Fähigkeit bestehende Technologie an neue Produkte anzupassen
- Politische und wirtschaftliche Stabilität

Die größten Schwächen sind:

- Mangelndes Bewusstsein
- Hohe Kosten im Zusammenhang mit Mikrofertigungsanlagen
- Infrastrukturkosten
- Bestehende Prozesskomplexität für die Entwicklung von 3D-Strukturen
- Mangel an Wissen und Know-how, das mit der Industrie geteilt wird
- Arbeitskosten
- Hoher Forschungsaufwand für Design in der Fertigung
- Bürokratie bei der Finanzierung von F&E

Die wichtigsten Möglichkeiten sind:

- Aktuelle Nachfrage der Industrie nach präziseren Fertigungssystemen bei höheren Produktionsraten
- Neue Märkte, die Mikroteile benötigen
- Design-Wissen
- Infrastruktur
- Integration in Prozessketten
- Etablierte Werkzeugmaschinenindustrie
- Standardisierung und Vereinheitlichung der Messtechnik-Standards
- Zunehmendes Interesse von Förderorganisationen
- Wichtige staatliche Initiativen zur Unterstützung der Schaffung von Mikrofertigungstechnologien

Die größten Risiken sind:

- Widerstand konservativer Marktkräfte gegen die Einführung „störender“ Technologien
- Materialien (strenger geregelt in der EU)

- Verpackung
- Materialentwicklung findet außerhalb der EU statt
- Der Mangel an geteiltem Wissen führt zu längeren Entwicklungszeiten
- Vereinheitlichung und Standardisierung der Konzepte für die Mikrofertigung
- Die USA setzen die Standards in der Messtechnik
- Dominanz des Fernen Ostens im wichtigen Consumer Markt
- Vertrauen auf angepasste Lösungen

Zusammenfassend zeigt die Analyse der europäischen Mikrofertigungsmärkte:

- Die große Stärke Europas liegt in der Verfügbarkeit von ausgebildeten Menschen, einer gut etablierten Werkzeugmaschinenindustrie und Fachkompetenz in multidisziplinärer Produktentwicklung.
- Die größten Schwächen, die das Wachstum des europäischen Mikrofertigungsmarktes verlangsamen könnten, sind die Kosten, die erforderlich sind, um diese Technologien zu implementieren und zu verfolgen, die konservative Grundhaltung und der Widerstand einiger Industriezweige, der fehlende Wissensaustausch zwischen F&E-Akteuren und der Industrie, der Mangel an Standards und fehlende Unterstützung der Messtechnik.
- Die möglichen Chancen für Europa auf dem Mikrofertigungsmarkt im Vergleich zu den anderen Akteuren im Rest der Welt liegen in der Integration von Prozessketten, der Einrichtung von Möglichkeiten für die 3D-Bearbeitung, der Schaffung von Prototyping-Fähigkeiten, dem wirksamen Einsatz von Design für die Fertigung und eine höhere Effizienz und besserer Fokus auf die Forschung.
- Die größten Risiken für Europa kommen aus Standards und Verpackungslösungen, die außerhalb Europas entwickelt wurden, sowie der Dominanz des Fernen Ostens in den wichtigsten Consumer Märkten

## **10.3 Die Zukunft des Mikrofertigungsmarktes und technologische Zukunftsforschung**

Jedes Unternehmen braucht eine langfristige Vision, um zu überleben. Daher ist ein klares Verständnis der Zukunft sowie deren Planung von wesentlicher Bedeutung. Eine kritische Analyse bezieht sich auf die Prognose des zukünftigen Marktes. In diesem Abschnitt werden wir uns die Zukunft des Mikrofertigungsmarktes genauer anschauen; wir analysie-

ren Markttrends, identifizieren die prominentesten und bedeutendsten Zukunftsbranchen für die Mikrofertigungstechnologien und präsentieren einige der zukünftigen Anwendungen und Technologien.

### 10.3.1 Markttrends

Die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellte Analyse unterstreicht die positiven Aussichten für den Mikrofertigungsmarkt. Die wichtigsten aktuellen und zukünftigen Trends in der Mikrofertigung sind [5, 9].

- Die disruptive Entwicklung von Mikrofertigungstechnologien (d.h. Oberflächen-Mikrobearbeitung, Bulk-Mikrobearbeitung) hat zur Entwicklung neuer Produkte geführt. Es wird erwartet, dass in naher Zukunft die Entwicklung neuer Produkte in unterschiedlichen Branchen dank der weiteren Verbesserung disruptiver sowie kontinuierlicher Mikrofertigungstechnologien erleichtert wird (d.h. Mikromotoren, Batterien, organische Photovoltaik, etc.).
- Diese neuen Mikrofertigungstechnologien werden nicht nur die Entwicklung neuer Produkte erleichtern, sondern auch die Entwicklung von Prozessen beschleunigen und somit den Zeitraum vom Design bis zur Herstellung neuer Produkte reduzieren.
- Das wachsende Bewusstsein für ökologische und soziale Nachhaltigkeit zusammen mit den von den Regierungen festgelegten Regelungen werden viele Branchen (d.h. Energie, Fertigung, Transport, Unterhaltungselektronik, etc.) in Richtung einer breiteren Umsetzung von Mikrofertigungstechnologien schieben, um die ökologischen und sozialen Auswirkungen zu erhöhen.
- Es gibt eine zentrale Forderung nach Mikrofertigungstechnologien, die die Herstellung von Multi-Material-Komponenten ermöglichen. Dies ist sehr wichtig und relevant aufgrund der positiven Auswirkungen, die dies in Bezug auf die Verwirklichung einer flexiblen und kosteneffizienten Herstellung multifunktionaler Produkte aus verschiedenen Materialien in allen Fertigungsbereichen haben könnte.
- Replikationsmethoden sind wahrscheinlich die vielversprechendsten unter den Technologien. Trotzdem sind sie in der Industrie nicht weit verbreitet. Sie sind gute Kandidaten für den Ersatz bestehender Lithographieverfahren. Eine solche wichtige Entwicklung würde sich auf die Herstellung des Master-Stempels beziehen, die derzeit sehr teuer ist.
- Es gibt eine entscheidende Notwendigkeit für die Weiterentwicklung bestehender Prozesse und Werkzeuge für die Mikro-/Nano-Montage –



für die Integration des Nanomaßstabs in den Mikromaßstab. Darüber hinaus besteht eine zunehmende Nachfrage nach einer kosteneffizienten und zuverlässigen Mikro/Nano-Montage und 3D-Verpackung.

- Die wissensbasierte Entwicklung ist ein bedeutender Trend für die Entwicklung von Mikrogeräten und Fertigungstechnologien. Die Einführung numerischer Simulationstools ermöglicht die effiziente Integration nanometergroßer Geräte in mikrometergroße Geräte. Darüber hinaus ermöglichen die Erzeugung und Anwendung neuartiger mikroskopischer Techniken die Manipulation und Verbesserung mikrometergroßer Strukturen.
- Die Entwicklung neuartiger intelligenter und miniaturisierter Sensoren und Aktoren sorgt für mehr Intelligenz in der Fertigungskette. Die Entwicklung von MEMS-basierten intelligenten und miniaturisierten Sensoren kann sich positiv auf die Produktionslieferketten auswirken, da sie eine anspruchsvollere Methode zur Steuerung des gesamten Produktionsprozesses zur Verfügung stellen. Abgesehen davon sind neuartige Verfahren zu ihrer Integration erforderlich. In dieser Hinsicht sind die Online-Steuerung und Überwachung der Fertigungsprozesskette, Maschinen, Ausrüstung, usw. unverzichtbar für die Industrie. Die herausragenden Treiber für die Einführung der Miniaturisierung in vielen vertikalen Märkten sind geringer Energieverbrauch, reduzierte Störgeräusche und minimale Kosten.

Trotz eines vielversprechenden Zukunftsmarkts für die Mikrofertigung ist zu beachten, dass die Herstellungskosten immer ein Wettbewerbsfaktor sein werden. Dies könnte zu einer bemerkenswerten Herausforderung führen, wobei sich die Beteiligten auf die Entwicklung neuer Technologien konzentrieren sollten, um eine kostengünstige und qualitativ hochwertige Produktion zu ermöglichen.

### **10.3.2 Zukunftsbranchen**

In Abschnitt 10.2.2 dieses Kapitels haben wir eine Übersicht über den aktuellen Mikrofertigungsmarkt und die wesentlichen Anwendungsbereiche präsentiert. Obwohl es derzeit mehrere Anwendungsbereiche gibt, sind einige Märkte attraktiver als andere. Dennoch wird sich die Attraktivität und die Bedeutung dieser Märkte verändern und somit ist es wichtig, nicht nur ihre aktuelle Bedeutung zu bewerten, sondern auch ihre mögliche zukünftige Anziehungskraft. Die wichtigsten aktuellen und zukünftigen Märkte für die Mikrofertigung wurden nach den Ergebnissen einer Umfrage, die in der MINAM-Roadmap veröffentlicht wurde, identifiziert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10.3 und Abbildung 10.4 dargestellt.

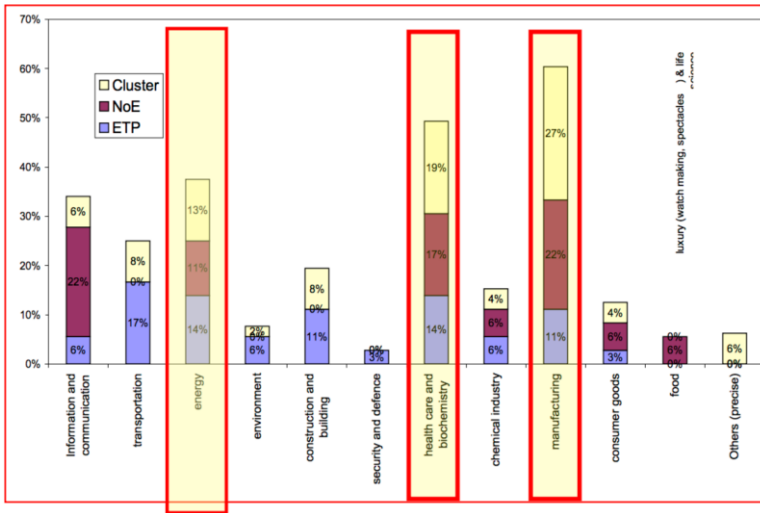


Abbildung 10.3: Hauptmärkte zwischen 2012-2015 [6]

Abbildung 10.3 zeigt, dass im Zeitraum 2012 bis 2015 die "Fertigung" der bedeutendste Markt für die Mikrofertigung ist. Die anderen führenden Branchen sind Gesundheitswesen und Energie. Inzwischen wurden auch IKT, Transport und Bau als wichtige Branchen identifiziert, jedoch nicht als die wichtigsten.

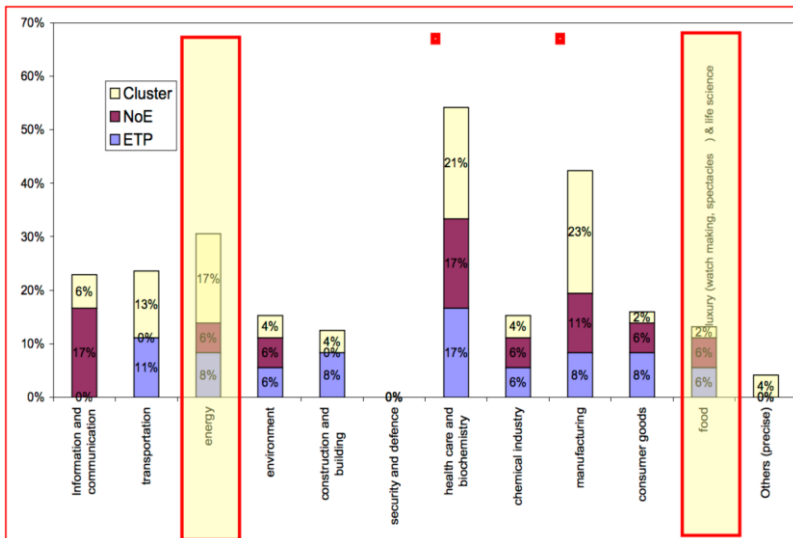


Abbildung 10.4: Hauptmärkte nach 2015 [6]

Ab 2015 (Abbildung 10.4) wurde das Gesundheitswesen als führende Branche für die Anwendung der Mikrofertigung identifiziert. Energie gilt als zweitwichtigste Branche, gefolgt von Transport und IKT.

### 10.3.3 Zukünftige Anwendungen und Technologien

Nachdem die wichtigsten Zukunftsmärkte für die Mikrofertigung identifiziert wurden, ist es ebenso wichtig, die Anwendungen der Mikrofertigung im Zukunftsmarkt zu identifizieren. In diesem Teil stellen wir die wichtigsten zukünftigen Anwendungen vor und werfen einen genaueren Blick in die Zukunft der Mikroteile und der Mikrofertigungstechnologien. Abbildung 10.5 zeigt die wichtigsten Anwendungen der Mikrofertigung auf einer Zeitachse.

	Time period (year)		
	2011-2013	2013-2015	2015 on
Major Application of MicroManufacturing	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Micro fuel cells</li> <li>• Microfluidics</li> <li>• Development of point-of-care devices</li> <li>• Further development of MicroManufacturing sensors</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integration of nano/micro technologies</li> <li>• Replication methods</li> <li>• Multi-material microinjection molding</li> <li>• Further development of microactuators</li> <li>• Knowledge-based manufacturing systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Micro-cell power</li> <li>• Energy harvesting systems</li> <li>• Further development in solar cells manufacturing</li> <li>• Further development in thin-film technology</li> <li>• Energy storage devices based on flexible substrates</li> <li>• Polymeric-based point-of-care facilities. Wearable medical devices</li> <li>• Knowledge-based manufacturing systems</li> </ul>

Abbildung 10.5: Wichtige zukünftige Anwendungen der Mikrofertigung [5]

#### 10.3.3.1 Die Zukunft der Mikroteile

Mikrokomponenten sind die Verbindung zwischen Anwendungen und Technologien. Aus der Perspektive der Anwendung sind sie einige der Schlüsselkomponenten, die wesentliche oder zusätzliche Funktionalität bieten. Aus technologischer Sicht sind Mikrokomponenten das Ergebnis einer einzigen Technologie oder einer Reihe von Replikations-, Strukturierungs-, Beschichtungs- und Montagetechniken (einer Prozesskette). Auf der Grundlage der Ergebnisse einer MINAM-Umfrage gelten Mikrokomponenten als "zentrale Frage" für die Zukunft der Mikrofertigung. Abbildung 10.6 und Abbildung 10.7 veranschaulichen die aktuelle und zukünftige Bedeutung der Mikroteile.

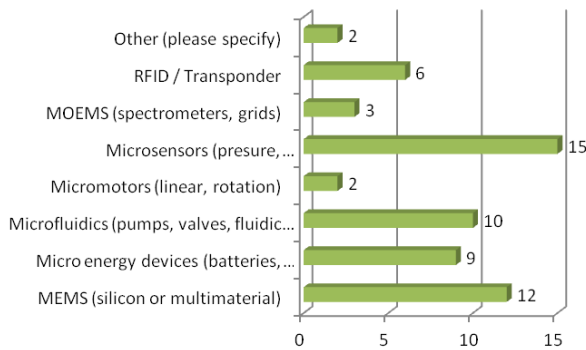


Abbildung 10.6: Die aktuelle Bedeutung von Mikrokomponenten [6]

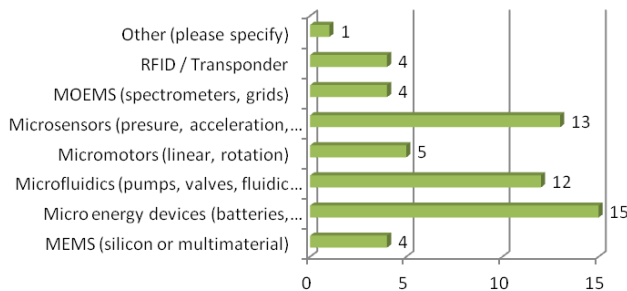


Abbildung 10.7: Die künftige Bedeutung von Mikrokomponenten [6]

Abbildung 10.6 und Abbildung 10.7 zeigen, dass Mikrosensoren in Zukunft das wichtigste Mikroteil sein werden. Silizium oder multilayerale MEMS werden nicht als sehr signifikant angesehen; trotzdem bleiben sie immer noch am zweitwichtigsten. Mikrofluidik- und Mikroenergie-Geräte werden als neue wichtige Mikrobauteile und mögliche Engpässe auftauchen. Die anderen Komponenten besitzen nicht das gleiche Maß an Bedeutung.

### 10.3.3.2 Die Zukunft der Mikrofertigungstechnologien

Die Mikrofertigung setzt Techniken ein zur Herstellung von mikrogroßen Komponenten und Strukturen. Dementsprechend beinhalten die Mikrofertigungstechnologien die Verkleinerung der gängigsten und am weitesten verbreiteten Bearbeitungsverfahren (z.B. Fräsen und Bohren). Auf der Ebene der Mikroskala bezeichnet man diese Technologien als Mikrotechnologien (z. B. Mikrobohrung, Mikrobearbeitung, Mikroprägung).

Wir schauen uns nun zwei Mikrofertigungstechnologien und ihre Zukunftsperspektiven genauer an, nämlich Replikationstechnologien und Mikrostrukturierungstechnologien.

### **Replikationstechnologien**

Mikrospritzgießen ist eine der wichtigsten Replikationstechnologien. In den letzten Jahren wurde das Mikrospritzgießen anerkannt und als Technologie für die Massenproduktion von polymerbasierten Komponenten mit Mikro- oder Nano-Strukturen oder strukturierter Oberflächentopographie angewendet. Das Mikrospritzgießen gilt auch als effiziente, zuverlässige und kostengünstige Technologie zur Replikation von Polymer-Mikroteilen. Die Trends beim Mikrospritzgießen deuten darauf hin, dass dies eine der wichtigsten Technologien für den Einsatz in der Mikrofertigung sein wird.

Im Folgenden präsentieren wir die zukünftigen Trends beim Mikrospritzgießen und in den Replikationstechnologien [6].

- Es gibt einen klaren Trend zum Mikro-Rapid-Prototyping. Die Herstellung von Spritzgusswerkzeugen wurde durch Techniken wie Mikro-Rapid-Prototyping-Verfahren und Technologien wie Mikrostereolithographie erleichtert. Dieses Verfahren wird für sehr kleine Produktionsmengen eingesetzt.
- Die Replikation von nano- und mikrogroßen Komponenten ist ein weiterer wichtiger Trend. Dies ist bedeutsamer für Komponenten mit hohem Seitenverhältnis (d.h. Komponenten mit optischen Eigenschaften).
- Es gibt einen Trend zur Entwicklung kleinerer Sensoren, die eine präzisere Überwachung und Steuerung von Prozessen ermöglichen.
- Ein wesentlicher Trend hängt zusammen mit der Entwicklung und dem Einsatz neuer Materialien (z.B. Bulk-metallische Gläser), um die Herausforderungen im Replikationsprozess zu meistern.
- Ein weiterer wichtiger Trend betrifft die Funktionsintegration. Dies führt zu Möglichkeiten für Technologien wie beispielsweise 3D-MID (Moulded Interconnect Devices), Druckverfahren, Mehrkomponentenspritzgießen, Laserdirektstrukturierung und Polymerfilm-basierte Technologie.

### **Mikrostrukturierungstechnologien**

Mikrostrukturierungstechnologien wie Mikrofrästechnologien ermöglichen die erforderliche 3D-Strukturierung einer breiteren Palette von Materialien. Allgemein werden für Mikrobearbeitungsverfahren die gleichen Materialien eingesetzt, wie in Makrofertigungsverfahren. Daher ist die Bandbreite an Materialien ziemlich groß und umfasst Metalle, Polymere, Keramiken und Glas.

Im Folgenden präsentieren wir die zukünftigen Trends bei den Mikrostrukturierungstechnologien [6].

- Die wichtigsten Bereiche der Mikrostrukturierungstechnologie werden in Zukunft das Laserschneiden, die Stereolithographie, Drahterodieren und reaktives Iontiefenätzen sein.
- Für das Mikroschneiden gibt es mehrere wichtige technologische Trends, einschließlich der Erstellung fortschrittlicher Modelle und Strategien, die darauf abzielen, die Herausforderung der Wärmeausdehnung von Mikro-Fräswerkzeugen zu überwinden, die Analyse des Verschleißverhaltens ultra-kleiner Mikro-Schneidwerkzeuge und die Entwicklung von Modellen und Techniken zur präzisen Vorhersage von Mikrowerkzeugbruch.
- Für die Lasermaterialbearbeitung gibt es einen signifikanten Trend in Richtung grüne Energietechnologien. Außerdem werden einige Technologien wie Mikrobohren, Laser-Mikro Ritzen, und Dünnschichtstrukturierung und Strukturierung weiter verbreitet sein.
- Ein weiterer signifikanter Trend im Bereich der Laserbearbeitung ist die Verwendung ultraschneller Lasersystemen anstelle von Nanosekunden-Laserpulsen.

## 10.4 Geschäftsmodelle für die Mikrofertigung

Vor kurzem ist der Begriff "Geschäftsmodell" in vielen Management-Publikationen aufgetaucht. Auch wenn der Begriff in Mode gekommen ist und er viel Aufmerksamkeit erhalten hat, herrscht immer noch Unklarheit darüber, was genau ein Geschäftsmodell ist und wie es von den Unternehmen eingesetzt werden kann. Wie ein Unternehmen die Begriffe "Geschäftsmodell" und "Strategie" differenzieren kann und somit den Aufbau eines Geschäftsmodells konsequent betreibt, um eine bestimmte Strategie zu verfolgen, wird nach wie vor als Herausforderung betrachtet.

### 10.4.1 Was ist ein Geschäftsmodell?

Seit der ersten Verwendung des Begriffs "Geschäftsmodell" durch Jones im Jahr 1960 [10] wurden unterschiedliche Definitionen vorgeschlagen, die den Begriff und seine Rolle erklären sollen. Diese Definitionen spiegeln verschiedene Perspektiven wider, die mit einem Geschäftsmodell abgedeckt werden können, z.B. Wertschöpfung, Vereinfachung eines komplexen Systems, Geldschöpfung, Darstellung des Verhaltens eines Unternehmens, usw. In der späten 90er Jahren präsentierte Timmers eine der ersten strukturierten, aber dennoch einfachen Definitionen des Begriffs Geschäftsmodell. Er beschrieb Ge-

schäftsmodell als eine allgemeine Architektur für den Produkt-, Service- und Informationsfluss [11]. Petrovic, et al. [12] folgten der Logik von Linder und Cantrell [13] und führten den Begriff Wertschöpfung als wichtigste Komponente eines Geschäftsmodells ein. Magretta und Stähler gingen einen Schritt weiter, indem sie "Geschäftsmodell" von "Strategie" unterscheiden [14]. Sie beschrieben ein Geschäftsmodell als ein System, das zeigt, wie die verschiedenen Teile eines Geschäfts zusammenpassen, um eine bestimmte Strategie zu verfolgen. Im Jahr 2004 präsentierte Osterwalder seine weit gefasste Definition: Geschäftsmodell ist ein konzeptionelles Werkzeug, das eine Reihe von Elementen und deren Beziehungen enthält und das zum Ausdruck bringt, wie ein Unternehmen Geld verdienen möchte. Es beschreibt den Wert, den ein Unternehmen für ein oder mehrere Kundensegmente anbietet, sowie die Architektur des Unternehmens und sein Netzwerk an Partnern für die Erstellung, Vermarktung und Bereitstellung dieses Wertes und Beziehungskapitals, um profitable und nachhaltige Umsatzströme zu generieren [15]. Später schlugen Osterwalder und Pigneur ein Business Model Canvas vor, als Werkzeug zur Realisierung der vorherigen Definition des Geschäftsmodells [16].

In dieser Studie wird Geschäftsmodell als ein Instrument verstanden, das eine Reihe strategischer Entscheidungen und Alternativen umfasst, die einem Unternehmen helfen, verschiedene Formen eines Wertes innerhalb einer Wertschöpfungskette zu erstellen, zu liefern und zu erfassen [17]. Abbildung 10.8 zeigt das Konzept eines Geschäftsmodells und seine Beziehung zu Strategie und Vision in einem Unternehmen.

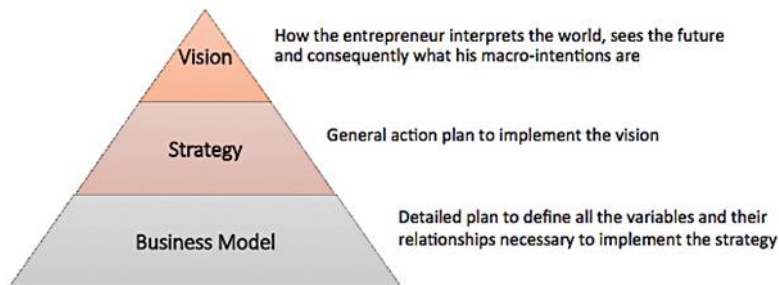


Abbildung 10.8: Das Konzept des Geschäftsmodells

Das Geschäftsmodell ist eine Zwischenschicht zwischen Strategie und operativer Umsetzung, die eine ganzheitliche Sicht auf das Unternehmen ermöglicht. Es macht alle Design-Variablen deutlich, die für den Erfolg in Betracht gezogen werden müssen, um lokale Optimierungsansätze (der Technik, Supply Chain, usw.) zu überwinden. Es stellt auch sicher, dass alle Variablen angepasst und miteinander vereinbar sind (d.h. es macht keinen Sinn, ein "Bezahlen-nach-Maschinenverfügbarkeit"-Konzept anzubieten, wenn die Ma-

schinen kein Fernüberwachungssystem besitzen und ein IT-System sowie ein System für die Datenerfassung fehlen.) Darüber hinaus macht es ein Geschäftsmodell möglich, zu einem detaillierten Prozess- und Technologie-Design zu gelangen, nachdem man sich über die Säulen des Unternehmens geeinigt hat und Unstimmigkeiten auf Systemebene gelöst wurden. Ein Geschäftsmodell vermittelt Investoren und wichtigen Akteuren auch einen genaueren Eindruck über die Unternehmensziele und in welcher Weise die Unternehmer beabsichtigen, das Unternehmen zu strukturieren, um die Ziele zu erreichen.

#### 10.4.1.1 Geschäftsmodellelemente

Ein Geschäftsmodell kann als ein System verstanden werden, das aus mehreren Komponenten besteht. Basierend auf dem Ziel und der Struktur des Geschäftsmodells verändern sich die Komponenten von einem Modell zum anderen. Die Elemente eines Geschäftsmodells ermöglichen die Erfüllung seiner Ziele. Folglich hängen sie auch, zu einem großen Teil, von der Definition des Begriffes ab. In den letzten zehn Jahren und im Verlauf der Entwicklung des Konzepts wurden mehrere Vorschläge in der Literatur vorgestellt, die die wichtigsten Bausteine eines Geschäftsmodells definieren. Einige dieser Modelle bauen auf einigen allgemeinen Bausteinen auf [18-20]; andere berücksichtigen spezifischere und detailliertere Bausteine, die auch die verschiedenen Teile einer Wertschöpfungskette in Betracht ziehen [16, 21]. Tabelle 10.4 zeigt eine Zusammenfassung der Vorschläge für Geschäftsmodellkomponenten in den letzten zehn Jahren.

Tabelle 10.4: Geschäftsmodellelemente

Referenz	Geschäftsmodellkomponenten
Chesbrough & Rosenbloom (2002)	Wertangebot, Marktsegment, Struktur der Wertschöpfungskette, Kostenstruktur, Position des Unternehmens innerhalb des Wertschöpfungsnetzes, Formulierung der Wettbewerbsstrategie
Afuah (2004)	Aktivitäten, Ressourcen, Positionen, Industrie-Faktoren, Kosten
Shafer et al. (2005)	Strategische Entscheidungen, Wertschöpfung, Wertschöpfungsnetzwerk, Werterfassung
Doganova & Renault (2009)	Wertangebot, architektonischer Wert, Umsatzmodell
Osterwalder & Pigneur (2010)	Key-Ressourcen, Key-Partner, Key-Aktivitäten, Wertangebot, Kanäle, Kundensegment, Kundenbeziehung, Kostenstrukturen, Einnahmequellen

Chesbrough & Rosenbloom definierten 6 Blöcke in ihrem Geschäftsmodell. Sie beabsichtigten, verschiedene Teile der Wertschöpfungskette in den definierten Bausteinen abzudecken; allerdings sind die Blöcke nicht genau auf der gleichen Ebene (z.B. Formulierung der Wettbewerbsstrategie vs. Struktur der Wertschöpfungskette). Zum Beispiel bezieht



sich der Block, der sich auf die Struktur der Wertschöpfungskette bezieht, hauptsächlich auf die Erstellung und Lieferung eines Wertangebots, während die Formulierung der Wettbewerbsstrategie auf die Definition und das Erreichen eines Wettbewerbsvorteils für das Unternehmen abzielt [21]. Afuah entwickelte einen strategischen Management-Ansatz, um die Bausteine eines Geschäftsmodells zu definieren. Sein Modell umfasst vier Dimensionen, die in interne (firmenspezifische Faktoren) und externe Faktoren (Branchenfaktoren) unterteilt sind [18]. Die Kombination dieser Faktoren hilft einem Unternehmen ein erfolgreiches Geschäftsmodell zu entwerfen. Später haben Shafer et al. vier Hauptelemente eines Geschäftsmodells vorgeschlagen: strategische Entscheidungen, Wertschöpfungsnetzwerk, Mehrwert erzeugen und Mehrwert nutzen [20]. Während strategische Entscheidungen mit internen Geschäftspraktiken in Zusammenhang stehen, wie Strategie, Branding, Wertangebot, usw., fokussiert sich das Wertschöpfungsnetzwerk auf die Interaktion des Unternehmens mit externen Partnern wie Lieferanten und Kundenbeziehungen. Die Finanzstruktur des Geschäftsmodells wird durch die beiden anderen Kategorien "Mehrwert erzeugen" und "Mehrwert nutzen" abgedeckt. Die erste Kategorie befasst sich mit den Ressourcen und Verfahren des Unternehmens, die zweite konzentriert sich auf die Kosten- und Ertragsstruktur. Im Jahr 2009 definierten Doganova und Renault die Struktur ihres Geschäftsmodells auf der Grundlage von drei wichtigen Bausteinen: Das Wertangebot, das sich auf das angebotene Produkt oder eine Dienstleistung für die Kunden konzentriert; der Architektur-Wert zur Verwaltung von Interaktionen mit Partnern und zur Festlegung der richtigen Kanäle, um ein Produkt / eine Dienstleistung an Endkunden zu liefern; sowie das Umsatzmodell, das die finanziellen Aspekte eines Unternehmens abdeckt [19].

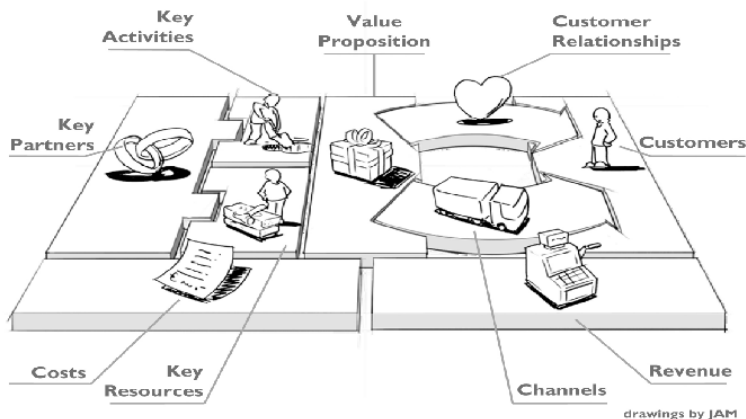


Abbildung 10.9: Business Model Canvas [22]

Kürzlich haben Osterwalder und Pigneur ein Business Model Canvas vorgeschlagen, das aus 9 unterschiedlichen Elementen besteht [16]. Jedes Element ist so konzipiert, dass es einen bestimmten Teil der Wertschöpfungskette abdeckt, so dass die gesamte Wertschöpfungskette mit dem Business Model Canvas angesprochen werden kann. Die Leinwand (Canvas) kann logisch in drei Bereiche unterteilt werden: Die linken Blöcke beziehen sich auf die Effizienz (Schlüsselpartner, wichtige Aktivitäten, wichtige Ressourcen und Kostenstruktur), die rechten Blöcke beziehen sich auf Wertelieferung (Kundensegment, Kundenbeziehung, Kanäle und Einnahmequellen) und schließlich das Wertangebot, das in der Mitte angeordnet ist und als Bindeglied dient, um beide Seiten der Leinwand zu verbinden. Abbildung 10.9 veranschaulicht das Business Model Canvas.

Unsere Überlegungen zu Geschäftsmodellen und ihren konstituierenden Elementen werden in Abbildung 10.10 unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Elemente des oben beschriebenen Geschäftsmodells und der anderen skizzierten Modelle dargestellt.

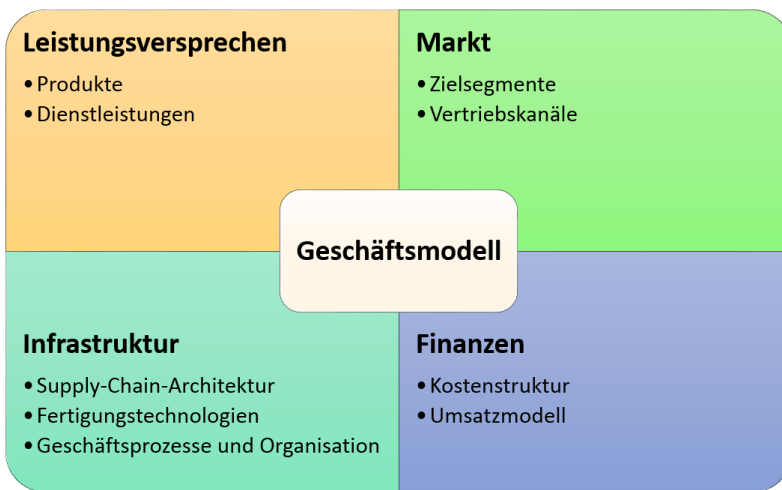


Abbildung 10.10: Konstituierende Elemente eines Geschäftsmodells

Wie in Abbildung 10.10 dargestellt, besteht das Geschäftsmodell aus vier Hauptbausteinen: Wertangebot, Markt, Infrastruktur und Finanzen. Im Wertangebot-Block wird festgelegt, was ein Unternehmen in Form von Produkten und Dienstleistungen anbietet (z.B. Werkzeugmaschinen, Softwarelösungen, Wartung, usw.). Der Markt-Block beschreibt die Kunden, an die das Wertangebot gerichtet ist, und die Vertriebskanäle, die genutzt werden, um das Wertangebot an den Kunden zu bringen. Der Infrastruktur-Block legt fest, wie das Unternehmen den Markt mit dem Wertangebot beliefert. Dies beinhaltet: die Supply-Chain-Architektur und eine Beschreibung dessen, was das Unternehmen intern produziert,

was es kauft oder an andere Unternehmen auslagert, die Art der Beziehungen mit anderen Supply-Chain-Unternehmen; die Fertigungstechnologien und die Herstellungsprozesse; sowie den Geschäftsprozess oder die interne Organisation und die Fähigkeiten zur Herstellung, Beschaffung, Marketing und Lieferung des Wertangebots. Der Finanz-Block schließlich beschreibt die finanziellen Mechanismen, durch die das Unternehmen Gewinne aus der Versorgung des Marktes mit dem Wertangebot realisiert. Dazu gehört auch die Kostenstruktur für alle Aktivitäten, die erforderlich sind, um die Produkte auf den Markt zu bringen sowie das Umsatzmodell, durch welches das Unternehmen seine Kosten deckt und Gewinne erzielt.

## 10.4.2 Innovative Geschäftsmodelle

Seit einigen Jahren ist die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle in verschiedenen Branchen und Sektoren eindeutig zu beobachten. In der Tat wird davon ausgegangen, dass ein innovatives Geschäftsmodell ein leistungsstarkes Werkzeug für den zukünftigen Erfolg eines Unternehmens ist. Es gibt unterschiedliche Treiber für die Geschäftsmodell-Innovation, zum Beispiel:

- Markt: Kundenanforderung (z.B. in der Automobilindustrie, OEMs (Original Equipment Manufacturer) fragen verstärkt nach einer Gesamtbetriebskosten-Garantie ("Total Cost of Ownership").
- Technologie: Eine neue Technologie steht zur Verfügung zur Unterstützung neuer Prozesse oder zur besseren oder effizienteren Unterstützung bestehender Prozesse (d.h. das Internet und Fortschritte in der IT haben das Geschäftsmodell E-Commerce möglich gemacht).
- Wettbewerber: Das neue Geschäftsmodell wird der neue Standard auf dem Markt (d.h. Kopiergeräte-Sektor, "pay per click" Werbung im Internet)

Die Innovation in Bezug auf ein Geschäftsmodell kann entweder inkrementell oder radikal sein. Ein Geschäftsmodell ist inkrementell innovativ, wenn einige seiner Komponenten innovativ sind. Zum Beispiel: Anbieten innovativer Produkte oder Dienstleistungen, Erschließung neuer Marktsegmente, die noch nicht bedient werden, Erzeugen neuer Umsatzmechanismen, Entwickeln neuer Supply-Chain-Konfigurationen, usw. Auf der anderen Seite wird eine radikale Innovation des Geschäftsmodells erreicht, wenn alle Geschäftsmodellvariablen sich gemeinsam und einheitlich entwickeln (innovative Produkte/Dienstleistungen, die mit neuen Zahlungsmechanismen angeboten werden, die eine innovative Infrastruktur erfordern). Empirische Daten belegen, dass eine inkrementelle Geschäftsmodellinnovation manchmal zu einem schweren Versagen führen kann, wenn man davon ausgeht, dass sich bestimmte Aspekte des Unternehmens radikal entwickeln –

isoliert, dann jedoch durch bestehende Modellkomponenten oder Systeme nur unzureichend unterstützt werden.

Einige Beispiele für Geschäftsmodellinnovation sind:

- Service und Servitization: Ein Geschäftsmodell kann innovativ sein, wenn das Wertangebot Dienstleistungen umfasst, und es sich bei den angebotenen Dienstleistungen um solche mit hohem Mehrwert handelt; das bedeutet, dass sie darauf ausgerichtet sind, ein Geschäftsergebnis für die Kunden zu unterstützen (Garantie), anstatt Kunden bei der Verwendung physischer Produkte zu unterstützen.
- Aus der Infrastruktur-Perspektive kann ein Geschäftsmodell innovativ sein, wenn: 1) Es einen breiten Rückgriff gibt auf Vernetzung und Supply-Chain-Partnerschaften im Vergleich zur vertikalen Integration. 2) Eine prozessorientierte Organisation angenommen wird. 3) Moderne Fertigungstechnologien für die Herstellung eingesetzt werden. 4) Es eine integrierte Lieferkette für die Fertigung/de-Fertigung umfasst.
- Aus finanzieller Sicht kann ein Geschäftsmodell innovativ sein, wenn die Umsätze des Anbieters mit den Ergebnissen verknüpft sind und nicht mit dem Austausch physischer Produkte (Bezahlung pro Ergebnissen anstatt Verkauf von Produkten). In diesem Fall übernimmt der Lieferant (einen Teil) der operativen Risiken des Kunden und wird dafür entschädigt.

### **10.4.3 Aktuelle Geschäftsmodelle für die Mikrofertigung**

Derzeit können die Geschäftsmodelle, die von den Akteuren im Mikrofertigungsmarkt eingesetzt werden, in zwei Kategorien unterteilt werden:

1. Ein traditionelles Geschäftsmodell für den Verkauf von Maschinen; bei diesem Modell kauft ein Unternehmen die Mikrofertigungsanlagen von den Maschinenherstellern und betreibt sie im eigenen Haus.
2. Ein Geschäftsmodell für Produktionsdienstleistungen; bei diesem Modell besitzt ein Unternehmen mehrere Mikrofertigungsanlagen sowie Kompetenz in dem Verfahren und bietet die Produktion als Dienstleistung für die Hersteller an.

Im Folgenden beschreiben wir jedes Geschäftsmodell und seine Besonderheiten.

#### **10.4.3.1 Traditioneller Verkauf von Maschinen**

Der Verkauf von Maschinen ist ein traditionelles Geschäftsmodell, bei dem der Hersteller der Mikrofertigungsanlagen (Lieferant) das physisch greifbare Produkt (Mikrofertigungs-

anlage) an den Benutzer der Mikrofertigungstechnik (Kunde) verkauft. Darüber hinaus werden After-Sales-Dienstleistungen als notwendige Ergänzungen zu den physischen Produkten angesehen. Bei diesem Geschäftsmodell erfolgt der Betrieb im Haus und der Kunde (Benutzer der Technik) ist für den Betrieb der Maschinen verantwortlich.

Abbildung 10.11 zeigt die Konfiguration eines traditionellen Geschäftsmodells für den Maschinenverkauf, bei dem die Features des Geschäftsmodells für jede Innovationsdimension herausgestellt werden. Es sollte erwähnt werden, dass die aktuelle Konfiguration auf der Grundlage der von Copani et al. vorgeschlagenen Methodik für die Konfiguration neuer Geschäftsmodelle entwickelt wurde. [22].

Innovation dimensions		Options				
Operating personnel		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer	
Maintenance personnel		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer	
Location		Equipment producer	Third party	"Fence to Fence" to the customer	Customer	
Payment modus		Pay per Part	Pay per Use (Rent)	Pay for availability	Fixed rate	
Ownership	During phase of use	Equipment producer	Equipment producer	Equipment producer	Equipment Producer	Leasing bank
	After phase of use				Equip. Producer	Leasing bank
Procurement of raw materials		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer	
Transport of final products		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer	

Abbildung 10.11: Konfiguration für den traditionellen Verkauf von Maschinen

Die grünen Kreise in Abbildung 10.11 stellen die Features des Geschäftsmodells in Bezug auf die Innovationsdimensionen dar. Wie man sehen kann, werden alle Dimensionen in diesem Geschäftsmodell vom Kunden abgedeckt. Dazu gehören Bereiche wie Betriebspersonal, Wartung, Beschaffung, Transport usw.

#### 10.4.3.2 Produktionsdienstleistung

Mikrofertigungstechnologien können für die Mikroproduktion in vielen Bereichen des Marktes als Wegbereiter fungieren. Allerdings stellt die Annahme eines traditionellen Geschäftsmodells Herausforderungen wie hohe Investitions- und Folgekosten, Mangel an Kompetenz und Ressourcen sowie Änderung traditioneller Produktionsprozesse dar. Um diese Herausforderungen zu überwinden (und das Risiko zu minimieren) werden Ge-

schäftsmodelle übernommen, um Produktionsdienstleistungen anzubieten; dabei kann ein Unternehmen, das mehrere Arten von Mikrofertigungsmaschinen besitzt, als externer Fachpartner auftreten. Diese Geschäftsmodelle werden Produktionsdienstleistung genannt. Ein Geschäftsmodell für Produktionsdienstleistungen zur Mikrofertigung basiert darauf, dem Kunden die Dienstleistung der Produktion oder das Prototyping von Endprodukten anzubieten, durch Verwendung verschiedener Mikrofertigungstechnologien, die im Besitz des Anbieters sind. Neben der physischen Produktionsdienstleistung bietet der Anbieter in der Regel auch andere Dienstleistungen an, die mit Produkt-/Prozess-Design, Produkt-Industrialisierung, usw. zu tun haben. Abbildung 10.12 veranschaulicht die Konfiguration des Geschäftsmodells Produktionsdienstleistung.

Innovation dimensions		Options				
Operating personnel		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer	
Maintenance personnel		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer	
Location		Equipment producer	Third party	"Fence to Fence" to the customer	Customer	
Payment modus		Pay per Part	Pay per Use (Rent)	Pay for availability	Fixed rate	
Ownership	During phase of use	Equipment producer	Equipment producer	Equipment producer	Equipment Producer	Leasing bank
	After phase of use	Equipment producer	Equipment producer	Equipment producer	Equip. Producer	Leasing bank
Procurement of raw materials		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer	
Transport of final products		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer	

Abbildung 10.12: Konfiguration eines Geschäftsmodells für Produktionsdienstleistungen

Wie in Abbildung 10.12 gezeigt, spielt der Gerätehersteller eine entscheidende Rolle im Geschäftsmodell Produktionsdienstleistungen. Viele Aktivitäten wie Wartung, Beschaffung und Transport werden durch den Gerätehersteller durchgeführt, während der Betrieb in der Fabrik des Geräteherstellers mit dessen eigenem Personal stattfindet. Bei einem Geschäftsmodell für Produktionsdienstleistungen tritt das Unternehmen als Anbieter von Mikrofertigungsleistungen und Lösungen auf. Während das Kern-Wertangebot des Unternehmens in der Regel auf Produktionsdienstleistungen fokussiert ist, kann es zusätzliche Wertangebote wie Engineering und Softwareentwicklung anbieten. Um dieses Geschäftsmodell verwirklichen zu können, benötigt das Unternehmen einen großen Maschinenpark an Mikrofertigungsmaschinen und -anlagen, um die Produktion kundenspezifischer Prototypen und Teile für die Endkunden zu gewährleisten. Üblicherweise spezialisiert sich der

Anbieter in einem Bereich der Mikrofertigungstechnologien. Die Zielmarktsegmente umfassen in der Regel mehrere Sektoren; die wichtigsten Endmärkte sind: Medizinische Geräte (Gesundheitswesen), Elektronik, Maschinen, Biotech, Militär, Luft- und Raumfahrt, usw.



Abbildung 10.13: Elemente eines Geschäftsmodells für Produktionsdienstleistungen

Abbildung 10.13 zeigt die Elemente des Geschäftsmodells Produktionsdienstleistungen.

Eines der bemerkenswertesten Beispiele von Unternehmen, die dieses Geschäftsmodell im Mikrofertigungsmarkt anwenden ist die Firma Materialise. Materialise ist ein Unternehmen mit Sitz in Belgien, das seinen Kunden additive Fertigungsdienstleistungen (AM) anbietet. Das Unternehmen bietet seinen Kunden Dienstleistungen wie Herstellung und Prototyping von Teilen und Produkten, Softwareentwicklung für die Besitzer von AM-Anlagen, Engineering- und Design-Service, sowie Co-Kreation durch Online-3D-Printing-Service für Endanwender (i.materialise) an.

#### 10.4.4 Innovative Geschäftsmodelle für die Mikrofertigung

Neue Trends auf dem Markt für Mikrofertigung erfordern die Erstellung und Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle, welche die neue technologische Entwicklung aufnehmen können, um die aufkommenden Bedürfnisse der Nutzer zu befriedigen. Wie bereits erwähnt, kann die Innovation in unterschiedlichen Elementen eines Geschäftsmodells basierend auf dem ultimativen Ziel des Unternehmens stattfinden. Das Gleiche gilt für Mikrofertigungsunternehmen. Innovative Geschäftsmodelle können die verschiedenen Aspekte

reflektieren. In diesem Abschnitt stellen wir drei Beispiele innovativer Geschäftsmodelle für die Mikrofertigung vor.

#### **10.4.4.1 Personalisierte Fertigung für das Gesundheitswesen durch enge Zusammenarbeit mit Krankenhäusern**

Heute fragen Kunden nach Produkten, die auf der Basis ihrer individuellen Bedürfnisse und Wünsche entwickelt und hergestellt werden. In einigen Branchen, z.B. im Gesundheitswesen, ist die Herstellung personalisierter medizinischer Geräte und Produkte von entscheidender Bedeutung und hat mehr Aufmerksamkeit erhalten, da sie die Lebensqualität der Patienten direkt betrifft. In der Tat sind die Trends hin zu einer alternden Bevölkerung, kombiniert mit einer raschen technologischen Entwicklung, für den Gesundheitssektor von besonderem Interesse für die Produktion kundenspezifischer medizinischer Geräte [23]. In den bestehenden Geschäftsmodellen erhält der Kunde personalisierter medizinischer Geräte das Endprodukt vom Anbieter. Allerdings gibt es erhebliche Hindernisse und Herausforderungen für das bestehende Geschäftsmodell, wie zum Beispiel:

- Zeitaufwändiger Prozess der Lieferantenauswahl, Bestellung, Gestaltung, Herstellung und Lieferung des Produkts (für Krankenhäuser).
- Keine oder sehr geringe Interaktion zwischen dem medizinischen Personal (z.B. Chirurg im Falle von implantierbaren Geräten) und dem Hersteller während der Designphase.
- Hohe Kosten für das Endprodukt.
- Keine wirkliche Personalisierung und ein begrenztes Maß an Anpassung, aufgrund der hohen Kosten.

Mikrofertigungstechnologien können als echte Wegbereiter für die Produktion personalisierter medizinischer Geräte dienen. Um die aktuellen Hindernisse zu überwinden, kann die Herstellung personalisierter medizinischer Geräte in der Nähe oder im Krankenhaus stattfinden. Dies kann zu einem höheren Maß an Integration zwischen Herstellern und Krankenhäusern führen und sogar die Rolle der Krankenhäuser vom Benutzer zum Hersteller dieser Geräte verändern. Die Umsetzung dieses Ansatzes führt zur Fertigung kundenspezifischer medizinischer Geräte in den Krankenhäusern. Allerdings erfordert diese Strategie die Entwicklung und Umsetzung eines innovativen Geschäftsmodells, um eine derart radikale Integration eines Produkt-Service-Systemkonzepts zu erleichtern [23]. Neue Geschäftsmodelle müssen eingeführt werden, um die Krankenhäuser in die allgemeine Bereitstellung personalisierter medizinischer Geräte zu integrieren. Abbildung 10.14 zeigt zwei Beispiele einer Konfiguration eines Geschäftsmodells für die personalisierte Fertigung im Gesundheitswesen.



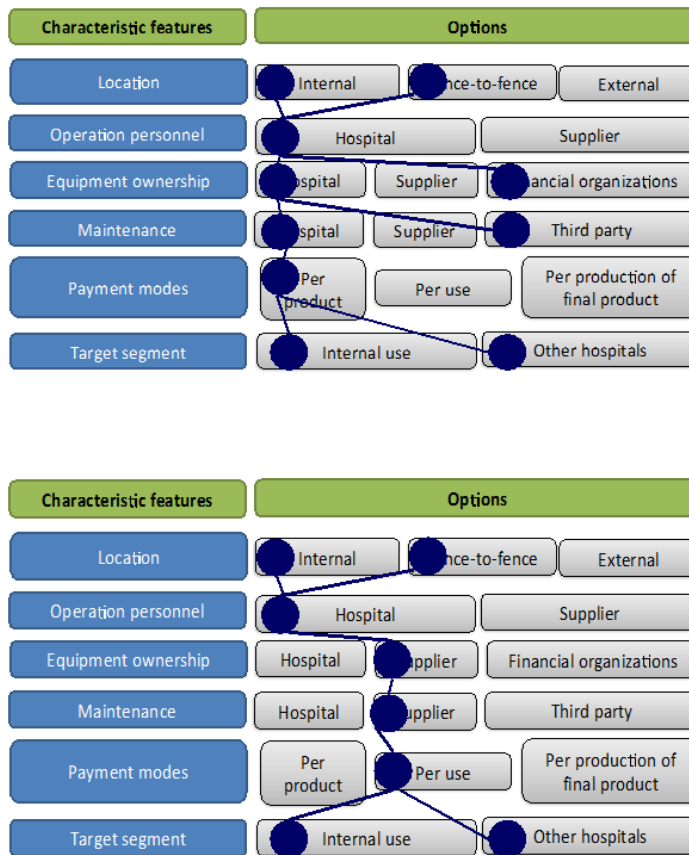


Abbildung 10.14: Beispiele einer Konfiguration eines Geschäftsmodells für die personalisierte Fertigung im Gesundheitswesen (übernommen aus [23])

Die Geschäftsmodell-Konfiguration oben zeigt ein Szenario, in dem die Mikrofertigungsanlagen dem Krankenhaus gehören. Allerdings erfolgt die Herstellung entweder im Haus oder Fence-to-Fence. Das interne Krankenhauspersonal ist verantwortlich für den Herstellungsbetrieb; die Bezahlung erfolgt pro gekaufter Maschine.

Die Geschäftsmodell-Konfiguration unten zeigt ein Szenario, das darauf basiert, dem Krankenhaus die Nutzung der Maschinen anzubieten, anstatt diese direkt zu kaufen. In diesem Fall sind die Mikrofertigungsanlagen Eigentum der Lieferanten und diese sind auch für die Wartung der Mikrofertigungsanlagen verantwortlich; das Krankenhaus erwirbt das Recht zur Nutzung der Maschinen von den Anbietern der Mikrofertigungsmaschinen entweder durch Leasing oder Miete. Die Produktion findet immer noch im oder in der Nähe des Krankenhauses statt [23].

Daher ermöglichen beide Konfigurationen die Umsetzung eines neuen Geschäftsmodells, bei dem die Produktion personalisierter Medizinprodukte durch die Anwendung der Mikrofertigungstechnik realisiert wird und der Grad der Integration im Krankenhaus ziemlich hoch ist. Ein solches Geschäftsmodell bringt Vorteile durch verringerte Durchlaufzeit, verbesserten Service für die Patienten, eine Verbesserung ihrer Lebensqualität, kosteneffizientere Herstellung dieser personalisierten Geräte und eine bessere Nutzung der Chirurgie und medizinischen Prozesse. Das Geschäftsmodell enthält jedoch einige Herausforderungen, zum Beispiel strenge Vorschriften und Standards im Gesundheitswesen für die Inhouse-Produktion, Zertifizierung des Endprodukts und die Gewährleistung der anhaltenden wirtschaftlichen Nachhaltigkeit.

#### 10.4.4.2 Mikro-Fabrik

Die relativ kleinen Mikrofertigungsanlagen können auch innovative "Mikro-Fabriken" ermöglichen, die in kleinen Räumen wie Büros oder sogar in Häusern untergebracht werden können. Mikro-Fabrik oder Desktop-Fertigung bezieht sich auf miniaturisierte Produktionsanlagen wie Mikrobearbeitungseinheiten, Roboterzellen und Mikro-Rapid-Prototyping-Anlagen. Eine Mikro-Fabrik (Desktop) passt in der Regel auf einen Tisch, ist mobil und voll integriert. Sie ist idealerweise modular und ermöglicht die Herstellung kleiner (mikrogroßer) Teile und Produkte. Dank der geringen Abmessungen der Mikro-Fabrik kann die Produktion in der Lieferkette nachgelagert und sogar bis zum Point of Sale verschoben werden. Unter Berücksichtigung der hochentwickelten Mikrofertigungstechnologien, die in einer Fabrik im Mini-Maßstab verwendet werden, ermöglichen Mikro-Fabriken die effiziente und effektive Herstellung von Mikrobauteilen. Darüber hinaus ermöglicht das Geschäftsmodell Mikro-Fabrik die effiziente Produktion personalisierter Produkte. In einigen Fällen kann sogar der Benutzer eines bestimmten Produkts durch Aufbau einer Mikro-Fabrik für die Inhouse-Produktion selbst zum Hersteller werden. Dieses Fertigungs- und Geschäftsmodell im kleinen Maßstab kann in vielen Bereichen angewendet werden. Abbildung 10.15 zeigt Beispiele von Mikro-Fabriken.



Abbildung 10.15: Beispiele für Mikro-Fabriken [24]

Die Anwendung des Konzepts Mikro-Fabrik als neues Geschäftsmodell bringt Vorteile für das Unternehmen. Ein gutes Beispiel hierfür ist ein berühmter japanischer Uhrenhersteller, der eine Mikro-Fabrik zur Bearbeitung von Präzisionsuhrenteilen einsetzt. Die Einführung eines solchen Geschäftsmodells führte zu 99% Einsparung beim Werkstückmaterial und 90% Platzersparnis für das Unternehmen. Abgesehen von diesen bemerkenswerten Einsparungen bei Investitionen, Energie, Raum und Ressourcen bietet dieses neue Geschäftsmodell auch andere Vorteile, einschließlich: kürzere Anlaufzeit; einfache Änderung des Produktionslayouts; die Nähe der Produktion beim Kunden kann leichter erreicht werden; die allgegenwärtige Herstellung wird entschieden einfacher machbar (mobil, vor Ort, usw.). Allerdings ist zu beachten, dass die begrenzte Verfügbarkeit von Geräten im kleinen Maßstab immer noch eine Herausforderung darstellt, der sich diese Art von Geschäftsmodell stellen muss.

#### **10.4.4.3 Hersteller von Mikromaschinen**

Die umfangreiche Anwendung und das Potential der Mikrofertigungstechnologien haben zu einer schnellen Verbreitung der Technologie in den verschiedenen Branchen geführt, da immer mehr Unternehmen sich gezwungen sehen, Mikrofertigungstechnologien anzuwenden. Allerdings stehen diese Unternehmen vor mehreren Hürden, wie zum Beispiel:

- Hohe Anfangsinvestitionen und hohe Folgekosten für die Maschinen
- Mangel an Wissen und Kompetenz in der Anwendung der Mikrofertigungstechnologie und Materialien
- Die Komplexität der Prozessgestaltung und –einrichtung
- Unvorhersehbare Nachfrage nach Produktionskapazität

Die Hersteller von Mikromaschinen können neue und innovative Geschäftsmodelle anwenden, um einige dieser Hürden zu überwinden. Im Folgenden stellen wir einige Konfigurationen neuer Geschäftsmodelle für Mikromaschinen vor.

#### **Bauen - am Kundenstandort betreiben:**

Innerhalb dieses Geschäftsmodells bleibt der Hersteller der Investitionsgüter (Maschinen) Eigentümer der Anlagen; er betreibt diese Anlagen im Werk des Kunden ausschließlich für diesen Kunden, beschäftigt Bedien- und Wartungspersonal und wird pro Nutzung oder pro Teil bezahlt. Das gleiche Modell kann mit einer Kaufoption für den Kunden angeboten werden. Abbildung 10.16 veranschaulicht diese Konfiguration

Innovation dimensions		Options					
Operating personnel		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer		
Maintenance personnel		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer		
Location		Equipment producer	Third party	"Fence to Fence" to the customer	Customer		
Payment modus		Pay per Part	Pay per Use (Rent)	Pay for availability	Fixed rate	Pay for equipment	
Ownership	During phase of use	Equipment producer	Equipment producer	Equipment producer	Equipment Producer	Leasing bank	Customer
	After phase of use	Equipment producer	Equipment producer	Equipment producer	Equip. Producer	Leasing bank	
Procurement of raw materials		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer		
Transport of final products		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer		

Abbildung 10.16: Bauen - am Kundenstandort betreiben - eigene Konfiguration

### Der Anlagenlieferant wird zum Teilelieferanten:

Innerhalb dieses Geschäftsmodells stellt der Hersteller von Investitionsgütern (Maschinen) das Produkt in seinen eigenen Räumlichkeiten her und fertigt Kundenaufträge an seinem Standort. Der Hersteller ist der Eigentümer der Anlage, er betreibt und wartet die Anlage mit seinem eigenen Personal und wird pro Teil bezahlt. Dieses Konzept kann für einen oder mehrere Kunden organisiert werden. Abbildung 10.17 veranschaulicht diese Konfiguration

Innovation dimensions		Options					
Operating personnel		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer		
Maintenance personnel		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer		
Location		Equipment producer	Third party	"Fence to Fence" to the customer	Customer		
Payment modus		Pay per Part	Pay per Use (Rent)	Pay for availability	Fixed rate	Pay for equipment	
Ownership	During phase of use	Equipment producer	Equipment producer	Equipment producer	Equipment Producer	Leasing bank	Customer
	After phase of use	Equipment producer	Equipment producer	Equipment producer	Equip. Producer	Leasing bank	
Procurement of raw materials		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer		
Transport of final products		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer		

Abbildung 10.17: In dieser Konfiguration wird der Anlagenlieferant zum Teilelieferanten

Innovation dimensions		Options				
Operating personnel		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer	
Maintenance personnel		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer	
Location		Equipment producer	Third party	"Lease to Fence" the customer	Customer	
Payment modus		Pay per Part	Pay per Use (Rent)	Pay for availability	Fixed rate	
Ownership	During phase of use	Equipment producer	Equipment producer	Equipment producer	Equipment Producer	Leasing bank
	After phase of use	Equipment producer	Equipment producer	Equipment producer	Equip. Producer	Leasing bank
Procurement of raw materials		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer	
Transport of final products		Equipment producer	Operating Joint Venture	Third party	Customer	

Abbildung 10.18: Konfiguration des Supply Park-Konzepts

### Supply Park-Konzept:

Die „Supply Park“ Konfiguration basiert auf der Tatsache, dass der Hersteller der Investitionsgüter seinen Kunden Anlagen anbietet, die in Betrieben installiert sind, die in der Nähe der Kundenanlagen neu gebaut wurden. Er bleibt Eigentümer der Maschinen, die mit eigenem Personal betrieben und instand gehalten werden, und stellt Zulieferteile oft "just in sequence" exklusiv für diesen einen Kunden her. Dieser Modelltyp wird vor allem von größeren OEMs der Automobilindustrie in Auftrag gegeben. Abbildung 10.18 veranschaulicht diese Konfiguration.

### Rekonfigurations-Garantie:

Bei dieser Konfiguration garantiert der Maschinenlieferant die Option, die gelieferte Maschinen neu zu konfigurieren, sobald neue Produkte und/oder Produktionsmengen erforderlich sein sollten. Eine Reihe von Rekonfigurations-Szenarien wird identifiziert und der Lieferant garantiert fixe Rekonfigurations-Kosten, wenn der Kunde diesen Service verlangt.

### Kapazitäts-Garantie:

Innerhalb dieser Konfiguration des Geschäftsmodells besitzt der Maschinenlieferant die Anlagen, die vom Kunden betrieben werden. Der Maschinenlieferant garantiert dem Kunden, ihm die Produktionskapazität zur Verfügung zu stellen, die im Laufe der Zeit notwendig ist, um die Produkte herzustellen, die vom Markt in Bezug auf Art und Volumen gefordert werden. Sollten Neukonfigurationen an Maschinen und/oder Layout erforderlich sein, wird der Maschinenlieferant diese nach Bedarf vornehmen. Der Kunde zahlt eine fixe Gebühr, um die Kapazität nutzen zu können. Die Umsetzung jeder Konfiguration

des Geschäftsmodells Mikromaschinen hat mehrere potenzielle Vorteile für das Unternehmen, zum Beispiel: die Lösung variabler Nachfrage und Unsicherheit; Aufrechterhaltung der state-of-the-art Funktionen in Nicht-Kernkompetenzbereichen; vermindertes Investitionsrisiko für den Kunden vor allem im Hinblick auf neue technologische Entwicklungen, die Aufteilung von Risiken zwischen dem Kunden und dem Anlagenlieferanten.

Ein Modell, das diese Vorteile ausbalanciert, stellt andere Herausforderungen an das Unternehmen, einschließlich: fehlende Management-Kompetenzen, um solche neuen Geschäftsmodelle zu entwerfen und zu verwalten; zu geringe Kenntnisse, um die Parameter des neuen Geschäftsmodells (Preis, Vertragslaufzeiten, Lebenszykluskosten, usw.) quantitativ zu bewerten und die Risiken zu managen.

## 10.5 Referenzen

1. Dimov SS, Matthews C, Glanfield A, Dorrington P (2006) A roadmapping study in Multi-Material Micro Manufacture. In: Proceedings of Second International Conference on Multi-Material Micro Manufacture 4M2006, Grenoble, France, 20-22 September 2006.
2. Eloy JC (2012) MEMS Packaging Market & Technology Trends, Yole Developments, SEMICON West 2012, San-Francisco.  
[http://www.semiconwest.org/sites/semiconwest.org/files/data14/docs/SW2014\\_JC%20Eloy\\_Yole%20Developpement\\_0.pdf](http://www.semiconwest.org/sites/semiconwest.org/files/data14/docs/SW2014_JC%20Eloy_Yole%20Developpement_0.pdf). Accessed 17 July 2015.
3. Bouchaud J (2011) High Value MEMS market overview, HIS iSupplie, DTIP Conference 2011, Marseilles, France, 12 May 2011.
4. Mounier E (2014) Future of MEMS: A market and technologies perspective, Yole Developments, MEMT Tech Seminar 2014, October 2014.  
<http://www.semi.org/eu/sites/semi.org/files/images/Eric%20Mounier%20-%20Future%20of%20MEMS.%20A%20Market%20and%20Technologies%20Perspective.pdf>. Accessed 10 July 2015.
5. Frost & Sullivan (2012) Advances in Micro-Manufacturing Technologies (Technical Insights).
6. MINAM 2.0 (2012) Roadmap 2012: Final version; MINAM - Micro- and NanoManufacturing,
7. Dennison S. Applications of micro & nanotechnologies in healthcare: Medical devices and products, UK MNT Network
8. Johnston C, Advanced F, UK MNT Network. Applications of micro & nanotechnologies In the Aerospace sector, Prepared in partnership between Colin Johnston, Faraday Advanced and the UK MNT Network
9. Qin Y (2010) Micro manufacturing engineering and technology. William Andrew, 1st edition
10. Jones GM (1960) Educators, Electrons, and Business Models: A Problem in Synthesis. *Accounting Review*, 35(4), 619-626.

11. Timmers,P (1998) Business Models for Electronic Markets. *Electronic Markets*, 8 (2), 3 - 8.
12. Petrovic O, Kittl C, Teskten RD (2001) Developing Business Models for e-Business. *International Conference on Electronic Commerce*, Vienna, Austria, 31 October 2001..
13. Linder J, Cantrell S (2000) Changing Business Models: Surveying the Landscape. *Accenture Institute for Strategic Change*.
14. Magretta J (2002) Why Business Models Matter. *Harvard Business Review*, 80 (5), 86–92.
15. Osterwalder A (2004) The Business Model Ontology - a proposition in a design science approach. PhD Dissertation. University of Lausanne, Switzerland.
16. Osterwalder A, Pigneur Y (2010) *Business Model Generation*. Hoboken, John Wiley & Sons Inc., New Jersey.
17. Pourabdollahian G, Copani G (2014) Proposal of an innovative business model for customised production in healthcare. *Modern Economy*, 5(13): 1147-1160.
18. Afuah A (2004) *Business models: A Strategic Management Approach*. McGraw-Hill.
19. Doganova L, Eyquem-Renault M. (2009) What do Business Models Do? *Innovation Devices in Technology Entrepreneurship*. *Research Policy*, 38: 1559-1570.
20. Shafer SM, Smith HJ, Linder J. (2005) The power o the business models. *Business Horizons*, 48: 199-207.
21. Chesbrough H, Rosenbloom RS. (2002) The role of the business model in capturing value from innovation: evidence from Xerox Corporation’s technology spin-off companies. *Industrial and Corporate Change*, 11 (3): 529-555.
22. Copani G, Molinari Tosatti L, Lay G, Schroeter M, and Bueno R. (2007) New business models diffusion and trends in European machine tool industry. *Proceedings of 40th CIRP International Manufacturing Systems Seminar*, Liverpool, UK, 30 May-1 June 2007.
23. Pourabdollahian G, Copani G. (2015) Development of a PSS-oriented business model for customised production in healthcare, *Procedia CIRP*, 30: 492-497.
24. Tuokko R, Heikkilä R, Järvenpää E, Nurmi A, Prusi T, Siltala N, Vuola A. (2012) *Micro and desktop factory roadmap*. Tampere University of Technology.

Dieses Buch beinhaltet Beiträge aus verschiedenen Bereichen der Mikrofertigungstechnologie und -ingenieurwesen und wurde im Rahmen des EU-Projektes MIMAN-T (Micro-manufacturing training for SMEs) verfasst. Es ergänzt die im Rahmen des Lifelong-Learning Programms der Europäischen Kommission entwickelte Online-Training-Plattform, die durch das MIMAN-T Konsortium entwickelt wurde. Auf dieser Plattform werden interessierten Nutzern theoretische Grundkenntnisse sowie praktische Tipps zu einigen Spitzentechnologien zur Fertigung und Vermessung von Mikrokomponenten, -geräten und -produkten vermittelt.

ISBN 978-3-7315-0604-1



9 783731 506041 >

Dieses Buch richtet sich vorrangig an Techniker und zukünftige Fachkräfte, aber auch Studenten, die in diesem Gebiet tätig werden. Es soll als effektives Werkzeug dienen, das dazu führt, dass wissenschaftliche Entwicklungen in konkrete industrielle Vorteile umgesetzt werden können.