

# Kapitel 8

## Vergleich mit anderen Methoden

Zur Herstellung von Mikrostrukturen existieren unterschiedliche Verfahren, die zum Teil bereits industriell eingesetzt werden. Für den Einsatz müssen sie sich anhand einer Reihe von Fragen messen lassen: Wie gut sind die erreichbare Ortsauflösung und das Aspektverhältnis der Strukturen? Inwieweit lassen sich dreidimensionale Strukturen erzeugen? Ist die Geometrie frei wählbar? Wie schnell ist die Bearbeitungsgeschwindigkeit? Läßt sich die Methode parallelisieren? Welche Materialien lassen sich bearbeiten, und wie groß ist der apparative Aufwand?

Im Vergleich mit bestehenden Methoden schneidet die elektrochemische Mikrostrukturierung mit ultrakurzen Spannungspulsen bei diesen Fragen insgesamt recht gut ab. Betrachtet man als erstes die Ortsauflösung, muß man zwei Werte unterscheiden: zum einen den Arbeitsabstand um das Werkzeug, bei dem bisher Werte bis hinunter zu 1–2  $\mu\text{m}$  erreicht wurden, und zum zweiten den Kantenradius der geätzten Strukturen, der bereits deutlich unter 1  $\mu\text{m}$  lag. Die in dieser Arbeit gezeigten dreidimensionalen Strukturen demonstrieren, daß ein Aspektverhältnis von etwa Zehn leicht zu erzeugen ist. Wie im vorangegangenen Kapitel diskutiert, sollte die Ortsauflösung durch geeignete Ätzbedingungen künftig sogar noch deutlich verbessert werden können.

Mit der elektrochemischen Mikrostrukturierung lassen sich dreidimensionale Strukturen individuell wie mit einem Fräser ätzen, ohne daß man durch Masken auf bestimmte Formen festgelegt ist. (Wenn die gezeigten treppenartigen Strukturen auch streng genommen nur 2,5-dimensional sind, ist mit der Herstellung des Mikrocantilevers zumindest eine echt dreidimensionale Struktur gelungen.) Die Materialabtragungsrate lag bisher bei etwa  $1 \mu\text{m/s}$ . Abhängig vom Material kann sie wahrscheinlich um den Faktor zehn erhöht werden. Außerdem ließe sich die Methode parallelisieren, indem mehrere Strukturen gleichzeitig wie mit einem Stempel geformt werden. Die Bandbreite der geeigneten Materialien ist durch die hier gezeigten Beispiele bereits angedeutet worden und sollte auf alle elektrochemisch bearbeitbaren Stoffe erweiterbar sein. Daß der apparative Aufwand des Verfahrens relativ gering ist, ist als weiterer Vorteil zu bewerten.

Zum Vergleich sollen hier die Möglichkeiten von anderen Mikrostrukturierungsverfahren kurz beschrieben werden. Zu den wichtigsten, technisch eingesetzten Prozessen zur Herstellung von Mikroelementen gehören:

- Anisotropes Ätzen von einkristallinen Materialien durch naßchemische Prozesse oder reaktives Ionenätzen,
- LIGA-Verfahren, eine Kombination von **L**ithographie, **G**alvanoformung und **A**bformung,
- Mikrospritzguß und Mikroprägetechniken,
- Präzise mechanische Bearbeitung durch Drehen, Fräsen, Boren etc.,
- Mikrofunkenerosion,
- Laserablation und andere Lasertechniken,
- Elektrochemische Methoden.

Mikroelektromechanische Systeme, die Sensoren und Aktoren enthalten, bestehen heute in erster Linie aus Silizium. Zur Herstellung kann man dabei auf die bei der Chip-Produktion entwickelten Verfahren zurückgreifen.

---

Durch Kombination von Lithographie und Si-Micromachining-Techniken wie u.a. anisotropes Ätzen [70], reaktives Ionenätzen und Erzeugung von isolierenden Schichten [2], [3] läßt sich das Material dreidimensional bearbeiten. Auf diese Weise können sogenannte Nanoelektromechanische Systeme hergestellt werden wie z.B. ein Elektrometer, dessen kleinste freitragende Struktur einen Durchmesser von nur 200 nm hat [71]. Zwar ist dieser Prozeß wegen seiner vielen Arbeitsschritte sehr aufwendig, bietet aber den Vorteil, viele Strukturen parallel herstellen zu können. Allerdings läßt er sich kaum auf andere Materialien übertragen. Insbesondere das anisotrope Ätzen ist prinzipiell auf monokristallines Material beschränkt.

Generell sind lithographische Verfahren nur bedingt dazu geeignet, dreidimensionale Strukturen zu erzeugen. Bei ihnen wird die Struktur einer Maske durch Beleuchtung und Entwicklung eines Photoresists auf die Oberfläche eines Werkstücks übertragen. Anschließend kann an unbedeckten Stellen der Oberfläche selektiv geätzt oder Material abgeschieden werden. Daher lassen sich mit Hilfe der Lithographie zwar hohe Ortsauflösungen bis hinunter in den Nanometerbereich erreichen, aber zunächst nur zweidimensionale Strukturen bis zu einer gewissen Dicke erzeugen. Dreidimensionale Elemente lassen sich durch Wiederholung von Prozeßschritten und Kombination mit weiteren Techniken produzieren. Dazu gehört zum Beispiel das Verwenden von Opferschichten, auf die ein anderes Material aufgebracht und strukturiert wird. Die Opferschicht wird anschließend unter den Strukturen herausgeätzt und hinterläßt freitragende Elemente [72], [73], [74].

Viele Mikroelemente wie Zahnräder oder Mikroreaktoren aus Metallen, Kunststoffen oder Keramiken lassen sich durch das sogenannte LIGA-Verfahren produzieren, eine Kombination von lithographischen und elektrochemischen Techniken [75]. (LIGA steht für die Prozeßschritte Lithographie, Galvanoformung und Abformung.) Eine lithographisch strukturierte Polymerschicht dient dabei als Form, in die ein Metall elektrochemisch abgeschieden wird. Nach Entfernen des Kunststoffs bleibt eine metallische Mikrostruktur zurück, die entweder als solche verwendet oder als Werkzeug

zum Prägen oder Spritzgießen wiederum abgeformt werden kann. Mit dieser Methode lassen sich Teile mit einer Präzision von bis zu 100 nm herstellen, deren kleinste Strukturen 1–10  $\mu\text{m}$  betragen. Gleichzeitig können sie bis zu einigen Hundert Mikrometern oder sogar wenigen Millimetern dick sein. Um ein so hohes Aspektverhältnis zu erzeugen, muß allerdings zum Belichten des dicken Polymerresists meist Synchrotronstrahlung verwendet werden, was das Verfahren apparativ aufwendig macht. Außerdem lassen sich auf diese Weise nur zweidimensionale Strukturen mit senkrechten Wänden herstellen, und die Materialien müssen sich elektrochemisch abscheiden lassen.

Mikrospritzguß- und Mikroprägetechniken, die sich gut zur Massenproduktion kleiner Teile eignen, erfordern stabile und präzise Werkzeuge. Diese lassen sich nicht nur durch das LIGA-Verfahren, sondern auch durch mechanisches Bohren, Fräsen oder Drehen herstellen [76]. Diese herkömmlichen Materialbearbeitungstechniken lassen sich durchaus auf kleinen Maßstab übertragen. So lassen sich aus weichen Metallen oder Kunststoffen Gräben von ungefähr 10  $\mu\text{m}$  Breite und Tiefe mit Mikrometerpräzision fräsen. Für die mikrometergenaue Abtragung von Metallen kommt auch die elektrische Funkenerosion in Frage, die ebenfalls Genauigkeiten im Mikrometerbereich ermöglicht. Dabei sind Aspektverhältnisse größer als Zehn erreichbar.

Eine weit verbreitete Technik ist die Laserablation. Kunststoffe, Keramiken und biologische Materialien lassen sich mit hoher Präzision abtragen. Bei der Metallbearbeitung kommt es wegen der hohen thermischen Belastung häufig zum Aufschmelzen der Kanten, was sich durch die Verwendung von kurzen Pulsen im Femtosekundenbereich verbessern läßt [77], [78]. Zusätzlich zu den abtragenden Lasertechniken gibt es auch Verfahren, bei denen sehr lokal polymerisiert oder Material aus der Gasphase abgeschieden wird, wodurch dreidimensionale Strukturen entstehen können [79], [80]. Lasertechniken arbeiten allerdings in erster Linie sequentiell.

Elektrochemische Verfahren werden bei der Herstellung von Mikrosystemen und in der Elektronikindustrie erfolgreich eingesetzt [16], [17], [81], [82]. Neben Prozessen wie dem Elektropolieren und Abscheiden von dünnen Fil-

---

men handelt es sich dabei zumeist um die Strukturierung mit Hilfe von Masken, die meist lithographisch hergestellt werden [18], [83], [84]. So können beispielsweise Kupfer-Leiterbahnen integrierter Mikrochips elektrochemisch in lithographisch erzeugte Strukturen abgeschieden werden. Metalle und Halbleiter lassen sich durch Masken auf der Oberfläche hindurch auch anodisch ätzen. Da die maskierten Gebiete der Oberfläche teilweise hinterätzt werden, ist die Präzision beim Übertragen der Maske in das Material allerdings eingeschränkt.

Schließlich sollen elektrochemische Rastersondentechniken genannt werden, die Oberflächen auf der Nanometerskala strukturieren können [19], [20]. Da Rastersondentechniken schlecht parallelisierbar sind, und mit ihrer Hilfe nur sehr geringe Stoffmengen bewegt werden können, sind sie wohl nicht für dreidimensionale Materialbearbeitung geeignet. Die räumliche Begrenzung der elektrochemischen Reaktionen wird auf unterschiedliche Weise erreicht. Beim Scanning Electrochemical Microscope (SECM) werden die begrenzte Diffusion von Reaktanden und die Abschirmung durch die im Vergleich zur eigentlichen Elektrode relativ dicke seitliche Isolierung ausgenutzt. So werden zum Beispiel Reaktanden an einer Ultramikroelektrode produziert, die dann über wenige Mikrometer zur Oberfläche diffundieren, an der dann die eigentliche chemische Reaktion stattfindet [22], [23]. Die Isolierung verhindert allerdings, daß mit Ultramikroelektroden in die Tiefe geätzt wird. Auf die Spitze eines Rastertunnelmikroskops können Metalle elektrochemisch abgeschieden werden, die dann anschließend auf die Probenoberfläche transferiert werden und dort Cluster bilden. Die Übertragung kann durch mechanischen Kontakt [21] oder durch einen Spannungspuls geschehen [37], [85]. Andere Verfahren nutzen zur Erzeugung von Nanolöchern Feldeffekte unter der Spitze aus [86] oder arbeiten in einem winzigen Elektrolytvolumen, das in feuchter Atmosphäre durch Kapillarkräfte unter der Spitze vorhanden ist [87].

Besonders erwähnt werden soll hier noch die Möglichkeit, Nanosekundenkurze Spannungspulse an die Spitze eines Rastertunnelmikroskops anzulegen. Dadurch gelingt es, elektrochemische Reaktionen eng um den Bereich herum

zu beschränken, an dem der Tunnelprozeß stattfindet. So kann mit einem einzelnen Spannungspuls ein wenige Monolagen tiefes Loch mit einem Durchmesser von 3–5 nm in einen Goldfilm geätzt werden, oder Kupfer-Cluster aus kupferhaltigem Elektrolyten direkt auf der Oberfläche abgeschieden werden [88], [89], [90]. Die räumliche Ortsauflösung beruht auf einem anderen Prinzip als bei der elektrochemischen Mikrostrukturierung. In dem nur wenige Nanometer breiten Spalt zwischen Spitze und Probenoberfläche werden beim Anlegen des Spannungspulses alle Ionen des Elektrolyten zum Umladen der elektrochemischen Doppelschichten verbraucht. Der Elektrolyt verarmt vollständig an Ionen, da während weniger Nanosekunden Ionen nicht schnell genug in den schmalen Spalt nachdiffundieren können. So kommt es effektiv zur Isolation der Elektroden. Elektrochemischer Strom kann nur dort fließen, wo die Tunnelspitze einen Abstand von wenigen Ångström zur Probenoberfläche hat.