

# Lithographische Verfahren zur Mustererzeugung in der Mikrosystemtechnik

J. Schulz, D. Maas, J. Mohr, IMT

## Einleitung

Der Brockhaus schreibt zum Begriff Lithographie: „Geschliffener Solnhofener Schiefer, mit Fettkreide beschrieben und mit saurer Gummiarabicum-Lösung geätzt, nimmt nur an den beschriebenen Stellen die Druckfarbe an (lithos = stein; graphein = schreiben, zeichnen)“. Erfunden wurde die Lithographie von Alois Senefelder, Autor von Komödien und

Liedern, im Jahr 1789, der nach einer Technik suchte, seine Stücke zu kopieren. Er handelte schon damals so, wie es heute von uns angewandten Wissenschaftlern verlangt wird: er erkannte die kommerziellen Chancen des Verfahrens und meldete es zum Patent an (1799). Die Anwendung des Verfahrens im Bereich der Kunst ließ nicht lange auf sich warten, wurde aber lange Zeit nicht so recht als eigenstän-

dige Kunstform akzeptiert. Dies änderte sich spätestens mit den Lithographien von Henri de Toulouse-Lautrec. Die Weiterentwicklung im Bereich der Massenreproduktion führte zum heutigen Offset-Druck.

Die Weiterentwicklung zur Strukturierung von Substraten für technische Anwendungen begann mit der Verfügbarkeit von Fotolacken. Die Strukturierung von Fotolacken ist ähnlich wie in der Fotografie mit Hilfe eines Belichtungs- und Entwicklungsschritts möglich. Die Strukturen von Fotolacken können deswegen in der Lithographie zur Strukturierung des Substrats durch Ätzen verwendet werden. Hier rührt der im Folgenden synonym verwendete Begriff „Resist“ her, denn die Fotolackstrukturen müssen der Ätzlösung „widerstehen“.

Das Schema ist in Abb. 1 für Positivlacke und für Negativlacke dargestellt. Die „technische“ Lithographie besteht somit aus der Prozessfolge:

- Beschichten
- Bestrahlen
- Entwickeln
- Ätzen oder andere Form der Nutzung der Struktur
- Strippen

Die Selektivität spielt für die Materialauswahl eine zentrale Rolle. Beim Entwickeln muss eine Lösung gefunden werden, deren Lösungsgeschwindigkeiten im belichteten und unbelichteten Bereich sich sehr stark unterscheiden (Kontrast des Prozesses). Die Lösungen, die zur Strukturierung des Substrats eingesetzt

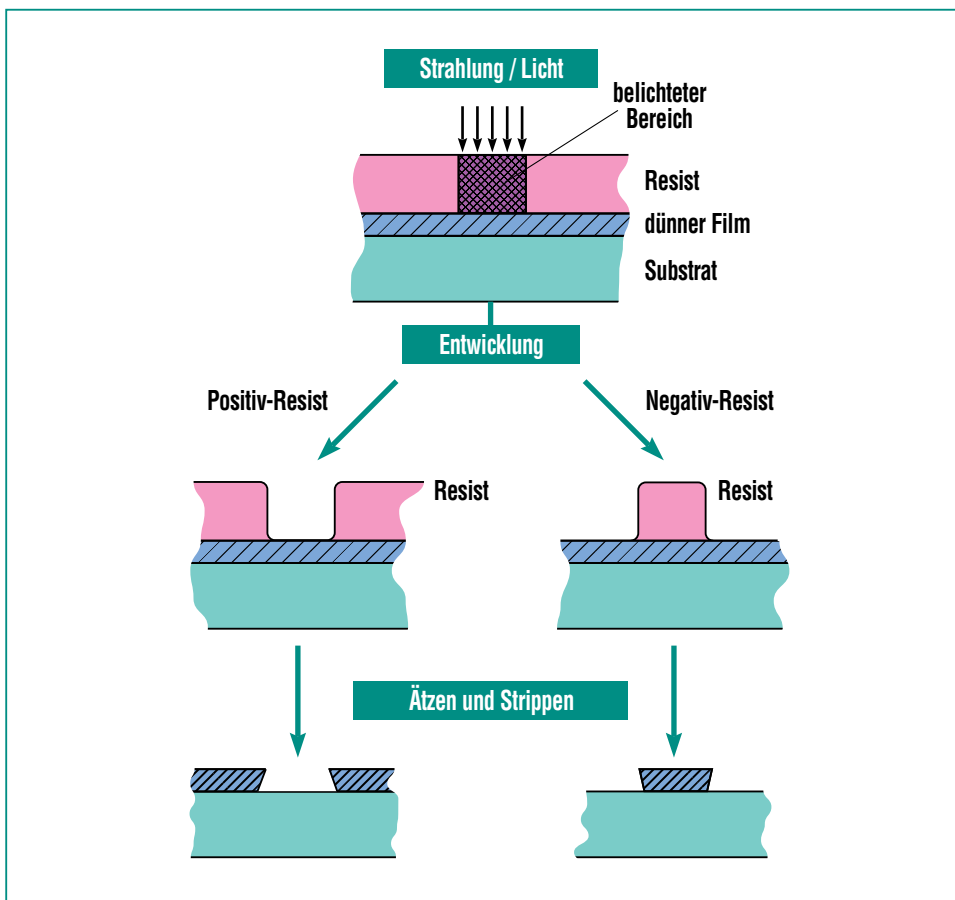


Abb. 1: Darstellung der prinzipiellen Schritte der technischen Lithographie: Bestrahlung, Entwicklung, Ätzen der Strukturen und Strippen. Bei Positiv-Resists werden die belichteten Bereiche wegentwickelt, bei Negativ-Resists die unbelichteten. Die unterschiedlichen Entwicklungsraten der belichteten und unbelichteten Bereiche beruhen bei Positiv-Resists z.B. auf einer deutlichen Reduzierung des Molekulargewichts (PMMA) oder auf chemischen Reaktionen, die die Polarität deutlich erhöhen (Novolak). Bei Negativ-Resists ist die geläufigste Wirkungsweise eine Vernetzungsreaktion (z.B. SU-8).

Einsatzgebiet	Substrat	Auflösung	Höhe
Chips	8 inch	0,2 µm	1 µm
Flip-Chip	8 inch	30 µm	30 µm
Leiterplatte	DIN A3	100 µm	10 µm
Schreib-/Leseköpfe	8 inch	30 µm	100 µm

**Tab. 1: Zusammenstellung der Einsatzgebiete der Lithographie mit den höchsten Umsatzvolumina und den dazugehörigen technischen Grundparametern. Die Tabelle dient der Orientierung und stellt nicht die „vorderste Front“ der Technologie dar.**

werden, dürfen die Resiststrukturen nicht angreifen. Andererseits muss beim Strippen der Strukturen der (eventuell chemisch veränderte) Resist sehr gut aufgelöst, die hergestellten Strukturen aber nicht angelöst werden.

Die Resiststrukturen dienen also zum Ätzen des Substrats (substraktive Strukturierung). Sie können aber auch zum Auffüllen der freigelegten Bereiche (additive Strukturierung, wie z.B. im LIGA-Verfahren) oder – vor allem in der Halbleiterstrukturierung – zum Herstellen lokaler Dotierungen durch Ionenimplantation verwendet werden. In ganz seltenen Fäl-

len wird die Resiststruktur selbst genutzt. Hierzu später noch ein Beispiel.

Tab. 1 gibt einen groben Überblick über die heutigen Einsatzgebiete und die wesentlichen Charakteristika von lithographischen Verfahren.

### Prozessschritte der Lithographie

Abb. 2 zeigt Strukturen aus der Halbleitertechnik und eine Auflistung der möglichen Fehler [1].

Für die Auswahl und genauere Festlegung der Prozessschritte

sind neben den technisch erzielbaren Eigenschaften vor allem die Investitionskosten und die Auswirkungen auf die Produktionskosten ausschlaggebend.

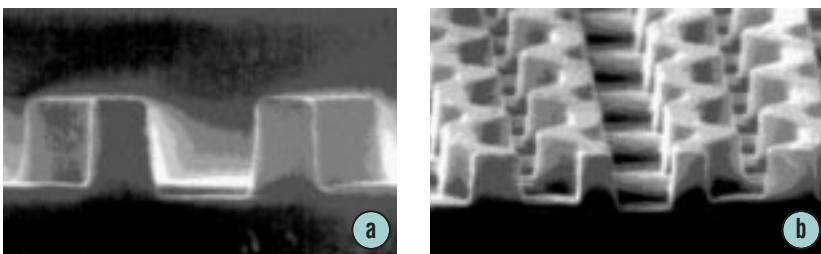
Im Folgenden werden nur die am IMT verfügbaren Prozessschritte näher beleuchtet.

### Beschichtung des Substrats mit Resist

Spin-Coating ist eine apparativ einfache und sehr verbreitete Technik, um auf runden Substraten gleichmäßige Schichten zwischen 0,1 µm und 100 µm Dicke aufzubringen. Das Substrat wird auf einen motorgetriebenen Teller gelegt, der in Lösemittel gelöste Resist wird z.B. aus einer Pipette aufdosiert und der Motor wird gestartet. Zur Berechnung der sich ergebenden Schichtdicke existiert übrigens eine der wenigen geschlossenen Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen:

$$h = \frac{h_0}{\left[1 + (4\rho\omega^2 / 3\eta) h_0^2 t\right]}$$

Hierbei ist: h die Schichtdicke nach dem Schleudervorgang, h<sub>0</sub> die Schichtdicke vor dem Schleudervorgang, ρ die Dichte, η die Zähigkeit der Flüssigkeit, ω die Kreisfrequenz und t die Schleuderzeit. Bei sehr kleinen Schichtdicken ist es oft schwierig eine geschlossene Schicht (pin-hole-free) zu erzeugen. Bei dicken Schichten wird die Homogenität der Dicke wegen des möglichen Fließens bei auch nur leichter Schräglage im Gravitationsfeld zum Problem, ebenso stört eine Randüberhöhung, die sich mehrere Zentimeter vom Rand zur



**Abb. 2: Beispiel für Lithographiestrukturen bei der Chip-Herstellung. Stichwortartig einige technologische Probleme, die es zu beherrschen gilt: Verträglichkeit der Prozessfolgen, Auflösung, Streulicht, Reflexion vom Substrat, Defekte, Profil- und Tiefenschärfe, Homogenität über der Fläche, Justierung, Verzüge, Stufenbedeckung, Spannungsrisse, Haftung, Sauberkeit nach dem Strippen. Die Auswirkungen von Fehlern reichen von Sofortausfällen der Chips über Feldausfälle im späteren Einsatz bis hin zu nicht tolerablen Qualitätsschwankungen.**

Substratmitte hin erstrecken kann.

Nach dem Aufschleudern erfolgt ein sogenannter „Prebake-Schritt“ (Backen vor dem Belichten), um durch Austreiben des Lösemittels einen festen Film zu erzielen.

Das Aufkleben von Resists auf ebene Substrate ist eigentlich nur im LIGA-Verfahren bedeutend, wo hohe Resistdicken (200 µm bis 2 mm) mit nur sehr geringen inneren mechanischen Spannungen verlangt werden. Dies verbietet jegliche mit erhöhter Temperatur verbundene Prozessfolge. Besondere Anforderungen sind eine geringe Dicke der Klebeschicht und deren Blasenfreiheit.

Weitere Beschichtungstechniken sind z.B.: Sprühen, Laminieren, Tauchen, elektrochemische Beschichtung.

### Belichtung des Resists

Technologisch am einfachsten und wegen der oft geringen Stückzahlen in der Mikrosystemtechnik am weitesten verbreitet ist die UV-Belichtung durch Schattenwurf. Der Schatten wird beim Belichten durch eine Quarzglasplatte erzeugt, der Schatten entsteht unter den opaken Bereichen, die aus 0.1 µm dickem Chrom auf dem Glas bestehen. Zum Belichten wird eine Quecksilberdampflampe mit den drei typischen Wellenlängen 365 nm, 405 nm und 436 nm verwendet, wobei die Auswahl der Wellenlänge auf die Empfindlichkeit des Resists abgestimmt sein sollte. Die (Fresnel-)Beugung des Lichts führt zu einer Unschärfe in der Ab-

bildung, die durch folgende Formel beschrieben wird:

$$b_{\min} = Q \sqrt{\lambda d}$$

Hierbei ist  $b_{\min}$  die kleinste erreichbare Strukturbreite,  $\lambda$  die Wellenlänge,  $d$  der Abstand zwischen Maske und Resist und  $Q$  ein Parameter, der alle anderen Einflüsse zusammenfaßt. In  $Q$  gehen zu einem großen Teil die Qualität der Belichtungsoptik und vor allem der sogenannte Kontrast des verwendeten Resists ein.

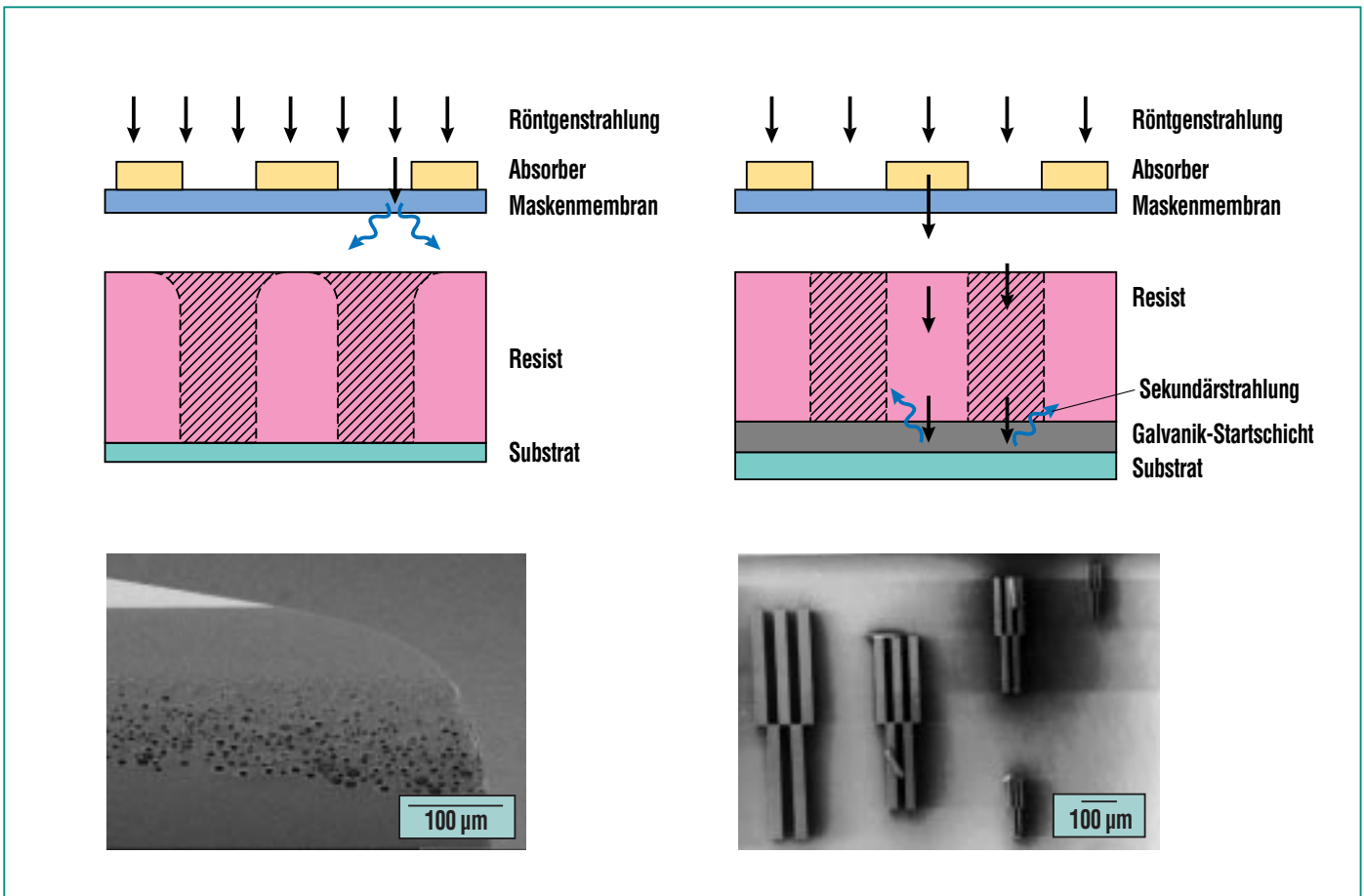
Die Röntgenbelichtung durch Schattenwurf ist das zentrale Merkmal der LIGA-Technik des IMT. Wegen der geringen Wellenlängen des verwendeten (Synchrotron-) Strahlungsspektrums (0,05 nm bis 5 nm) spielt die Beugung eine vernachlässigbare Rolle. Allerdings müssen die Masken anders aufgebaut sein als in der Fotolithographie: Eine dünne Membran mit geringer Kernladungszahl trägt die Absorberstrukturen mit hoher Kernladungszahl, die meist aus galvanisch abgeschiedenem Gold bestehen. Ein Standard hat sich bislang weltweit nicht etablieren können. Das IMT arbeitet mit (und an) zwei Varianten: Titanmembranen, 2.5 µm dick für Bestrahlungen von Resists bis 500 µm und Berylliumbleche, 500 µm dick für Bestrahlungen zur Erzeugung noch höherer Strukturen. Andere Institutionen verwenden dünne Membranen aus Siliziumnitrid, Siliziumcarbid, Glas, Bornitrid, Diamant etc.

Wegen der Härte der Strahlung absorbieren auch die Materialien

mit hoher Kernladungszahl die Strahlung nicht vollständig. Die Reststrahlung beeinflusst durch Fluoreszenzeffekte die Qualität der Strukturen sowohl an der Resistoberkante als auch an der für die Haftung wichtigen Grenzfläche zum Substrat. Beide Effekte sind in Abb. 3 dargestellt und können u.a. durch eine ausreichende Absorberhöhe vermieden werden [2].

Die Belichtung mit Elektronenstrahlen nimmt in mehrfacher Hinsicht eine Sonderstellung ein. Zum Einen wird nicht durch eine Maske belichtet, sondern ein fokussierter Elektronenstrahl wird so bewegt, dass nur die zu belichtenden Bereiche getroffen werden. Solche Anlagen erzeugen daher aus CAD-Daten die ersten Strukturen (Primäre Mustererzeugung). Zum Anderen erfolgt die Absorption des Strahles im Wesentlichen durch inelastische Streuung der Elektronen im Resist. Dieser Streueffekt ist die Ursache für Unschärfen der Strukturen vor allem bei Resisthöhen oberhalb 1 µm. Um dies zu minimieren, muss die Energie der einfallenden Elektronen möglichst hoch sein.

Wenn hohe Stückzahlen mit sehr geringer Streuung der Strukturbreite gefordert sind, wird nahezu ausschließlich die Projektionsbelichtung eingesetzt. Sie ist ähnlich der Diaprojektion, nur dass die Maske gleich groß oder größer als das Bild ist. Auf dem Substrat werden die einzelnen Strukturbereiche, meist identisch mit einem Chip, im sogenannten Step and Repeat Verfahren aneinandergesetzt.



**Abb. 3: Probleme bei der Synchrotronbelichtung des Resists. Zusätzlich zur hohen thermischen Belastung von Maske und Substrat spielen wegen der kurzwelligen Komponenten der Strahlung Fluoreszenzeffekte eine wichtige Rolle. So ist im linken Bild dargestellt, wie Fluoreszenz aus der Maskenmembran oder von den Absorberstrukturen in den obersten Schichten des Resists absorbiert wird und dort zu Verrundungen führt. Im rechten Bild ist dargestellt, wie Fluoreszenz aus dem Substrat zu einer hauchdünnen entwickelbaren Zone unter unbelichteten Resiststrukturen führt, die in Entwicklerlösung weggeschwemmt werden können (Haftungsprobleme).**

Weitere Varianten sind die direkte Belichtung mit einem gesteuerten Laserstrahl und, vor allem für die Nanotechnologie, die Belichtung mit einem Elektronenstrahl eines höchstauflösenden Raster-Elektronenmikroskops (REM).

### Entwicklung

Das Herauslösen der belichteten Bereiche (Positiv-Resist) bzw. der unbelichteten Bereiche (Negativ-Resist) erfolgt in einer für jeden

Resist spezifischen Entwicklerlösung. Je unschärfer der Übergang zwischen belichteten und unbelichteten Bereichen ist, umso stärker wirken sich Schwankungen der Entwicklerkonzentration, der Temperatur, der Entwicklersättigung etc. auf das Strukturprofil aus. Daher sind vor allem für die UV-Lithographie und die E-Beam-Lithographie sehr homogene Bedingungen des Stofftransports zu und von den zu entwickelnden Bereichen nötig. Dies wird durch

kontinuierliches Besprühen des rotierenden Substrats erreicht (Sprühentwicklung). Bei sehr scharfen Übergängen zwischen belichteten und unbelichteten Bereichen (Röntgenlithographie) ist ein einfaches Tauchen in ein Bad mit Entwicklerlösung ausreichend. Die Entwicklungsrate kann durch Megaschall signifikant beschleunigt werden [3], ohne dass sich der Kontrast des Resists verringert. Dies ist insbesondere für hohe Strukturen, wie sie für das

LIGA-Verfahren typisch sind, von Bedeutung.

Noch nicht in kommerziellem Einsatz sind Resists, die sich in einem Plasmareaktor trocken entwickeln lassen.

### Strippen

Probleme im Zusammenhang mit dem rückstandsfreien Entfernen des Resists werden häufig unterschätzt. Bei Negativ-Resists treten meist starke Vernetzungen auf, was die Suche nach einem geeigneten Lösungsmittel, das die erzeugten Strukturen nicht angreift, sehr erschwert. Bei Positiv-Resists werden die Strukturen einem „Postbake“ unterworfen, der ein leichtes Vernetzen initiiert und dadurch die Stabilität gegen Ätzen erhöht. Zweitens geht das anschließende Ätzen, die Galvanik oder auch die Ionenimplantatio-

nen nicht ganz spurlos am Resist vorbei. Zumindest die oberflächennahen Bereiche, die ja auch durch die Bestrahlung schon in Mitleidenschaft gezogen wurden, benötigen aggressive Medien zur Auflösung.

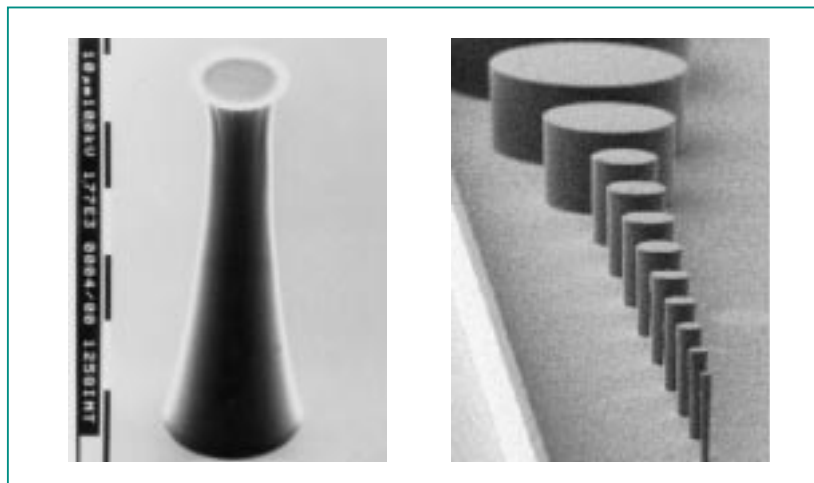
Nicht zuletzt sei das rückstandsfreie Spülen und Trocknen erwähnt, das anlagentechnisch beherrscht werden muss. Für jede Anwendung werden Reinigungskaskaden mit spezifischen Lösungsmedien bereitgestellt. Eingesetzte Varianten sind beispielsweise: nasschemisches Auflösen, Verbrennen im Sauerstoffplasma, gegebenenfalls mit Zugabe aggressiver Gase wie  $\text{CF}_4$  oder  $\text{SF}_6$ , Belichten und Entwickeln des gesamten Substrats, Laserablation, Wasserstrahlanwendung mit mehreren Hundert bar Druck.

## Anwendungsbeispiele der Lithographie am IMT

### UV-Lithographie

Ein vergleichsweise einfaches Anwendungsbeispiel ist die Herstellung von Leiterbahnen aus Gold mit einer Linienbreite von  $5\ \mu\text{m}$  und einer Dicke kleiner  $1\ \mu\text{m}$ . Hierfür werden Resists unterhalb  $5\ \mu\text{m}$  Dicke eingesetzt. Sie werden unter anderem für fluidische Sensoren (Druck, Durchfluss, Temperatur) und für Heizleiter bei Mikropumpen verwendet. Gewisse Erfahrungen sind beim Ätzen der Strukturen notwendig. Will man Strukturbreiten kleiner  $2\ \mu\text{m}$  erreichen, so ist beim Belichten auf möglichst guten Kontakt zwischen Maske und Resist zu achten. In allen anderen Teilschritten hat die Homogenität über der Fläche eine zentrale Bedeutung (Beschichten, Tempern, Entwicklung, Ätzen), da Inhomogenitäten zu Variationen der Linienbreite und somit der elektrischen Eigenschaften der Leiterbahnen führen. Die Nutzung qualifizierter Reinaräume und qualifizierter Handhabungstechniken ist unabdingbar.

Mit Resists von  $10\ \mu\text{m}$  bis mehrere hundert  $\mu\text{m}$  Dicke werden Formen für die Galvanik hergestellt. Schwerpunkte der Entwicklungsarbeiten sind nicht so sehr die Lithographieaspekte sondern vielmehr das Zusammenspiel der verschiedenen aufeinander folgenden Technologieschritte. Abb. 4 zeigt zunächst das Strukturprofil der Novolak-Resists [4] im Vergleich mit dem relativ neuen Epon SU8 Resistsystem. Abb. 5 zeigt den Blick auf einen Formeinsatz, der mit dem SU8 Resist und Nickel-Galvanik hergestellt wurde [5].



**Abb. 4: Vergleich der Resistprofile dicker Schichten in der UV-Lithographie. Links ist eine  $60\ \mu\text{m}$  hohe Novolak-Struktur zu sehen, rechts eine  $180\ \mu\text{m}$  hohe SU-8 Struktur. Wenngleich der erste Eindruck zugunsten der SU-8-Strukturen ausfällt, konnten sich diese am Markt bislang nur wenig durchsetzen. Die Gründe liegen in der Spannungsrisseanfälligkeit und dem sehr hohen Vernetzungsgrad, der dazu führt, dass der Resist sich nur schwer entfernen lässt.**



**Abb. 5: Detailaufnahme eines Formeinsatzes aus galvanisiertem Nickel. Die Quadrate sind etwa 50 µm breit. Der Resist wurde durch Laserablation entfernt.**

### E-Beam-Lithographie

Das IMT besitzt einen Elektronenstrahlschreiber des Typs EBP5 (EBeam Pattern Generator 5 Zoll), mit dem Substrate bis zu einer Strukturfeldgröße von 5 Zoll (etwa 125 mm) belichtet werden können. Die Anlage wird routi-

nemäßig eingesetzt, um Chrommasken für die UV-Lithographie und anspruchsvolle Zwischenmasken für das LIGA-Verfahren herzustellen. Bei den Chrommasken beträgt die Resistenschichtdicke 0,5 µm. Bei den Zwischenmasken beträgt die Resistenschichtdicke 3 µm. In diesem Falle spielt die Streuung der Elektronen für die Strukturauflösung bereits eine erhebliche Rolle. Insbesondere für optische Anwendungen – eines der strategischen Anwendungsfelder des Programms MIKRO – sind die Auflösung, die Seitenwandsteilheit, die Seitenwandwelligkeit (die aus dem Aneinanderfügen einzelner Pixel resultiert) und die Lagegenauigkeit aller optischen Elemente zueinander besonders hohen Anforderungen unterworfen. Dies ist der Grund für die hohe Beschleunigungsspannung von 100kV beim IMT-Elektronenstrahlschreiber.

### Röntgenlithographie

Die Röntgenlithographie war der Ausgangspunkt der heutigen Kompetenz des IMT rund um das LIGA-Verfahren. An der Angströmquelle Karlsruhe (ANKA) sind drei Strahlrohre für LIGA-Belichtungen installiert. Zwischen dem Strahlquellpunkt, der sich noch im Speicherring der ANKA befindet und der eigentlichen Bestrahlungsstation, gibt es unterschiedliche Elemente, die der Anpassung des Spektrums dienen. Tab. 2 stellt die Anwendungsfälle zusammen.

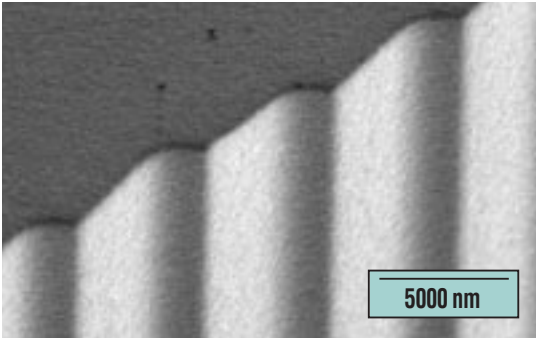
Über störende Effekte wie z.B. die Fluoreszenz wurde oben schon berichtet. Zur Befriedigung der Industriekunden müssen hier jeweils geeignete Lösungen erarbeitet werden. Tab. 3 stellt Parameter zusammen, für die das IMT Verfahren etabliert hat, die für industrielle Anwendungen tauglich

Beam-Line	Anwendungsbereich	Status	Strahlenoptische Elemente
Litho 1	Maskenlithographie bis 100 µm	Im Aufbau	Röntgenspiegel
Litho 2	Bestrahlung bis 600 µm	Etabliert	Röntgenspiegel
Litho 3	Bestrahlung bis 100 µm (1.3 GeV) Bestrahlung bis 800 µm (1.8 GeV) Forschung, Ultratiefe Lithographie	Etabliert Etabliert Im Aufbau	Doppelröntgenspiegel

**Tab. 2: Zusammenstellung der Bestrahlungsmöglichkeiten in der ANKA.**

	Röntgenlithographie	Tiefenlithographie	Ultratiefenlithographie
Strukturhöhe/µm	<100	100-400	400-1000
Kleinste Breite/µm	5	5-20	8-40
Strukturdetails (Beispiel Spektrometer)	Sub-µm	Sub-µm	Sub-µm
Vertikalität/mrad	<1	1,5	1,5-2,5

**Tab. 3: Parameter der Röntgenlithographie. Grau hinterlegt sind Anwendungsfälle, für welche die Technologie derzeit erarbeitet wird.**



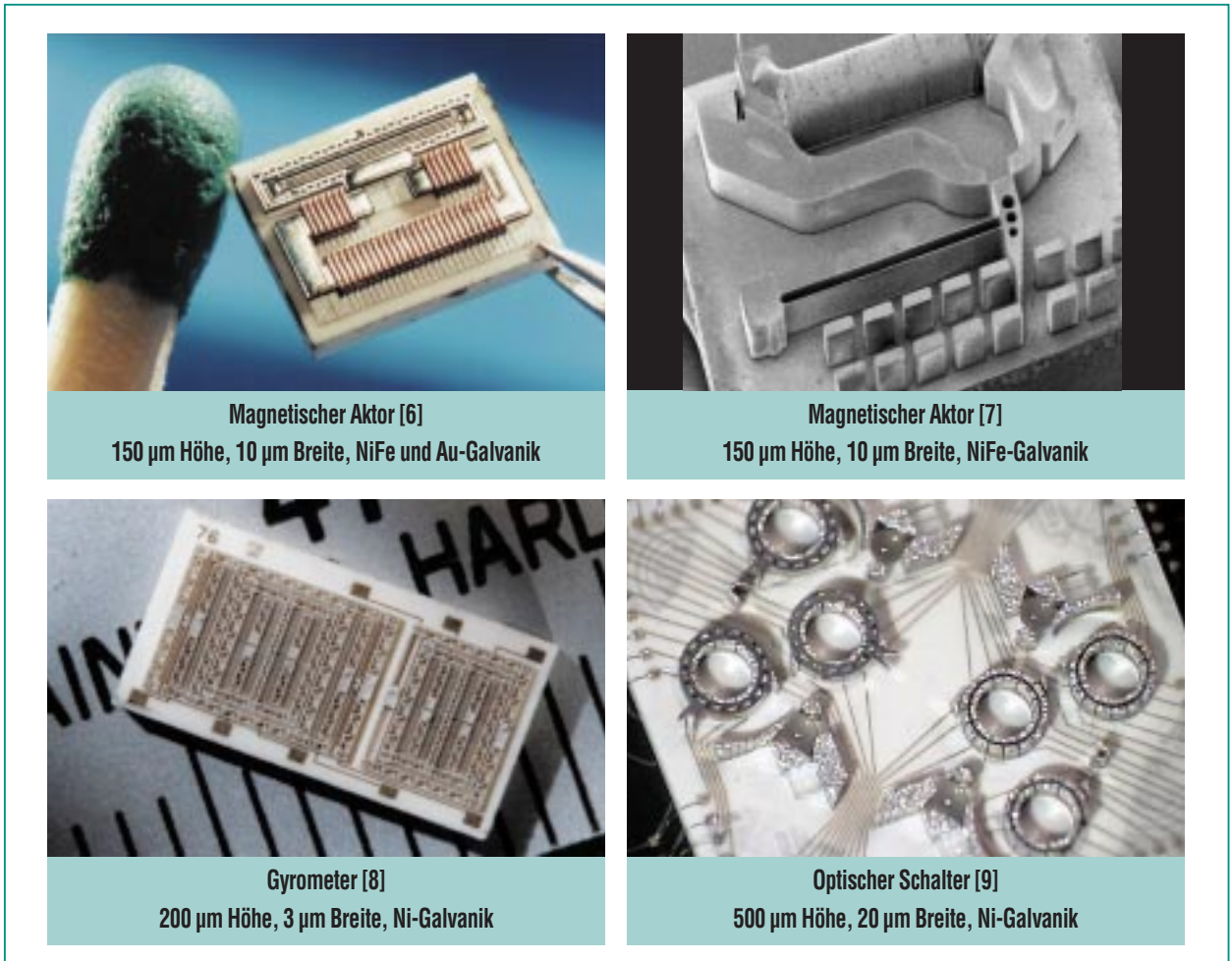
**Abb. 6: Ausschnitt eines Beugungsgitters eines Spektrometers, das mit Röntgenlithographie nach dem LIGA-Verfahren hergestellt wurde. Die einige  $\mu\text{m}$  langen und knapp  $1 \mu\text{m}$  hohen Stufen erstrecken sich über die gesamte Resistdicke von etwa  $400 \mu\text{m}$ .**

sind. Für die Anwendungen der Ultra-Tiefen-Lithographie wird ein Ausblick gegeben.

Als Beispiel für die hohen Anforderungen an die Lithographiestruktur ist in Abb. 6 ein Ausschnitt eines Spektrometers dargestellt. Dies ist eines der wenigen Beispiele, bei denen die Lithographiestruktur direkt verwendet werden kann. Solche direktlithographischen Bausteine dienen den LIGA-Kunden, um die Marktnachfrage auszutesten. Die Herausforderungen zur Herstellung solcher Strukturen liegen neben der Feinheit der

Strukturdetails vor allem in der präzisen auf wenige zehn Nanometer genauen Lage des Gitters über dem gesamten Längenbereich von einigen Zentimetern und in der Defektfreiheit der Strukturen.

Als Beispiele für das Potential der LIGA-Technik, in Kombination mit vielen anderen Technologien wie Galvanik, Aufbau- und Verbindungstechnik, etc. sind in den vergangenen Jahren verschiedene Arbeiten durchgeführt worden. Abb. 7 zeigt einige beeindruckende Beispiele hierzu.



**Abb. 7: Potential der LIGA-Technik anhand einiger Beispiele.**

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Lithographie ist auch in der Mikrosystemtechnik ein Standardverfahren zur Strukturierung. Die Details der Verfahren hängen in sehr hohem Maße von den gewünschten technischen Anforderungen und mit breiter werdendem Einsatzgebiet auch von den Kosten und vom Automatisierungsgrad der Fertigungskette ab.

Das IMT konzentriert sich auf die Röntgenlithographie. In diesem Bereich sind in den vergangenen Jahren die wesentlichen strukturbegrenzenden Effekte untersucht worden. Nun gilt es, die in der ANKA erstmalig zur Verfügung stehende gut reproduzierbare und verlässliche Bestrahlungsmöglichkeit für eine breitere Nutzung des LIGA-Verfahrens einzusetzen. Hierzu sind Anstrengungen zur Vertiefung des Prozessver-

ständnisses, der Standardisierung, der Erhöhung der Ausbeute und in der Prüftechnik bis hinab in den Sub- $\mu\text{m}$  Bereich notwendig.

## Literatur

- [1] W. M. Moreau, *Semiconductor Lithography, Principles, Practices and Materials*, Plenum Press 1988
- [2] F. J. Pantenburg, J. Mohr, *Proc. of the 1st European Conf. on Synchrotron Radiation in Materials Science, Chester, GB, July 3-8, 1994 Nuclear Instruments and Methods B, 97 (1995) S. 551-556*
- [3] A. El-Kholi, J. Mohr, R. Stransky, *Microelectronic Engineering vol. 23, 1994, no.1-4, S. 219 ff.*
- [4] S. J. Chung, H. Hein, J. Schulz, *Strukturprofilsimulation dicker Schichten in der optischen Lithographie mit DNQ-Novolak-basierenden Photoresists. Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6111 (August 98) Dissertation, Universität Karlsruhe 1998*
- [5] S. J. Chung, H. Hein, *Herstellung von Formeinsätzen aus Nickel bis 120 mm Durchmesser mit Hilfe konventioneller Optischer Lithographie. 4. Statuskolloquium des Programms Mikrosystemtechnik, Karlsruhe, 30.-31. März 2000 Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6423 (März 2000) S. 187-188*
- [6] B. Rogge, J. Schulz, J. Mohr, *Wissenschaftliche Berichte, FZKA-5793 (Juli 96)*
- [7] P. Krippner, J. Mohr, *SPIES's Internat. Symp. on Micromachining and Microfabrication 99, Santa Clara, Calif., September 20-22, 1999*
- [8] K. Schumacher, U. Wallrabe, J. Mohr, *Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6361 (August 99)*
- [9] A. C. M. Ruzzu, U. Wallrabe, J. Mohr, *Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6514 (Dezember 2000)*