

# Röntgentiefenlithographie an ANKA

J. Mohr, S. Achenbach, M. Börner, F.J. Pantenburg, V. Saile, IMT

## Einleitung

Neben der Analytik stellt die Röntgentiefenlithographie zur Herstellung von Mikrostrukturen nach dem LIGA-Verfahren die Hauptanwendung des ANKA Speicherringes dar. LIGA ist ein Kunstwort aus den Anfangsbuchstaben der 3 Prozessschritte **L**ithographie, **G**alvanik und **A**bformung. Im ersten Schritt, der Lithographie, werden durch Bestrahlung eines strahlenempfindlichen Kunststoffes (Resist) mit Synchrotronstrahlung Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis hergestellt, wobei die Strukturhöhen bis zu mehreren Millimetern und die Strukturabmessungen nur wenige Mikrometer betragen können [1]. Diese besonderen Eigenschaften führten in der Vergangenheit zu einer Vielzahl von verschiedenen Mikrostrukturprodukten, wobei für die Bestrahlung die Strahlungsquellen der Universität Bonn oder der BESSY GmbH eingesetzt wurden.

In einer ersten Ausbaustufe baut das Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) drei Strahlrohre für die Röntgentiefenlithographie an ANKA auf. Die Strahlrohre sind dabei so ausgelegt, dass alle Strukturierungsaufgaben von geringer Strukturhöhe (bis ca. 100  $\mu\text{m}$ , insbesondere für die Maskenherstellung), von mittlerer Strukturhöhe (bis ca. 500  $\mu\text{m}$ , für die routinemäßige Fertigung von Mikrostrukturen) und von großen Strukturhöhen (im Millimeterbereich, für explorative Entwicklungen) durchgeführt werden können. Um die Sauberkeitsanforderungen mikrotechnischer Fertigungsmethoden zu erfüllen, sind

die Strahlrohre in einem separaten Reinraum aufgebaut.

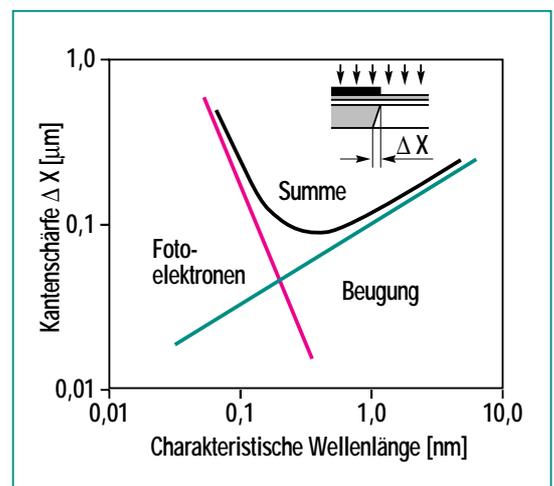
## Anforderungen der Röntgentiefenlithographie

Bei der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung wird ein röntgenempfindlicher Resist (Polymethylmethacrylat = PMMA) über eine Maske lokal mit Röntgenstrahlung belichtet. Durch die Belichtung erfolgt eine chemische Modifikation des Resists (Hauptkettenbruch bei PMMA und damit Reduktion des Molekulargewichtes), so dass die bestrahlten Bereiche in einem geeigneten Entwickler selektiv gelöst werden können [2]. Aufgrund der extremen Parallelität der Röntgenstrahlung ist eine der herausragenden Eigenschaften der Röntgentiefenlithographie, dass mit ihr hohe Strukturen hergestellt werden können, deren Wände nur minimale Abweichungen von der Senkrechten aufweisen. Damit besitzen die Strukturen eine über der Strukturhöhe gleichbleibende Qualität. Die erreichbare Qualität der Mikrostrukturen hängt entscheidend von den Eigenschaften der Synchrotronstrahlung ab. Direkten Einfluss auf die Steilheit der Strukturwände nehmen die Divergenz der Synchrotronstrahlung sowie die Beugung der Strahlung an der Absorberkante und die Reichweite der Fotoelektronen in den von der Maske abgeschatteten Resistbereich. Winkelfehler aufgrund der Divergenz der Strahlung liegen im Bereich von weniger als 0.1 mrad. Beugung und Fotoelektronen sind in Bezug auf die Kantenunschärfe gegenläufige Effekte. Während der

Beugungseinfluss mit zunehmender Wellenlänge zunimmt, nimmt der Einfluss der Fotoelektronen mit zunehmender Wellenlänge ab (Abb. 1). Eine minimale Kantenunschärfe von etwa 0,1  $\mu\text{m}$  ergibt sich für beide Effekte bei einer charakteristischen Wellenlänge von etwa 0.3 nm [3].

Indirekten Einfluss auf die Qualität hat das Röntgenspektrum über die Erzeugung von Fluoreszenzstrahlung aus der Maskenmembran und über die Erzeugung von Sekundärelektronen aus der Haft- und Galvanikstartschicht, sowie über den Leistungseintrag in Maske und Resistenschicht.

Fluoreszenzstrahlung entsteht insbesondere dann, wenn das zur Strukturierung genutzte Synchrotronstrahlungsspektrum im Bereich von sogenannten Absorptionskanten (starker Sprung



**Abb. 1:** Einfluss der Fotoelektronen und der Beugung an der Absorberkante in Abhängigkeit von der charakteristischen Wellenlänge des Synchrotronstrahlungsspektrums auf die Kantengenauigkeit von röntgenlithographisch erzeugten 500  $\mu\text{m}$  hohen Mikrostrukturen.

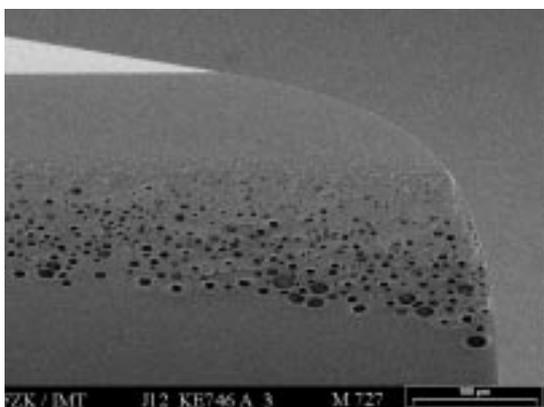
im Absorptionsspektrum des Materials aufgrund der Tatsache, dass ein Übergang eines Elektrons in die nächste Schale stattfinden kann) des Maskenmembranmaterials liegt. Dies trifft auf das als Membran der Maske verwendete Titan zu, dessen Kante bei 0.497 nm und somit in dem von ANKA zur Verfügung gestellten Röntgenspektrum liegt. Die

Fluoreszenzstrahlung wird homogen über dem Raumwinkel abgestrahlt und führt somit zu Schädigungen auch unter dem Absorbierbereich. Damit ergibt sich eine verrundete Oberflächenkante (Abb. 2). Während dieser Effekt bei Arbeitsmasken aus Beryllium vernachlässigt werden kann, ist der Effekt bei Masken aus Titan, die bei verschiedenen Anwendungen (z.B. justierte und gekippte Bestrahlungen) derzeit zwingend notwendig sind, nur durch eine Modifikation des Spektrums vermeidbar.

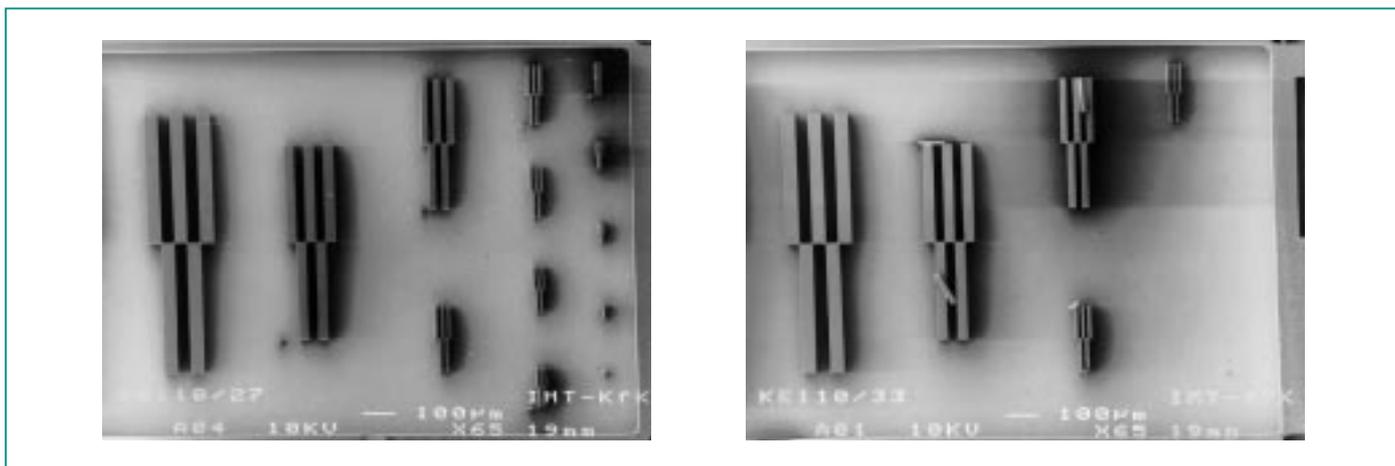
Da das Substrat in der Röntgentiefenlithographie in der Regel aus einem Metall besteht, das einen deutlich höheren Absorptionskoeffizienten als das Resistmaterial besitzt, steigt in der Grenzfläche Resist-/Haftschicht der Wirkungsquerschnitt für die Produktion von Sekundärelektronen stark an. Diese Elektronen führen zu einer verstärkten Zerstörung des Resists in der Grenzschicht. Während der Effekt in

den bestrahlten Bereichen keine Rolle spielt, kann er in den von den Absorbieren abgeschatteten Bereichen einen drastischen Einfluss auf die Haftung der Strukturen haben, sofern durch den Absorber die Strahlung nicht ausreichend absorbiert wird (Abb. 3). Um insbesondere bei hohen Strukturen den Goldabsorber noch in vertretbarer Dicke zu halten, ist es notwendig, den Anteil hochenergetischer Photonen im Spektrum zu vermindern [4].

Die Synchrotronstrahlung wird in den Absorbieren und im Resist absorbiert und führt zu einer Erwärmung von Maske und Resist (Abb. 4). Für die Bestrahlungsbedingungen an ELSA (2,7 GeV, 35 mA, Scangeschwindigkeit 10 mm/sec) wurde für den Fall einer Berylliummaske eine maximale Temperaturerhöhung von 1,3 °C simuliert. Für eine Titanmaske beträgt die Temperaturerhöhung 19 °C. In diesem Fall werden Verzüge zwischen Maske und Substrat, die die Qualität der Struktu-



**Abb. 2:** Verrundung der Mikrostruktur an der Strukturoberseite aufgrund Schädigung des Resists durch isotrope Fluoreszenzstrahlung aus der Maskenmembran, die im vom Absorber abgeschatteten Bereich abgelagert wird.



**Abb. 3:** Vergleich der Resisthaftung von 100 µm dicken Resiststrukturen nach dem Entwicklungsprozess für unterschiedliche Absorberdicken (links 7,5 µm, rechts 3,5 µm), was eine unterschiedliche Sekundärelektronenproduktion in der Oberflächenschicht des Substrates bewirkt und damit eine unterschiedliche Haftung der Mikrostrukturen.

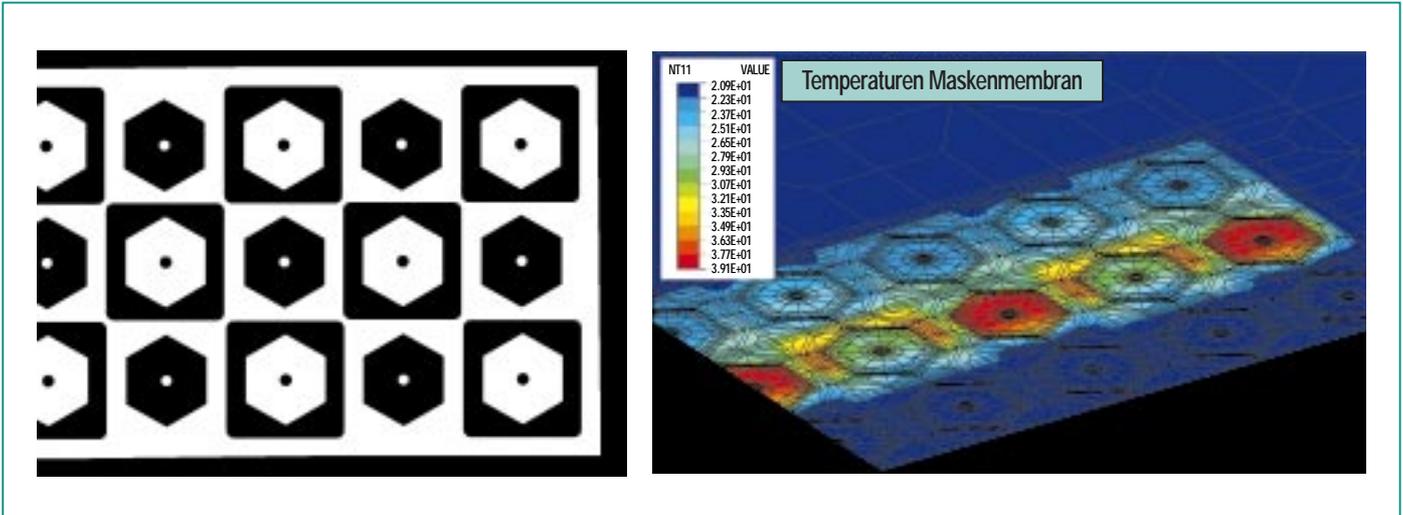


Abb. 4: Simulierte Temperaturverteilung auf einer Titanmaske bei Bestrahlung am Elektronenstretcherring ELSA der Universität Bonn (2,7 GeV, 35 mA, 200  $\mu\text{m}$  Resistdicke, Scangeschwindigkeit 20 mm/sec) für die im linken Teil des Bildes gezeigte Maskenstruktur (schwarz: Absorber). Die errechnete maximale Temperaturerhöhung beträgt 19  $^{\circ}\text{C}$ .

ren negativ beeinflussen, von bis zu einem Mikrometer beobachtet. Der Leistungseintrag an ANKA ist im Vergleich zu ELSA um mehr als eine Größenordnung höher, so dass in diesem Fall auch die Temperaturerhöhung und damit die Verzüge deutlich höher ausfallen (Abb. 5).

### Strahlrohrdesign

Wie die Diskussion der qualitätsbestimmenden Faktoren zeigt, ist es insbesondere notwendig, das Spektrum durch Herausfiltern eines mehr oder weniger großen Anteils an hochenergetischen Photonen zu beschneiden und den Leistungseintrag zu vermindern. Dies lässt sich durch den Einsatz von Filter und Röntgenspiegel im Strahlrohr ermöglichen, die unter sehr flachem Winkel von der Synchrotronstrahlung getroffen werden. So kommt man beispielsweise mit einem Ni-Spiegel und Winkeln von größer 8

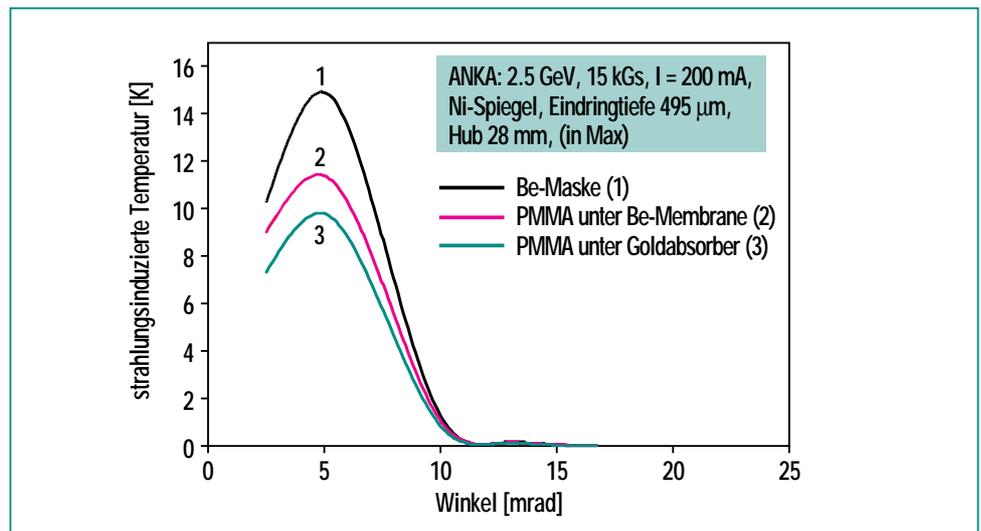
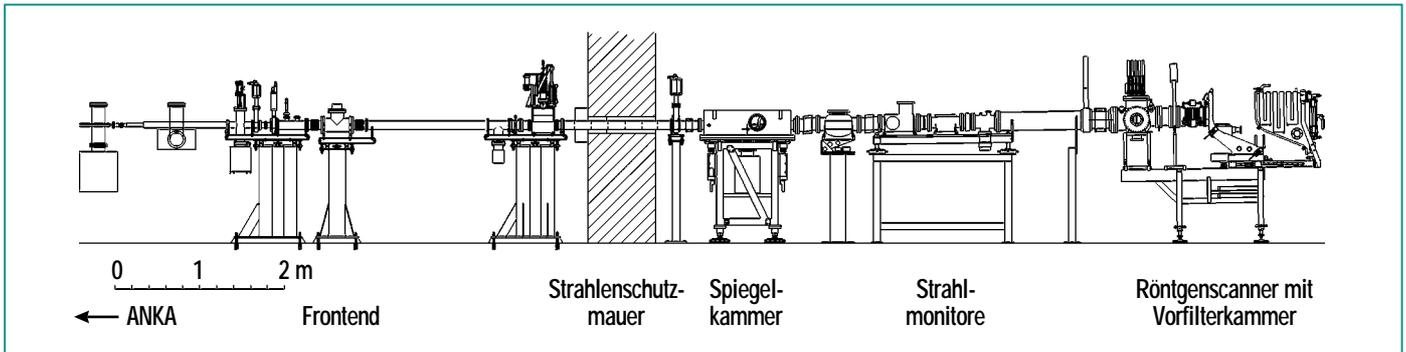


Abb. 5 : Berechnete strahlinduzierte Temperaturerhöhung auf einer Be-Maske bei Bestrahlung an ANKA (2,5 GeV, 200 mA, Resistdicke 500  $\mu\text{m}$ , Scangeschwindigkeit 20 mm/sec) als Funktion der Winkeleinstellung des Spiegels im Strahlrohr.

mrad zu Temperaturerhöhungen, die im Hinblick auf Verzüge akzeptabel sind. Aus diesem Grunde sind die drei Röntgentiefenlithographiestrahlrohre mit entsprechenden metallbeschichteten, wassergekühlten Silizium-

spiegeln ausgestattet. Abb. 6 zeigt exemplarisch den Aufbau des Strahlrohres LITHO 2. Das Frontend ist bei allen ANKA-Strahlrohren einheitlich und besteht aus einem wassergekühlten Kupferblock als Beam-Shutter, ei-



**Abb. 6: Schematischer Aufbau des Lithographiestrahlrohres LITHO 2 an ANKA. Ausgehend vom Quellpunkt (links, außerhalb des Bildes) erkennt man den Frontend-Bereich der mit der Strahlenschutzmauer abschließt. Nach der Spiegelkammer und den Strahlmonitoren befindet sich der Scanner, der in einer Strahlenschutzhütte im Reinraumbereich an ANKA untergebracht ist.**

nem Ringabschlussventil, einer Schnellschlussklappe, einem Strahlmonitorsystem und einem Strahlkollimator. Im Falle der LIGA-Strahlrohre ist der Kollimator so ausgelegt, dass an der Stelle der Probe, die sich etwa 15 m vom Strahlquellpunkt in der Bestrahlungsapparatur befindet, in

horizontaler Richtung ein Strahl von 125 mm Breite zur Bestrahlung der Probe zur Verfügung steht. Daran schließt sich die Strahlrohroptik mit dem metallbeschichteten Si-Spiegel an (Abb. 7). Der Neigungswinkel zum Strahl des Spiegels wird für das jeweilige Strahlrohr so eingestellt,

dass nur Photonen bis zu der für die Strukturierung tolerierbaren Energie (Cut-Off Energie) reflektiert werden. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Bestrahlungszeit bei fester Dicke und abnehmender Cut-Off-Energie überproportional zunimmt. Die Cut-Off Energie wird deshalb abhängig von den Ergebnissen der ersten Experimente für LITHO 1 (Bestrahlung von Masken und Strukturen bis ca. 100  $\mu\text{m}$ ) zwischen 1 und 4 keV und für LITHO 2 (Bestrahlung von Proben bis ca. 500  $\mu\text{m}$ ) zwischen 2 und 8 keV liegen. Im Falle von LITHO 3 wird ein Doppelspiegelsystem eingebaut, das es erlaubt den Winkel variabel einzustellen. Durch Herausfahren der Spiegel kann auch das gesamte Röntgenspektrum genutzt werden. Darüber hinaus soll mit diesem Strahlrohr, das auch der Weiterentwicklung der Bestrahlungsbedingungen dient, untersucht werden, inwieweit ein Scannen des Strahles mit einem Spiegel möglich ist. Während in diesem Fall das Strahlrohr horizontal verläuft, sind die beiden anderen Strahlrohre um den doppelten Winkel des



**Abb. 7: Blick auf die beiden Strahlrohre LITHO 1 und LITHO 2 im Bereich der optischen Aufbauten. Im Vordergrund ist die Vakuunkammer des Spiegels von LITHO 2 zu erkennen. Im Hintergrund erkennt man die Strahlmonitore beider Strahlrohre.**

Spiegelwinkels geneigt. Nach dem Spiegel befindet sich ein variables Schlitzsystem, mit dem der Strahl in seiner Breite auf die Maskenbreite angepasst wird, um die Wärmebelastung des Spiegels und der Maske zu vermindern. Ein anschließendes Berylliumfenster trennt das UHV-Vakuum des Rings und der Spiegelkammer von dem Hochvakuum des restlichen Strahlrohres. Ein weiterer Positions- und Intensitätsmonitor erlaubt die direkte Kontrolle des vom Spiegel reflektierten Synchrotronstrahls. Das Strahlrohr wird mit einem Röntgenscanner (Hersteller: Fa. Jen-Optik) abgeschlossen. Der Scanner enthält eine Filterkammer, um das Spektrum im niederenergetischen Bereich an die Probenstärke anpassen und das geforderte Dosisverhältnis einstellen zu können. Ein zweites Berylliumfenster trennt das Hochvakuumstrahlrohr vom Scanner, der unter einem Druck von 100 mbar Helium betrieben wird. Der Scanner dient dazu, Maske und Probe periodisch durch den Strahl zu bewegen, um in vertikaler Richtung Flächen bis 100 mm ausleuchten zu können. Er enthält außerdem zusätzliche Vorrichtungen, um justierte und gekippte Bestrahlungen durchzuführen. Damit ist die Herstellung von komplexen wie z.B. beweglichen LIGA-Strukturen oder Prismenstrukturen möglich.

## Anwendungen

Obwohl im Rahmen des LIGA-Verfahrens die Fertigung von Mikrostrukturkomponenten bei großen Stückzahlen durch Abformung erfolgt, stellt die Röntgen-

tieflithographie ein wichtiges Fertigungsverfahren dar, wenn es darum geht Prototypen herzustellen, um den Aufwand für die Herstellung eines Abformwerkzeuges zu vermeiden. Sie findet auch ihren Einsatz bei Komponenten, die durch Abformung bisher nicht herstellbar sind, wie z.B. bewegliche Strukturen. Durch die direkte Verfügbarkeit der Röntgenquelle wird ihre Bedeutung auch bei der Fertigung von Komponenten in mittlerer Stückzahl zunehmen.

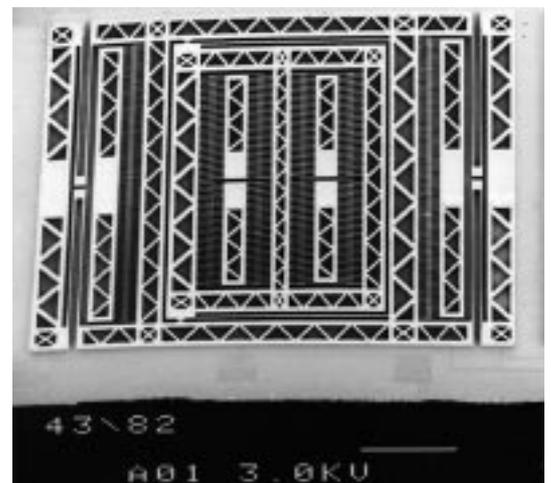
LIGA-Komponenten finden vor allem Anwendung in der Fluidik, der Sensorik, der Aktorik und der Optik. Im folgenden werden exemplarisch einige in der Vergangenheit vom IMT durch LIGA-Technik hergestellte Komponenten beschrieben.

### Fluidische Anwendungen

Für Mikrostrukturen, die in der Fluidik Anwendung finden, ist die freie Strukturierbarkeit im Rahmen der Röntgentieflithographie in Verbindung mit sehr glatten Seitenwänden (mittlere Rauigkeit  $R_a < 50 \text{ nm}$ ) von besonderer Wichtigkeit. Damit lassen sich Fluidplatten mit beliebiger Kanalgeometrie realisieren, die im Bereich der Biotechnologie eine immer größere Bedeutung gewinnen. Die Batchfertigung von sehr kleinen Strukturen mit hoher Packungsdichte auf einem Substrat erlaubt darüber hinaus die Realisierung von fluidischen Elementen mit hoher Systemleistung. Beispiel hierfür ist ein bistabiler Schalter wie er mit Hilfe der Röntgentieflithographie realisiert wurde [5].

### Mikromechanische Anwendungen

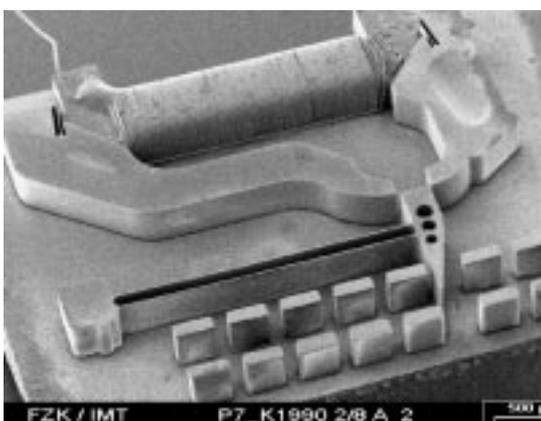
Mikromechanische Komponenten in LIGA-Technik finden sowohl in der Sensorik als auch als miniaturisierte Stellglieder (Aktoren) Anwendung. Dabei ist das durch Röntgentieflithographie realisierbare Aspektverhältnis und die große Strukturhöhe von besonderem Vorteil für die Herstellung von aktorischen Komponenten. Entscheidend bei der Herstellung von Sensoren und Aktoren ist die Anwendung der Opferschichttechnik [6], die es erlaubt, sowohl feststehende als auch bewegliche Strukturen nebeneinander zu realisieren. Aufbauend auf dieser Technik wurden z.B. hochempfindliche Beschleunigungssensoren [7] und Gyrometer [8] (Abb. 8), elektrostatische Linearaktoren [9] oder Mikromotoren [10] realisiert.



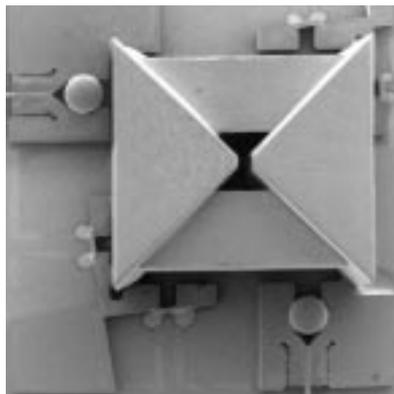
**Abb. 8:** Durch Röntgentieflithographie und Galvanik hergestellte Struktur eines Gyrometers, das nach dem Coriolisprinzip arbeitet. Die Anregung erfolgt elektrostatisch über Kammstrukturen (rechter und linker Bereich). Über die im Zentrum befindlichen Kammstrukturen wird die Auslenkung kapazitiv ausgewertet.

## Optische Anwendungen

Die Möglichkeit LIGA-Strukturen in optischen Anwendungen zu nutzen, ergibt sich aus der optischen Transparenz der Werkstoffe im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich sowie durch die hohe Präzision der Strukturen selbst aber auch der hohen Positionsgenauigkeit der Strukturen zueinander und der geringen Rauigkeit der Strukturseitenwände. Es lassen sich somit sogenannte mikrooptische Bänke realisieren, die einerseits Führungsstrukturen aufweisen, die als Halteelemente für hybrid einzusetzende mikrooptische Bauelemente dienen und die andererseits einfache optische Elemente wie Zylinderlinsen, Mikroprismen und geometrische Teiler aufweisen. Beispiele hierfür sind bidirektionale Sende- und Empfangsmodule, Heterodynempfänger



**Abb. 10: Elektromagnetischer Mikrochopper für Faseranwendungen. Die hammerartige Struktur wird durch ein elektromagnetisches Feld periodisch bewegt, so dass das Licht, das zwischen den in die Faserführungsstrukturen einzulegenden Fasern gekoppelt wird, periodisch unterbrochen wird. Die Spule ist in die Aktorstruktur eingefügt.**



**Abb. 9: Mikrooptische Bank eines Heterodynempfängers. Eingefügte optische Elemente (Kugellinsen, Fasern, Photodioden, Strahlteilerprismen) werden durch röntgenlithographisch hergestellte Halte- und Führungsstrukturen passiv zueinander justiert.**

ger (Abb. 9) [11] oder Faserstecker [12]. Die Integration von aktorischen Elementen in die mikrooptische Bank erlaubt auch den Aufbau von mechano-optischen Systemen wie z.B. Faserschalter [13], Bypass-Schalter [14], Chopper [15] (Abb. 10) oder Mikroscanner.

Eine weitere Produktklasse im Bereich der Optik sind wellenleitende Module für Multimode-Anwendungen mit optischen Funktionsflächen. Beispiel hierfür sind planare Gitterspektrometer für den sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich (Abb. 11) [16]. Herzstück dieser Elemente sind vertikal strukturierte Beugungsgitter mit Gitterstufen im Bereich von wenigen zehntel Mikrometern und von über 500 Gitterzähnen pro Millimeter, die nur aufgrund der besonderen Eigenschaft der Synchrotronstrahlung in der notwendigen Präzision hergestellt werden können [17], [18].

Ein weiteres Element dieser Produktklasse ist ein optischer Abstandssensor, der nach dem Triangulationsprinzip arbeitet und bei dem vertikal strukturierte Linsenflächen zur Abbildung eingesetzt werden [19].

## Zusammenfassung

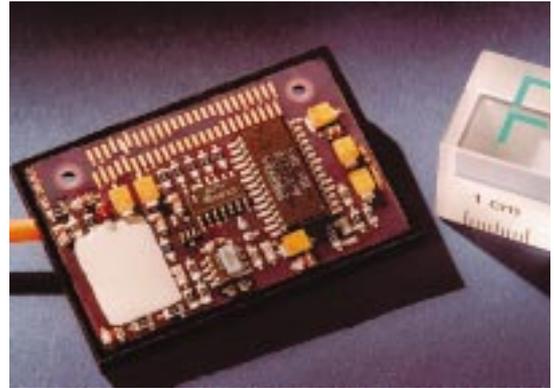
Die langjährigen Aktivitäten des Forschungszentrum Karlsruhe haben zu einer Vielzahl von Mikrostrukturprodukten geführt. Damit wurde die Relevanz des LIGA-Verfahrens und der Röntgentiefenlithographie als mikrotechnische Fertigungsmethode demonstriert. Bei der Herstellung der Strukturen war dabei allerdings immer ein zeitbestimmender Faktor, dass die Röntgenbestrahlung an einer Quelle an einem mehrere hundert km entfernten Standort durchgeführt werden musste. Dadurch ergaben sich Nachteile aufgrund einer komplexeren Logistik und aufgrund von Transportproblemen. Qualitätseinbrüche wegen der zeitlichen und räumlichen Unterbrechung der Prozesskette waren unvermeidbar. Die Erfahrungen zeigten, dass für eine industrielle Umsetzung des Verfahrens Prozesslabors und Röntgenbestrahlungsanlage räumlich integriert werden müssen.

Dies ist mit dem direkten Zugriff auf die Strahlungsquelle ANKA am FZK und der Verfügbarkeit der umfangreichen Infrastruktur des Instituts für Mikrostrukturtechnik gegeben. Damit eröffnet sich erstmalig die Möglichkeit, eine komplette LIGA-Linie an einem Ort nach industriellen Standards zu betreiben. Somit steht

ein durchgängiger Service im Bereich des LIGA-Verfahrens zur Verfügung, der eine verstärkte Nutzung der Prozesstechnologie durch die Industrie erwarten lässt. Vorteilhaft ist dabei insbesondere auch, dass alle Verfahrensschritte nach den Regeln des IMT-Qualitätsmanagementsystems nach DIN EN ISO 9001 durchgeführt werden. Somit wird das IMT zusammen mit der ANKA GmbH als Lieferant von LIGA-Formeinsätzen und von Mikrostrukturen als Prototypen oder als Serienprodukte in kleiner und mittlerer Stückzahl auftreten können. Darüber hinaus besteht für die Industrie auch die Möglich-

keit, die LIGA-Strahlrohre zu mieten oder gar eigene Strahlrohre aufzubauen.

Die Wissenschaftler des IMT haben mit ANKA hervorragende Möglichkeiten, Strukturierungsmethoden mit der Röntgenlithographie weiterzuentwickeln und zu erweitern, aber auch neue Konzepte zu verwirklichen, die insbesondere die Kosten für eine Fertigung mit der Röntgentiefenlithographie reduzieren. Mit solchen neuartigen Verfahren versprechen sich das Forschungszentrum und die ANKA GmbH eine Steigerung der Attraktivität des LIGA-Verfahrens bei der Industrie.



**Abb. 11: Mikrospektrometersystem für den NIR-Bereich auf der Basis eines röntgenlithographisch strukturierten planaren Wellenleiters mit vertikalem Beugungsgitter und eines InGaAs-Detektors. Der Wellenleiter sitzt unter der Elektronikplatine. (Kooperationspartner: Steag micro Parts)**

## Literatur

- [1] Becker E.W., Ehrfeld W., Hagmann P., Maner A., Münchmeyer D.; *Microelectronic Engineering*, 4 (1986) p. 35-56
- [2] *Eine ausführliche Darstellung des LIGA-Verfahrens und der Röntgentiefenlithographie findet sich in:*  
Menz W., Mohr J.; *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*, 2. Aufl. (1997), VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim (ISBN 3-527-29405-8)
- [3] Becker E.W., Ehrfeld W., Münchmeyer D.; *KfK Bericht 3732 (1984)*, Kernforschungszentrum Karlsruhe
- [4] Pantenburg F.J., Mohr J.; *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B97 (1995) p. 551-556.
- [5] Gebhard U., Günther R., Just E., Ruther P.  
*in: H. Reichl, MICRO SYSTEM Technologies 96, 5th Int. Conf. on Micro-, Electro-, Opto-, Mechanical Systems and Components, Potsdam, 17.-19.9.96; VDE-Verl. (1996) p. 609-614*
- [6] Mohr J., Burbaum C., Bley P., Menz W., Wallrabe U.  
*in: H. Reichl, MICRO SYSTEM Technologies 90, 1st Int. Conf. on Micro Electro, Opto, Mechanic Systems and Components, Berlin, 10.-13.9.1990; Springer-Verlag (1990) p. 529-537*
- [7] Strohmarm M., Bley P., Fromheim O., Mohr J.; *Sensors and Actuators A*, 41-42 (1994) p. 426-429

- [8] Schumacher K., Krömer O., Wallrabe U., Mohr J., Saile V.; *Transducer'99, 10th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, June 7-10, Digest of Technical Papers, Vol.1, Sendai (1999) p. 1574-1577*
- [9] Mohr J., Kohl M., Menz W.; *7th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Yokohama, 7.-10.6.93; Digest of Technical Papers, (1993) p. 120-123*
- [10] Samper V.D., Sangster A.J., Reuben R.L., Wallrabe U.; *J. of Microelectromechanical Systems 7, 2 (1998) p. 214-223*
- [11] Ziegler P., Wengelink J., Mohr J.; *Proc. Conf. On Micro Opto Electro Mechanical Systems (MOEMS '99), Mainz 30.8.-1.9.99, p. 186-189*
- [12] Dittrich H., Wallrabe U., Mohr J., Ruther P., Hanemann T., Jacobi O., Müller K., Piotter R., Ruprecht R., Schaller T., Zißler W., *FZKA Bericht 6423 (2000), Forschungszentrum Karlsruhe*
- [13] Mohr J., Göttert J., Müller A., Ruther P., Wengeling J.; *Intern. Symp. on Opto-electronics, San Jose, February 8-14, 1997; SPIE 3008 (1997) p. 273-278*
- [14] Mohr J.; *Technical Digest MOEMS'97 Int. Conf. on Optical MEMS and their Applications, Nara, J., 18.-21.11.97, (1997) p. 221-226;*
- [15] Krippner P., Mohr J., Saile V.; *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 3878 (1999) p. 144 - 154*
- [16] Krippner P., Kühner T., Mohr J., Saile V.; *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 3912 (2000) p. 141-149*
- [17] Müller C., Mohr J.; *ISR - Interdisciplinary Science Reviews 18 (1993) p. 273-279*
- [18] Müller C., Fromhein O., Göttert J., Kühner T., Mohr J.; *in: K. Shi, L.H. Spiekam, X.J.M. Leijtens: Proceedings 9th European Conf. on Integrated Optics (ECIO '97), Delft, 3.-6.4.95 (1995)*
- [19] Ruther P., Nakajima H., Mohr J., Saenger S.; *tm-Technisches Messen, 66 (1999) p.176-184*