

Nicht entleeren

KfK 3995 : 2

November 1985

**Herstellung von Mikrostrukturen
mit großem Aspektverhältnis
und großer Strukturhöhe
durch Röntgentiefenlithographie
mit Synchrotronstrahlung,
Galvanoformung und
Kunststoffabformung
(LIGA-Verfahren)**

18. DEZ. 1985

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Zentralbibliothek

E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann,
A. Maner, D. Münchmeyer
Institut für Kernverfahrenstechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Kernverfahrenstechnik

KfK 3995

Herstellung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis und großer
Strukturhöhe durch Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung,
Galvanoformung und Kunststoffabformung (LIGA-Verfahren)

von

FWM

E.W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann,
A. Maner, D. Münchmeyer

Bürexemplar Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH	Nr. <i>2</i>
--	-----------------

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Herstellung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis und großer Strukturhöhe durch Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung, Galvanoformung und Kunststoffabformung (LIGA-Verfahren)

Zusammenfassung

Beim LIGA-Verfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis und großer Strukturhöhe wird durch Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung eine primäre Kunststoffform erzeugt, die galvanisch mit einem Metall aufgefüllt wird. Die entstandene Metallstruktur wird als Formeinsatz für die Herstellung sekundärer Kunststoffformen benutzt, die bei der Massenfertigung an die Stelle der primären Kunststoffform treten. Es wird über den Stand der vom Kernforschungszentrum Karlsruhe unter Mitwirkung der Siemens AG und des Fraunhoferinstituts für Festkörpertechnologie durchgeführten Arbeiten berichtet: Durch einmalige Bestrahlung und Entwicklung von Polymethylmethacrylat (PMMA)-Platten wurden primäre Kunststoffformen hergestellt, die, bei Strukturhöhen von einigen hundert μm , Strukturabweichungen in Strahlrichtung von nur etwa $0,1 \mu\text{m}$ aufweisen. Die besten Ergebnisse wurden mit einer Röntgenmaske erzielt, die aus einer $25 \mu\text{m}$ dicken Trägerfolie aus Beryllium und $18 \mu\text{m}$ dicken Absorberstrukturen aus Kupfer und Gold besteht. Die durch das PMMA vorgebildeten Mikrostrukturen ließen sich beim galvanischen Auffüllen praktisch fehlerfrei auf das Metall übertragen, wobei selbst Strukturdetails unter $0,1 \mu\text{m}$ wiedergegeben wurden. Die Abformung erfolgte mit einem Gießharz auf Methacrylat-Basis, das zur Verringerung der Haftung zwischen Formteil und innerer Formoberfläche ein internes Trennmittel enthielt. Durch galvanisches Auffüllen der sekundären Kunststoffformen konnten sekundäre Metallstrukturen hergestellt werden, die sich von den primären praktisch nicht unterscheiden. Aus den Ergebnissen geht hervor, daß eine Überlegenheit des LIGA-Verfahrens gegenüber anderen Fertigungsmethoden für Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis vor allem dann zu erwarten ist, wenn bei der Massenherstellung eines Mikrostrukturkörpers gleichzeitig hohe Anforderungen an das räumliche Auflösungsvermögen, das Aspektverhältnis, die Strukturhöhe, die Parallelität der Strukturwände und die Freiheit der Formgebung gestellt werden.

Fabrication of Microstructures with High Aspect Ratios and Great Structural Heights by Synchrotron Radiation Lithography, Galvanoforming and Plastic Moulding (LIGA Method)

Summary

Under the LIGA method for fabricating microstructures having high aspect ratios and great structural heights synchrotron radiation lithography produces a primary template which is filled with a metal by electrodeposition. The metallic structure so produced is used as a mould insert for fabricating secondary plastic templates which in mass production replace the primary template. This is a report about the status of work performed by the Karlsruhe Nuclear Research Center with the cooperation by Siemens AG and the Fraunhofer Institute for Solid State Technology: By irradiation and development of polymethyl methacrylate (PMMA) plates primary templates were produced which, for structural heights of several hundred μm , exhibit deviations in critical dimensions of less than about $0.1 \mu\text{m}$. The best results were obtained with an X-ray mask consisting of a $25 \mu\text{m}$ thick beryllium foil and $18 \mu\text{m}$ thick absorber structures consisting of copper and gold. Practically perfect metallic replicas were obtained by electrodeposition of nickel in the PMMA microstructures and even details in structure of less than $0.1 \mu\text{m}$ size were reproduced. Moulding was done with a methacrylate based casting resin with an internal mould release agent. By electrodeposition of nickel in the secondary templates secondary metal structures were produced which practically do not differ from the primary structures. The LIGA method can be expected to be superior to other methods for fabricating microstructures with high aspect ratios if, in series production of microstructures with complex shapes, stringent requirements are imposed on the resolution, the aspect ratio, the structural height, and the parallelity of the structural walls.

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Erzeugung primärer Mikrostrukturen aus Kunststoff durch Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung	3
2.1 Besondere Anforderungen an den Lithographieprozeß und theoretisch erreichbare Genauigkeit	3
2.2 Herstellung von Röntgenmasken mit ausreichendem Kontrast	5
2.3 Bei der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung erzielte Ergebnisse	8
2.4 Apparative Entwicklung für die Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung	13
3. Erzeugung metallischer Mikrostrukturen durch galvanische Metallabscheidung in Mikrostrukturen aus Kunststoff	15
3.1 Besondere Anforderungen an den Galvanoformungsprozeß	15
3.2 Bei der Galvanoformung erzielte Ergebnisse	16
3.3 Apparative Entwicklung für die Galvanoformung	18
4. Erzeugung sekundärer Mikrostrukturen aus Kunststoff durch Abformung metallischer Mikrostrukturen	20
4.1 Besondere Anforderungen an den Kunststoffabformprozeß	20
4.2 Bei der Kunststoffabformung erzielte Ergebnisse	21
4.3 Apparative Entwicklung für die Kunststoffabformung	22
5. Praktische Anwendung und Weiterentwicklung des LIGA-Verfahrens	26
6. Literaturverzeichnis	31

1. Einleitung

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe wird seit einigen Jahren ein Verfahren zur Massenherstellung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis und großer Strukturhöhe entwickelt, das auf einer Kombination von Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung, Galvanoformung und Kunststoffabformung beruht ("LIGA"-Verfahren) (Abb. 1): Durch Röntgentiefenlithographie wird eine primäre Kunststoffform erzeugt, die galvanisch mit einem Metall aufgefüllt wird. Die entstandene Metallstruktur wird als Formeinsatz für die Herstellung sekundärer Kunststoffformen benutzt, die bei der Massenfertigung an die Stelle der primären Kunststoffform treten.

Die unter Mitwirkung der Siemens AG und des Fraunhofer-Instituts für Festkörpertechnologie durchgeführten Arbeiten waren zunächst auf die Erzeugung extrem kleiner Trenndüsensysteme für die Urananreicherung mit den beiden ersten Verfahrensschritten ausgerichtet /1/. Dabei wurden bisher unbekannte Kombinationen von hohem räumlichen Auflösungsvermögen, großem Aspektverhältnis, großer Strukturhöhe und extremer Parallelität der Strukturwände erreicht. Aufgrund dieser Ergebnisse und der neuerdings hinzugekommenen Möglichkeit, die eigentliche Massenproduktion über Kunststoffabformung, d. h. unabhängig von einer Synchrotronstrahlungsquelle, durchführen zu können, gewinnt das LIGA-Verfahren zunehmendes Interesse auch für die Herstellung anderer Mikrostrukturen. Bereits heute erkennbare Anwendungen liegen in den Bereichen Mikroelektronik, integrierte Optik, Verfahrenstechnik und Medizintechnik.

Im folgenden wird über den Stand der Entwicklung bei den einzelnen Schritten des LIGA-Verfahrens berichtet, die selbstverständlich auch getrennt oder in anderer Kombination angewendet werden können.

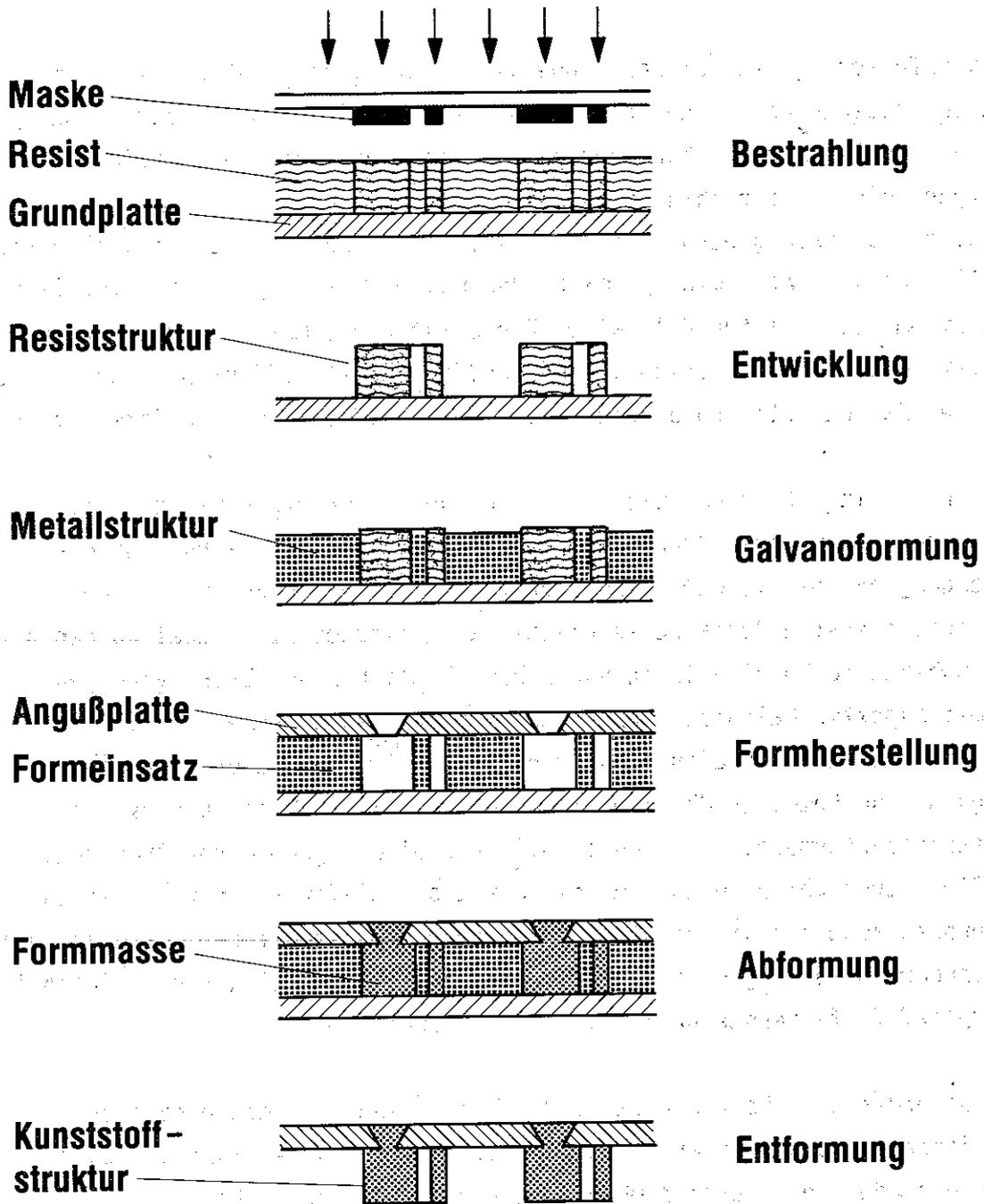


Abb. 1: Fertigungsschritte beim LIGA-Verfahren: Durch Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung wird eine primäre Kunststoffform erzeugt, die galvanisch mit einem Metall aufgefüllt wird. Die entstandene Metallstruktur wird als Formeinsatz für die Herstellung sekundärer Kunststoffformen benutzt, die bei der Massenfertigung an die Stelle der primären Kunststoffform treten.

2. Erzeugung primärer Mikrostrukturen aus Kunststoff durch Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung

2.1 Besondere Anforderungen an den Lithographieprozeß und theoretisch erreichbare Genauigkeit

Die Röntgenlithographie mit Synchrotronstrahlung wird bisher hauptsächlich für die Massenfertigung mikroelektronischer Bauelemente mit charakteristischen Abmessungen im Submikrometerbereich entwickelt /2/. Bei dieser Anwendung reichen Resistschichten von wenigen Mikrometer Dicke aus, die sich durch Aufbringen eines flüssigen Lacks auf das Substrat und anschließendes Ausheizen des Lösungsmittels mit ausreichender Qualität erzeugen lassen. Wegen der geringen Schichtdicke kann mit verhältnismäßig langwelliger Synchrotronstrahlung gearbeitet werden (charakteristische Wellenlänge $\lambda_c \approx 2$ nm), wie sie z. B. vom Elektronenspeicherring BESSY in Berlin geliefert wird. Bei der vorgesehenen Anwendung der Röntgenlithographie im Rahmen des LIGA-Verfahrens sollen dagegen Kunststoffformen erzeugt werden, die, bei charakteristischen Abmessungen im Mikrometerbereich, eine Strukturhöhe von mehreren hundert Mikrometer haben. Der entsprechende Verfahrensschritt wird daher als Röntgentiefenlithographie bezeichnet. Bei der Verwendung der Synchrotronstrahlung im Rahmen des LIGA-Verfahrens kommt nicht nur deren hohe Intensität sondern in besonders starkem Maße auch deren weitgehende Parallelität zum Tragen.

Bei den früheren Arbeiten zum LIGA-Verfahren /1/ wurde am Elektronensynchrotron der Universität Bonn mit einer charakteristischen Wellenlänge $\lambda_c = 0,7$ nm eine Strukturhöhe von 400 μm durch viermaliges abwechselndes Bestrahlen und Entwickeln einer Platte aus Polymethylmethacrylat (PMMA) erreicht. Im Rahmen von Untersuchungen zur Abbildungsgenauigkeit der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung /3/ wurde durch Rechnungen gezeigt, daß der mit zunehmender Wellenlänge größer werdende Beugungseinfluß und der mit abnehmender Wellenlänge größer werdende Einfluß der Sekundärelektronen in PMMA zu einem Minimum der auf diesen Effekten beruhenden Strukturabweichung bei einer charakteristischen

Wellenlänge zwischen 0,2 und 0,3 nm führen. Bei dieser Wellenlänge lassen sich in PMMA die angestrebten Strukturhöhen in der Größenordnung von 500 μm schon mit einmaliger Bestrahlung und Entwicklung erreichen. Die aufgrund der Beugung und des Sekundärelektroneneinflusses zu erwartenden Unterschiede der Abmessungen zwischen den Enden einer 500 μm hohen Struktur liegen dabei nur in der Größenordnung von 0,1 μm .

Wenn dieses Genauigkeitspotential ausgeschöpft werden soll, darf die lokale Divergenz der Synchrotronstrahlung an der Probe einige Zehntel mrad nicht übersteigen. Beim Elektronensynchrotron der Universität Bonn liegt die Divergenz der Strahlung am Entstehungsort bei einer Elektronenenergie von 2 GeV zwischen einem Zehntel und knapp einem mrad in beiden Richtungen. In horizontaler Richtung kann man die lokale Divergenz stets durch einen entsprechenden Bestrahlungsabstand klein halten; in vertikaler Richtung dagegen wird in der Regel die Probe periodisch durch die bandförmige Strahlung gescannt, so daß die volle Divergenz der Quelle wirksam wird. Scannt man jedoch den Elektronenstrahl so durch den Biegemagneten, daß die Probe voll von der Synchrotronstrahlung getroffen wird, so nimmt auch für diese Richtung die effektive Divergenz mit dem Abstand ab. Ein relativ schnelles Scannen des Elektronenstrahls ist bei hoher Leistungsdichte notwendig, um die in der Probe freiwerdende Wärme ausreichend abführen zu können.

Zur vollen Ausschöpfung des Genauigkeitspotentials der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung wird ferner eine Kombination von Entwickler und Resist benötigt, die ein Verhältnis der Abtragungsgeschwindigkeiten im Hell- und Dunkelbereich in der Größenordnung von 1000 aufweist. Als Entwickler eignet sich z. B. ein Gemisch aus einem Glycoläther, einem Azin, einem primären Amin und Wasser /4/. Es zeigt bei hochmolekularen, insbesondere bei quervernetzten PMMA-Sorten einen verschwindend kleinen Dunkelabtrag bei ausreichender Abtragungsgeschwindigkeit im Hellbereich (Abb. 2). Der Resist kann als fertige Platte bezogen (GS 233)*) oder als Gießharz eingesetzt werden (Plexit 74)*).

*) Hersteller: Röhm GmbH, Darmstadt

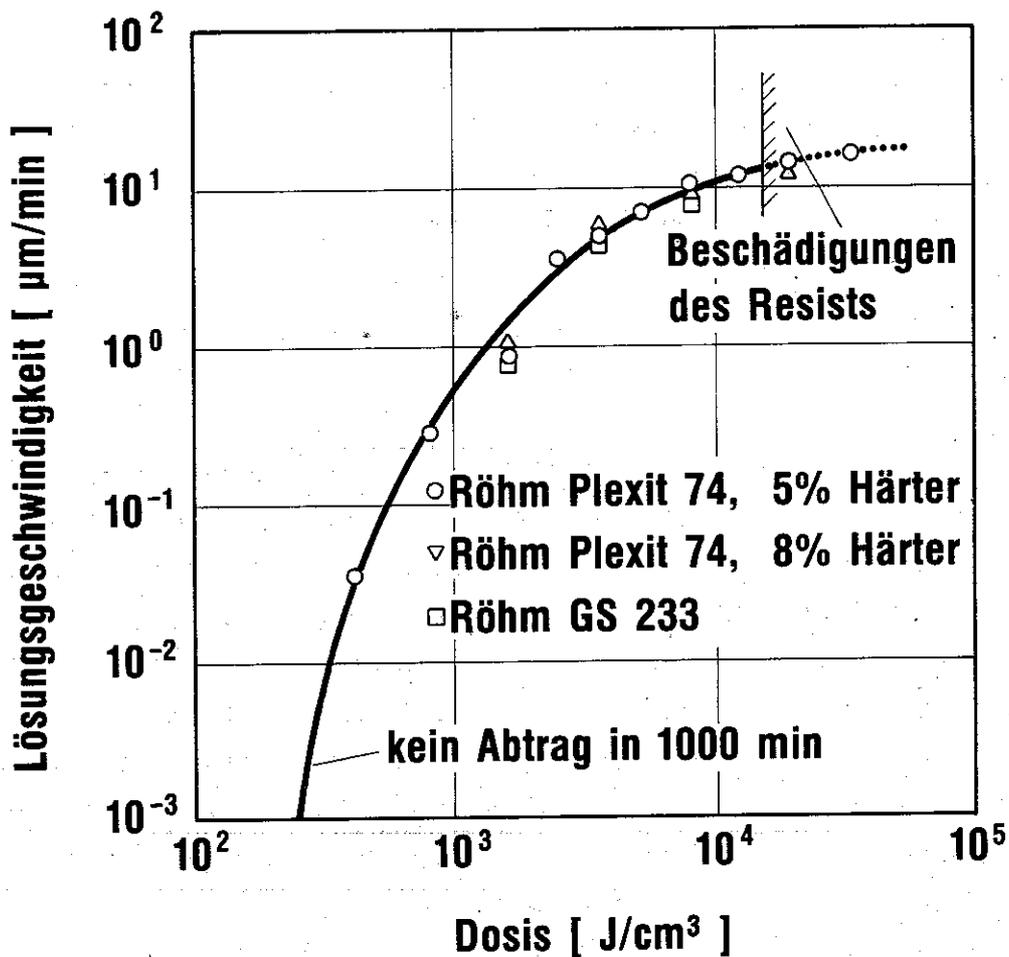


Abb. 2: Dosisabhängigkeit der Lösungsgeschwindigkeit von extrem hochmolekularem bzw. quervernetztem PMMA in einem Mehrkomponenten-Entwickler /3/.

2.2 Herstellung von Röntgenmasken mit ausreichendem Kontrast

Die bei der Röntgentiefenlithographie verwendete, relativ kurze Wellenlänge und die für eine kurze Bestrahlungsdauer erforderlichen hohen Leistungsdichten stellen weit höhere Anforderungen bezüglich der Transparenz des Trägers, der Dauerbeständigkeit gegenüber Strahlung und des Kontrasts an die Masken, als man sie üblicherweise aus der Röntgenlithographie kennt. Es wurde deshalb gleichzeitig mit der Entwicklung des LIGA-Verfahrens auch mit der Entwicklung neuartiger Masken, d. h. mit der Entwicklung neuer Maskenträger und der zugehörigen Strukturierungstechniken, begonnen.

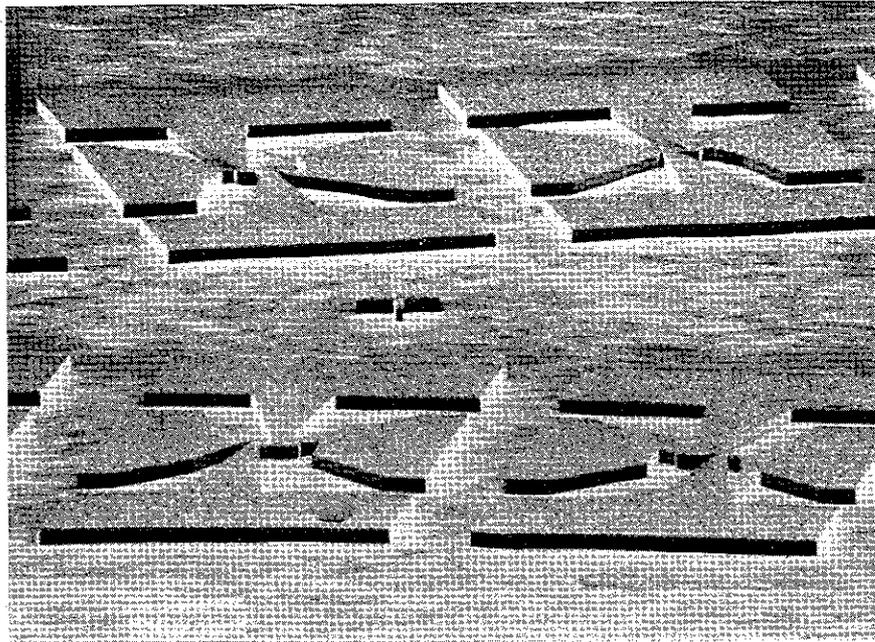
Im genannten Wellenlängenbereich weist lediglich Beryllium eine ausreichende Transparenz als Trägermaterial bei einer Dicke auf, die eine problemlose Bearbeitung und Handhabung zuläßt. Zur Erzielung der notwendigen Absorption müssen außerdem Absorberstrukturen aus Gold mit einer Dicke von 10 bis 15 μm auf den Träger aufgebracht werden, was gegenüber den üblichen Röntgenmasken eine Steigerung um einen Faktor zehn bedeutet.

Bei einem gemeinsam mit Siemens entwickelten Maskenherstellungsprozeß wird zunächst eine lichtoptische Maske im Kontaktverfahren auf ein Glassubstrat umkopiert, das zuvor mit einer metallischen Haftvermittlungsschicht, einer Galvanikstartschicht und mit einem Diazo-Resist von 1,5 μm Dicke beschichtet wurde. Nach dem Entwickeln werden die Zwischenräume der Resiststruktur galvanisch mit Gold aufgefüllt, der Resist wird entfernt, Polyimid aufgeschleudert, dieses im Ofen polymerisiert und zum Schluß von der Rückseite ein Fenster in das Glassubstrat geätzt. Die so hergestellte Zwischenmaske wird röntgenlithographisch umkopiert, und die Zwischenräume der Resiststruktur werden galvanisch zunächst mit Kupfer und dann mit Gold unter Verwendung einer zuvor auf die Berylliumfolie aufgetragenen Startschicht aufgefüllt, um die gewünschte Absorberdicke zu erhalten. Als Träger verwendet man dabei eine in einem stabilen Metallrahmen gespannte, etwa 25 μm dicke, gewalzte Berylliumfolie^{*)}. Als Resist dient PMMA. Abbildung 3 zeigt rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen einer solchen Maske.

Zur Vereinfachung des Fertigungsprozesses wurden erste erfolgreiche Versuche zur direkten Herstellung der Zwischenmasken mit Hilfe eines Elektronenstrahlschreibers unter Verwendung eines Tri-level-Resists beim Fraunhofer-Institut für Festkörpertechnologie, Abteilung Mikrostrukturtechnik, Berlin, durchgeführt. Diese Methode ermöglicht außerdem wesentlich höhere Genauigkeiten bei der Erzeugung der Absorberstrukturen als die optische Methode. Besonders vorteilhaft ist es, die dicke Absorberstruktur durch Umkopieren auf ein und demselben Träger herzu-

*) Hersteller: DEGUSSA AG, Frankfurt/Main

(a)



(b)

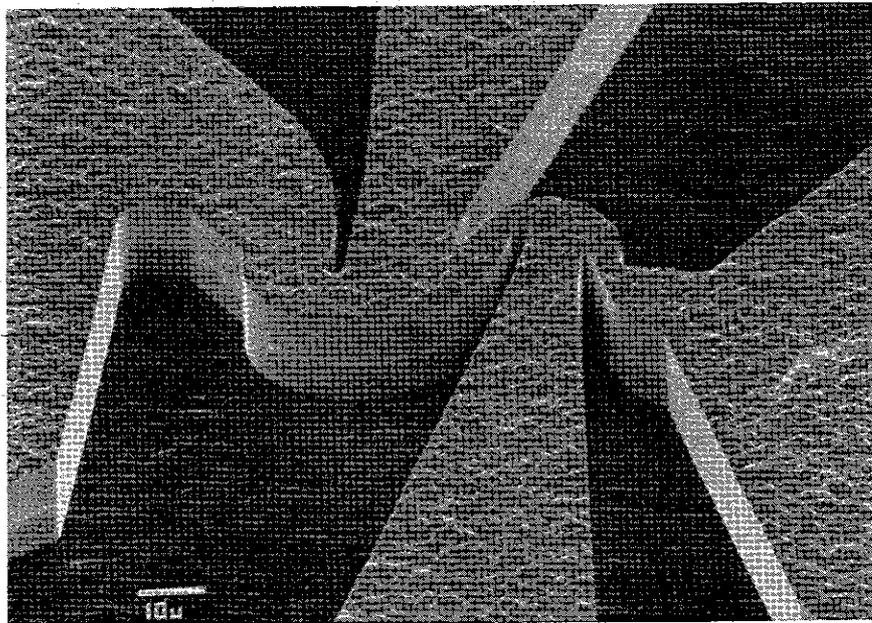


Abb. 3a-b: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer Maske für die Röntgentiefenlithographie. Als Träger dient eine 25 μm starke Beryllium-Folie. Die Absorberstrukturen bestehen aus einer Kupferschicht mit einer Dicke von ca. 8 μm und einer darauf abgeschiedenen Goldschicht mit einer Dicke von etwa 10 μm (Siemens AG).

stellen, weil dadurch Maßabweichungen, die beispielsweise von Temperaturunterschieden beim Umkopierprozeß herrühren, wesentlich reduziert werden können /5/.

2.3 Bei der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung erzielte Ergebnisse

Bei der Erzeugung der primären Mikrostrukturen durch Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung wurde das PMMA als Gießharz auf eine etwa 3 mm starke Trägerplatte aufgebracht und durch Erwärmen gehärtet. Die Trägerplatte bestand aus austenitischem Stahl oder aus mit Gold, Titan oder Nickel beschichtetem Kupfer. Ihre Oberfläche wurde vor dem Aufbringen der zu strukturierenden PMMA-Schicht durch Sandstrahlen mit Korund bzw. naßchemisch mit oxidierenden Medien behandelt, um eine bessere Haftung der Kunststoffstrukturen auf der Platte zu erzielen.

Die Bestrahlung erfolgte am Elektronensynchrotron der Universität Bonn^{*)}, dessen charakteristische Wellenlänge λ_c im allgemeinen bei etwa 0,5 nm und damit deutlich oberhalb des für die vorgesehene Anwendung optimalen Wertes von 0,2 - 0,3 nm lag (vgl. Abschnitt 2.1). Um trotz der zu kleinen mittleren Eindringtiefe zu starke Unterschiede in der Dosisablagerung längs des Strahls zu vermeiden, wurde der langwellige Anteil des Strahlungsspektrums durch Filtern mit einer ca. 100 μm starken Polyimidfolie unterdrückt. Dabei mußten Bestrahlungs- und Entwicklungszeiten von jeweils mehreren Stunden in Kauf genommen werden. Entwickelt wurde etwa doppelt so lange, wie es für das völlige Freilegen der Strukturen erforderlich war. Durch die "Überentwicklung" kann erreicht werden, daß die Seitenflächen der Strukturen annähernd Flächen gleicher Dosisablagerung darstellen und das Genauigkeitspotential der Röntgentiefenlithographie weitgehend ausgeschöpft wird.

*) Die Autoren danken dem Direktorium und den Mitarbeitern des Physikalischen Instituts der Universität Bonn für die freundliche Unterstützung und die Bereitstellung von Bestrahlungskapazität.

In Abbildung 4a ist eine 330 μm hohe Teststruktur aus PMMA mit kreuzförmigem Querschnitt dargestellt, deren Stege 8 μm breit sind. Aus Abbildung 4b geht hervor, daß der Unterschied der Stegbreiten zwischen den Strukturenden nur etwa 0,1 μm beträgt, wie dies aufgrund der theoretischen Analyse der Störeffekte /3/ zu erwarten ist.

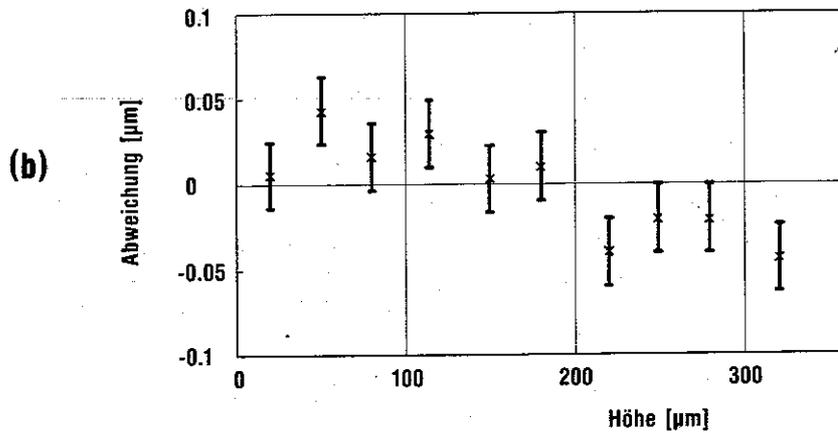
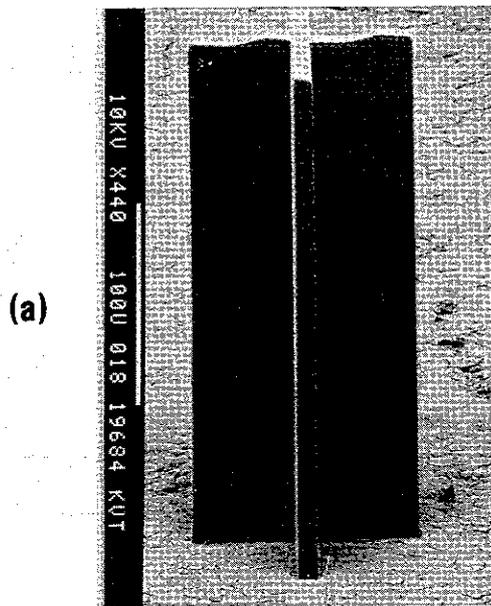
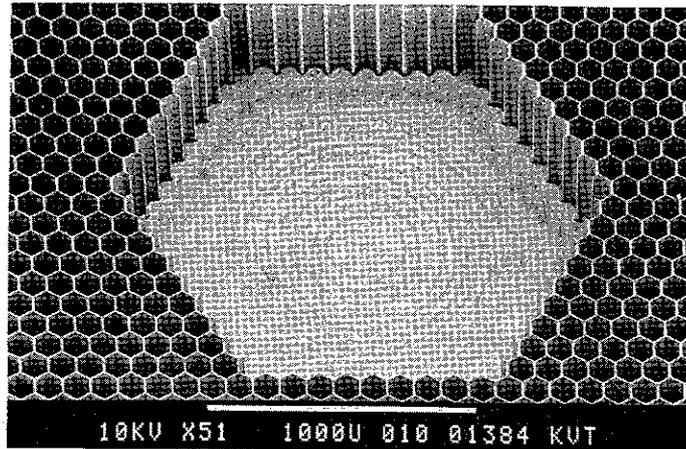


Abb. 4a-b: a) REM-Aufnahme einer durch Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung hergestellten 330 μm hohen Teststruktur aus PMMA. Stegbreite 8 μm .
b) Mit einem Strukturbreitenmeßgerät ermittelte Abweichung der Stegbreite vom Mittelwert. Aus der Abbildung geht hervor, daß der Unterschied der Stegbreiten zwischen den Strukturenden nur etwa 0,1 μm beträgt.

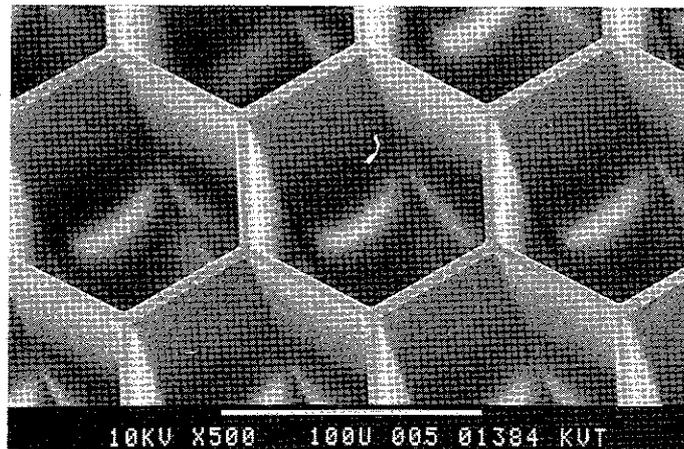
Daß PMMA-Strukturen mit einem Aspektverhältnis in der Größenordnung von 100 und Strukturhöhen von mehreren 100 μm auch in größeren Verbänden formstabil sind, zeigt die in Abbildung 5 wiedergegebene Wabenstruktur. Sie hat bei einer Wabenbreite von 80 μm eine Wandstärke von 4 μm bei einer Strukturhöhe von 350 μm . Der von angeschnittenen Wabenstrukturen umgebene Freiraum im Zentrum des oberen Bildes ermöglicht eine Beurteilung der Strukturgenauigkeit in größerer Tiefe.

In Abbildung 6 sind Ausschnitte einer 300 μm hohen primären Kunststoffform aus PMMA für die Herstellung von Trenndüsen wiedergegeben. Die minimale Breite der auf komplizierte Weise zusammenhängenden Kunststoffstrukturen beträgt 3 μm , die kleinsten Krümmungsradien in den keilförmigen Einschnitten der Form liegen unter 0,5 μm .

(a)



(b)



(c)

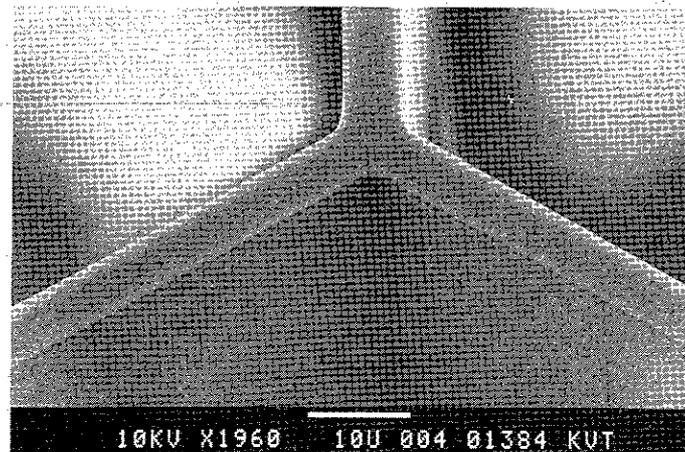


Abb. 5a-c: REM-Aufnahmen einer durch Röntgentiefenlithographie erzeugten Wabenstruktur aus PMMA bei verschiedenen Vergrößerungen. Die Wabenbreite beträgt $80\ \mu\text{m}$, die Strukturhöhe $350\ \mu\text{m}$ und die Wandstärke $4\ \mu\text{m}$. Die Längen der Striche an den unteren Bildrändern entsprechen etwa 1000, 100 und $10\ \mu\text{m}$.

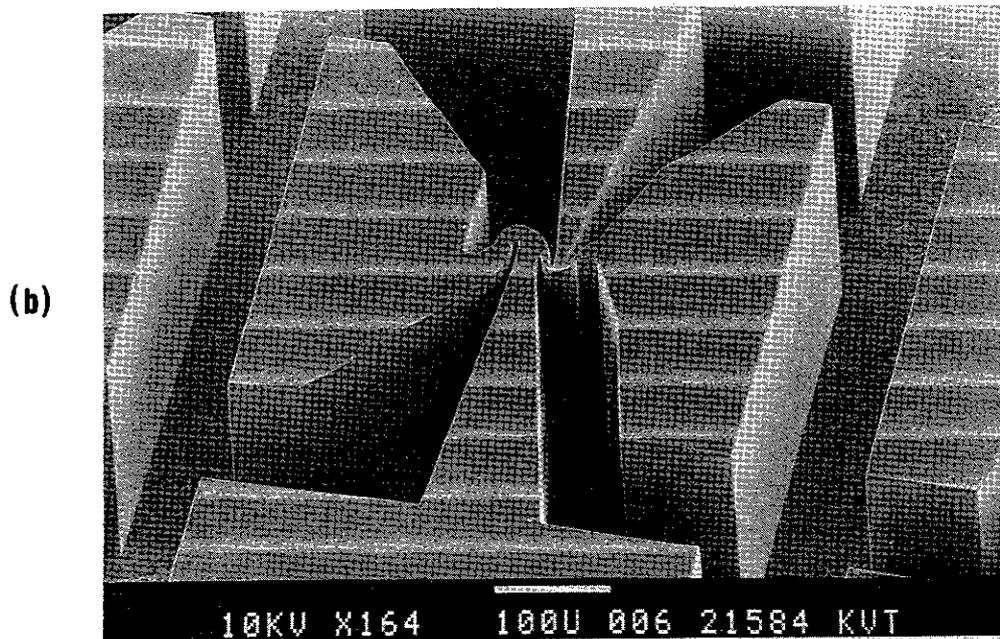
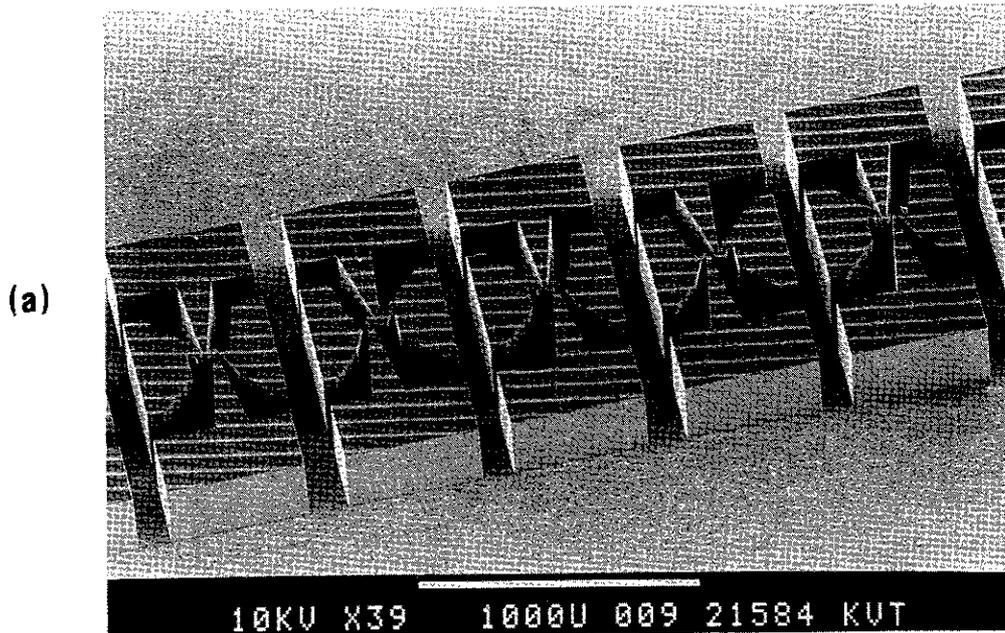


Abb. 6a-b: REM-Aufnahmen von durch Röntgentiefenlithographie erzeugten primären Kunststoffformen aus PMMA für die Herstellung von Trenndüsen. Die Längen der Striche an den unteren Bildrändern entsprechen etwa 1000 bzw. 100 μm .

2.4 Apparative Entwicklung für die Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung

Die in den Abbildungen 5 und 6 gezeigten primären Kunststoffformen wurden unter Verwendung einer relativ einfachen Bestrahlungsapparatur hergestellt. Um das Potential der Genauigkeit bis an die bereits genannten theoretischen Grenzen mit kleinstmöglichem Zeitaufwand reproduzierbar ausnutzen zu können, wurde eine fortgeschrittene Bestrahlungsapparatur gebaut.*) Sie zeichnet sich durch eine extrem schwingungsarme Lagerung der genauigkeitsbestimmenden Komponenten, eine gute Thermostatisierung, einen Präzisionsscanner für die periodische Bewegung der Probe durch die bandförmige Strahlung sowie eine Rechnersteuerung und -überwachung aus (Abb. 7). Die Abweichungen vom exakten Geradlauf des Scanners sind bei einem Hub von 100 mm und bei einer Geschwindigkeit von 10 mm/s kleiner

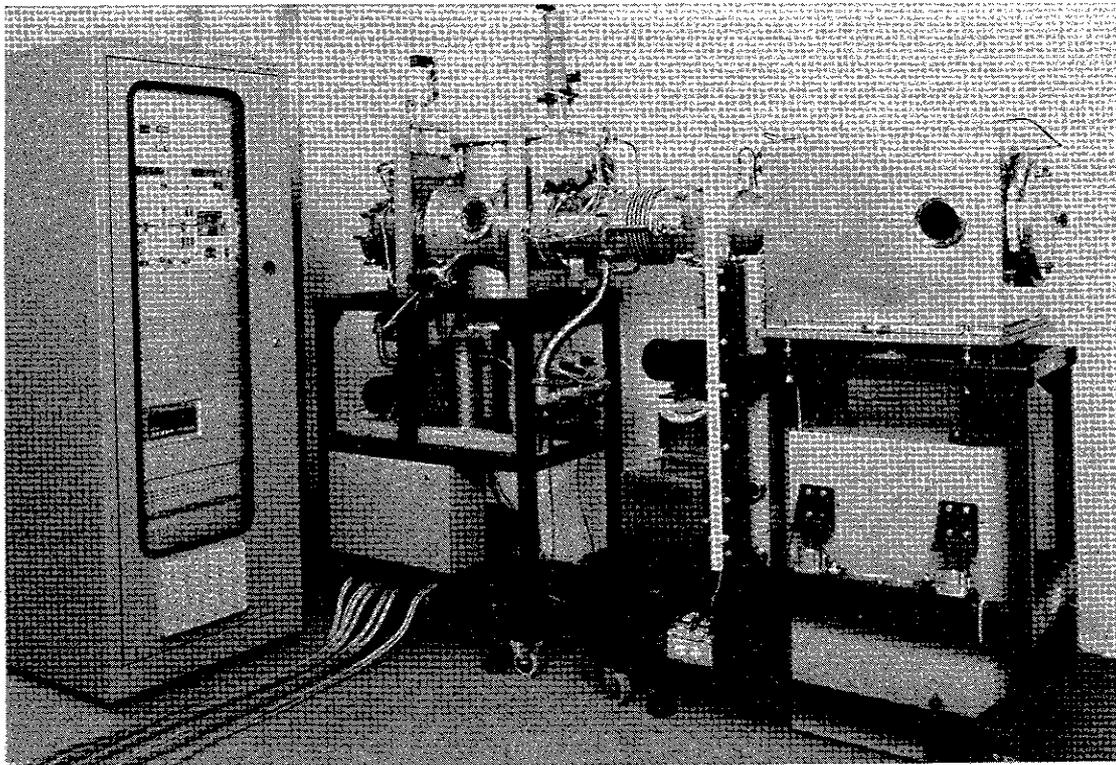


Abb. 7: Bestrahlungsapparatur

*) Hersteller: Arthur Pfeiffer Vakuumtechnik GmbH, Asslar

als 0,1 Bogenminuten. Es ist ein automatisch arbeitender Fensterwechsler für das Polyimidfenster vorgesehen, das das Vakuum des Beschleunigers von der Heliumatmosphäre abtrennt, die in der Bestrahlungskammer zur Kühlung von Probe und Maske dient. Der Wechsel erfolgt aus einem Magazin mit 6 Fenstern und dauert bei evakuierter Bestrahlungskammer nur wenige Sekunden.

Wie für die Bestrahlung, so wurde auch für den Entwicklungsprozeß auf Grund der gewonnenen Erfahrungen eine Sondermaschine gebaut^{*)}, die den besonderen Anforderungen der Röntgentiefenlithographie mit extremen Aspektverhältnissen Rechnung trägt. Die Probleme liegen hierbei insbesondere in einem gleichmäßigen Transport von Entwickler- und Spülmedien in die tiefen Strukturdetails sowie im Wegtransport des gelösten Resists aus diesen Strukturen. Deshalb sind mehrere Proben in dieser Maschine auf einem Rotor senkrecht angeordnet, wobei die Strukturseite jeweils nach außen zeigt. Für Entwicklung und Spülung stehen drei unabhängige Medienkreisläufe zur Verfügung, die sowohl für Tauch- als auch für Sprühprozesse ausgelegt sind. Die Trocknung der Proben erfolgt durch Abschleudern und Abblasen mit trockenem Stickstoff. Durch eine speicherprogrammierbare Steuerung ist eine variable Prozeßführung möglich.

*) Hersteller: Convac GmbH, Wiernsheim

3. Erzeugung metallischer Mikrostrukturen durch galvanische Metallabscheidung in Mikrostrukturen aus Kunststoff

3.1 Besondere Anforderungen an den Galvanoformungsprozeß

Die Herstellung metallischer Reliefstrukturen durch galvanische Metallabscheidung auf strukturierte Kunststoffoberflächen ist ein seit langem im kommerziellen Maßstab erprobter Prozeß, mit dem z. B. bei der Fertigung von Formwerkzeugen für Phono- und Videoplaten Strukturdetails im Submikrometerbereich präzise übertragen werden /6/. Bei der Anwendung der Galvanoformung im Rahmen des LIGA-Verfahrens treten jedoch neue Probleme wegen des um Größenordnungen höheren Aspektverhältnisses der Mikrostrukturen auf.

Durch das große Aspektverhältnis wird die Möglichkeit ausgeschlossen, die für die Galvanoformung erforderliche Elektrode durch Aufbringen einer Leitschicht auf der gesamten Kunststoffoberfläche zu erzeugen. Es muß deshalb eine nur an dem Boden der einzelnen Mikrostrukturbereiche wirksame Elektrode vorgesehen werden. Bei zusammenhängenden Kunststoffstrukturen läßt sich diese Aufgabe im Prinzip dadurch lösen, daß man die durch Bestrahlen und Entwickeln einer Kunststoffplatte erzeugten freitragenden Kunststoffstrukturen nachträglich auf eine Galvanikelektrode aufklebt. Wegen der dabei kaum zu vermeidenden Strukturverzüge wird man jedoch i. a. die Möglichkeit vorziehen, die Kunststoffschicht schon vor der Bestrahlung und Entwicklung fest mit einer als Galvanikelektrode geeigneten metallischen Trägerplatte zu verbinden, wie es in Abschnitt 2.3 beschrieben ist. Außer der höheren erreichbaren Strukturgenauigkeit hat diese Methode den Vorteil, daß sie auch bei nicht zusammenhängenden Strukturen anwendbar ist.

Die beim Entwickeln der bestrahlten PMMA-Schicht zwischen den Strukturen freigelegte Oberfläche der Trägerplatte ist durch die Einwirkung des lösungsmittelhaltigen Entwicklers in einem fettfreien Zustand und kann unmittelbar zum galvanischen Aufbau der Metallstruktur dienen.

3.2 Bei der Galvanoformung erzielte Ergebnisse

Bei der Herstellung von Trenndüsenelementen wurde Nickel als Abformmetall vor allem wegen seiner ausgezeichneten Korrosionsbeständigkeit gegenüber Uranhexafluorid gewählt. Nickel erwies sich jedoch auch bei der galvanischen Herstellung anderer Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis als besonders geeignet, da das verwendete Nickelsulfamatbad [7] bei Stromdichten in der Größenordnung von 1 A/dm^2 eine ausgezeichnete Mikrostreufähigkeit zeigt und nur geringe innere Spannungen der Mikrostrukturen erwarten läßt.

Das Nickelsulfamatbad enthielt neben 400 g/l Nickelsulfamat 40 g/l Borsäure als Puffermittel sowie geringe Mengen eines anionenaktiven Netzmittels. Der Elektrolyt wurde bei $52 \text{ }^\circ\text{C}$ und einem pH-Wert von 4,0 betrieben. Die Metallabscheidung erfolgte mit Stromdichten von 1 bis 2 A/dm^2 . Um die Reinhaltung des Elektrolyten zu gewährleisten, wurde er kontinuierlich über ein Membranfilter mit $0,3 \text{ }\mu\text{m}$ Porenöffnung umgepumpt.

Da bei der galvanischen Metallabscheidung mit äußerer Stromquelle eine vollkommen ebene Metalloberfläche nicht realisierbar ist, wurden die geringfügigen Unterschiede in der Strukturhöhe und die Mikrorauigkeit der anodenseitigen Galvanikoberfläche durch Überschleifen der noch mit Kunststoff gefüllten Metallstruktur beseitigt. Der Kunststoff wurde anschließend durch Herauslösen mit Lösungsmitteln aus den Metallstrukturen entfernt. Bei der Verwendung von quervernetztem PMMA wurden die Strukturen vor dem Herauslösen mit Synchrotronstrahlung bestrahlt, um eine ausreichende Löslichkeit zu gewährleisten.

Zur Demonstration der beim Galvanoformungsprozeß erreichbaren Genauigkeit der Formübertragung wurden die in Abbildung 5 gezeigte Wabenstruktur aus PMMA und eine dazu komplementäre Struktur galvanisch mit Nickel aufgefüllt. Die in Abbildung 8 dargestellten Metallstrukturen zeigen, daß die durch das PMMA vorgebildeten Strukturen praktisch fehlerfrei übertragen werden, wobei selbst Strukturdetails unter $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ wiedergegeben werden.

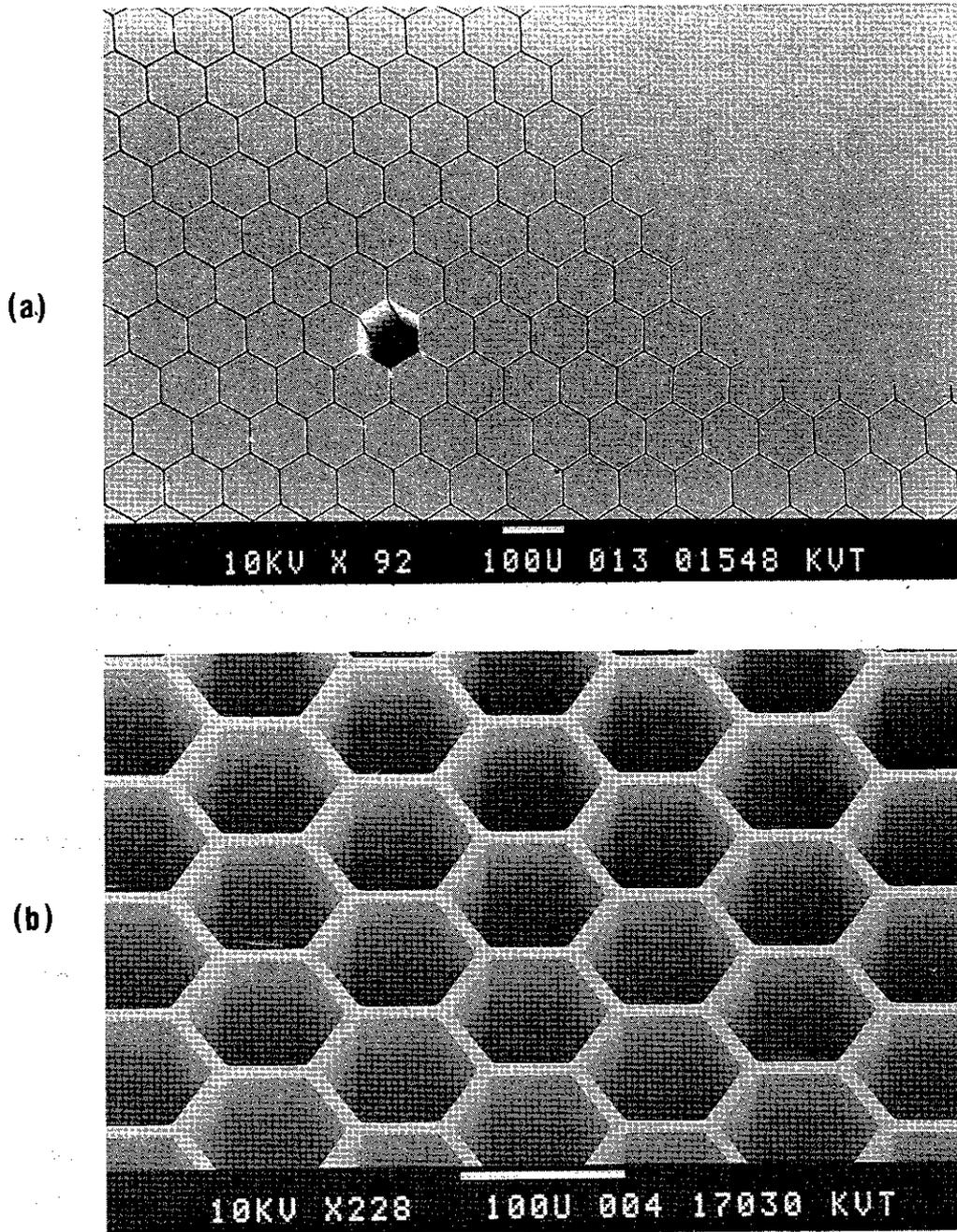


Abb. 8a-b: REM-Aufnahmen von Sechskant-Prismen (a) und Wabenstrukturen (b) aus Nickel, die durch Galvanoformung unter Verwendung röntgentiefenlithographisch erzeugter PMMA-Formen hergestellt wurden. Die Prismenbreite bzw. die Wabenbreite beträgt $80\ \mu\text{m}$, die Strukturhöhe $330\ \mu\text{m}$ und die Spaltbreite zwischen den Prismen bzw. die Wandstärke der Waben $4\ \mu\text{m}$. Um einen Einblick in die Tiefe zu ermöglichen, wurde bei der Prismenstruktur (a) eine Einheit entfernt. Die Längen der Striche an den unteren Bildrändern entsprechen etwa $100\ \mu\text{m}$.

Abbildung 10a zeigt einen Ausschnitt eines Trenndüsenchips aus Nickel, der durch Galvanoformung unter Verwendung einer primären Kunststoffform hergestellt wurde, wie sie in Abbildung 6 wiedergegeben ist. Auf den Galvanoformungsprozeß mit sekundären Kunststoffformen wird in Abschnitt 4 eingegangen.

3.3 Apparative Entwicklung für die Galvanoformung

Nachdem in Laborversuchen die Voraussetzungen für die Galvanoformung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis ermittelt worden waren, wurde mit dem Bau einer weitgehend automatisch arbeitenden Galvanoformungseinrichtung begonnen, die zur Serienfertigung von Mikrostrukturen aus Nickel eingesetzt werden soll^{*)}. Der Automat bearbeitet die auf Gestellen angeordneten Mikrostruktursubstrate selbständig, wobei ein rechnergesteuertes Transportsystem die einzelnen Gestelle durch die Behandlungsabteile zum Entfetten, Spülen, Dekapieren, Galvanisieren und Trocknen führt und in einem Magazin ablegt. Um eine Verunreinigung der Mikrostrukturen zu vermeiden, ist der Automat als Reinraumgerät ausgelegt.

Abbildung 9 zeigt das Schema des Galvanikteils. Er enthält neben der Galvanisierzelle eine Hilfswanne, in der einige Hilfseinrichtungen des Prozesses untergebracht sind. Durch diese Aufteilung enthält die Galvanisierzelle lediglich die zur Metallabscheidung notwendigen Komponenten, wie den von oben eingebrachten Substratträger und die Nickelanoden, und der Galvanisiervorgang ist der Verunreinigungs- bzw. Störungsgefahr durch die Hilfseinrichtungen nicht mehr ausgesetzt. Um die Mikrostrukturen vor Verunreinigung zu schützen, strömt der Elektrolyt im mittleren Kanal der Galvanisierzelle, in den der Substratträger von oben eingeführt wird, senkrecht nach oben und wird in den beiden benachbarten Kanälen, in denen sich die Nickelanoden befinden, nach unten abgeführt. Der mittlere Kanal ist von den äußeren Kanälen durch Kunststoffmembranen getrennt. Durch diese Strömungsführung in der Galvanisierzelle werden Verunreinigungen, die entweder von oben in die Zelle fallen oder von den Nickelanoden als unlösliche Feststoffpartikel stammen können, von den Substraten ferngehalten.

*) Bau und Erprobung des Galvanoformungsautomaten erfolgen gemeinsam mit der DEGUSSA AG, Frankfurt/Main.

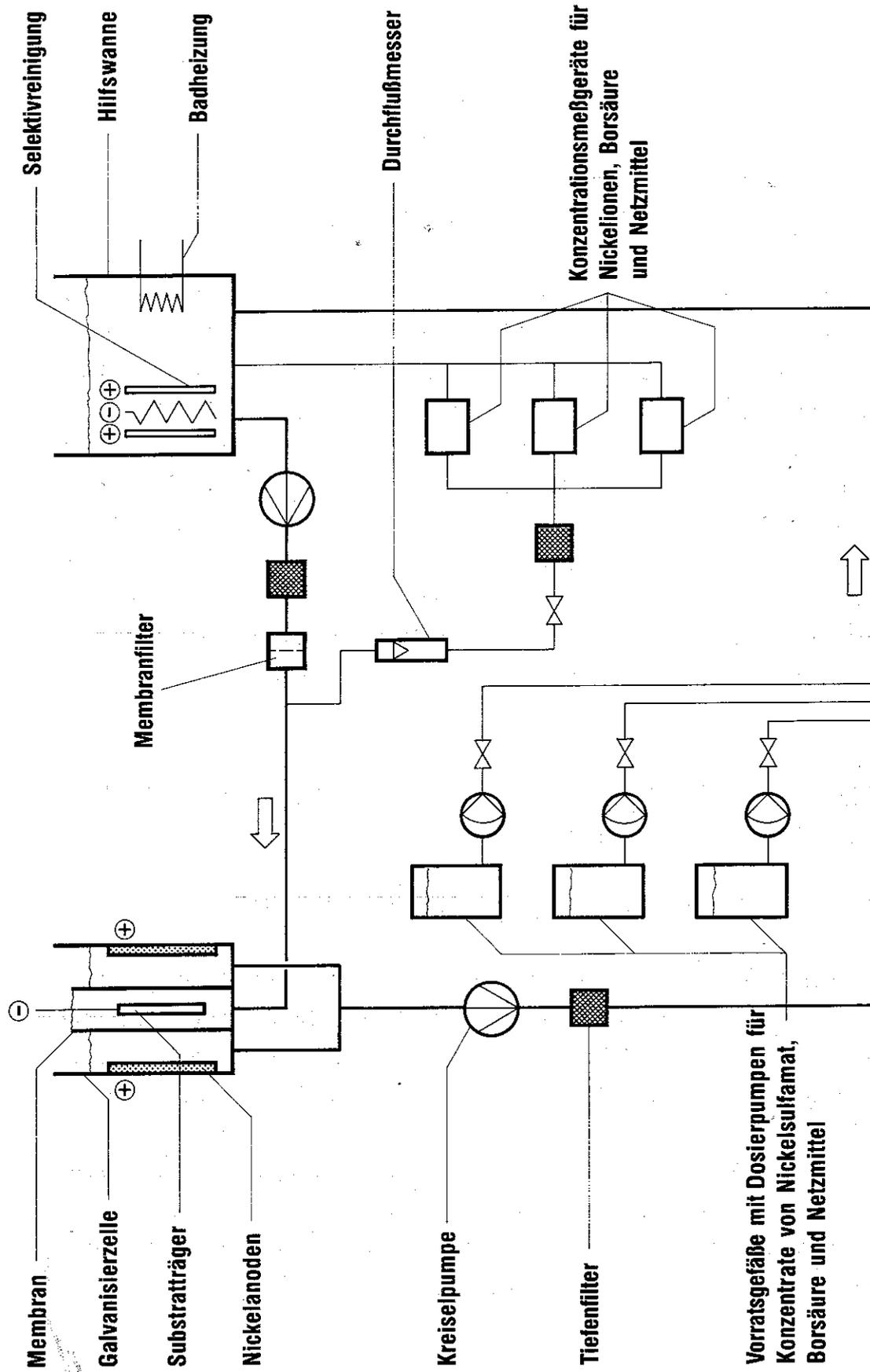


Abb. 9: Schema des Galvanikteils der weitgehend automatisch arbeitenden Galvanoformungseinrichtung zur Herstellung von Mikrostrukturen aus Nickel.

Der Elektrolyt wird zwischen der Galvanisierzelle und der Hilfswanne mit Hilfe von zwei Pumpen im Kreislauf geführt und dabei mit zwei Tiefenfiltern und einem Membranfilter kontinuierlich filtriert. In der Hilfswanne sind die Hilfssysteme zur Temperierung und zur Selektivreinigung des Elektrolyten untergebracht. Bei der Selektivreinigung des Elektrolyten werden bei niedrigen Stromdichten ($0,2 - 0,5 \text{ A/dm}^2$) bevorzugt Fremdmetallionen auf einer Hilfskathode abgeschieden und somit aus dem Elektrolyten entfernt. Ein Teil des zur Galvanisierzelle strömenden Elektrolyten wird abgezweigt und über einen Durchflußmesser drei Konzentrationsmeßgeräten zugeführt. Die Konzentrationsmeßgeräte ermitteln im Durchfluß und ohne Probenvorbereitung die Konzentrationen der drei Elektrolytkomponenten. Die Bestimmung der Nickelionen und der Borsäure erfolgt spektroskopisch im sichtbaren bzw. infraroten Spektralbereich, während die Netzmittelkonzentration elektrochemisch ermittelt wird. Die Korrektur der Konzentrationen erfolgt automatisch durch Zudosieren von entsprechenden Konzentraten aus Vorratsbehältern mit Hilfe von Dosierpumpen. Das ganze System wird von einem Rechner gesteuert.

4. Erzeugung sekundärer Mikrostrukturen aus Kunststoff durch Abformung metallischer Mikrostrukturen

4.1 Besondere Anforderungen an den Kunststoffabformprozeß

Auch bei der Anwendung der Kunststoffabformung im Rahmen des LIGA-Verfahrens treten gegenüber dem Abformprozeß bei Phono- und Videoplatten /6/ neue Probleme wegen des um Größenordnungen höheren Aspektverhältnisses der Mikrostrukturen auf. Außerdem sind die durch Abformung gewonnenen sekundären Kunststoffformen im allgemeinen nicht das Endprodukt, sondern sollen, wie die durch Röntgentiefenlithographie erzeugten primären Kunststoffformen, galvanisch mit einem Metall aufgefüllt werden. Das bedeutet, daß auch die sekundären Kunststoffformen i. a. mit einer Elektrode oder einer Galvanikstartschicht versehen werden müssen.

Auch Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis lassen sich relativ leicht in Kunststoff abformen, wenn man als Abformmasse einen Kunststoff mit geringen Haftkräften und gummielastischen Eigenschaften, also z. B. einen Silikonkautschuk verwendet. Naturgemäß haben kautschukartige Kunststoffe aber nur eine geringe Formstabilität, so daß sie sich nicht für die Abformung isoliert stehender Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis eignen.

Bei Kunststoffen, die nach der Verfestigung formstabil sind, muß die Form eine möglichst glatte innere Formoberfläche aufweisen, so daß eine formschlüssige Verbindung zwischen der Form und dem festen Kunststoff vermieden wird. Da ein externes Trennmittel bei Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis im allgemeinen nur mit erheblichen Schwierigkeiten angewendet werden kann, ist es zweckmäßig, die Entformung durch ein internes Trennmittel zu erleichtern.

4.2 Bei der Kunststoffabformung erzielte Ergebnisse

Bei der Herstellung sekundärer Kunststoffformen für die Massenproduktion von Trenndüsen wurde das in Abbildung 1 gezeigte Prinzip des Spritzgusses angewendet. Dabei konnte von der Tatsache Gebrauch gemacht werden, daß die feinen Trenndüsenstrukturen in Verbindung mit relativ weiten Gasführungskanälen stehen. Der Formeinsatz wurde in einem Werkzeug mit einer Angußplatte abgedeckt, die an den Stellen der Gasführungskanäle mit Angußbohrungen versehen ist, über die die Formmasse zugeführt werden kann. Nach dem Verfestigen der Formmasse entsteht über die Angußbohrungen eine formschlüssige Verbindung zwischen dem Formteil, d. h. der sekundären Kunststoffform, und der Angußplatte, die das Entformen des Formteils aus dem Formeinsatz mit Hilfe der Angußplatte ermöglicht.

Die Angußplatte kann unmittelbar als Galvanikelektrode für die Abscheidung von Metall in den sekundären Kunststoffformen verwendet werden. Um eine sichere Abdichtung zwischen Formeinsatz und Angußplatte zu erreichen, wurden Angußplatten aus weichgeglühtem Aluminium verwendet, in die sich der Formeinsatz beim Schließen der Form leicht eindrückte.

Die Abformversuche wurden mit einem Gießharz auf Methacrylat-Basis durchgeführt, dem zur Verringerung der Haftung zwischen Formteil und innerer Formoberfläche ein internes Trennmittel zugesetzt wurde.

Abbildung 10b zeigt einen Ausschnitt einer 300 µm hohen sekundären Trenndüsenform, die unter Verwendung des in Abbildung 10a im Ausschnitt wiedergegebenen Nickel-Chips als Formeinsatz nach der beschriebenen Abformmethode hergestellt wurde. Auch nach 30maliger Verwendung des Formeinsatzes konnten im Rasterelektronenmikroskop keinerlei Veränderungen an den z. T. nur wenige µm breiten, 300 µm hohen Metallstrukturen beobachtet werden. Man kann deshalb erwarten, daß eine Massenproduktion von Mikrostrukturen aus Kunststoff mit großem Aspektverhältnis und großer Strukturhöhe unabhängig von einer Synchrotronstrahlungsquelle durchführbar ist, wenn ein geeignetes Abformwerkzeug vorliegt.

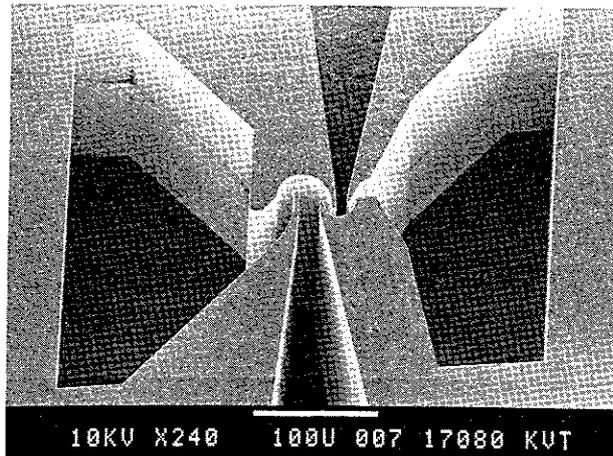
Daß mit den sekundären Kunststoffformen auch sekundäre Mikrostrukturen aus Metall hergestellt werden können, geht aus Abbildung 10c hervor. Die hier wiedergegebene Trenndüsenstruktur aus Nickel wurde durch galvanische Metallabscheidung in eine sekundäre Trenndüsenform aus Kunststoff, wie sie in Abbildung 10b gezeigt ist, erhalten.

4.3 Apparative Entwicklung für die Kunststoffabformung

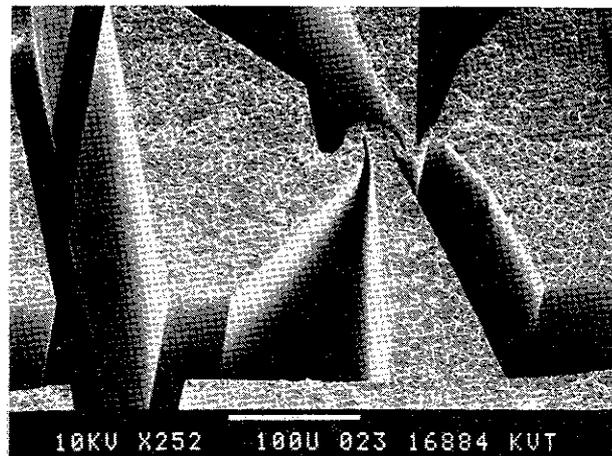
Die in Abbildung 10b im Ausschnitt gezeigte sekundäre Kunststoffform wurde in einer einfachen Laborapparatur hergestellt. In Abbildung 11 ist das Fließschema einer kürzlich fertiggestellten Zweikomponenten-Misch- und Dosieranlage dargestellt^{*)}, in der verschiedene Formmassen hinsichtlich

*) Hersteller: Kent-Moore (Europe) AG, Baar/Schweiz

(a)



(b)



(c)

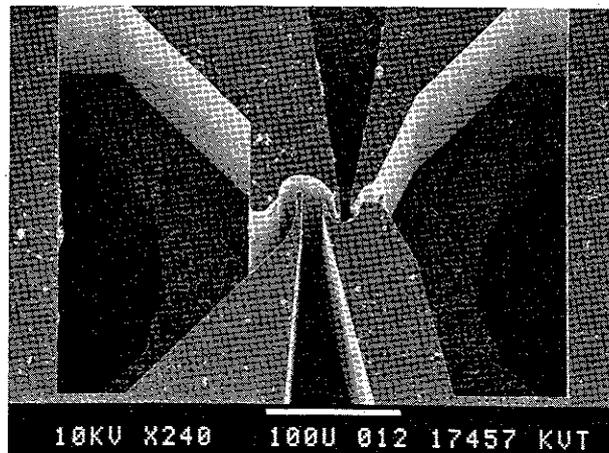


Abb. 10a-c: REM-Aufnahmen von Ausschnitten einer durch Röntgentiefenlithographie und Galvanoformung hergestellten primären Trenndüsenstruktur aus Nickel ("Formeinsatz") (a), einer durch Abformung hiermit erzeugten sekundären Kunststoffform (b) und einer sekundären Trenndüsenstruktur aus Nickel (c), die durch galvanische Metallabscheidung in die sekundäre Kunststoffform erzeugt wurde. Die Längen der Striche an den unteren Bildrändern entsprechen etwa 100 μm .

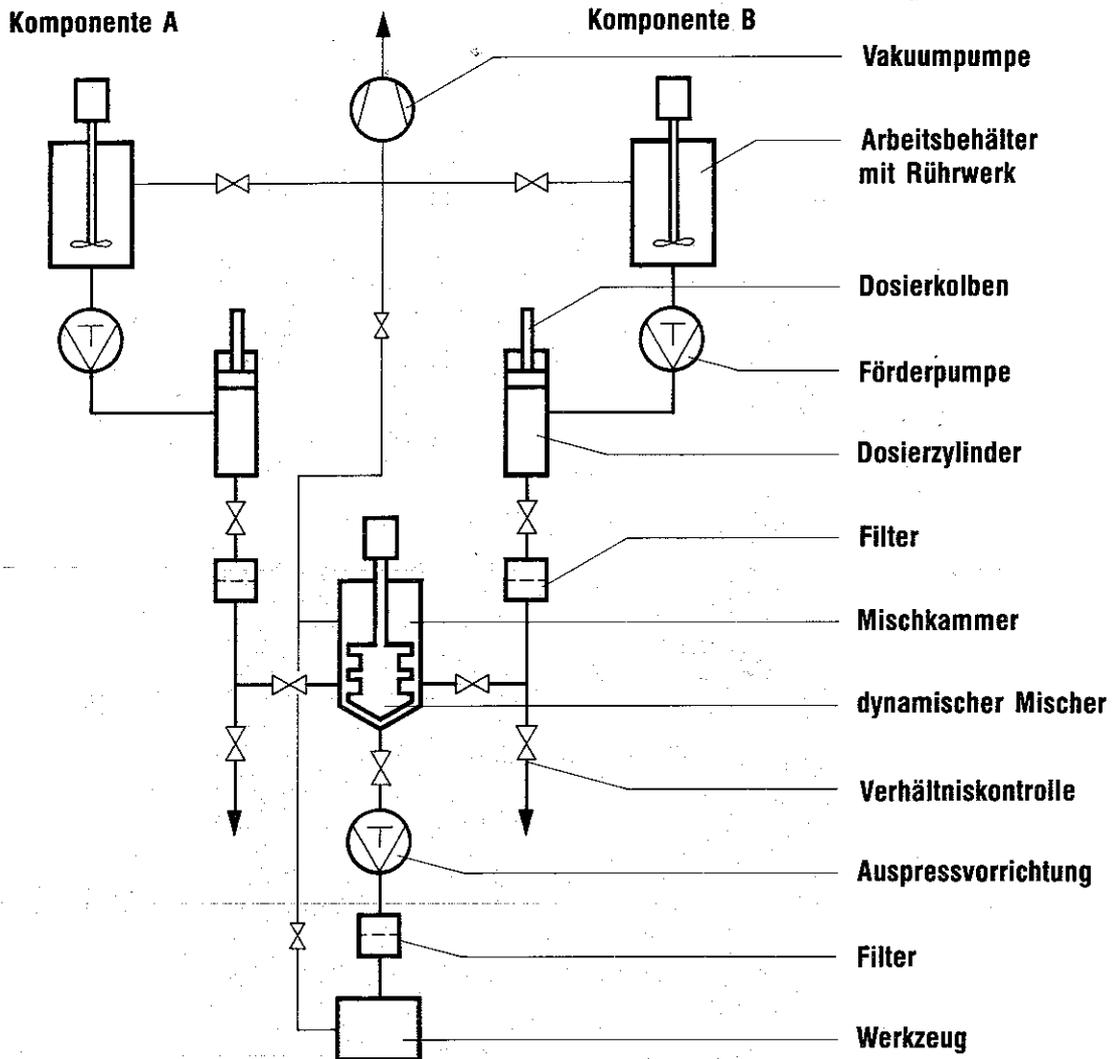


Abb. 11: Schema der Zweikomponenten-Misch- und Dosieranlage für die Herstellung von Mikrostrukturen aus Reaktionsharzen.

ihrer Eignung zur Abformung von Mikrostrukturen untersucht und die Verfahrensparameter unter reproduzierbaren Bedingungen optimiert werden sollen.

Die beiden Formmassekomponenten, z. B. Harz mit internem Trennmittel und der Härter, werden in den evakuierbaren Arbeitsbehältern mit je 500 cm³ Inhalt, die mit je einem Rührwerk versehen sind, aufbereitet. Über Förderpumpen werden die Komponenten in Dosierzylinder gedrückt und von den Dosierkolben im gewünschten Verhältnis in die 30 cm³ fassende Mischkammer gefördert. Während des Mischvorganges mit einem dynamischen Mischer kann der Raum über der Formmasse ebenfalls evakuiert werden. In den Zuleitungen zur Mischkammer sind Filter mit einer Porenweite von 3 µm sowie je eine Abzweigung zur Verhältniskontrolle eingebaut.

Das vermischte Material wird von einer Auspreßvorrichtung angesaugt und über ein weiteres Feinfilter in das evakuierte Werkzeug gedrückt. Nach dem Aufbau des Einfüllgrenzdruckes kann ein Nachdruck bis zu 100 MPa aufgebracht und während der Aushärtung gehalten werden. Nach dem Befüllen des Werkzeuges über die Auspreßvorrichtung läßt sich das Werkzeug zusammen mit dieser Vorrichtung vom Mischer trennen und gegen ein anderes auswechseln.

Die Anlage ist bis 200 °C beheizbar. Sie kann sowohl manuell als auch über eine programmierbare Maschinensteuerung bedient werden.

5. Praktische Anwendung und Weiterentwicklung des LIGA-Verfahrens

Zur vollen Ausschöpfung des Genauigkeitspotentials des LIGA-Verfahrens wird Synchrotronstrahlung mit einer charakteristischen Wellenlänge von 0,2 - 0,3 nm benötigt (vgl. Abschnitt 2.1). Solche Strahlung wird am Elektronensynchrotron der Universität Bonn nach der Inbetriebnahme des im Bau befindlichen Stretcherrings ELSA für die LIGA-Arbeiten in gewissem Umfang zur Verfügung stehen. Auch an anderen Stellen, z. B. am Elektronenspeicherring DORIS bei DESY, kann geeignete Synchrotronstrahlung erzeugt werden.*) Für eine kommerzielle Nutzung des LIGA-Verfahrens ist jedoch eine speziell auf diesen Prozeß zugeschnittene und weitgehend für seine Anwendung zur Verfügung stehende Strahlenquelle erstrebenswert. Es wurde daher ein an diese Aufgabe angepaßter Elektronenspeicherring entworfen, der zur Verminderung des Raum- und Betriebsmittelbedarfs mit vier supraleitenden Ablenkmagneten arbeitet /8/. Es ist vorgesehen, den Entwurf soweit auszuarbeiten, daß eine Entscheidung über den Bau der Strahlenquelle getroffen werden kann.

Von der universellen Einsetzbarkeit des LIGA-Verfahrens kann nur Gebrauch gemacht werden, wenn sich die erforderlichen Röntgenmasken (vgl. Abschnitt 2.2) hinreichend schnell und mit tragbarem Aufwand herstellen lassen. Es wurde daher mit der Planung einer Maskenlinie begonnen, bei der die erforderlichen Geräte in einem gemeinsamen Gebäude unter Reinraumbedingungen untergebracht sind.

Nicht bei allen Anwendungen des LIGA-Verfahrens ist der Einsatz aller drei Teilschritte erforderlich. So wird man im allgemeinen auf die Kunststoffabformung verzichten, wenn das Endprodukt aus Metall besteht und nur in relativ kleiner Stückzahl benötigt wird. Typische Beispiele sind Metallgitter mit besonders kleinen charakteristischen Abmessungen, großem Aspektverhältnis und hoher Transparenz für Forschungs- und Ent-

*) Ein Teil der in /1/ beschriebenen Versuche wurde am Elektronenspeicherring DORIS durchgeführt.

wicklungsaufgaben. Andererseits kann auch bei kleiner Stückzahl eine Kunststoffabformung erforderlich sein, wenn das Endprodukt aus einem Kunststoff bestehen soll, der sich nicht lithographisch strukturieren läßt, was z. B. bei medizinischen Anwendungen der Fall sein kann. Wenn dabei die Entformung Schwierigkeiten bereitet, kann, bei hinreichendem Wert des Endproduktes, der Formeinsatz aus der durch Abformung gewonnenen Kunststoffstruktur herausgelöst werden.

Eine Abformung der primären oder sekundären Metallstruktur kann bei Bedarf auch mit einem anderen fließ- oder sinterfähigem Stoff, beispielsweise mit Glas, erfolgen, wie dies bei einem Konzept für die Herstellung spezieller Vielkanal-Bildverstärkerplatten vorgesehen ist /9/.

Die Möglichkeiten des LIGA-Verfahrens lassen sich dadurch erweitern, daß man die primäre Kunststoffform nach der galvanischen Auffüllung erneut partiell bestrahlt und entwickelt. Dadurch kann man die Metallstrukturen teilweise freilegen, während sie durch den Rest des Kunststoffes zusammengehalten werden. Auf diese Weise lassen sich z. B. elektrische Mikroverbindungselemente mit extrem kleinem Rasterabstand herstellen (Abbildung 12) /10/. Die gleiche Technik ist auch bei sekundären Kunststoffformen anwendbar, wenn, wie bei dem in Abbildung 10b gezeigten Beispiel, zur Abformung ein Röntgenstrahl-empfindlicher Kunststoff verwendet wird.

Die im Rahmen des LIGA-Verfahrens entwickelte Kunststoffabformung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis und nachfolgender Galvanik läßt sich selbstverständlich auch mit Formeinsätzen durchführen, die nicht über Röntgentiefenlithographie hergestellt wurden. Eine entsprechende Anwendungsmöglichkeit ist z. B. das Kopieren von Spinddüsenplatten für die Herstellung von Profilmäßen /11/, bei denen die primären Spinddüsenkapillaren durch Elektroerodieren in die Spinddüsenplatten eingebracht worden sind.

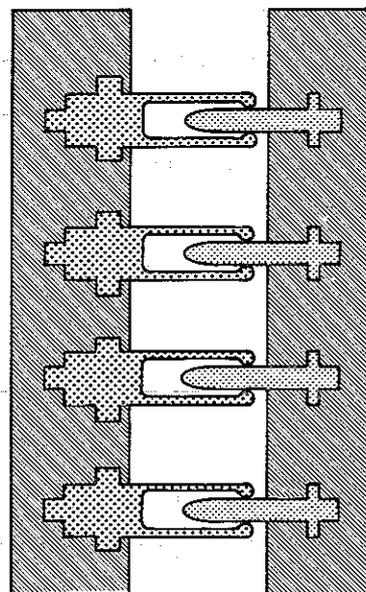
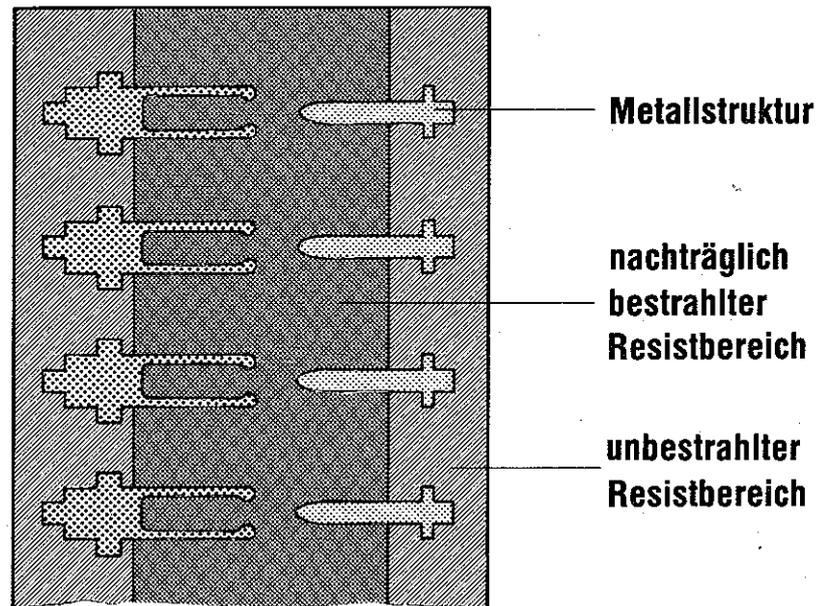


Abb. 12: Partielle Freilegung von nach dem LIGA-Verfahren erzeugten Metallstrukturen durch einen zweiten Bestrahlungsschritt, dargestellt am Beispiel elektrischer Mikroverbindungselemente /10/.

Auch wenn die abzuformende Struktur keine für die Injektion der Formmasse geeigneten makroskopischen Bereiche besitzt^{*)}, ist eine Abformung möglich, indem man den Formeinsatz mit flüssiger Formmasse überschichtet oder in eine weiche Formmasse eindrückt. Zur Erzeugung der Galvanikstartschicht wird hierbei der Formeinsatz, vor dem Kontakt mit dem Kunststoff, an der äußeren Oberfläche zunächst mit einer Antihafschicht und dann mit einem Metall beschichtet (Abbildung 13). Beim Entformen bleibt die Metallisierung am Grund der Sekundärform hängen, wo sie als Galvanikstartschicht dient. Die Entformung erfolgt zweckmäßig unter Verwendung des erhärteten, über die Formdicke hinausgehenden Kunststoff als Haltekörper. Eine weitere Möglichkeit bietet das Eindrücken des Formeinsatzes in eine Verbundschicht aus einem elektrisch isolierenden und einem elektrisch leitenden Kunststoff. Die Dicke der isolierenden Schicht wird so gewählt, daß der in sie eindringende Formeinsatz gerade elektrischen Kontakt mit der leitenden Schicht bekommt. Nach dem Entfernen des Formeinsatzes wird die leitende Schicht als Galvanikelektrode verwendet /12/.

Bei der Massenfertigung sekundärer Kunststoffformen ist die relativ lange Verarbeitungszeit der bisher verwendeten Reaktionsharze ein Nachteil. Es werden daher entsprechende Abformversuche auch mit Thermoplasten im Spritzgießverfahren durchgeführt. Die bisher vorliegenden Ergebnisse lassen diesen Weg aussichtsreich erscheinen.

Bei der praktischen Anwendung steht die als LIGA-Verfahren bezeichnete Kombination von Verfahrensschritten in Konkurrenz mit anderen Fertigungsmethoden für Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis, beispielsweise dem anisotropen Ätzen von Silizium-Einkristallen /13/ oder der Erzeugung von Mikroporen in Kunststoff oder Glimmer durch Beschuß mit hochenergetischen schweren Ionen /14/. Eine Überlegenheit des LIGA-Verfahrens ist vor allem dann zu erwarten, wenn bei der Massenherstellung eines Mikrostrukturkörpers, wie bei der Herstellung von Trenndüsen, gleichzeitig hohe Anforderungen an das räumliche Auflösungsvermögen, das Aspektverhältnis, die Strukturhöhe, die Parallelität der Strukturwände und die Freiheit der Formgebung gestellt werden.

^{*)} Vgl. z. B. die in Abbildung 5 gezeigte Wabenstruktur.

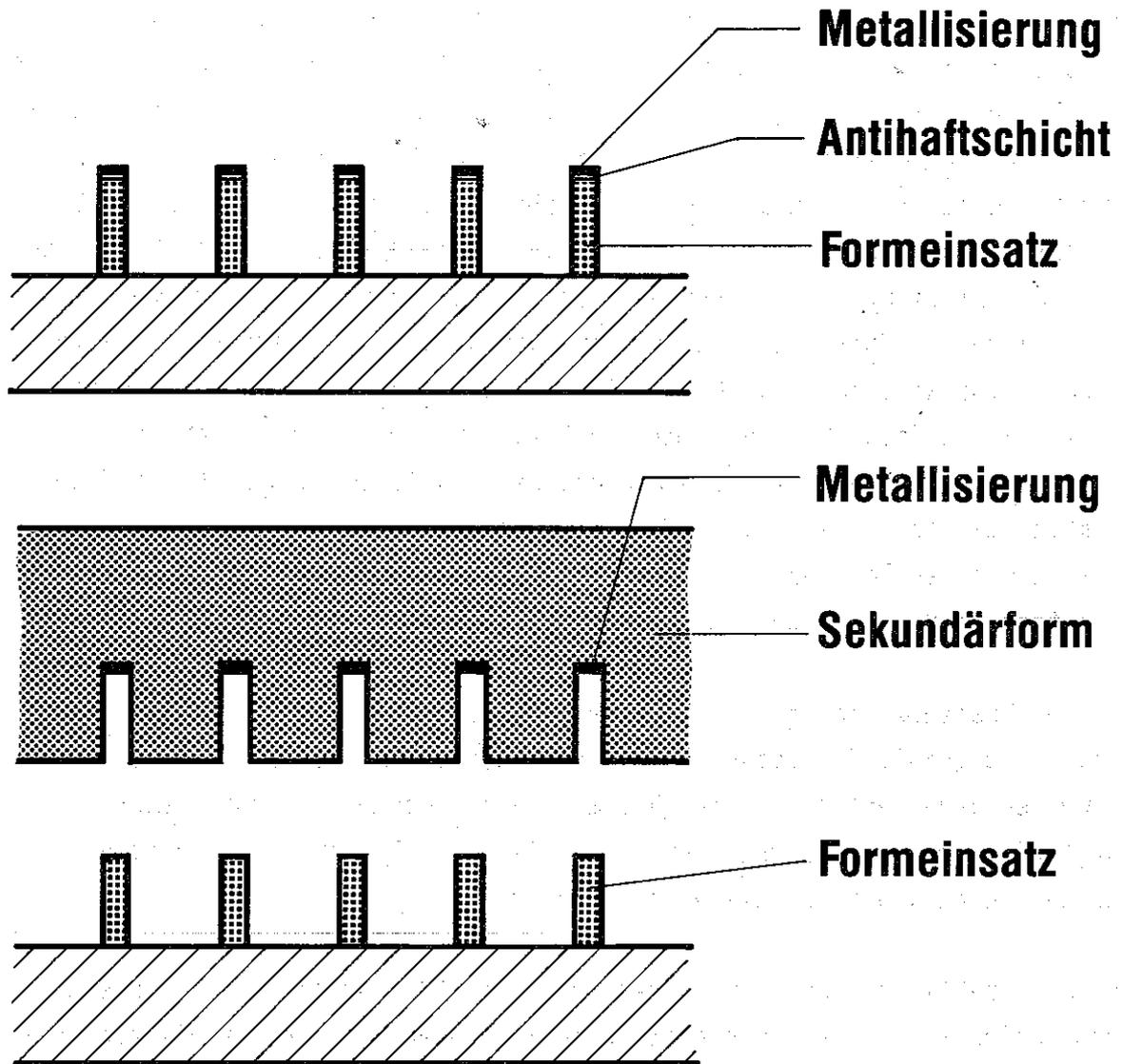


Abb. 13: Erzeugung einer Galvanikstartschicht durch Übertragung einer Metallisierungsschicht von der Stirnfläche des Formeinsatzes auf den Grund der Sekundärform.

6. Literaturverzeichnis

- /1/ E.W. Becker, H. Betz, W. Ehrfeld, W. Glashauser, A. Heuberger, H.J. Michel, D. Münchmeyer, S. Pongratz, R.v. Siemens:
"Production of Separation Nozzle Systems for Uranium Enrichment by a Combination of X-Ray Lithography and Galvanoplastics".
Naturwissenschaften 69 (1982) 520-523.
- /2/ Vgl. z. B.: A. Heuberger, H. Betz, S. Pongratz:
"Present Status and Problems of X-Ray Lithography".
Festkörperprobleme/Advances in Solid State Physics 20 (1980) 259-313.
- /3/ E.W. Becker, W. Ehrfeld, D. Münchmeyer:
"Untersuchungen zur Abbildungsgenauigkeit der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung bei der Herstellung technischer Trenndüsen-elemente".
KfK-Bericht 3732, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1984).
D. Münchmeyer, Dissertation, Universität Karlsruhe (1984).
- /4/ V. Ghica, W. Glashauser:
"Verfahren für die spannungsfreie Entwicklung von bestrahlten Polymethylmethacrylat-Schichten".
Offenlegungsschrift DE 3039110.
- /5/ W. Ehrfeld, A. Maner, D. Münchmeyer:
"Verfahren zur Herstellung von Masken für die Röntgentiefenlithographie".
DP Anmeldung vom 22.8.1985.
- /6/ Vgl. z. B.: P.E.L. Legierse, J.H.A. Schmitz, M.A.F. van Hoek, S. van Wijngaarden:
"Electroformed Molds for Optical Readout Discs".
Plating and Surface Finishing, Dezember 1984, 21-25.
- /7/ Vgl. z. B.: S.A. Watson:
"Galvanofornung mit Nickel".
Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau (1976).

- /8/ D. Einfeld, O.F. Hagen, P.R.W. Henkes, R. Klingelhöfer,
B. Krevet, H.O. Moser, G. Saxon, G. Stange:
"Entwurf einer Synchrotronstrahlungsquelle mit supraleitenden
Ablenkmagneten für die Mikrofertigung nach dem LIGA-Verfahren".
KfK-Bericht 3976, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1985).
- /9/ E.W. Becker, F.S. Becker, W. Ehrfeld:
"Konzepte für die Herstellung von Vielkanal-Bildverstärkerplatten
durch Röntgentiefenlithographie und Mikrogalvanoplastik".
KfK-Bericht 3750, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1984).
- /10/ W. Ehrfeld, P. Hagmann, D. Münchmeyer, E.W. Becker:
"Verfahren zur Herstellung mechanisch trennbarer Vielfach-Verbin-
dungen für den elektrischen Anschluß mikroelektronischer Bauele-
mente und nach diesem Verfahren hergestellte Vielfach-Verbindungen".
DP-Anmeldung vom 2.11.1984.
- /11/ E.W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, J. Mohr, D. Münchmeyer:
"Konzepte für die Herstellung von Spinndüsenplatten durch Röntgen-
lithographie mit Synchrotronstrahlung, Galvanoformung und Kunst-
stoffabformung".
KfK-Bericht 3961, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1985).
- /12/ W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, D. Münchmeyer, E.W. Becker:
"Verfahren zum Herstellen plattenförmiger Mikrostrukturkörper".
DP-Anmeldung, Oktober 1985.
- /13/ Vgl. z. B.: K.E. Petersen:
"Silicon as a Mechanical Material".
Proc. IEEE 70 (1982) 420-457.
- /14/ Vgl. z. B.: B.E. Fischer, R. Spohr:
"Production and Use of Nuclear Tracks: Imprinting Structure on Solids".
Rev. Mod. Phys. 55 (1983) 907-948.