

KfK 4363
Februar 1988

Herstellung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis durch Präzisionszerspanung mit Formdiamanten

W. Bier, K. Schubert
Institut für Kernverfahrenstechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Kernverfahrenstechnik

KfK 4363

**Herstellung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis durch
Präzisionszerspanung mit Formdiamanten**

W. Bier und K. Schubert

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Herstellung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis durch Präzisionszerspanung mit Formdiamanten

Kurzfassung

Als Beitrag für das neue Arbeitsgebiet Mikrotechnik des Kernforschungszentrums Karlsruhe wurde gemeinsam mit der Firma Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB) ein rein mechanisches Verfahren für die Herstellung von Mikrostrukturen entwickelt, das auf der Oberflächenstrukturierung von Folien durch Präzisionszerspanung mit profilierten Mikrodiamanten und dem anschließenden Zusammenfügen der Folien zu einem Mikrostrukturkörper beruht. Das Verfahren ist aus der ebenfalls gemeinsam mit MBB entwickelten Trenndüsenfertigung für die Uran-235-Anreicherung hervorgegangen.

Charakteristisch für die mit dem mechanischen Verfahren herstellbaren Mikrostrukturkörper ist das in einem Bereich von mehreren Größenordnungen frei vorgebbare Aspektverhältnis der in den Körpern in großer Zahl enthaltenen kanalförmigen Mikroöffnungen, deren Querschnittsform ebenfalls in weiten Grenzen frei bestimmbar ist. Erste Mikrostrukturkörper aus Aluminium wurden gefertigt, die pro cm^2 Querschnittsfläche mehrere zehntausend Mikrokanäle mit über die Länge konstantem Querschnitt von hoher Präzision besitzen, wobei spezifische Oberflächen bis zu $600 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ und optische Transparenzen bis zu 70 % erreicht wurden. Die kleinsten Querabmessungen der Kanäle liegen zur Zeit in der Größenordnung von 10 Mikrometern. Als Materialien für die Mikrostrukturkörper kommen alle zerspanbaren Werkstoffe in Frage, d. h. neben vielen Metallen auch formstabile Kunststoffe und Halbleiter wie z. B. Silizium.

Von den möglichen Anwendungsbeispielen für die mechanisch gefertigten Mikrostrukturkörper befinden sich bereits erste kompakte Mikrowärmetauscher und Röntgenlichtkollimatoren in der praktischen Erprobung. So konnten nach orientierenden Messungen in einem würfelförmigen Wärmetauschervolumen von nur 1 cm^3 bei Wasser als Medium volumetrische Wärmedurchgangskoeffizienten von etwa $200 \text{ MW}/\text{m}^3\text{K}$ erreicht werden. Dieser Wert liegt um zwei Größenordnungen höher als bei konventionellen Plattenwärmetauschern. Für die Richtungseinengung von Röntgenstrahlen wurde ein gegenüber den bisher verwendeten Kollimatoren sehr kompakt aufgebauter Feinkollimator mit einem auf die Kanalweiten von 20 Mikrometern bezogenen Aspektverhältnis von 10 000 hergestellt und vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, erfolgreich getestet.

Fabrication of Microstructures with High Aspect Ratios by Precision Cutting Using Profile Dressing Diamonds

Abstract

As a contribution to the new activities in microengineering pursued by the Karlsruhe Nuclear Research Center a purely mechanical technique for microstructure fabrication has been developed jointly with Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB). The technique is based on surface structuring of foils by precision cutting with profiled micro-diamonds and subsequent foil jointing to a microstructure body. The technique is the outcome of a method of mechanical fabrication of separation nozzles for uranium-235 enrichment, likewise developed in cooperation with MBB.

The typical feature of the microstructure bodies which can be fabricated using this technique is that the aspect ratio of the great number of channel-like penetrations contained in the bodies can be specified within broad limits. The cross-sectional shapes of these penetrations can likewise be freely fixed within broad limits. First aluminum-made microstructure bodies have been fabricated which contain several ten thousands of microchannels per square centimeter of cross-sectional area with a high precision achieved in the constancy of cross sections over the length, specific surfaces up to $600 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ and optical transparencies up to 70%. The minimum cross-sectional dimensions of the channels are on the order of $10 \text{ }\mu\text{m}$. Eligible materials for microstructure bodies are all cuttable materials, i.e., in addition to many metals, inherently stable plastics and semiconductor materials, e.g., silicon.

Of the practical examples of mechanically fabricated microstructure bodies very compact micro-heat exchangers and X-ray collimators have already reached the stage of testing in application: After first measurements in a cubic heat exchanger volume of only 1 cm^3 with water as the medium volumetric heat transfer coefficients of about $200 \text{ MW}/\text{m}^3\text{K}$ have been obtained. This value is higher by two orders of magnitude than in conventional plate-type heat exchangers. A compact fine collimator, aspect ratio 10,000 related to $20 \text{ }\mu\text{m}$ channel diameter, for narrowing the direction of X-rays has been successfully tested by the Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching.

Einleitung und Überblick

Für die kommerzielle Herstellung von Trenndüsenmikrostrukturen für das Trenndüsenverfahren zur Uran-235-Anreicherung ist vom Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) gemeinsam mit der Firma Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB), Ottobrunn, ein mechanisches Verfahren entwickelt worden, bei dem die zerspanende Bearbeitung von Aluminiumteilen mit hochpräzise geschliffenen Formdiamanten eine wesentliche Rolle spielt [1]. Der erreichte Entwicklungsstand erlaubt die mechanische Fertigung von Trenndüsenstrukturen mit einem kleinsten Radius der Umlenkrolle von 25 Mikrometern [2].

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde vom KfK im Rahmen seines neuen Arbeitsgebietes Mikrotechnik wiederum gemeinsam mit MBB ein neues Verfahren zur mechanischen Herstellung von anderen Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis, d.h. mit einem großen Verhältnis von Strukturhöhe zu kleinster lateraler Abmessung entwickelt, das auf der Oberflächenstrukturierung von Folien durch Präzisionszerspanung mit profilierten Mikrodiamanten und dem anschließenden Zusammenfügen der Folien zu einem Mikrostrukturkörper beruht.

Mit dieser Methode lassen sich mit relativ einfachen Mitteln Körper mit einer Vielzahl von Mikrokanälen mit über die Länge konstanten Querschnitten von hoher Präzision erzeugen. Die kleinsten lateralen Abmessungen liegen im 10-Mikrometerbereich und die Strukturhöhen im Millimeter- bis Dezimeterbereich, d.h. das Aspektverhältnis der Mikrokanäle ist in einem weiten Bereich vorgebar. An Probestücken wurden Aspektverhältnisse zwischen 10 und 10 000 realisiert. Die Querschnittsform der Mikrokanäle und deren Anordnung ist ebenfalls in weiten Grenzen frei bestimmbar. Die Fertigungstoleranzen bei den Lateralabmessungen und bei der Parallelität der Kanäle liegen im Mikrometerbereich. Als Materialien

kommen alle zerspanbaren Werkstoffe in Frage, d.h. neben sehr vielen Metallen und Metallegierungen auch formstabile Kunststoffe und Halbleitermaterialien wie z.B. Silizium.

In der vorliegenden Arbeit wird die Herstellung von ersten Mikrostruktur-Musterstücken aus Aluminium nach der mechanischen Methode beschrieben. Von den möglichen, sich anbietenden Anwendungen wird weiterhin über den Bau und erfolgreichen Test von äußerst kompakten Mikrowärmetauschern mit sehr hohen volumetrischen Leistungsdichten und eines Feinkollimators zur Richtungseinengung von Röntgenstrahlen berichtet. Die im folgenden gezeigten Mikrostrukturkörper wurden im Rahmen eines KfK-Entwicklungsauftrages von der Firma MBB gefertigt.

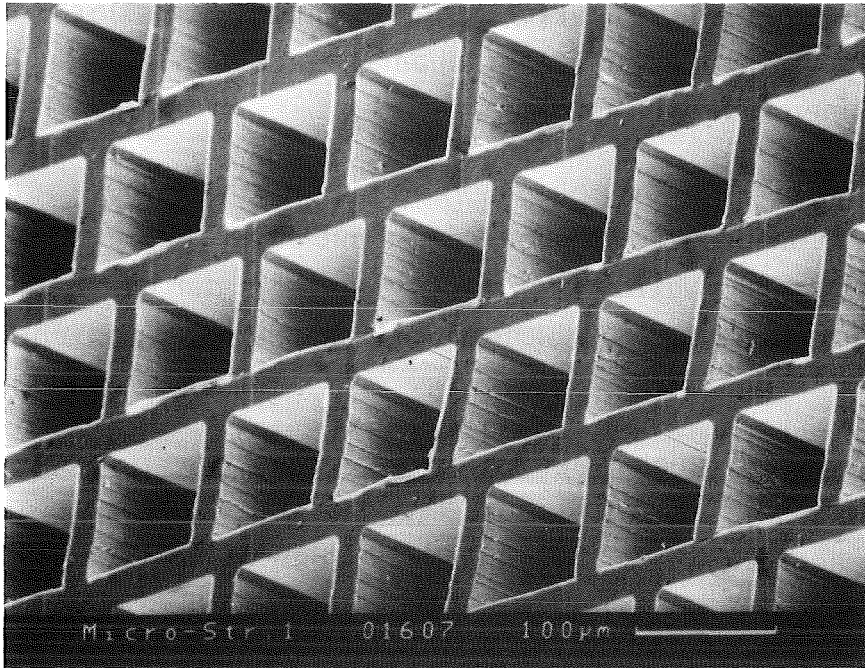
Herstellung von Mikrostruktur-Musterstücken

Die Abbildungen 1 bis 3 zeigen rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen der Stirnflächen von Aluminiumkörpern mit Mikrokanälen unterschiedlicher Größe und Form.

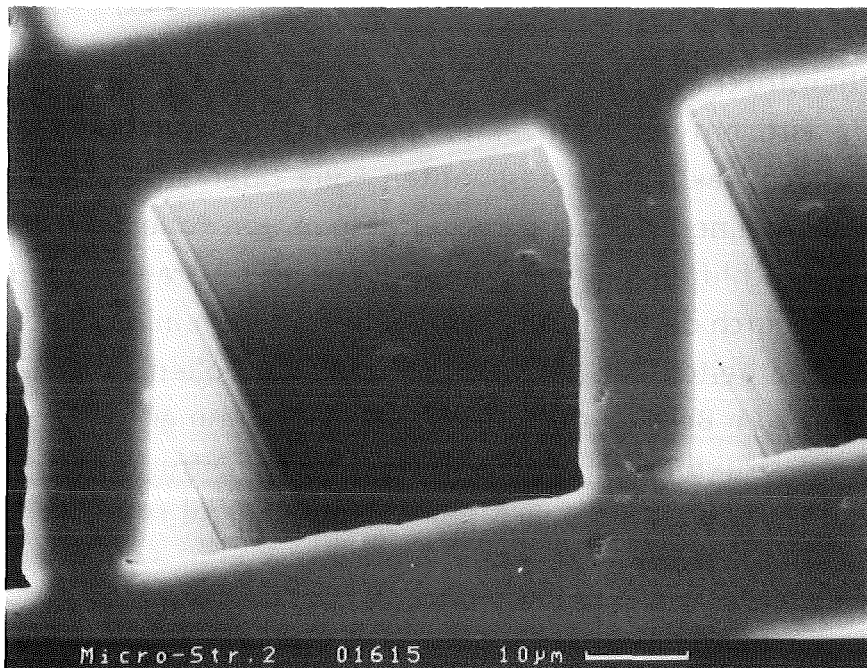
Die quadratischen Kanäle in Abb.1a haben Querabmessungen von 90 Mikrometern bei Wandstärken zwischen den Kanälen von 18 Mikrometern. Der Aluminiumkörper besitzt ca. 8000 Kanäle pro Quadratzentimeter Querschnittsfläche und eine spezifische innere Oberfläche von $300\text{cm}^2/\text{cm}^3$. Die optische Transparenz, d.h. der freie Querschnitt, liegt bei ca. 70%.

Bei einem weiteren Musterkörper konnten durch Verkleinerung der Querabmessungen der Kanäle auf 40 Mikrometer die Kanaldichte auf 35 000 Kanäle pro Quadratzentimeter und die spezifische innere Oberfläche auf ca. $600\text{ cm}^2/\text{cm}^3$ gesteigert werden.

Die Abb 1b zeigt einen Kanal dieses Körpers. Aus der REM-Aufnahme geht die hohe Oberflächengüte der Strukturwände hervor (mittlere Rauigkeit kleiner 0,1 Mikrometer).



(a)



(b)

Abb.1: REM-Aufnahmen der Stirnflächen von zwei nach dem mechanischen Verfahren hergestellten Mikrostrukturkörpern aus Aluminium mit Kanälen quadratischen Querschnitts und Kanallängen von 14 mm.

a) Die Querabmessungen der Kanäle betragen $90\ \mu\text{m}$ bei Wandstärken von $18\ \mu\text{m}$. Die Anzahl der Kanäle pro cm^2 liegt bei ca. 8000, die spezifische innere Oberfläche bei $300\ \text{cm}^2/\text{cm}^3$. Damit ergibt sich eine optische Transparenz von etwa 70%.

b) Die Abbildung zeigt einen $40\ \mu\text{m}$ engen Mikrokanal eines Mikrostrukturkörpers, bei dem durch Verkleinerung der Kanalabmessung die Kanaldichte auf ca. 35 000 Kanäle pro cm^2 und die spezifische innere Oberfläche auf ca. $600\ \text{cm}^2/\text{cm}^3$ gesteigert werden konnte. Die optische Transparenz beträgt etwa 60%.

Abb.2a zeigt einen Mikrostrukturkörper mit torbogenartigen Durchbrüchen, wobei hier ein biradialer Formdiamant mit einem mittleren Radius von 31 Mikrometern verwendet wurde.

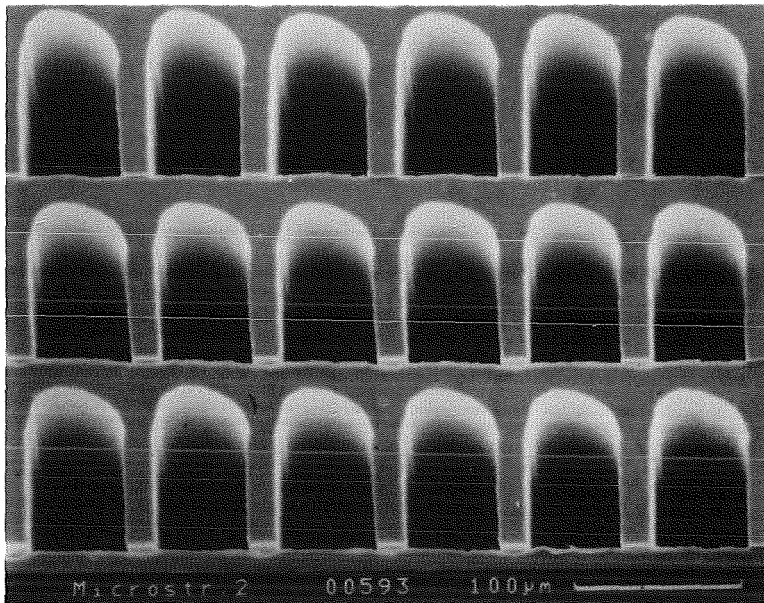
Die Herstellbarkeit von komplizierteren Querschnittsformen geht aus Abb.2b hervor, in der sternförmige Kanäle mit einem maximalen Sterndurchmesser von 180 Mikrometern gezeigt sind. Bei der hier gewählten Anordnung lassen sich ca. 2500 solcher Durchbrüche pro Quadratzentimeter realisieren.

In den bisherigen Beispielen beträgt die Tiefe der Mikrostruktur-Musterstücke 14 mm, d.h. die auf die Kanaldurchmesser bezogenen Aspektverhältnisse liegen zwischen 80 und 300. Neben den gezeigten Querschnittsformen könnten auch andere Querschnitte realisiert werden wie z.B. drei- oder vieleckige, runde, kreuzschlitzförmige oder ellipsenförmige Querschnitte.

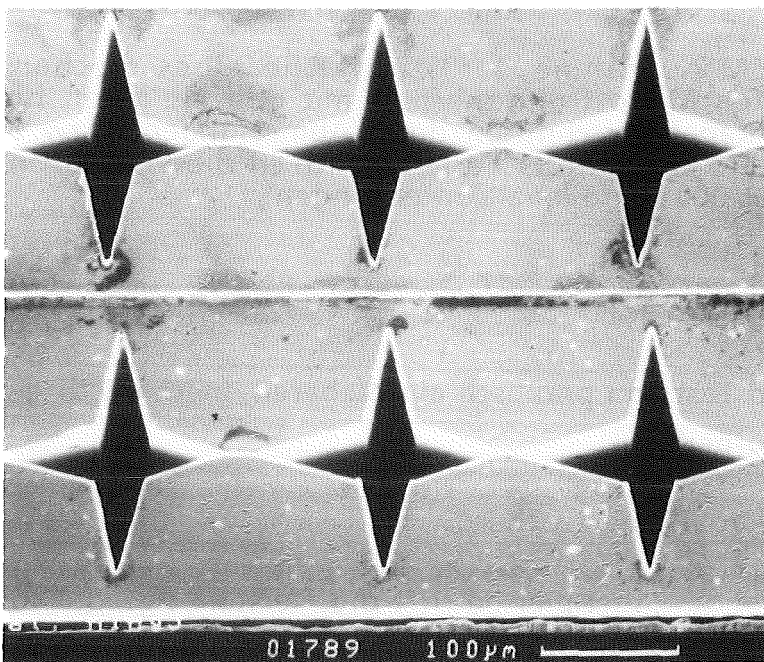
Die Oberflächenstrukturierung der Folien, aus denen die Körper zusammengesetzt sind, wird entweder an einer auf einer geschliffenen Sintermetallplatte durch Vakuum aufgespannten Folie oder an einer um den zylindrischen Dorn einer Drehmaschine aufgespannten Folie durchgeführt. Mit hochpräzise geschliffenen Mikrodiamanten werden parallel verlaufende Nuten mit einer durch den Diamant vorgegebenen Form in die Oberfläche der Folien eingearbeitet. Anschließend werden die Folien übereinander geschichtet und zum Beispiel durch Deckplatten zusammengehalten. Eine Verbindung der strukturierten Folien durch Kleben, Diffusionslöten oder -schweißen dürfte ebenfalls möglich sein. Entsprechende Untersuchungen dazu werden zur Zeit durchgeführt.

Die erreichbaren Minimalabmessungen der Querschnittsform der Kanäle werden durch die Größe der Profildiamanten gegeben und liegen beim jetzigen Entwicklungsstand bei 5 bis 10 Mikrometern.

Abb.3 zeigt dazu einen Mikrostrukturkörper mit rechteckigen Kanälen, deren Abmessungen 5 bzw. 8 Mikrometer betragen. Pro Quadratzentimeter Querschnittsfläche lassen sich in dieser Anordnung mehr als 100 000 Mikrokanäle unterbringen.



(a)



(b)

Abb.2: REM-Aufnahmen der Stirnflächen von Mikrostrukturkörpern aus Aluminium mit Kanälen unterschiedlichen Querschnitts bei Kanallängen von 14 mm.

a) Torbogenartige Kanäle, bei denen der Radius des Bogens $31\ \mu\text{m}$ beträgt.

b) Sternförmige Kanäle zur Demonstration der Herstellbarkeit von komplizierteren Querschnittsformen. Der maximale Stern Durchmesser beträgt $180\ \mu\text{m}$.

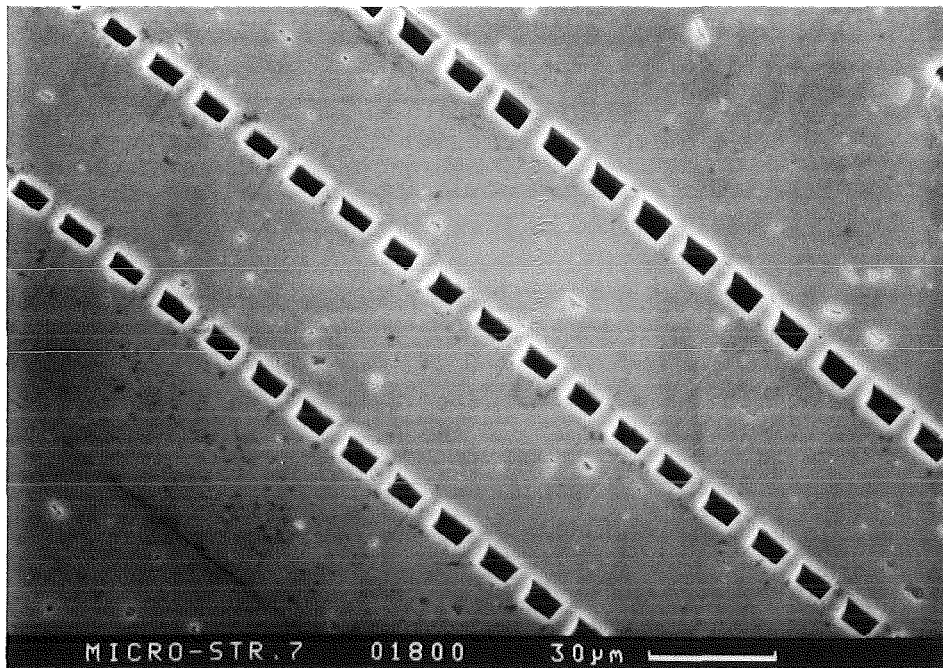


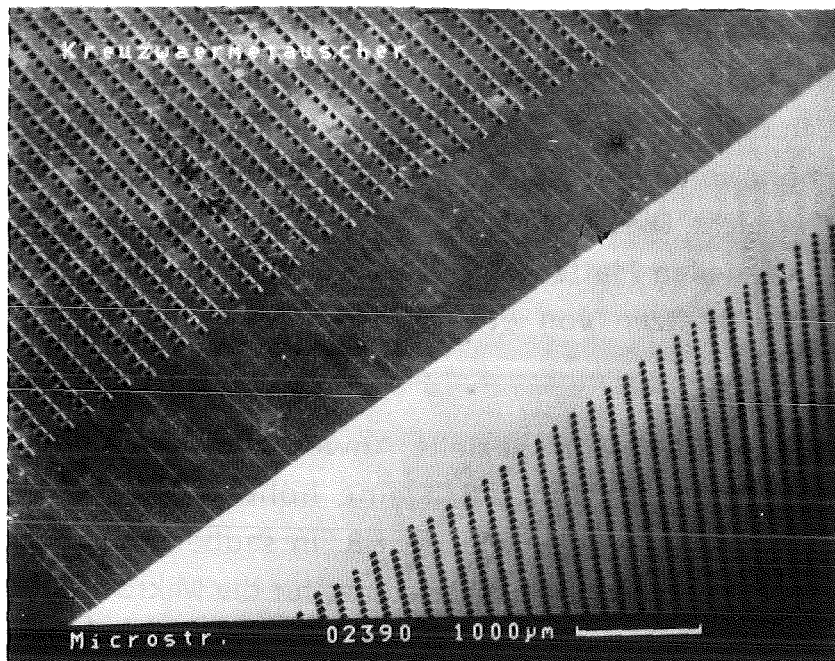
Abb.3: REM-Aufnahme der Stirnfläche eines mechanisch hergestellten Mikrostrukturkörpers mit den kleinsten bisher erreichten Kanalquerschnitten, deren Abmessungen 5 bzw. 8 μm betragen. Pro cm^2 Stirnfläche lassen sich in dieser Anordnung mehr als 100 000 Mikrokanäle unterbringen.

Herstellung und Test von praktisch einsetzbaren, mechanisch gefertigten Mikrostrukturkörpern

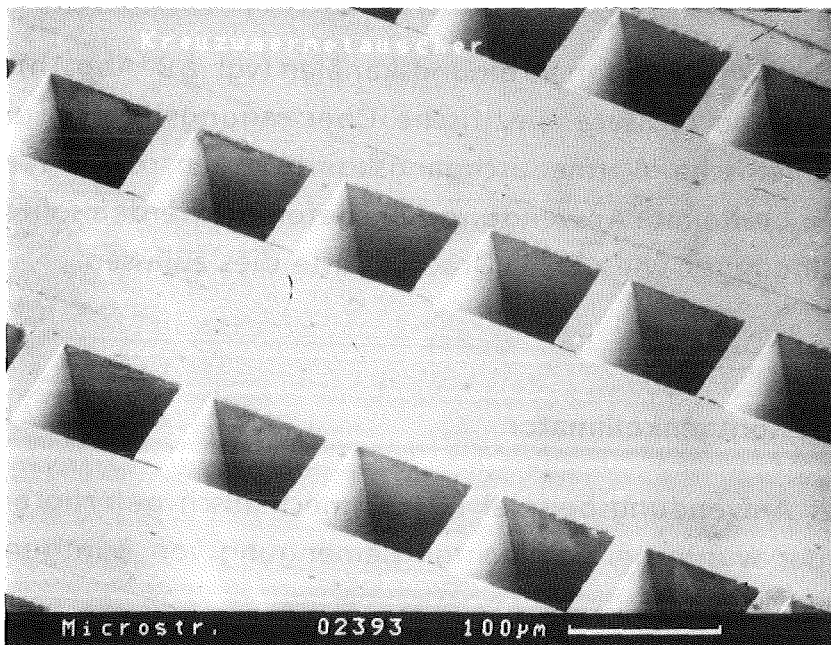
1. Kompakte Mikrowärmetauscher

Ein erstes Anwendungsbeispiel betrifft die Herstellung von kompakten Mikrowärmetauschern aus Aluminium in Rippenplattenbauweise mit hohen volumetrischen Wärmedurchgangskoeffizienten:

Abb.4 zeigt REM-Aufnahmen der Stirnseiten eines nach dem Kreuzstromprinzip aufgebauten Mikrowärmetauschers mit rechteckigen Strömungskanälen mit Abmessungen von 80 bzw. 95 Mikrometern und Wandstärken zwischen den Kanälen von 20 Mikrometern. Damit konnten bei einem würfelförmigen Wärmetauschervolumen von 1 cm^3 auf jeder Seite rund 4000 Strömungskanäle mit einer gesamten Übertragungsfläche von ca. 150 cm^2 untergebracht werden. Orientierende Messungen an diesen



(a)



(b)

Abb.4: REM-Aufnahmen der Stirnflächen eines aus mechanisch strukturierten Folien hergestellten Mikrowärmetauschers mit hohen volumetrischen Wärmedurchgangskoeffizienten.

a) Blick auf die Kante des nach dem Kreuzstromprinzip aufgebauten Wärmetauschers. In dem würfelförmigen Wärmetauschervolumen von 1 cm^3 sind pro Seite rund 4000 Strömungskanäle untergebracht.

b) Detailvergrößerung einer Stirnfläche. Die Abmessungen der Strömungskanäle betragen 80 bzw. 95 μm bei Wandstärken von ca. 20 μm . Die gesamte Übertragungsfläche beträgt 150 cm^2 . Aus der Abbildung geht die hohe Gleichmäßigkeit der Strömungskanäle hervor.

Mikrowärmetauschern wurden zunächst mit Wasser gegen Wasser durchgeführt. Bei Durchsätzen von ca. 6 l/min, einem Druckverlust von 2,2 bar und einer mittleren Temperaturdifferenz von 25 K wurde eine Leistung von ca. 5 kW in dem aktiven Kühlervolumen von 1 cm³ übertragen, d.h. es wurden sehr hohe volumetrische Wärmedurchgangskoeffizienten von etwa 200 MW/m³K erreicht. Dieser Wert liegt um zwei Größenordnungen höher als bei konventionellen Plattenwärmetauschern [3]. Bei den niedrigsten eingestellten Durchsätzen von etwa 0,25 l/min wurden noch 70 MW/m³K gemessen¹⁾.

Für den Betrieb solcher, für spezielle Anwendungsgebiete gedachten Mikrowärmetauscher muß natürlich eine hohe Reinheit der beiden Fluidströme gewährleistet sein, wie sie z.B. in sauberen, geschlossenen Kreisläufen erzielt werden kann. Als Material für die Mikrowärmetauscher steht eine breite Werkstoffauswahl zur Verfügung, so daß auch aggressive Flüssigkeiten oder Gase und hohe Temperaturen beherrscht werden können.

Bei Anwendung von engeren Strömungskanälen (vgl. z.B. Abb.1b) könnten auch entsprechend größere spezifische Übertragungsflächen und noch höhere volumetrische Wärmedurchgangskoeffizienten realisiert werden, wenn dies für bestimmte Anwendungsfälle gefordert werden sollte und die Betriebsbedingungen wie z.B. die Druckverluste dies zulassen.

2. Kompakter Röntgenkollimator

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für die mechanisch gefertigten Mikrostrukturkörper wurde bei der Richtungseinengung von Röntgenstrahlen demonstriert:

Für die Analyse von Röntgenstrahlen mit hoher spektraler Auflösung zur Bestimmung der Eigenschaften von Fusionsplasmen wird vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), Garching, ein Doppel-Kristall-Spektrometer

1) Mit ähnlichen Kompaktwärmetauschern in Plattenbauweise, die nach einem anderen Fertigungsverfahren und mit größeren Kanälen hergestellt wurden, sind Werte von 7 MW/m³K erreicht worden [3].

verwendet, in dessen Strahlengang zur Richtungseinengung der Röntgenstrahlen ein Feinkollimator mit einer räumlichen Winkelauflösung von 1:5000 bzw. von 42 Bogensekunden eingesetzt ist[4]. Als Kollimatoren werden zur Zeit einzelne hintereinander angeordnete Gitter verwendet, die im Fall der Feinkollimation auf einer Länge von ca. 1000 mm mit relativ viel Aufwand genau zueinander justiert werden müssen. Um hier zu einer einfacheren und gegebenenfalls billigeren Lösung zu kommen, wurde die Eignung der mechanisch gefertigten Mikrostrukturkörper für diesen Zweck untersucht.

Nach dem erfolgreichen Vortest des in Abb.1a gezeigten Mikrostrukturkörpers als Grobkollimator mit einer Winkelauflösung von 1:75 bzw. von 46 Bogenminuten beim IPP²⁾ wurde ein Probestück eines Feinkollimators aus Aluminium mit einer Auflösung von 1:5000 hergestellt, dessen engste Kanalweiten bei 20 Mikrometern liegen (Abb.5) und dessen Baulänge von

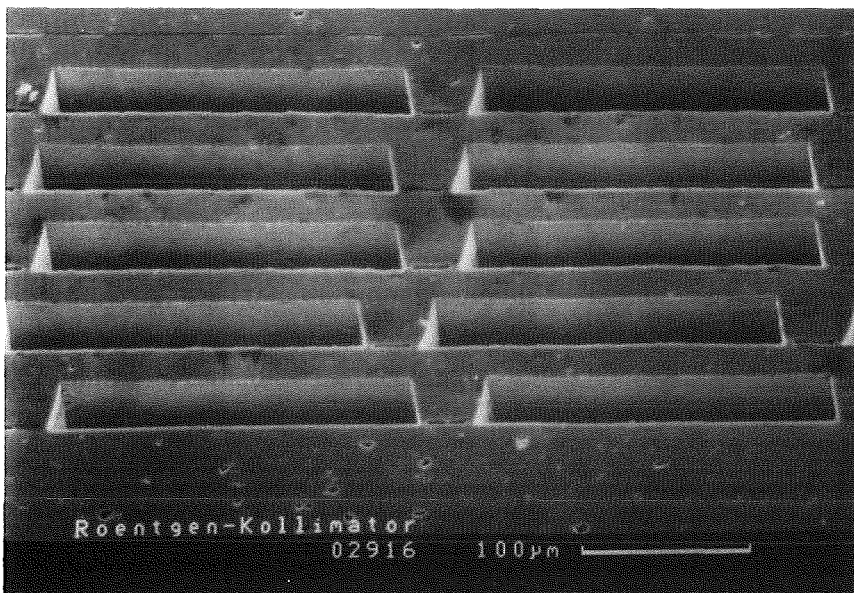


Abb.5: Ausschnittvergrößerung aus der Stirnfläche eines mechanisch hergestellten Feinkollimators zur Richtungseinengung von Röntgenstrahlen. Die engsten Kanalweiten betragen 20 µm bei einer Gesamtlänge des Kollimators von 200 mm (Aspektverhältnis 10 000). Das theoretische Winkelauflösungsvermögen von 1:5000 oder 42 Bogensekunden wurde experimentell im Rahmen der Meßgenauigkeit bestätigt²⁾.

2) Die Versuche an den Röntgenkollimatoren wurden freundlicherweise von Dr. U. Schumacher, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), Garching, durchgeführt.

200 mm um den Faktor 5 kleiner ist als der zur Zeit von IPP verwendete Feinkollimator.

Die bisher gewonnenen Testergebnisse des IPP zeigen, daß die aufgrund der vorhandenen Geometrie vorausberechnete Winkelauflösung von 1:5000 im Rahmen der Meßgenauigkeit erreicht wird. Das bedeutet, daß die Parallelität der 20-Mikrometer-Kanäle über die gesamte Länge von 200 mm mit vernachlässigbar kleinen Toleranzen eingehalten wurde. Darüber hinaus besagt das Ergebnis, daß bei den vorliegenden sehr kleinen Einfallswinkeln der Röntgenstrahlen noch keine die Winkelauflösung verschlechternde Totalreflexion an den durchgehenden Kanalwänden dieses Kollimators auftritt.

Neben dem Vorteil der kleineren Baulänge eines solchen mechanisch gefertigten Kompaktkollimators besteht die Möglichkeit, die optische Transparenz der in Abb.5 gezeigten Feinkollimatorstruktur zu erhöhen, was apparatetechnische Vorteile bei dem Doppel-Kristall-Spektrometer hätte.

Ausblick auf weitere Anwendungsmöglichkeiten

Aufgrund der hohen spezifischen inneren Oberflächen bei gleichzeitig großen optischen Transparenzen und großen Aspektverhältnissen der mit mechanischen Mitteln relativ einfach herstellbaren Mikrostrukturkörper sind neben den beschriebenen Anwendungsbeispielen auch andere Einsatzgebiete denkbar, wie zum Beispiel Feinfilter mit gleichartigen Porenöffnungen, niedrigem Strömungswiderstand und hoher mechanischer Stabilität, optische Gitterstrukturen mit großen Aspektverhältnissen, Katalysatorträger für spezielle Anwendungsfälle, genau definierbare Trägerflächen zur Zell- und Mikrobenfixierung und Kühlelemente für den Einsatz in der Mikroelektronik. Wegen der in weiten Bereichen frei vorgebbaren Querschnittsform der Mikrokanäle werden auch mögliche Anwendungen bei der Herstellung von Spinndüsenplatten untersucht, sowohl für das Naßspinnverfahren als auch - wegen der möglichen hohen Temperaturbeständigkeit der verwendbaren Werkstoffe - für das Schmelzspinnverfahren.

Die zukünftigen Entwicklungsarbeiten zielen darauf ab, das mechanische Mikrostrukturfertigungsverfahren weiterzuentwickeln, die Anwendungsmöglichkeiten zusammen mit der Industrie auszuloten und entsprechende Prototypmuster zu bauen und zu erproben.

Literatur

- [1] E.W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld, K. Schubert, D. Seidel: Entwicklung und technische Anwendung des Trenndüsenverfahrens zur Anreicherung von Uran 235. KfK-Nachrichten 13 (1981) Nr. 1/2, S. 50-57.
- [2] Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten 1986. Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-Bericht Nr. 4227, März 1987, S.3.
- [3] W.T. Cross and C. Ramshaw: Process Intensification: Laminar Flow Heat Transfer; Chem. Eng. Res. Des., Vol.64, July 1986, S.293-301.
- [4] J. Fink, H.W. Morsi, H. Röhr, U. Schumacher: Investigations and Tests for the Double Crystal Monochromators KS1 and KS2 for JET, IPP 1-240-IPP-JET No.33, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, February 1987.