

# Plasma Jet Machining - Fertigung von off-axis Parabolspiegeln aus Siliziumkarbid

Thomas Arnold\*, Georg Böhm\*

\*Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e. V., Leipzig

<mailto:thomas.arnold@iom-leipzig.de>

Plasma Jet Machining (PJM) ist ein nichtkonventionelles Bearbeitungsverfahren für die Formgebung und Korrektur optischer Elemente. Zusammen mit TNO Science und Industry hat das IOM eine Prozesskette aus PJM und 3D Roboterpolitur entwickelt, mit der stark gekrümmte off-axis Parabolspiegel aus SiC gefertigt wurden.

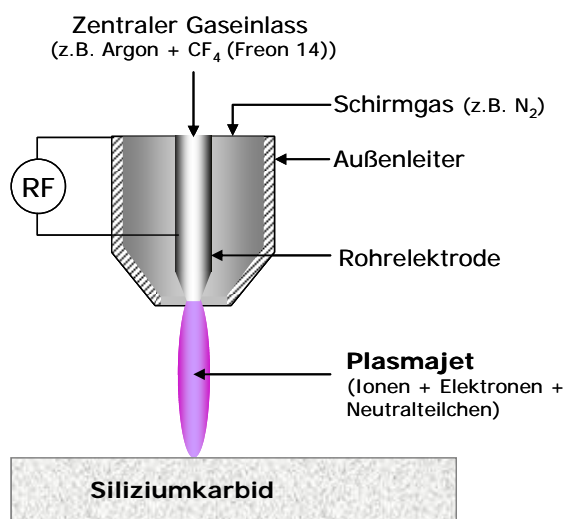
## 1 Einführung

Plasma Jet Machining (PJM) ist ein Verfahren zur Bearbeitung von Oberflächen, das seit über zehn Jahren im IOM entwickelt wird. Es dient insbesondere zur Formgebung und Korrektur optischer Elemente. PJM basiert auf einer chemisch reaktiven Atmosphärendruck-Plasmajetentladung, die mit der Oberfläche wechselwirkt und Material abträgt. Das Verfahren lässt sich effektiv zur Bearbeitung von Optiken aus Silizium, Quarz, ULE und SiC einsetzen [1,2], insbesondere da, wo aufgrund geometrischer Bedingungen oder des Materials eine konventionelle Bearbeitung nicht möglich ist. Aufgrund der rein chemischen Mechanismen beim Materialabtrag ohne mechanische Beiträge werden oberflächennahe Schädigungen vermieden, allerdings erhöht sich die Oberflächenrauheit.

Zusammen mit TNO Science und Industry hat das IOM eine Prozesskette aus PJM und 3D Roboterpolitur entwickelt, mit der stark gekrümmte off-axis Parabolspiegel aus SiC gefertigt werden konnten. Die Elemente dienen als Kollimatorspiegel in einem Subsystem für die GAIA-Satellitenmission der ESA und erfordern eine Formgenauigkeit von 12,5 nm rms und eine Mikrorauheit von 6 nm rms. Die Hauptschwierigkeit bei der Herstellung lag im kleinen Krümmungsradius ( $R=50,17$  mm) über einer effektiven Apertur von 10 mm. Als strahlbasiertes Verfahren ist PJM jedoch prädestiniert für eine solche Bearbeitung. Der Artikel beschreibt die PJM-Technologie sowie die angewandte Prozesskette zur SiC-Bearbeitung und zeigt die erzielten Bearbeitungsergebnisse.

## 2 Grundlagen des Plasma Jet Machining

Abbildung 1 zeigt das Prinzip der Plasmajeterzeugung. Die Plasmaquelle besteht aus einem Koaxialleitersystem, dessen Innenleiter als Gaszuführungsrohr ausgeführt ist und in einer Düse endet. Durch Bereitstellung von elektrischer Energie in Form von RF (13,56 MHz) Leistung wird an der Düse ein Inertgas-Plasmajet gezündet. Durch Zumischung des fluorhaltigen Gases  $CF_4$  sowie  $O_2$

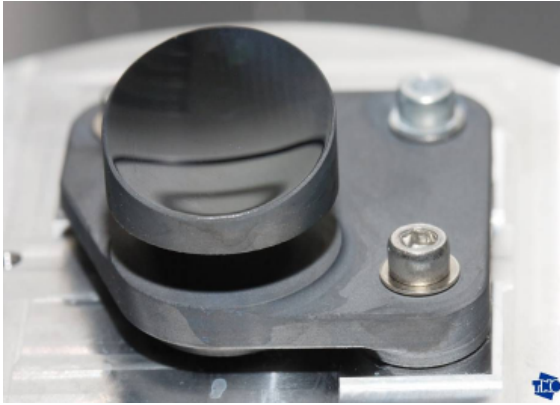


**Abb. 1** Prinzip der Plasmajeterzeugung und des Materialabtrages durch chemische Reaktion mit der Oberfläche.

werden im Plasma reaktive Spezies wie z.B. Fluor- und Sauerstoffradikale gebildet, die aus der Plasmajetquelle austreten. Der lokale Materialabtrag geschieht im wesentlichen durch chemische Reaktionen zwischen den Bestandteilen des Oberflächenmaterials SiC und den Radikalen. Dabei werden flüchtige Produkte wie  $CO_2$  und  $SiF_4$  gebildet, die über eine Absaugung entsorgt werden. Für die Bearbeitung von kleinen Flächen wurden gaussförmige Plasmajets mit Halbwertsbreiten zwischen 0,6 mm und 1 mm eingesetzt.

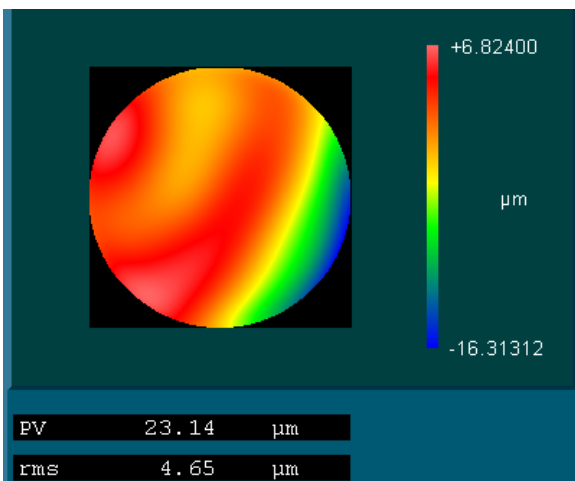
## 3 Prozesskette zur Bearbeitung von SiC

Insgesamt drei Parabolspiegel (Abb. 2) aus gesintertem SiC wurden zusammen in eine Aufnahme montiert, geschliffen und poliert. Der Formfehler nach der Politur betrug jeweils 18  $\mu m$  PV, 4  $\mu m$  rms. Abb. 3 zeigt den Eingangsfehler von Spiegel Nr. 2. Zunächst wurde mit PJM die Lage der optischen Achsen der Spiegel korrigiert. Die Bearbeitungszeiten lagen dabei im Bereich von drei Stunden. Es konnte eine Formverbesserung von 99% erreicht werden, allerdings rauhten die Oberflä-

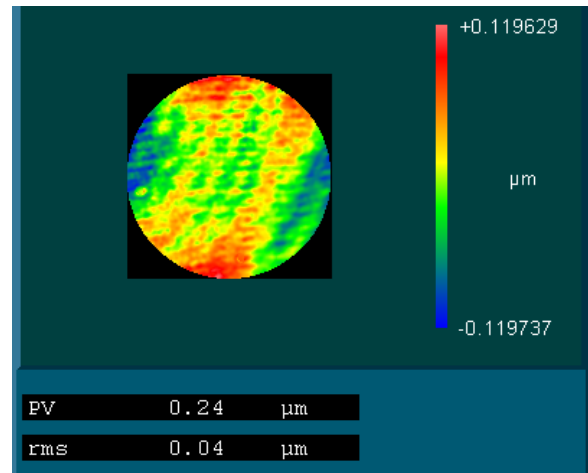


**Abb. 2** Einzelner Kollimatorspiegel aus SiC mit Durchmesser von 20mm. Die effektive Apertur ist 10 mm mit der zu erreichenden Spezifikation: Formfehler 12,5 nm rms, Mikrorauheit 6 nm.

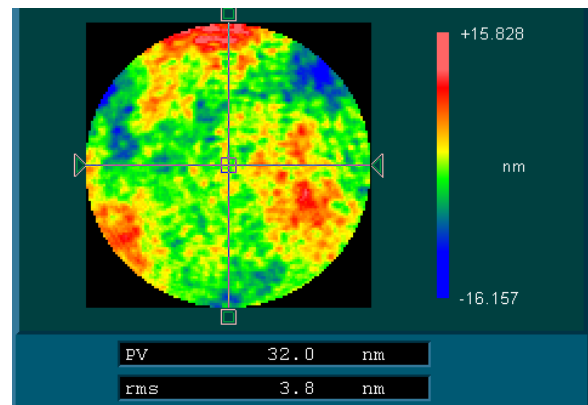
chen signifikant auf. Für die interferometrische Vermessung der Oberfläche war daher ein mechanischer formerhaltender Polierschritt notwendig. In Abb. 4 ist das Ergebnis nach PJM und Politur dargestellt. Die horizontalen periodischen Linienstrukturen sind auf nichtoptimale Bedingungen beim Polieren zurückzuführen. Um solche mittelfrequenten Strukturen zu korrigieren, wurde eine Plasmajet-Werkzeugfunktion mit einer Halbwertsbreite von 0,6 mm verwendet. Mit diesem Werkzeug konnte die vorgegebene Spezifikation von 12,5 nm rms für den Formfehler erreicht werden. Hochfrequente Anteile dieser Strukturen mit lateralen Wellenlängen  $< 0,6$  mm verblieben allerdings auf der Oberfläche. Ein Polierschritt mit hohem Materialabtrag reduzierte die Linienstrukturen deutlich. Dabei verschlechterte sich jedoch der langwellige Formfehler um einen Faktor 5 auf 412 nm PV, 64 nm rms. Ein erneuter PJM-Schritt erbrachte eine Formverbesserung von 82%. Die dabei entstehende Rauheit von ca. 12 nm rms wurde mit einem kurzen Glättschritt auf 6 nm rms verkleinert. Das erzielte Endergebnis ist in Abb. 5 dargestellt.



**Abb. 3** Eingangformfehler auf Spiegel #2 nach Schleifen und Vorpoltur auf Durchmesser 18 mm.



**Abb. 4** Formfehler auf Spiegel #2 nach PJM und einem Polierschritt zur Verminderung der Oberflächenrauheit. (Durchmesser 12 mm).



**Abb. 5** Bearbeitungsergebnis auf Spiegel #2, Durchmesser 10 mm.

#### 4 Zusammenfassung

Mit einer Prozesskette bestehend aus Plasma Jet Machining und formerhaltender 3D-Roboterpolitur ist es gelungen, kleine stark gekrümmte off-axis Parabolspiegel aus SiC herzustellen. Die Spezifikationen für Formfehler (12,5 nm rms) und Mikrorauheit (6 nm rms) konnten erreicht werden.

#### 5 Danksagung

Wir danken Dr. Guido Gubbels und Fred Kamphues von der TNO Science and Industry für die fruchtbare Zusammenarbeit und dem BMBF für die finanzielle Unterstützung im Rahmen der Inoprofile-Initiative „Ultrapräzisionsbearbeitung mit atomaren Teilchenstrahlen“ FKZ 03IP706.

#### Literatur

- [1] Th. Arnold et al., J. Vac. Sci. Technol. A 19 (5) (2001) 2586
- [2] G. Böhm, et. al, Frontiers in Optics 2008/ Laser ScienceXXIV/Plasmonics and Metamaterials/ Optical Fabrication and Testing on CD-ROM (Optical Society of America, Washington, DC, 2008), OThD4, ISBN 978-1-55752-861-2 (2008)