

# Scharfer Blick ins Weltall – Ultrapräzise Metallspiegel für astronomische und Weltraumanwendungen



Stefan Risse



Andreas Gebhardt



Ralf Steinkopf



Wieland Stöckl



Steffen Kirschstein <sup>1</sup>



Ralf-Rainer Rohloff <sup>2</sup>

---

Eine ultrapräzise Spiegelbaugruppe im Innern des weltweit größten Teleskops im US-Bundesstaat Arizona wird trotz Temperaturänderung und schneller Bewegungen den klaren Blick zu fernen Galaxien ermöglichen. Hohe mechanische und thermische Anforderungen sind ebenso an Spiegeloptiken zur Erdbeobachtung gestellt. Für eine genaue Abbildung von Objekten aus dem Weltall sind Spiegelsysteme (Teleskope) notwendig, die ein Höchstmaß an Stabilität und Formgenauigkeit bieten und zugleich Belastungen beim Raketentstart und im Dauerbetrieb widerstehen. Diese Eigenschaften werden mit Metallspiegeln aus speziellen Werkstoffkombinationen erreicht.

---

## Vom Spiegelentwurf zum Design

Bereits in der Designphase werden die Qualität und die Stabilität der Spiegelbaugruppe berücksichtigt. Entwurfsvarianten der Spiegel werden mit Finite-Elemente-Methoden simuliert. Damit ist eine Prüfung des Verhaltens der Spiegel unter auftretenden mechanischen und thermischen Lasten sowie auch unter Fertigungsbelastungen möglich (Abb. 1). Häufig besteht die Notwendigkeit eine Leichtgewichtslösung zu entwickeln, um das Massebudget zu entlasten. Hierzu wurde eine Variante entwickelt, welche bei einer Reduzierung von mehr als 50 % der Masse noch Steifigkeitseigenschaften nahe eines vergleichbaren massiven Körpers aufweist. Die Grundlage bildet der Erhalt geschlossener Oberflächen. Die Reduzierung der Masse wird durch Bohrungen erreicht, welche sich orthogonal kreuzen. In den Kreuzungspunkten bilden sich stützende Säulen aus.

Maßgeblich wird die Qualität der Spiegelfläche durch eine konstante Dicke bezogen auf die Leichtgewichtsstruktur erreicht. Bei gekrümmten Spiegeln wird deshalb mit unterschiedlichen Bohrungsmaßen gearbeitet.

---

## Spiegelnde Oberfläche mit nur einem Schnitt

Eine kostengünstige und hervorragend geeignete Methode zur Herstellung von Spiegeln ist die ultrapräzise Bearbeitung mit Diamantwerkzeugen (Abb. 2). Durch den harten und formstabilen Diamanten können Konturmerkmale mit exakter Ausführung erreicht werden <sup>1/1</sup>. Es entsteht bereits beim ersten Arbeitsschnitt eine spiegelnde optische Oberfläche mit Rauheitswerten RMS (root mean square) unter 20 nm. Hierzu werden Spezialmaschinen, so genannte Ultrapräzisionsdreh- und Fräsmaschinen, eingesetzt. Die Genauigkeit der Bearbeitung basiert auf präzisen mechanischen Achsen, welche öl- oder luftgelagert sind. Durch eine exakte Ausrichtung des Diamantwerkzeugs und Kompensation der Werkzeuggeometrie sind komplexe Oberflächen formgenau bearbeitbar. Die Bearbeitung der Spiegel erfolgt unter definierten Koordinatenbeziehungen zum Bewegungssystem der Maschine. Die Charakterisierung der Spiegelform beruht auf interferometrischen Messverfahren, welche aufgrund ihrer hohen Genauigkeit zur Prüfung optischer Oberflächen prädestiniert sind. Bei einfachen Formelementen wie ebenen oder kugelförmigen Flächen liefert die Messung direkt die Formabweichung zur Referenzoptik, typisch mit einer Qualität kleiner  $\lambda/20$ , d.h. kleiner 30 nm.

<sup>1</sup> Jena-Optronik GmbH

<sup>2</sup> Max-Planck-Institut für Astronomie

# A sharp view into outer space – Ultra precise metal mirrors for astronomic and space applications

The world's largest optical telescope, the large binocular telescope in Arizona, will offer high visibility to far-flung galaxies. A piston mirror unit in its centre acts as the enabling element, despite changes of temperature and fast movements. Similar to ground based optics, space applications have high mechanical and thermal requirements. In order to image space objects with high accuracy, mirror systems (telescopes) are required which offer a maximum of stability and shape accuracy. Furthermore, they must resist the forces present during rocket launch, and they must work in sustained continuous operation. These characteristics can be achieved using mirrors from special metal alloys.

## The mirror from draft to design

As early as the first design phase, quality and stability of the mirror unit is the focus of all considerations. Finite element methods are used to simulate different designs. In this way, it is possible to examine the behaviour of the mirrors under typically occurring mechanical and thermal loads as well as under manufacturing tensions (Fig. 1). Often it is essential to use a light-weight structure to reduce the mass. A special solution for such a case was developed which exhibits stiffness almost as great as a solid body but with less than 50% of its mass, on a basis of the retention of closed surfaces. Holes parallel to the closed sides, arranged in orthogonal crosses, forge self-supporting vaults. For high precision mirrors it is necessary to keep the space between surface and drill hole approximately constant. Curved mirrors therefore contain drill holes with different cross section dimensions.

## Mirror surfaces in just one cut

An outstanding technique in points of ultra-precision as well as economical production of mirrors is single point diamond turning (Fig. 2). The unique properties of the diamonds are used to obtain optical surfaces with roughness values down to < 20 nm rms (root mean square) and high form accuracy /1/.

The machines used for single point diamond turning have some special features, and the basis of high precision is founded in its accurate mechanical axes, which work with oil or air bearings. After aligning the tool in respect to the machine coordinate system and compensation of the tool geometry, complex surfaces are exactly machinable.

To meet the challenging requirements of optical surfaces, interferometric measurement is an adequate choice for examination. The characterization of spherical shapes or planes is based on comparison between test part and reference optic, typically with a quality of better than  $\lambda/20$ , i.e. smaller 30 nm. If aspherical mirrors are scheduled, the examination is considerably more complicated. Between the interferometer and the aspherical mirror, a Computer Generated Hologram (CGH) is assigned to compensate wave front differences between reference optic and the test part /2/. Such CGHs are basically diffractive gratings which produce a certain wave front on a well-defined point /3/. At the Centre for Advanced Micro and Nano-Optics (CMN-Optics) of the Fraunhofer IOF this CGH can be manufactured with an electron-beam recorder SB350 manufactured by VISTEC. An iterative loop of mirror cutting, inter-ferometric measurement and tool-path-correction is used to produce the mirror within the specified shape.

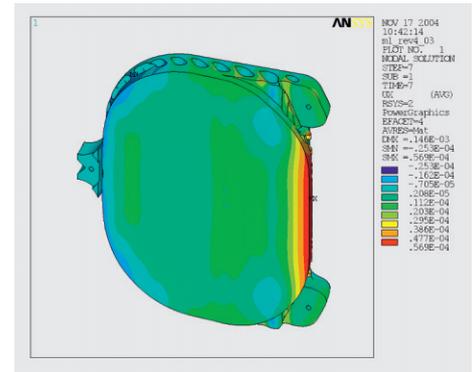


Abb. 1: Simulation eines Leichtgewichtspiegels unter Fliehkraft (Flächenfehler im Qualitätsbereich: 7 nm RMS).

Fig. 1: Simulation of a light weight mirror under centrifugal force (surface error in the quality area 7 nm rms).

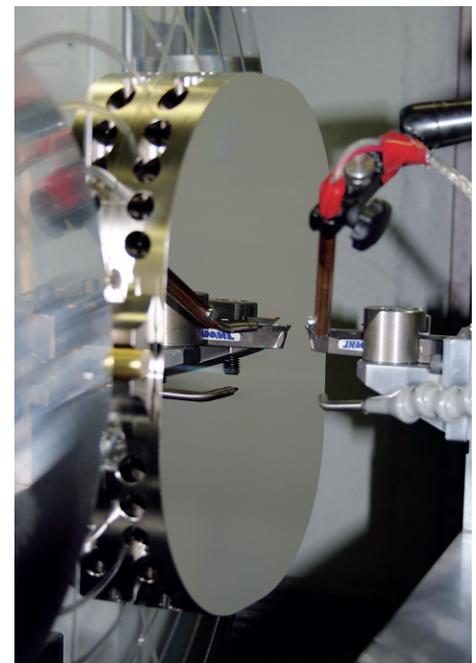


Abb. 2: Diamantbearbeitung einer Asphäre.

Fig. 2: Single Point Diamond Turning of an off-axis aspherical mirror.

Werden Asphären hergestellt, ist die Prüfung der Spiegel wesentlich komplizierter. Aufgrund ihrer Flexibilität und Multifunktionalität sind diffraktive Nullkompensatoren, so genannte computergenerierte Hologramme (CGH), geeignet /2/. Diese Prüfmittel erzeugen mittels Phasen- und Amplitudengitter an einem definierten Ort eine Wellenfront, deren Form der Soll-Oberflächenform der Asphäre angepasst ist /3/. Am Center for Advanced Micro- und Nano-Optics (CMN-Optics) des Fraunhofer IOF können mit einem Elektronenstrahlschreiber SB350 der Firma VISTEC diese CGH hergestellt werden. Durch eine iterative Bearbeitung der Spiegel unter Beachtung der interferometrischen Messung der Wellenfrontabweichung wird kontinuierlich eine Korrektur der Oberfläche erreicht.

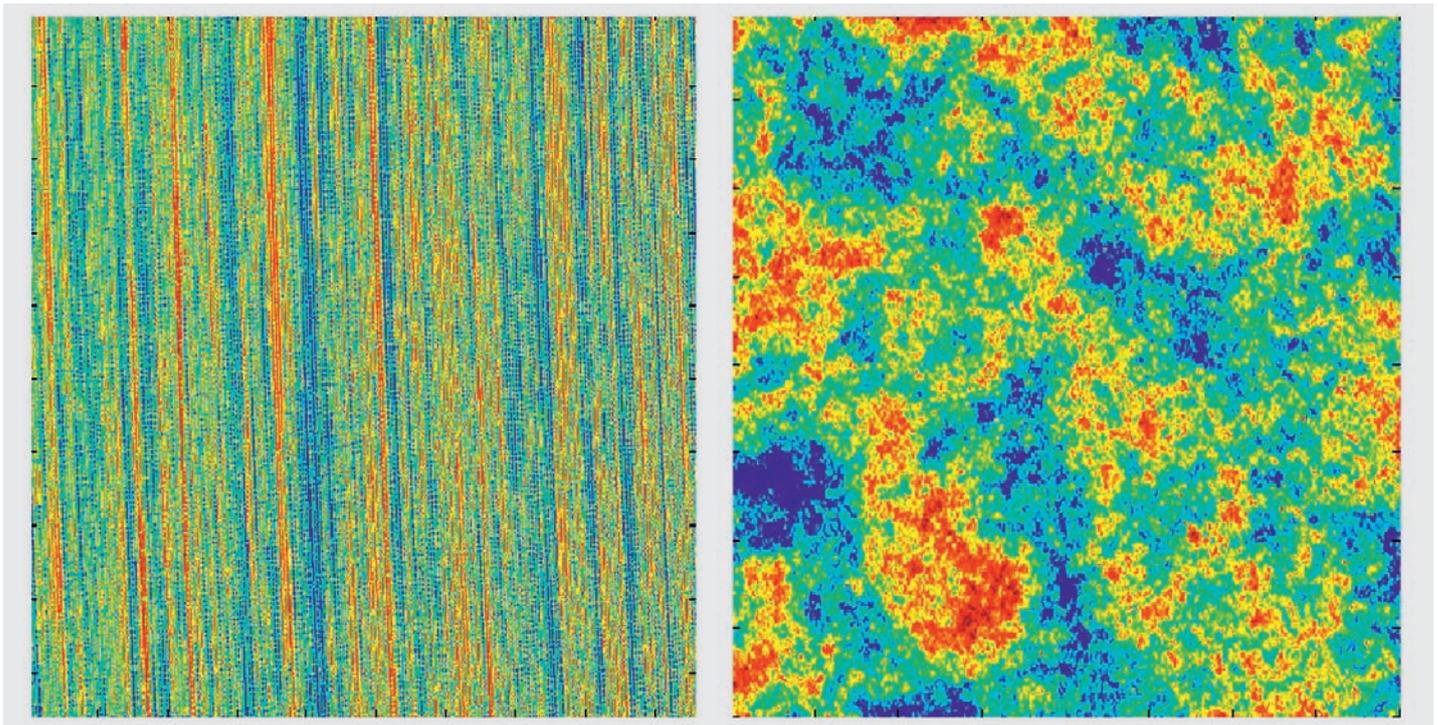
### Finishbearbeitung der Oberfläche für den visuellen Wellenlängenbereich

Die durch den Diamanten während der Bearbeitung hervorgerufene Mikrostruktur (Drehrillen) der Oberfläche wirkt im visuellen Wellenlängenbereich wie ein Beugungsgitter. Durch ein anschließendes Glätten der Oberfläche werden diese periodischen Anteile der Oberflächenrauheit entfernt. Um diese Bearbeitungstechnik einsetzen zu können, müssen geeignete Werkstoffe ausgewählt werden. Vorteilhaft ist hier die Beschichtung eines Aluminium-Grundkörpers mit einer Nickel-Phosphor-Legierung, welche eine amorphe Struktur aufweist und damit klassisch global oder computergestützt lokal

poliert werden kann. Die Mikrorauheit wird dabei unter einen Wert von RMS 1 nm verbessert (Abb. 3). Eine abschließende ionengestützte Formkorrektur ermöglicht Formqualitäten von PV (peak to valley) kleiner 100 nm (Abb. 4). Diese Finishbearbeitung erfolgt wieder unter Nutzung des computergenerierten Hologramms. Eine abschließende Beschichtung basiert auf Schichtsystemen, welche an die jeweiligen Anwendungsanforderungen angepasst werden. So werden Goldbeschichtungen z.B. für IR-Anwendungen und geschützte Silberbeschichtungen für breitbandige Verspiegelungen appliziert. In umfangreichen Tests wurden diese Schichtsysteme für Weltraumanwendungen qualifiziert.

Abb. 3: Mikrorauheit in Abhängigkeit von der Bearbeitung (links Diamantdrehen RMS 5 nm und rechts Polieren RMS 0,7 nm; Messfeld 2,5 x 2,5 mm<sup>2</sup>). © Carl Zeiss Jena GmbH.

Fig. 3: Micro roughness after diamond turning 5 nm rms (left side) and polishing 0,7 nm rms (right side). © Carl Zeiss Jena GmbH.



---

### Surface finishing for visual wavelength

Single point diamond turning always produces an unwanted effect: microstructures, typically turning structures, take effect as a diffraction grating in visual wavelength. These periodic structures must be removed with a smoothing procedure. Favourable is here an aluminium base plate coated with a nickel phosphorus alloy. This alloy is an amorphous material and can be polished globally in the classical way or locally with computer assistance. Surface roughness is thereby improved to better than 1 nm rms (Fig. 3).

Ion beam polishing is the last step in improving the form accuracy. Peak to valley values well beyond 100 nm are state-of-the-art (Fig. 4). Interferometers with CGH are used again for measurements during correction cycles.

To adapt the surface to the respective application special layer systems have to be designed.

Gold coatings are used in IR applications while protected silver coatings have been deployed for wide-band applications. These layer systems were qualified for space applications during extensive tests.

---

### Plane mirror for the Large Binocular Telescope (LBT, [www.mpia-hd.mpg.de](http://www.mpia-hd.mpg.de))

The world's largest optical telescope, the Large Binocular Telescope in Arizona, works with two mirrors of 8.4 m in diameter, similar to enormous field glasses (Fig. 5). The two mirrors realize the luminous intensity of a 12 m - telescope and the resolution of a 23 m - telescope. Responsible for this achievement is also the "PISTON MIRROR" unit, an assembly group from two mirrors with a plane surface of 200 mm x 140 mm (Fig. 6), which combines the two paths of rays in the instrument and adjusts phase shifts.

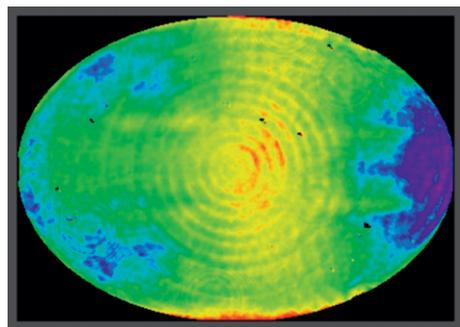


Abb. 4:  
Interferogramm nach Finishbearbeitung  
(PV ~ 30 nm; RMS ~ 5 nm).

Fig. 4:  
Form accuracy after completion  
(PV ~ 30 nm; rms ~ 5 nm).

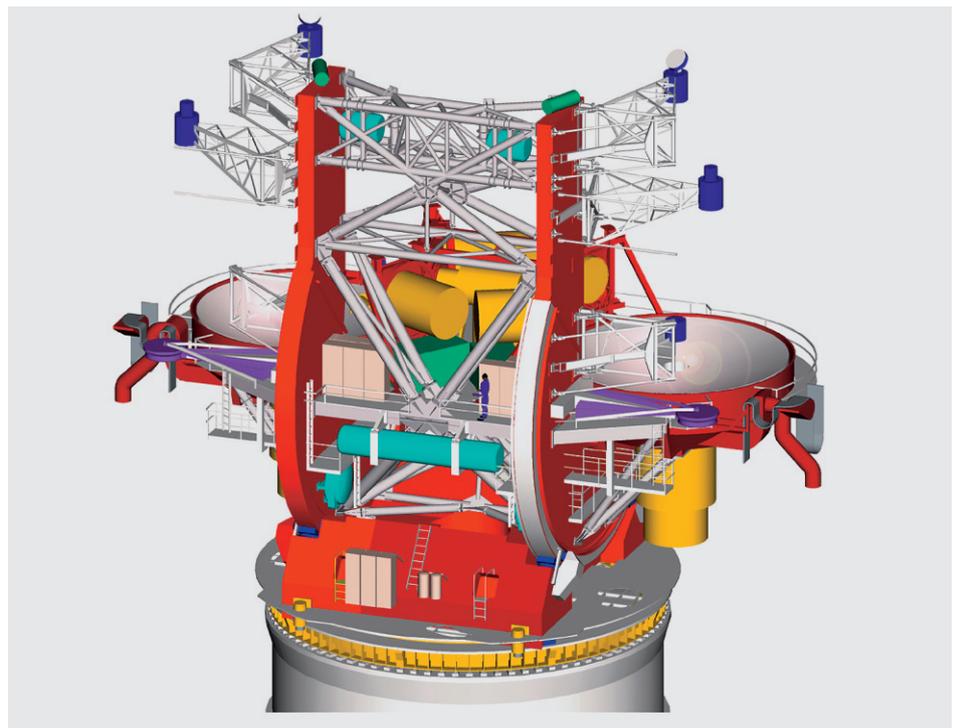


Abb. 5:  
Modell des Large Binocular Telescope.  
© [www.mpia.de/lbt](http://www.mpia.de/lbt).

Fig. 5:  
Model of the Large Binocular Telescope in  
Arizona.  
© [www.mpia.de/lbt](http://www.mpia.de/lbt).

---

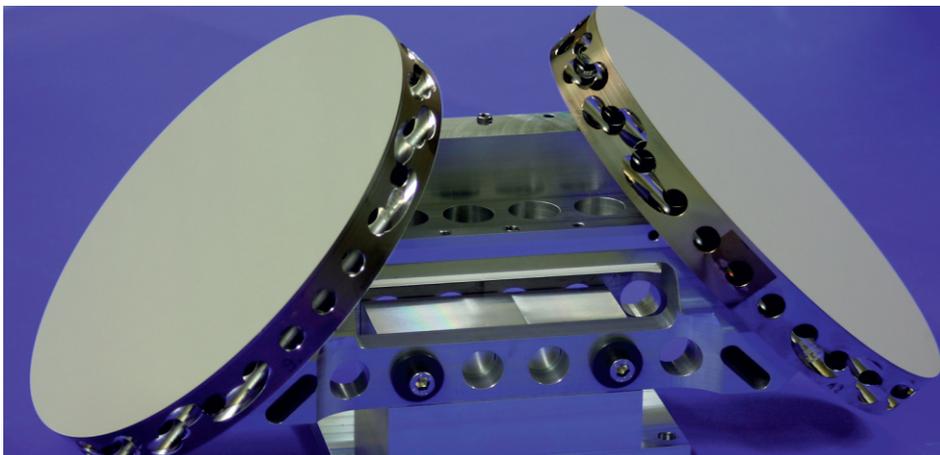
## Planspiegel für das Large Binocular Telescope (LBT, [www.mpia-hd.mpg.de](http://www.mpia-hd.mpg.de))

Das weltweit größte Teleskop, das Large Binocular Telescope, arbeitet mit zwei Spiegeln von 8,4 m Durchmesser, ähnlich eines riesigen Feldstechers (Abb. 5). Die beiden Spiegel realisieren die Lichtstärke eines 12-Meter-Teleskops und die Auflösung eines 23-Meter-Teleskops. Verantwortlich für diese Leistung ist auch der so genannte »PISTON-MIRROR«, eine Baugruppe aus zwei Spiegeln mit einer ovalen optischen Fläche von 200 mm x 140 mm (Abb. 6), welcher die beiden Strahlengänge im Instrument zusammenführt und die Phasenverschiebung der Strahlenbündel ausgleicht.

Die Baugruppe muss schnell und leicht beweglich sein und auch bei Temperaturschwankungen und Beschleunigungen die Form bewahren. Genutzt wurde deshalb eine spezielle Silizium-Aluminium-Legierung als Spiegelgrundkörper. Dieses Material hat eine Ausdehnungsanpassung an die Nickel-Phosphor-Dickschicht.

Abb. 6: Spiegelbaugruppe – Piston Mirror.

Fig. 6: Piston Mirror unit.



---

## Asphärische Spiegel für ein Erdbeobachtungs-Teleskop

Ein Satellitensystem mit fünf identischen Erdbeobachtungssystemen ist momentan in der Entwicklung. Die Basis ist ein Three-Mirror-Anastigmat-Teleskop (TMA) mit zwei asphärischen und einem sphärischen Spiegel. Das Optikdesign wurde von der Firma Jena-Optronik GmbH entwickelt (Abb. 7) und erreicht eine Pixel-Auflösung von 6,5 m x 6,5 m am Erdboden /4/. Möglich wird diese optische Performance durch ultrapräzise Metallspiegel aus Aluminium 6061 und einer Dickschicht aus einer amorphen Nickel-Phosphor-Legierung. In Zusammenarbeit mit der Carl Zeiss Jena GmbH wurden die diamantgedrehten Spiegel mit dem sich anschließenden Polierprozess geglättet und durch eine Ionenstrahlkorrektur in der Form-Qualität optimiert.

Die Montage und Justierung des TMA-Teleskops wurde unter interferometrischer Kontrolle der Wellenfront durchgeführt. In einer optimierten Position der Spiegel erfüllt das TMA-Teleskop mit einer Modulations-Transfer-Funktion (MTF) von 0,6 bei der Nyquist-

frequenz und besser im gesamten optischen Funktionsbereich die Voraussetzungen für brillante Bilder von der Erde. In Abbildung 8 ist ein Flugmodell eines TMA dargestellt.

---

## Zusammenfassung

Am Fraunhofer IOF Jena werden hochgenaue Metallspiegel mit komplexen Oberflächen vom Design bis zum Prototyp entwickelt. Die Aktivitäten umfassen auch die Integration der Spiegel in optische Systeme. Dabei können off-axis Asphären und optische Freiformflächen bis 450 mm x 300 mm realisiert werden. Anwendungen aus den Gebieten Luft- und Raumfahrt sowie Astronomie bilden den Schwerpunkt.

---

## Danksagung

Wir danken den Mitarbeitern der Jena-Optronik GmbH Klaus Michel, Jürgen Schöneich und Wolfgang Engel für die anregenden Diskussionen zu Fragen multispektraler Belichtungssysteme für Satelliten-Missionen sowie Volkmar Giggel, Peter Rucks und Jürgen Heise von der Carl Zeiss Jena GmbH für die fruchtbare Zusammenarbeit bei der Herstellung und Charakterisierung von Metallspiegeln.

### Literatur:

- /1/ v. Hulst, F.; et al; Diamantwerkzeuge für die Fertigung von mikrooptischen Bauelementen; IDR – Industrie Diamanten Rundschau 39 (2005) 1; S. 32-38, ISSN 0935-1469.
- /2/ Tiziani, H.J.; et al; Testing of aspheric surfaces; Proc. of SPIE, Vol. 4440, p.109-119.
- /3/ INFO PHYS TECH Nr.57/2004; Hochgenaue interferometrische Asphärenmessung; VDI Technologiezentrum.
- /4/ Kirschstein, S.; et al; Metal Mirror TMA – Telescopes of the JSS product line: Design and Analysis; Proc. of SPIE Vol. 59621M-1-10.

The assembly group must be easily movable and retain shape even during variations in temperature and acceleration. Therefore, a special aluminium-silicon alloy was used as mirror base. This material has an expansion coefficient close to the nickel phosphorus plate.

### Aspherical mirrors for an earth observation telescope

A satellite system with five identical earth observation systems is currently under development. Its basis is a Three-Mirror-Anastigmat telescope (TMA) with one spherical and two aspherical mirrors. The optic design was developed by Jena-Optronik GmbH (Fig. 7) and reaches a resolution of 6.5 m x 6.5 m at the ground /4/. This optical performance can be achieved by applying ultra precision metal mirrors from aluminium 6061 and a plating from amorphous nickel phosphorus alloy. In co-operation with Carl Zeiss Jena GmbH the single point diamond turned mirrors are smoothed with computer-assisted local spot polishing and improved in contour accuracy by ion beam polishing. The assembly and adjustment of the TMA telescope was accomplished under interferometric control of the wave front. In an optimised position of the mirrors the TMA telescope achieved a modulation transfer function (MTF) of 0.6 at the Nyquist Frequency and better all over the specified range. This forms a good basis for shooting brilliant pictures of the earth. A mounted TMA is shown in Fig.8.

### Summary

At the Fraunhofer IOF Jena ultra precise metal mirrors with complex surfaces from design to completion are being developed. Activities also cover the integration of the mirrors into optical systems. Off axis aspheres and optical free form surfaces up to 450 mm x 300 mm have been realized. Current activities are focused on aerospace and astronomy applications.

### Acknowledgements

We wish to thank the colleagues at Jena Optronik GmbH Klaus Michel, Jürgen Schöneich and Wolfgang Engel for inspiring discussions on questions of multi-spectral systems for satellite missions as well as Volkmar Giggel, Peter Rucks and Jürgen Heise of Carl Zeiss Jena GmbH for successful co-operation in the production and characterisation of metal mirrors.

#### References:

- /1/ v. Hulst, F.; et al; Diamantwerkzeuge für die Fertigung von mikrooptischen Bauelementen; IDR – Industrie Diamanten Rundschau 39 (2005) 1; S. 32-38, ISSN 0935-1469.
- /2/ Tiziani, H.J.; et al; Testing of aspheric surfaces; Proc. of SPIE, Vol. 4440, p.109-119.
- /3/ INFO PHYS TECH Nr.57/2004; Hochgenaue interferometrische Asphärenmessung; VDI Technologiezentrum.
- /4/ Kirschstein, S.; et al; Metal Mirror TMA – Telescopes of the JSS product line: Design and Analysis; Proc. of SPIE Vol. 59621M-1-10.

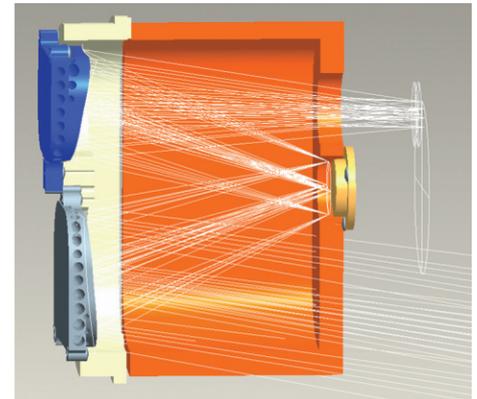


Abb. 7:  
TMA Optikdesign.  
© Jena-Optronik GmbH.

Fig. 7:  
TMA optic design.



Abb. 8:  
Flugmodell eines TMA.

Fig. 8:  
Flight model of TMA.