

Fertigung von Freiformflächen für das Darwin-Projekt mittels Ultra-Präzisions-Technologie (UPT)

Harald Ries^{1,2}, Rainer Jetter², Thomas Weigel³ und Kai Rickens⁴

¹Philipps-Universität Marburg,

²OEC AG München,

³Oerlikon Space AG Zürich,

⁴LFM Universität Bremen

<mailto:Rainer.Jetter@oec.net>

Wir berichten über eine Strahlformungsoptik bestehend aus zwei simultan maßgeschneiderten off-axis-Freiformflächen-Spiegeln, deren Aufgabe es ist, die Strahlung aus den Teleskopen der DARWIN-Flotte möglichst effizient in eine Monomode-Faser für Nulling-Interferometrie einzukoppeln. Messungen eines fertig gestellten Prototyps zeigen RMS Wellenfrontfehler von 90 nm.

1 Einführung

Im Rahmen der Raumfahrt-Mission DARWIN sollen einige physikalisch-chemische Voraussetzungen für Leben auf Planeten benachbarter Sonnen spektroskopisch untersucht werden. Dazu wird durch eine Monomode-Faser eine einzige Mode herausgefiltert, für die durch Nulling-Interferometrie die Strahlung des Zentralsterns ausgelöscht wird [1]. Trotz der synthetisch vergrößerten Apertur, wird dadurch auch die Strahlung des Planeten abgeschwächt, wenn auch nicht vollständig gelöscht. Daher ist es wichtig, eine möglichst hohe Kopplungseffizienz in die Faser zu erreichen, ohne die Wellenfront zu verändern.

Die Kopplungseffizienz berechnet man als Überlappungsintegral der einfallenden Feldstärke mit der Feldstärke der Fasermode. Würde man die Strahlung des Teleskops deren Feldstärke konstant ist (flat-top) direkt auf die Faser abbilden, dann würde die Kopplungseffizienz maximal 68% erreichen. Daher sollte durch eine geeignete Strahlformungsoptik (Beam Shaping Optics, im Folgenden BSO) die Feldverteilung der Teleskopstrahlung der Fasermode angepasst werden.

In früheren Arbeiten wurde gezeigt, dass eine einzige optische Fläche so maßgeschneidert werden kann, dass nahezu jede gewünschte Bestrahlungsstärkeverteilung erzielt wird [2]. In diesem Projekt musste aber gleichzeitig die Strahlrichtung, d.h. die Form der Wellenfront mit einer Toleranz weit unter einer Wellenlänge unverändert bleiben.

2 Simultanes Maßschneidern

Um beide Anforderungen zu erfüllen, nämlich die Feldverteilung an die Fasermode anzupassen und gleichzeitig eine sphärische Wellenfront zu erreichen, sind zwei optische Flächen nötig [3]. Diese wurden simultan maßgeschneidert, d.h. durch

Lösen eines gekoppelten Systems partieller Differentialgleichungen bestimmt.

Als Zielverteilung kann in der Praxis nur ein endlicher Teil der de facto unendlichen Fasermode zugrunde gelegt werden. In diesem Projekt wurde eine Kopplungseffizienz von 99% angestrebt. Abbildung 1 zeigt den als Zielverteilung verwendeten Teil der Fasermode, welcher 99% der Leistung umfasst. Die Bestrahlungsstärke am Rand liegt um fast 3 Größenordnungen unter dem Wert im Zentrum.

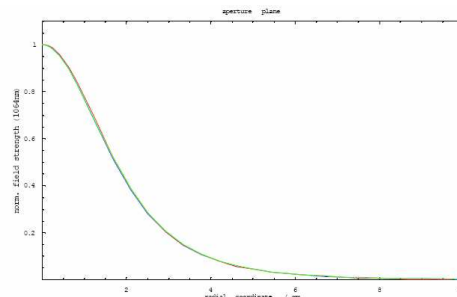


Abb. 1 Verteilung der Bestrahlungsstärke einer Monomodefaser, rückpropagiert auf die Eingangsapertur. Gezeigt ist der Teil der (de facto unendlichen) Verteilung, welcher 99% der Leistung einschließt. Sollverteilung (schwarz) sowie durch Simulation berechnete Verteilung im sagittalen (rot) und meridionalen Querschnitt (grün) sind praktisch identisch.

Je nach Wahl der Randbedingungen lassen sich entweder rotationssymmetrische on-axis-Systeme oder off-axis-Systeme, bestehend aus zwei Freiformflächen, berechnen.

3 Off-axis-System

Als Prototyp wurde ein off-axis-System gewählt, welches aus zwei Freiformspiegeln und einem Paraboloid besteht. Das System ist in Abb. 3 gezeigt. Durch Faltung in zwei Ebenen werden Polarisierungseffekte minimiert.

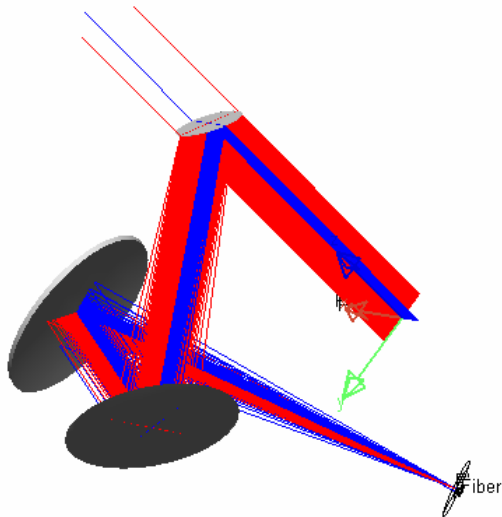


Abb. 2 Off-axis-BSO, dargestellt in LightTools™. Die beiden Freiformspiegel (oben und unten im Bild) erzeugen aus der ebenen flat-top-Wellenfront des Teleskops eine ebenfalls ebene Wellenfront mit einer der Faser-mode angepassten Apodisierung. Diese wird mit dem Paraboloid (links im Bild) auf die Faser fokussiert. Zwei Strahlenfächer in zueinander senkrechten Ebenen sind rot und blau dargestellt.

4 Kopplungseffizienz

Die zu erwartende Kopplungseffizienz des maßgeschneiderten BSO-Systems wurde mit CODE V™ berechnet. Dazu wurde eine wellenoptische Propagation verwendet. Die hohe Randkrümmung bereitete numerische Probleme, welche eine Begrenzung der Eingangspupille in der Strahlverfolgung nötig machten. Dadurch wurde eine etwas geringere Kopplungseffizienz als die angestrebte erreicht.

Abbildung 6 zeigt die erwartete Kopplungseffizienz, wie mit CODE V™ berechnet, in Abhängigkeit des Feldwinkels.

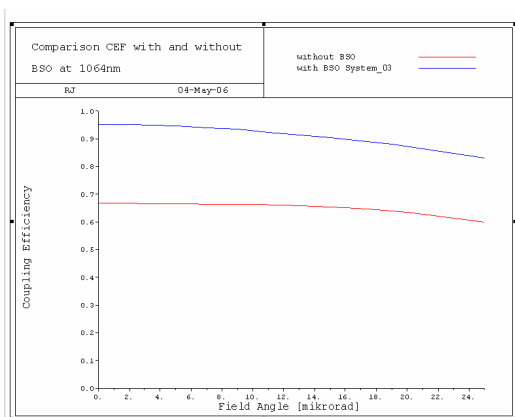


Abb. 3 Kopplungseffizienz mit BSO (blau) und ohne BSO (rot), berechnet mit Hilfe von CODE V™ in Abhängigkeit vom Feldwinkel.

5 Messergebnisse

Am LFM in Bremen wurde ein Prototyp der BSO hergestellt [4].

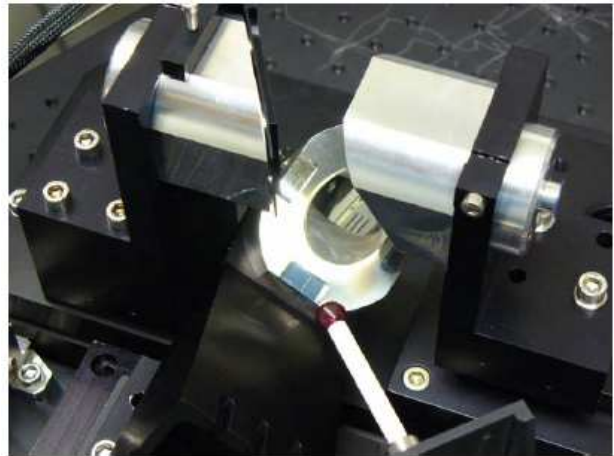


Abb. 4 Prototyp der BSO zur Vermessung der Wellenfrontfehler

Im Labor der Oerlikon Space AG in Zürich wurden erste interferometrische Messungen durchgeführt, wobei der Strahlengang umgekehrt wurde. Dabei wurde ein Wellenfrontfehler von unter 90 nm RMS nachgewiesen. Eine konstante Leistung (flat-top) über die Apertur wurde qualitativ festgestellt. Quantitative Messungen der Verteilung liegen noch nicht vor.

6 Zusammenfassung

Durch doppeltes Maßschneiden wurden simultan zwei Vorgaben erfüllt: Sowohl eine gewünschte Verteilung der Bestrahlungsstärke auf einer Fläche als auch die Richtung der Strahlung auf der Zielfläche. Es wurde eine sehr hohe Genauigkeit nicht nur im numerischen Design, sondern auch in der Herstellung erreicht und nachgewiesen. Damit wurde der Einsatz von Freiformflächen auch für ultrapräzise optische Anwendung demonstriert.

Literatur

1. ESA. <http://darwin.esa.int/>.
2. Ries, H. and J. Muschaweck, *Tailored freeform optical surfaces*. J. Opt. Soc. Am. A, 2002. **19**(3): p. 590-595.
3. Ries, H. *Laser beam shaping*. in *Proc. SPIE*. 2005. San Diego, CA.
4. O. Riemer, *Ultrapräzisionsbearbeitung*, 108 Jahrestagung der DGaO (2007) <http://www.dgao-proceedings.de>