

# Obstruktionsfreies Optikdesign basierend auf vier sphärischen Spiegeln

Silvio Pulwer\*, Daniel Jahns\*, Claus Villringer\*, Joachim Bauer\*, Sigurd Schrader\*

\*Technische Hochschule Wildau

[mailto: pulwer@th-wildau.de](mailto:pulwer@th-wildau.de)

Es wird ein Lösungsansatz für ein obstruktionsfreies Optikdesign, welches ausschließlich aus sphärischen Spiegeln besteht, beschrieben. Der Konfigurationsraum wird anhand von 15 Parametern definiert, welche Winkel, Spiegelabstände und Krümmungsradien beinhalten. Anhand eines abgeleiteten Beispielsystems, werden anwendungsspezifische Besonderheiten aufgezeigt und erste praktische Messungen vorgestellt.

## 1 Einführung

Ein obstruktionsfreies System kann durch coaxial, zentral obstruierende Systeme abgeleitet werden. Durch außeraxiales verschieben der Pupille können bereits grundlegende Aberrationen kontrolliert werden. Auf diesem Ansatz beruht eine Vielzahl verschiedener off-axis Kollimatoren/Teleskope. Viele dieser Auslegungen wurden vor 1990 für verschiedene Spezialanwendungen (Weltraumforschung, Lithografie, Militär) entwickelt. Der große Vorteil gegenüber linsenbasierten Systemen bestand darin, den bisherigen Spektralbereich in Richtung UV (Lithografie) und IR (Weltraumforschung/Militär) erweitern zu können. Die meisten Teleskop / Kollimatordesigns verwenden zumindest eine asphärische Komponente. Bei der Auslegung als Off-Axis System steigt der Aufwand für Fertigung und Justage stark an, da für die off-axis-Komponenten asphärische Vollflächen hergestellt werden müssen, welche nach Bearbeitung teilweise keine Rotations-symmetrie aufweisen. Zur Reduzierung der Kosten und des Justageaufwands wurde versucht, ein System abzuleiten, welches ausschließlich auf der Verwendung sphärischer Spiegel beruht.

## 2 Grundlagen

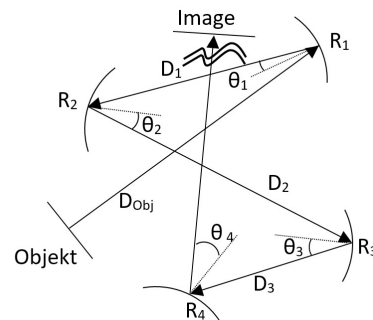
Historisch hergeleitet konnten basierend auf den Ergebnissen von Schwarzschild und Burch, welche zwei konzentrische sphärische Spiegel als Basis haben, Systeme entwickelt werden, welche gut für sphärische Aberration, Koma und Astigmatismus korrigiert waren. Weiterführend wurden als Lösungsansätze die Systeme von Shafer [1] und Howard & Stone [2] genutzt, welche sich bereits durch die ausschließliche Verwendung sphärischer Spiegel auszeichnen. Diese neue Gruppe der „All Spherical Mirror Imaging“ (ASMI) Systeme kann anhand von 15 Parametern wie in Abb. 1 dargestellt, grundlegend beschrieben werden [2].

Spiegelabstände:  $D_{Obj}$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_{Ima}$

Einfallswinkel des Hauptstrahls:  $\theta_{Obj}$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_4$ ,  $\theta_{Ima}$

Krümmungsradien:  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$

Die Parameter lassen sich im Falle einer Kollimatorauslegung reduzieren indem  $D_{Ima} = \infty$  und  $\theta_{Obj}$ ,  $\theta_{Ima} = 0^\circ$  angenommen werden.



**Abb. 1** Schematische Darstellung eines off-axis Kollimators, bestehend aus 4 sphärischen Spiegeln.

Die Mehrdimensionalität der vorhandenen Variablen im System umfasst optische und mechanische Parameter. Als Konsequenz ist eine mögliche Mehrfachfaltung des Strahlengangs analytisch berechenbar. Im Zusammenhang mit weiteren analytischen Betrachtungen, z.B. Multireflexionen auf mehreren Spiegeln, kann das Bauvolumen weiter reduziert werden. Für die Verwendung als Messinstrument und zur Gewährleistung einer hohen Kompatibilität ist es entscheidend, dass keine geneigte Bildebene vorliegt.

Die Vorgehensweise während des Optimierungsprozesses beinhaltet in Anlehnung zu Abb. 1 folgende Punkte:

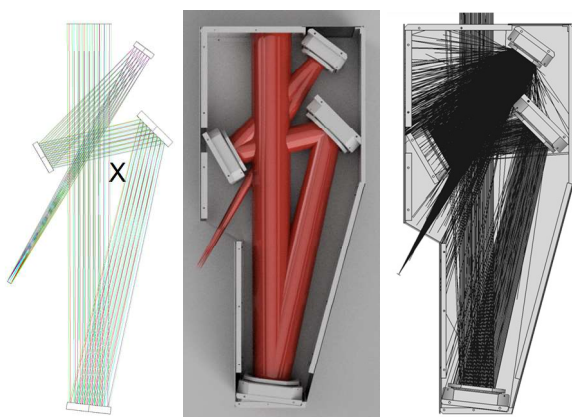
- Definition grundlegender Parameter ( $f$ ,  $N_{Obj}$ , Feldhöhe)
- Fixierung von  $\theta_1$
- Fixierung der Vorzeichen von  $D_{Obj}$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_{Ima}$
- Einschränkung von  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_4$  ( $-40^\circ$  bis  $+40^\circ$ )
- Einschränkung von  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  ( $-2 \times 10^4$  mm bis  $+2 \times 10^4$  mm)
- Schrittweise Einschränkung der Freiheitsgrade
- Fixierung: Hauptstrahl = Scheitelpunkt des Spiegels

Des Weiteren sind Planungsschritte für die Einplanung der Spiegelmontierung notwendig, welche die Annahme einer realen Spiegeldicke und einer „Verbotene Zone“ rund um den Spiegel einschließen. Zusätzlich muss die Einschränkung des effektiven Spiegeldurchmessers beachtet werden.

### 3 Ergebnisse

Für eine afokale Auslegung als Kollimator mit  $f = 1000$  mm und einer freien Apertur  $> 70$  mm werden 4 Spiegel (sphärisch) mit Aluminium Beschichtung zusammen mit 3 Punkt Spiegelhalterung (kardanisch) eingesetzt. Das System ist im gesamten Feld beugungsbegrenzt für  $\lambda = 633$  nm und Objektfeldhöhe = 12 mm,

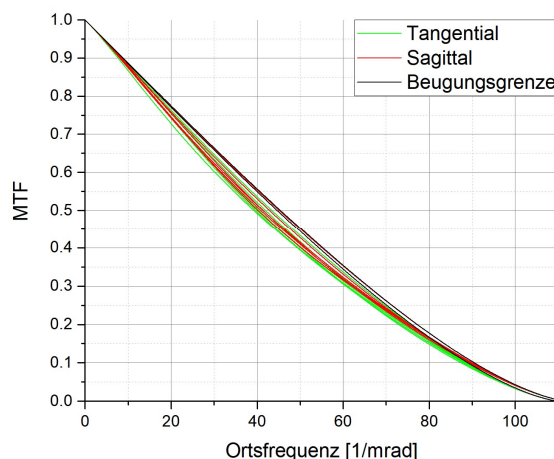
Das System in Abb. 2 dargestellte System wurde zunächst als sequentielles Optikdesign optimiert und anschließend zusammen mit kardanischen Halterungen ausgelegt. Hierbei wurde der Schwerpunkt des Systems in einem unbeleuchteten Punkt im Optikdesign so gewählt, dass dort Dreh/Schwenkvorrichtungen greifen können.



**Abb. 2** links: Optikdesign mit Markierung (X) des Systemschwerpunktes, mitte: Optomechanik Layout, rechts: Streulichtanalyse.

Die Spiegel wurden gemäß standardisierten Durchmessern als 2“, 3“, 4“ und 4“ Varianten ausgelegt und sind alle sphärisch mit Krümmungsradien im Bereich zwischen  $3 \times 10^3$  mm bis  $1,3 \times 10^4$  mm. In den Berechnungen haben Systeme mit einer bestimmten Reihenfolge von Spiegelkrümmungen (konkav, konkav, konvex, konkav) die besten Ergebnisse gemäß der Umsetzbarkeit geliefert. Die teilweise hohen Einfallswinkel von ca.  $30^\circ$  zur Spiegeloberflächennormale erfordern eine mechanische Fase am Rand der freien Apertur der kardanischen Halterungen. An dieser Stelle traten in der Streulichtanalyse Auffälligkeiten auf, welche durch Baffle Strukturen reduziert werden konnten.

Die Performance wurde anhand von Wellenfrontfehlern und der Analyse der Modulationstransferfunktion bestimmt (Abb. 3).



**Abb. 3** Berechnung (Simulation) der Modulationstransferfunktion für verschiedene Feldpositionen bei  $\lambda = 633$  nm.

Praktisch erfolgte die Wellenfrontmessung mit Hilfe eines scannenden Pentaprismas im Bildfeld des Kollimators und anschließender Auswertung der lokalen Wellenfrontabweichung. Der Wellenfrontfehler beträgt 230 nm (PV) bzw. 40 nm (RMS) und liegt somit im Bereich der Simulationsdaten.

### 4 Zusammenfassung

Für ein Obstruktionsfreies Optikdesign gibt es zahlreiche grundlegende Systeme, welche als Startsystem genutzt werden sollten. Als Besonderheit für lichtschwache Systeme (ab  $f/10$ ) sind Optikdesigns mit ausschließlich sphärischen Spiegeln ableitbar. Dies stellt eine kostengünstige Alternative zu bestehenden Systemen dar. Als Beispiel wurde ein off-axis Kollimator für VIS-IR Anwendung anhand der Optimierung von 15 grundlegenden Parametern abgeleitet und ein beugungsbegrenztetes Auflösungsvermögen erreicht.

Weiterführende Untersuchungen für die Miniaturisierung des Optikdesigns bestehend aus vier sphärischen Spiegeln zeigen, dass je Einsatzzweck, der Footprint des Optomechanik Layouts deutlich reduziert werden kann.

### Literatur

- [1] Shafer, D., „Four-mirror unobscured anastigmatic telescopes with all-spherical surfaces“, *APPLIED OPTICS* / Vol. 17, No. 7, 1978
- [2] Howard, J. und Stone, B., „Imaging with four spherical mirrors“, *APPLIED OPTICS* / Vol. 39, No. 19, 2000