

# Konzept für ein Dreispiegelobjektiv zur Fernerkundung

Eckhard Langenbach, Nicolas Thomas\*, Antoine Pommerol\*, Daniele Piazza\*, Matthias Blaukovitsch\*

\* *Space Research and Planetary Sciences, Physikalisches Institut, Universität Bern*

*mailto:eckhard.langenbach@sunrise.ch*

Für die früher an der Universität Bern entwickelte Kamera CaSSIS der ESA-Raumsonde ExoMars wird ein lichtstärkeres Nachfolgesystem mit breiterem Spektralbereich und deutlich größerem Gesichtsfeld konzipiert. Dafür werden verschiedene Dreispiegelsysteme untersucht und verglichen.

## 1 Einleitung

Die Arbeitsgruppe *Space Research and Planetary Sciences* an der Universität Bern hat für den Trace Gas Orbiter (TGO) des ExoMars-Programms der ESA das *Colour and Stereo Surface Imaging System* (CaSSIS) entwickelt und hergestellt (Abb. 1). Seit 2016 umkreist TGO den Mars, und CaSSIS liefert immer noch hochaufgelöste Bilder der Marsoberfläche.

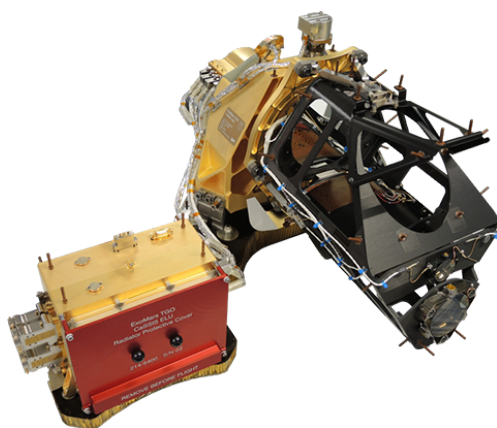


**Abb. 1** Colour and Stereo Surface Imaging System

Zu CaSSIS gehört eine Drehvorrichtung, mit der die Blickrichtung in und entgegen der Flugrichtung eingestellt werden kann. Abb. 2 zeigt, wie damit Stereobilder aufgenommen werden können.

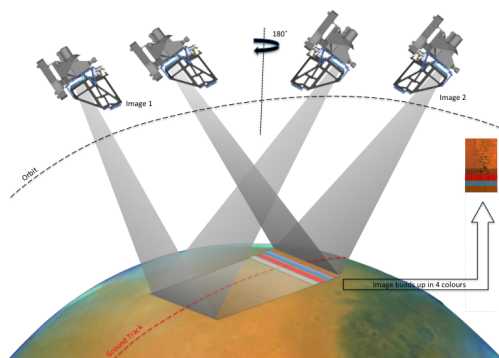


**Abb. 2** Rotation von CaSSIS für die Aufnahme von Stereobildern

Für eine mögliche Nachfolgemission mit dem Arbeitstitel CaSSIS 2.0 werden jetzt mögliche Systeme mit gesteigerter Abbildungsleistung untersucht.

## 2 Optische Systemdaten

Tabelle 1 vergleicht wichtige optische Parameter von CaSSIS und CaSSIS 2.0.

|                     | CaSSIS                         | CaSSIS 2.0                  |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Wellenlängenbereich | 400...1100 nm                  | 440...1900 nm               |
| Brennweite          | 880 mm                         | 940 mm                      |
| Blendenzahl         | 6.5                            | 4.7                         |
| numerische Apertur  | 0.077                          | 0.106                       |
| Objektfeld          | $1.35^\circ \times 0.85^\circ$ | $4^\circ \times 3^\circ$    |
| Diagonale           | $1.6^\circ$                    | $5^\circ$                   |
| Bildfeld            | $21 \times 13 \text{ mm}^2$    | $66 \times 49 \text{ mm}^2$ |
| Diagonale           | 25 mm                          | 82 mm                       |
| Pixelgröße          | $10 \times 10 \mu\text{m}^2$   | $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  |

**Tab. 1** Vergleich von CaSSIS und CaSSIS 2.0

Die effektive Brennweite beider Optiken ist ziemlich ähnlich, aber das neue System hat ein deutlich größeres Bildfeld, und der Wellenlängenbereich reicht weiter ins Infrarote. Mit den größeren Wellenlängen steigen die Beugungsunschärfen proportional an. Zumindest teilweise wird dies durch die kleinere Blendenzahl bzw. die erhöhte bildseitige numerische Apertur kompensiert. Die dadurch gesteigerte Auflösung kann von den kleineren Sensorexpeln genutzt werden.

## 3 Ansätze für Dreispiegelsysteme

Wegen des großen Arbeitswellenlängenbereichs hat man sich auf reine Spiegelsysteme beschränkt, die prinzipbedingt keine Farbfehler aufweisen. Bei entsprechenden Optiken mit Linsen wäre die Farbkorrektur sehr aufwendig. Auch die Größe der optischen Elemente lässt Spiegel bevorzugen, die vollflächig unterstützt werden können, was bei Raumfahrtanwendungen mit hohen Beschleunigungs- und Vibrationbelastungen vorteilhaft ist.

Bisher sind verschiedene Dreispiegelsysteme untersucht worden, wie sie z. B. in [1] beschrieben werden. Auch in [2] werden diese Optiken vorgestellt, und es gibt die zugehörigen Systemdateien in einer Bibliothek zum Optikrechenprogramm OpTaliX, das neben OSLO Premium für die hier vorgestellten Rechnungen verwendet worden ist. Die ausgewählten Startsysteme bestehen aus drei rotationsinvarianten Asphären, die eine gemeinsame Achse aufweisen und die außeraxial verwendet werden, um Mittenabschattungen zu vermeiden.

### 3.1 Dreispiegelsystem mit Zwischenbild

Beim ersten untersuchten System befindet sich die Blende recht weit vor dem Primärspiegel, und kurz vor dem Sekundärspiegel gibt es ein Zwischenbild (Abb. 3). Die Austrittspupille zwischen dem Tertiärspiegel und der Bildebene ist frei zugänglich, was bei der Störlichtunterdrückung helfen kann. Gegenüber dem Startsystem in [2] ist die numerische Apertur erhöht und das Bildfeld vergrößert worden. Durch eine Verkipfung des Sekundärspiegels wird die ursprünglich gemeinsame Achse der drei Spiegel eingegeben, um den Tertiärspiegel näher an den Primärspiegel zu verschieben. Damit können beide aus einem Stück gefertigt werden, was das Einhalten geringer relativer Positionstoleranzen erleichtert.

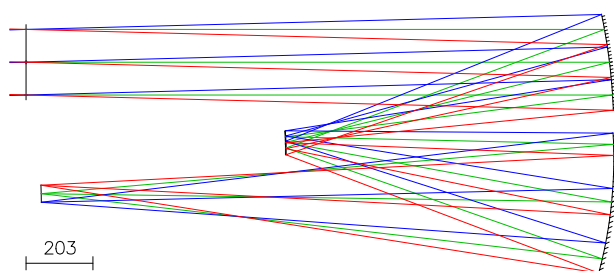


Abb. 3 Dreispiegelobjektiv mit Zwischenbild

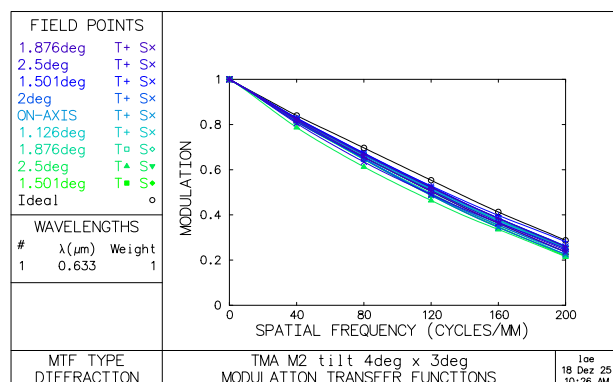


Abb. 4 MTF des Dreispiegelobjektivs mit Zwischenbild

Für die Bildfehlerkorrektur haben die Spiegelflächen jetzt bilateral symmetrische Freiformen. Damit erreicht man im gesamten Wellenlängenbereich und für das ganze Bildfeld eine beugungsbegrenzt gute

Abbildungsleistung. Die Kontrastübertragungsfunktion MTF für  $\lambda = 633 \text{ nm}$  in Abb. 4 liegt bei allen Feldpunkten nur knapp unter der MTF einer aberrationsfreien Optik.

### 3.2 Dreispiegelsystem ohne Zwischenbild

Abb. 5 zeigt ein entsprechendes Alternativsystem ohne Zwischenbild, bei dem die Blendenfläche mit dem Sekundärspiegel zusammenfällt. Die drei Spiegelflächen sind rotationsinvariante Asphären mit einer gemeinsamen Achse, die aber gegenüber der zur Gesichtsfeldmitte gehörenden Blickrichtung verkippt ist. Auch hier liegen der Primär- und der Tertiärspiegel so nah beieinander, dass sie auf einem gemeinsamen Substrat gefertigt werden können.

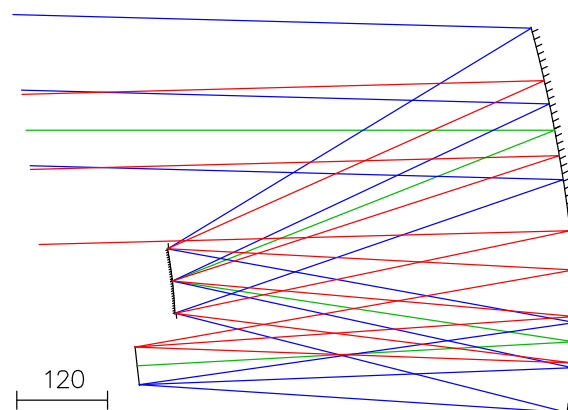


Abb. 5 Dreispiegelobjektiv ohne Zwischenbild

Die Optik ist deutlich kürzer als das System mit Zwischenbild, und es erreicht etwa die gleiche, beugungsbegrenzte Abbildungsleistung. Das Fehlen des Zwischenbilds und realer Ein- und Austrittspupillen erschwert aber die Störlichtunterdrückung.

## 4 Ausblick

Die gezeigten Dreispiegelsysteme zeigen schon sehr gute Abbildungsleistungen, aber die Entwicklung ist damit noch lange nicht abgeschlossen. Ein realisierbares System muss fertigmässige Toleranzen aufweisen, und es muss ausreichende Möglichkeiten zur wirksamen Störlichtunterdrückung bieten. Aktuell ist aber noch nicht klar, bei welcher Mission die Optik eingesetzt werden soll. Damit gibt es noch keine endgültigen Systemdaten, und auch das Sensorkonzept steht noch nicht fest. Erst wenn diese offenen Punkte geklärt sind, wird das System fertig entwickelt.

## Literatur

- [1] L. G. Cook, "Three Mirror Anastigmatic Optical System," (1981). US Patent 4,265,510.
- [2] H. Gross, ed., *Handbook of Optical Systems – Survey of Optical Instruments*, vol. 4 (WILEY-VCH, 2008).