

ZOOMOPTIK FÜR ANNÄHRUNGSSSENSOREN IM WELTALL

S. Kirschstein, F. M. Kolb,
Jena-Optronik GmbH
Prüssingstraße 41, 07745 Jena

Zusammenfassung

Ziel der Untersuchungen war die Analyse der Möglichkeiten und Risiken der optischen Zoomtechnik unter Weltraumbedingungen für robotische Anwendungen. Besonders attraktiv wird ein Zoomoptik basiertes Erkennungssystem dadurch, dass bei der Nutzung von zwei identischen Systemen ein stereoskopisches, räumliches Sehen ableitbar ist. Dies ermöglicht, bei genügender Maßhaltigkeit der Einzelsysteme eine Entfernungsbestimmung auch an targetfreien oder rotierenden Objekten.

Die allgemeinen Genauigkeitsanforderungen an ein Stereokamerasystem ausgehend von verschiedenen robotischen Anwendungen sind sehr hoch, insbesondere bezüglich der Messgenauigkeit (d.h. Auflösung) des Aufnahmemediums. Dabei dominiert der Fehler der Entfernungsmeßung gegenüber den Fehlern der Positionsbestimmung. Für viele Anwendungsbereiche ist der Fehler der Entfernungsmeßung auch praktisch relevant, z.B. für Entfernungsbestimmung eines Zielsatelliten bei Andockmanövern. Bei der Analyse des Fehlers der Entfernungsmeßung kommt ein „Pinhole“-Modell mit virtueller Bildebene zum Einsatz.

Optisch-mechanischen Designlösungen wurden aus verschiedenen kontinuierlich verstellbaren Zoomoptik Architekturansätzen, auch aus Sehfeldwechslern abgeleitet. Es wurden optische Lösungen von 10fachem Zoom, F# 4-10 für moderne APS Detektoren bis zu einer FOV von $\sim 80^\circ$ (2σ) entwickelt. Ein erster Entwurf eines Sehfeldwechslers mit afokaler Voroptik und rotierenden Prisma zeigt, dass ausgehend von der Sternsensorarchitektur bei der Jena-Optronik GmbH vergleichbare kompakte moderne Zoomsensoren für die Rendezvous und Docking (RvD) - Anwendung machbar sind, wobei die Sehfeldwechsler eine Robustheit ermöglichen, die mit Fixfokusoptiken vergleichbar sind. Klassische Zoomlösungen mit einer größeren Flexibilität können mit größerem Volumen (Masse) realisiert werden, wenn dafür geeignet stabile und weltraumgeprüfte Linearführungen entwickelt werden.

1. EINLEITUNG

Bisher wurden im Weltraum nur vereinzelt Zoom Objektive angewandt [1]. Gegenwärtig werden für die Annäherung zwischen zwei Satelliten verschiedene Kamerasyteme konzipiert. Von einem Satelliten aus messend, soll hier die Annäherung von 2km bis 1m in Echtzeit mittels einer Far und Mid Range Kamera verfolgt werden und im Nahbereich bis $\sim 60\text{cm}$ arbeitet noch ein zusätzlicher Kamerakopf als Dockingkamera. Damit ergibt sich ein Bedarf an mindestens 3 optischen Systemen. Vorteil dieser Lösung ist, daß die einzelnen Kameraköpfe für ihre Bereiche optimiert sind, sehr genau kalibriert werden können und eine hohe Meßgenauigkeit (Abstand, Dimensionen etc.) bei hoher Zuverlässigkeit besitzen.

Diese Grundaufteilung wird für eine Stereoentfernungsmeßung und zur Vergrößerung der Redundanz mehrfach ausgeführt, was die Anzahl der optischen Sensoren und den nötigen Aufwand an verarbeitender Rechenkapazität stark erhöht. Damit liegt das Einsparpotential vor allem im Bereich der Sensorenanzahl und der dazugehörigen Frontendelektronik und partiell im Bauraum. Besonders attraktiv wird ein Zoomoptik basiertes System dadurch, daß bei der Nutzung von nur zwei identischen Systemen ein stereoskopisches, räumliches Sehen ableitbar ist. Dies ermöglicht bei genügender Maßhaltigkeit der Einzelsysteme eine Entfernungsbestimmung auch an targetfreien oder schneller rotierenden Objekten. Als

Beispiel seien hier nur nicht-kooperative Satelliten, Landeflächen oder Weltraummüll genannt.

Als Anwendungsfälle für Zoom-Objektive sind mehrere unterschiedliche Missionsszenarien denkbar:

- Rendezvous und Docking (RvD)
- Lander
- Rover

Je nach Anwendungsfall unterscheiden sich die Anforderungen an die Zoom-Objektive in Bezug auf mechanische und thermische Belastung, Strahlung, sowie in Bezug auf die optischen Eigenschaften wie Zoomfaktor, Maßhaltigkeit etc. Voraussetzung für eine Nutzung der Zoom Technik unter Weltraumbedingungen sind damit

- hohe Maßhaltigkeit für einzelne Zoomschritte wie Abbildungsmaßstab (Brennweite, Verzeichnung) und stabile Line-of-Sight (LOS)
- Hohe Bildqualität (evtl. Nachfokussierung)
- Weltraumgeprüfte Antriebe und Stellelemente

Ziel der weiteren Untersuchungen ist die Analyse der Genauigkeitsanforderungen an die Zoomoptik als Stereokamerasystem für die oben genannten robotischen Anwendungen unter Weltraumbedingungen.

2. MISSIONS- UND EMPFINDLICHKEITSANALYSE

2.1. Modelle

Die allgemeinen Genauigkeitsanforderungen an ein Stereokamerasystem für robotische Anwendungen sind sehr hoch, insbesondere bezüglich der Messgenauigkeit (d.h. Auflösung) des Aufnahmemediums [2, 3, 4]. Dabei dominiert der Fehler der Entfernungsmessung gegenüber den Fehlern der Positionsbestimmung [4, 5]. Für viele Anwendungsbereiche ist der Fehler der Entfernungsmessung auch praktisch relevant, z.B. für Entfernungsberechnung eines Zielsatelliten bei Andockmanövern, der Abstand zur Oberfläche bei planetaren Landungen oder der Weg bis zu einer interessanten Felsformation bei Rovereinsätzen.

Die Analyse der Genauigkeitsanforderungen an ein Stereokamerasystem kann anhand des Fehlers der Entfernungsmessung dargestellt werden. Zur Verwendung kommt dabei ein Pinhole Camera Model mit virtueller Bildebene nach [6].

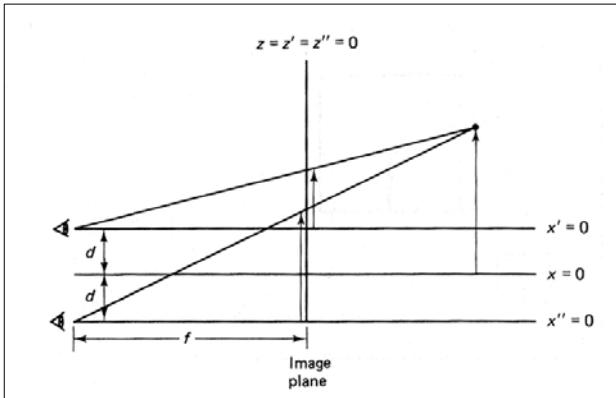


BILD 1. Stereokamerasystem (pin hole model) nach [6]

Hierbei stellt z den zu bestimmenden Abstand des Objekts von der Bildebene dar (positive z nach rechts), f die Kamerakonstante (äquivalent zur Brennweite bei Objektabstand $>> f$), die Differenz $x'' - x'$ die sogenannte Disparität, sowie $2d$ die Stereobasis. Die virtuelle Bildebene liegt im Abstand f . Für die Entfernung z des Objekts ergibt sich dabei:

$$(1) \quad z = \frac{f \cdot b}{x'' - x'} - f$$

Die Standardabweichung für den Abstandsfehler beträgt:

$$(2) \quad \sigma_z^2 = \left(\frac{\partial z}{\partial b} \sigma_b \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial f} \sigma_f \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial x'} \sigma_{x'} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial x''} \sigma_{x''} \right)^2$$

Die Standardabweichungen lassen sich auf einen Fehler der Brennweite f und des Winkels (Line-of-sight) zurückführen, z.B. verursacht durch Abweichungen der optischen Achse, so wie einen Messfehler bei der Bildaufnahme. Die gesamte Standardabweichung für die Abstandsmessung beträgt damit:

$$(3) \quad \sigma_z^2 = \left(\frac{z + f}{f} - 1 \right)^2 \sigma_f^2 + \left(\frac{(z + f)^2}{2f^2} \right) \sigma_f^2 + \left(\frac{z + f}{b} \right)^2 \sigma_b^2 + 2 \cdot \left(\frac{b}{4} + \frac{(z + f)^2}{b} \right)^2 \sigma_a^2 + 2 \cdot \left(\frac{(z + f)^2}{fb} \right)^2 \sigma_{x,mess}^2$$

2.2. Entfernungsfehler in Abhängigkeit von Brennweiten- und Winkelfehler

In der folgenden Abbildung ist diese Formel visualisiert mit den Daten für die Panoramic Camera („Pancam“) des Mars Exploration Rovers MER

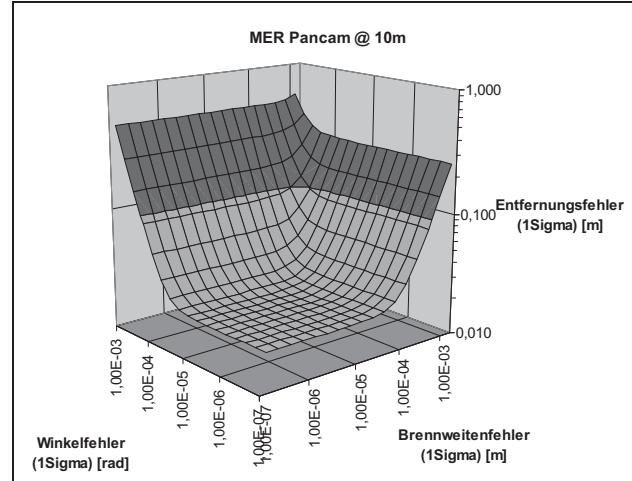


BILD 2. Entfernungsfehler in Abhängigkeit von Brennweiten- und Winkelfehler für Mars Exploration Rover Panoramic Camera

Der Restfehler bei verschwindendem Winkel- und Brennweitenfehler ist durch den Messfehler dominiert, in Übereinstimmung mit z.B. [3]. Dieser Fehler lässt sich z.B. durch eine höhere Auflösung des Bildaufnahmemediums (z.B. CCD-Chip) oder eine Subpixelinterpolation verringern (vgl. [5]). Nach [3] ist eine Subpixel-Auflösung notwendig, um eine für robotische Anwendungen ausreichende Genauigkeit zu erreichen.

2.3. Entfernungsfehler in Abhängigkeit der Stereobasis

Für die MER Pancam bei einer Entfernung von 10 m ist für einen Wert des Brennweitenfehler von 3.16×10^{-5} m und einen Winkelfehler von 1.78×10^{-5} rad der Fehler der Entfernungsmessung in Abhängigkeit der Stereobasis in BILD 3 dargestellt. Der Brennweiten- und Winkelfehler entspricht jeweils dem maximalen Wert, der gerade noch die Spezifikationen für die MER Pancam erfüllt. Wie intuitiv zu erwarten, sinkt der Fehler der Entfernungsmessung mit zunehmender Stereobasis (vgl. auch [3]). Um bei größeren Entfernungen eine hohe Genauigkeit zu erzielen ist somit eine große Stereobasis hilfreich. Die Abhängigkeit des Fehlers der Entfernungsmessung vom Fehler der Stereobasis selbst ist wiederum in BILD 4 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Fehler der Entfernungsmessung bis zu Stereobasis-Fehlern von ca. 1×10^{-4} m relativ konstant bleibt, um erst dann deutlich anzuwachsen.

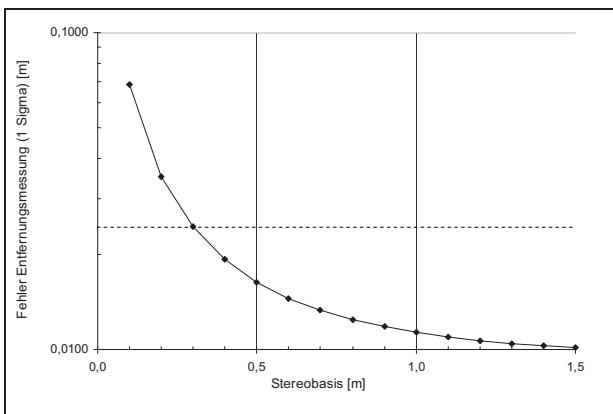


BILD 3. Entfernungsfehler in Abhängigkeit von der Stereobasis für Kameraparameter der MER Pancam bei $z=10\text{m}$, die gestrichelte Linie stellt die MER Pancam-Spezifikation für eine Stereobasis von 0.3m dar.

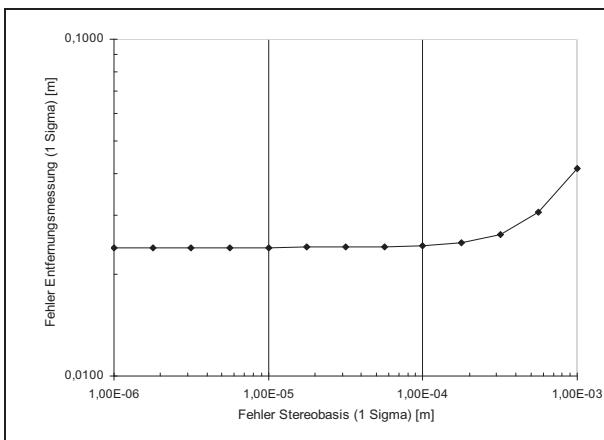


BILD 4. Entfernungsfehler in Abhängigkeit des Fehlers der Stereobasis für Kameraparameter der MER Pancam bei $z=10\text{m}$

2.4. Anforderungen ausgehend von Rendezvous- und Dockingmissionen

2.4.1. Orbit und Missionssdauer

Eine typische RvD-Mission findet in LEO oder GEO-Orbits statt. Die Dauer einer solchen Mission hängt von ihrer genauen Zielstellung ab. Ein Versorgungsflug zur Internationalen Raumstation liegt dabei im Bereich von höchstens 1 Jahr, während man bei Servicing-Missionen im GEO-Orbit von Zeitdauern von ca. 10 Jahren ausgehen kann.

2.4.2. Field-of-View (FOV) und Brennweite

Der FOV für jede Kamera lässt sich anhand von Gleichung (3) bestimmen, wenn Entfernung, Stereobasis und der gewünschte Bereich des Stereosehens bekannt sind. Für eine RvD-Mission lässt sich von folgenden allgemeinen Eckwerten ausgehen, so dass ein Client-Satellit im entsprechenden Entfernungsbereich erfasst und die Entfernung vermessen werden kann.

Entfernung	Breite des Stereosehbereichs	Stereobasis	FOV	Brennweite
1000 m	100 m	1,5 m	~ 6°	ca. 145 mm
100 m	30 m	1,0 m	~18°	ca. 50 mm
10 m	10 m	0,5 m	~ 55°	ca. 15 mm
1 m	2 m	0,2 m	~ 95°	ca. 7 mm

TAB 1. Allgemeine Anforderungen für ein Stereo-Zoom System für RvD

Die Brennweite ist hierbei mit der Standard-Abbildungsgleichung unter Verwendung eines Star1000-CMOS-Sensors berechnet. Für einen genauen Vergleich müssen die jeweiligen Missionsspezifikationen herangezogen werden.

Die hohen Genauigkeitsanforderungen von RvD-Missionen werden bei Kamerasyystemen mit fester Brennweite unter anderem dadurch erfüllt, dass die Kamerasyteme für jeden Entfernungsmessbereich eine angepasste Stereobasis besitzen, was mit einem Zoomkamerasytem nicht für alle Brennweiten gleichermaßen ideal realisiert werden kann.

2.4.3. Genauigkeit der Entfernungsmessung

Die Anforderungen an die Messgenauigkeit sind bei RvD-Missionen recht hoch. Die Kamerasyteme sollen in der Lage sein eine Entfernungsmessung eines Satelliten durch Stereotriangulation (im Falle eines Stereokamerasytems) durchzuführen bzw. im Nahbereich die Entfernung durch Vermessen eines Targets zu bestimmen. Die erforderliche Genauigkeit einer Entfernungsmessung liegt dabei im Bereich von ca. 1%, d.h. bei einer Entfernung von 100 m soll die Entfernungsmessung mit einer Genauigkeit von 1 m durchgeführt werden.

Mit den obigen Werten und folgenden Kameraparametern ergeben sich die Entfernungsmessfehler (siehe TAB 2 und TAB 3):

- Stereobasis $b = 0.5 \text{ m}$
- Fehler der Stereobasis $\sigma_b = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m}$
- Mess-/Quantisierungsfehler $\sigma_{x,\text{mess}} = 3.75 \times 10^{-6} \text{ m} (= \frac{1}{2} \text{ Pixel für Disparität})$

Für sehr große Distanzen erhält man einen Entfernungsmessfehler, der deutlich über 1% liegt. Dies entspricht einen Brennweitenfehler von $5.62 \times 10^{-4} \text{ m}$ sowie einen Winkelfehler von $1.78 \times 10^{-4} \text{ rad}$. Bei der Stereobasis von 1.5 m würde jedoch ein Objektiv für den Nahbereich mit 7 mm Brennweite und 95° FOV einen Stereosehbereich von 2 m nur bis zu einem Abstand von 1.6 m erlauben. Daher wird man eine Kombination von mindestens 3 Zoomobjektiven mit einem kurzen und einer langen Stereobasis benötigen, um die Entfernungsmessung von Fernbereich bis zum Dockingbereich zu ermöglichen.

Entfernung	Messfehler Entfernung	Maximaler Brennweitenfehler	Maximaler Winkelfehler
1000 m	73 m	-	-
100 m	2.1 m	-	-
10 m	0.098 m	5.62×10^{-5} m	1.78×10^{-4} rad
1 m	0.007 m	3.16×10^{-5} m	1.0×10^{-3} rad

TAB 2. Maximale Fehler bei einer Stereobasis von 0.5 m

Bei größerer Stereobasis $b = 1,5$ m erhält man einen geringeren Entfernungsmessfehler für große Distanzen:

Entfernung	Messfehler Entfernung	Maximaler Brennweitenfehler	Maximaler Winkelfehler
1000 m	24 m	-	-
100 m	1 m	1.78×10^{-4} m	5.62×10^{-5} rad
10 m	0.074 m	5.62×10^{-5} m	5.62×10^{-4} rad
1 m	0.01 m	5.62×10^{-5} m	5.62×10^{-4} rad

TAB 3. Maximale Fehler bei einer Stereobasis von 1.5 m

2.4.4. Stellzeit

Die Stellzeit ist bei RvD-Missionen eher von nachrangiger Bedeutung, da eine Umschaltung zwischen den verschiedenen Entfernungsbereichen (d.h. der Brennweite) an den Hold Points erfolgen kann.

2.4.5. Gewicht, Leistungsaufnahme, Temperatur

Das Gewichtsbudget dreier Stereokamerasysteme beträgt in Summe etwa 3.5 kg und muss durch ein Stereokamerasystem mit veränderlicher Brennweite ebenfalls erreicht werden. Dies gilt auch für die Leistungsaufnahme, für die in Summe ein Budget von etwa 8-15 W zur Verfügung steht. Der Temperaturbereich, in dem die Kamerasyteme zum Einsatz kommen beträgt

- für die Betriebstemperatur ca. -40°C bis +50°C
- ansonsten ca. -55°C bis +85°C

2.4.6. Ionisierende Strahlung

Die Anforderungen bezüglich ionisierender Strahlung sind abhängig vom Typ der Mission, z.B. einer Kurzzeitmission im LEO oder eine Langzeitmission im geostationären Orbit. Sie bewegen sich bei Kurzzeitmissionen im Bereich von wenigen kRad, so dass für Kurzzeitmissionen „rad hard“ Gläser nicht zwingend erforderliche sind.

3. OPTIK DESIGN DER ZOOM OBJEKTIVE

3.1. Grundsätzliche Architektur

Aus dem bisher Genannten ergibt sich eine Vielzahl von Architekturmöglichkeiten für die Zoomoptik. Sowohl der Brennweitenbereich als auch die Anzahl von Messpositionen müssen zugunsten einer robusten mechanischen Lösung mit hoher optischer Güte klein gehalten werden. Durch die Weltraumbedingungen ergeben sich weitere Randbedingungen, wie die Minimierung beweglicher mechanische/elektrischer Antriebe (Steller). Folgende idealtypische Lösung wurde angestrebt bei der Realisierung der Zoomobjektive.

- Nur ein bis zwei Steller
- Steller sind unempfindlich gegenüber Line-of-Sight Verkippung
- Kompakte nach außen abgeschlossene Lösung
- Kalibrierbare Zoomzustände (mindestens 3)
- F# klein
- Kleine Verzeichnung
- Telezentrische Abbildung

Der Brennweitenbereich wurde eingeschränkt und in zwei Varianten zerlegt, die jeweils einen Zoomfaktor von 10 umfassen. Beide beziehen sich im Field of View (FOV) auf die Verwendung eines Star1000 CMOS-Sensors mit 1024×1024 Pixeln (Pixel:13µm \times 13µm) berechnet.

Variante	Kleinste Brennweite	Mittlere Brennweite	Maximale Brennweite
V1	20 mm	50-60 mm	200mm
V2	10 mm	25	100mm
	F#	F#	F#
V1 & V2	4	4	8

TAB 4. Varianten des Zoombereiches mit dazugehöriger Öffnungszahl (F#)

Grundsätzlich wurden zwei Ansätze verfolgt:

- 1) dem eines **klassischen Zooms** mit im Prinzip kontinuierlichen Durchstellbereichs der Brennweite und des Öffnungsverhältnisses
- 2) dem des **Sehfeldwechslers**, bei dem durch Ein- oder Ausschwenken von ganzen optischen Gruppen (Linsenpakten in der Regel) diskrete Brennweiten eingestellt werden.

3.2. Optikkonzepte für die Architektur klassisches Zoom

Im kommerziellen Bereich der Zoomoptiken wird in klassischer Weise die Führung und Antrieb optischer Baugruppen durch Tubus mit Kurvennuten realisiert (siehe BILD 5). Diese wurde für die Anwendung im Weltraum als wenig geeignet bewertet. Zum einen gibt es den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Antriebsbewegung und Stellbewegung, was die genaue Stellbewegung erschwert und zum anderen genügt die erreichbare Genauigkeit der Gleitbewegung zwischen Lagerpartnern

der Führung nicht für messtechnische Anforderungen. Hinzu kommt ein typisches Umkehrspiel bei Änderung der Drehrichtung

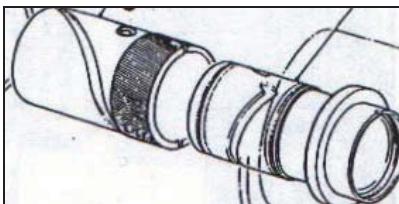


BILD 5. Klassischer Führung und Antrieb optischer Baugruppen durch Tubus mit Kurvennuten für Zoomoptiken

Für die Varianten V1 und V2 (TAB 4) wurden optische Designs entworfen (siehe BILD 6), bei denen die Gesamtlänge sich in Abhängigkeit der Brennweite ändert, die dann typischer Weise über einen herausfahrenden Tubus realisiert werden. Die Anzahl der optischen Gruppen auf kann so auf ein Minimum von 2 Gruppen für V1 reduziert werden. Auf Grund des höheren Korrekturaufwandes bei V2 müssen 3 Linsengruppen verwendet werden.

Obwohl man bei dieser Architektur die Gruppen und damit die Anzahl der Steller niedrig hält, bleibt dieser Ansatz ungünstig, da hier die Stellwege bis zu 150mm für V1 sind. Solche langen Stellwege führen zu Risiken und klassische Konzepte wie die oben beschriebene Führung durch Tubus mit Kurvennuten können nicht verwendet werden. Weiter ungünstige Punkte für die Realisierung mit veränderlicher Gesamtlänge sind die mitbewegte Aperturblende inklusive Mechanismus und elektrischen Antrieb, der nichttelezentrische Strahlengang und die schwierigere thermale Kontrolle.

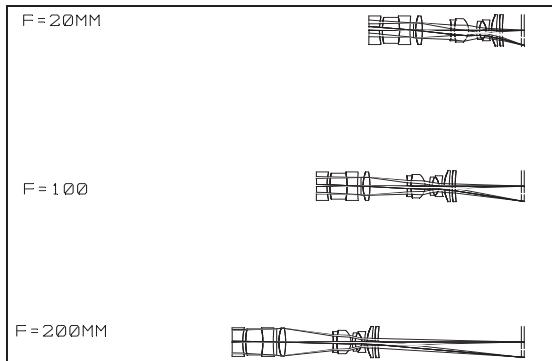


BILD 6. Optisches Design V1 (TAB 4) mit veränderbarer Gesamtlänge

Ein besserer Ansatz besteht in der Zoomarchitektur mit fixer Gesamtlänge, BILD 7. Ein vergleichbarer Ansatz wurde auch in [1] realisiert. Bei dieser Architektur können 3 optische Gruppen genutzt werden, wobei die erste Gruppe das Objektiv nach vorn abschließt. Die Apertureblende mit z.B. Irismechanismus kann ebenfalls fix im Zentrum als rein mechanisches Element vereinbart werden. Damit müssen nur 2 optische Baugruppen (Linsengruppen) über kurze Stellwege von 30 bis 50mm im inneren bewegt werden. Hier können Linearantriebe und -führungen mit einer hohen Reproduzierbarkeit und Robustheit zum Einsatz kommen. Nachteil dieser Architektur ist, dass die Gesamtlänge -hier 330mm- relativ groß ist und damit ist auch die Masse einer solchen Optik

deutlich über der einer einzelnen Fixfokusoptik liegt, aber in etwa das Zieltarget von 3.5kg erreicht. Die Bildqualität der gefundenen Optikdesignlösung ist sehr gut (siehe BILD 8), auch bei 10mm Brennweite (V2). Die Verzeichnung kann auf unter 2 % korrigiert werden, so dass trotz 10mm Brennweite und ein FOV von ca. 80° kein Fisheye Effekt auftritt. Der Strahlengang ist bildseitig bei einer Winkelvergrößerung von kleiner 0.1 nahezu telezentrisch.

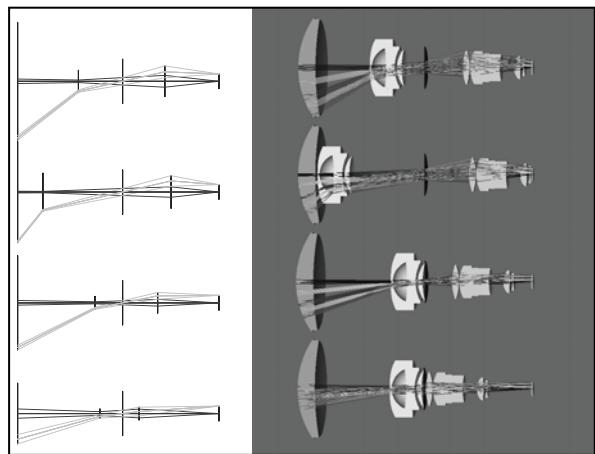


BILD 7. Optisches Design V2 (TAB 4) mit fixer Gesamtlänge

Auch um die LOS Stabilität und die Wiederholbarkeit der Brennweiteinstellung zu garantieren, ist das Optikkonzept Zoomarchitektur mit fixer Gesamtlänge gut geeignet, wenn man die Bewegung der inneren Optikgruppen im Bereich 3-5 µm z-Positionierung und Kippfehler kleiner 2-5 arcsec realisiert. Diese Stellelemente sind daher die kritischen Komponenten und werden zukünftig gesondert untersucht und mit weltraumgeeigneten Konzepten umgesetzt.

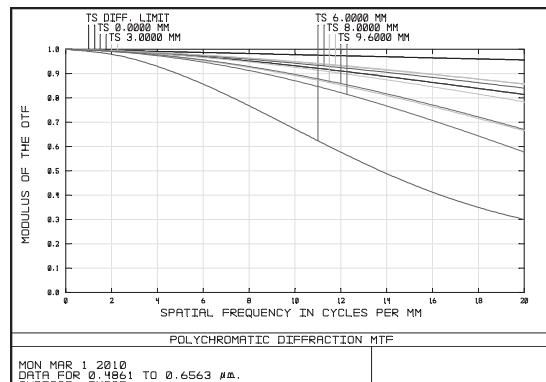


BILD 8. Polychromatische MTF für das Optische Design V2 (TAB 4) mit fixer Gesamtlänge

3.3. Optikkonzepte für die Architektur Sehfeldwechsler

Der zweite Architekturansatz ist der des **Sehfeldwechslers**, bei dem durch Ein- oder Ausschwenken von ganzen optischen Gruppen (in der Regel Linsenpaketen) diskrete Brennweiten eingestellt werden.

Für den RvD Einsatzfall sind im Grund diskrete Brennweiten ausreichend. Eine einfache Konfiguration besteht darin, ein auf unendlich abgestimmtes

Grundobjektiv mittlerer Brennweite (hier $f \sim 63\text{mm}$) durch afokale Voroptiken zu ergänzen (siehe BILD 9). Die afokale Voroptik kann man sowohl winkelvergrößernd, d.h. die Brennweite wird kleiner, oder winkelverkleinernd um 180° gedreht verwenden, wobei im letzteren Fall die Brennweite wächst. Dieses Konzept funktioniert vignettierungsfrei, wenn die Eintrittspupille des Grundobjektives objektseitig vor diesem liegt. Die Winkelvergrößerung wurde so gewählt, dass sowohl für das Nahfeld eine Brennweite von 20mm und im Fernfeld von 200mm sich ergibt und entspricht damit annähernd V1 (TAB 4).

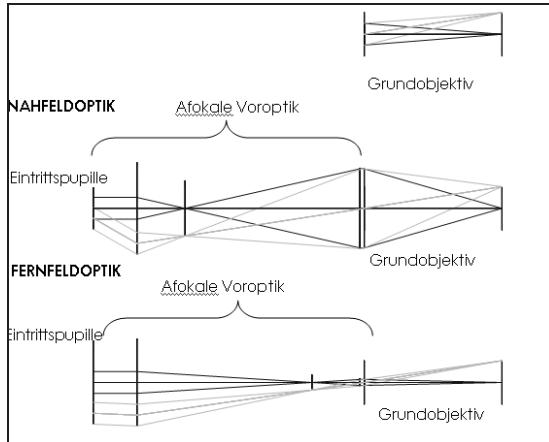


BILD 9. Optisches paraxiales Konzept eines Sehfeldwechslers mit afokaler Voroptik

Analysiert man die nötige Stabilität bezogen auf die im Abschnitt 2 aufgeführten maximalen Winkelfehler, so muss das Einschwenken der Voroptik mit einer Wiederholbarkeit kleiner $50\mu\text{m}$ Dezentrierung und einer Verkippung der optischen Achsen zueinander kleiner 0.00025° . Auch die Sehfeldwechslerarchitektur muss sich an der Robustheit eines Fixfokussystems messen. Das Ein- und Ausschwenken einer solchen afokalen Voroptik würde extrem aufwendig, vor allem der Kippfehler ist sehr sensitiv. Eine unempfindliche Lösung besteht darin, die Objektive zu fixieren und mittels Prisma, das Teil des Grundobjektives ist und an deren äußerer Stirnseite die Eintrittspupille des Grundobjektives liegt, zwischen den 3 Zuständen durch einfaches Drehen zu vermitteln. (BILD 10, 11)

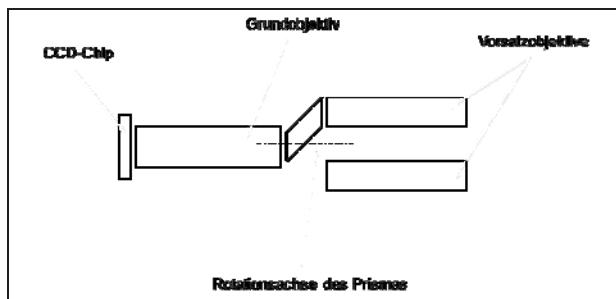


BILD 10. Sehfeldwechsler mit afokaler Voroptik mit rotierenden Prismen

Die Strahlumlenkung mittels Prisma ist invariant gegenüber jeglichen Verkippungen oder Rotationsfehlern des Prismas und damit entfällt der Fehlereinfluss beim Wechsel zwischen den 3 Brennweiten (Grundobjektiv, Afokale Voroptik für Nahfeld, Afokale Optik für Fernfeld –

siehe BILD 9). Die Rotation des Prismas kann mit verfügbaren Komponenten robust umgesetzt werden. Für das Konzept des Sehfeldwechslers mit afokaler Voroptik und rotierenden Prismen wurde sowohl für V1 als auch V2 im Optikdesign umgesetzt (siehe BILD 11). Da das Grundobjektiv exakt telezentrisch aufgebaut wurde, ist die Abbildung für alle 3 Brennweiten telezentrisch. Die hohe Anforderung an die Pupillenlage als auch optischer Qualität erfordert den Einsatz von Asphären in der afokalen Voroptik, trotzdem bleibt für kurze Brennweiten eine deutliche optische Verzeichnung von ca. 10%. Für die Sehfeldwechsler ist dies aber unkritisch, da jede Brennweitenstellung wie die eines Fixfokussensors (z.B. Sternsensoren) kalibriert werden kann.

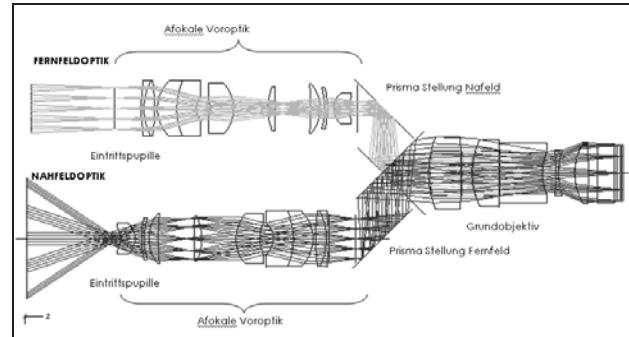


BILD 11. Optikdesign Sehfeldwechsler mit afokaler Voroptik und rotierenden Prismen

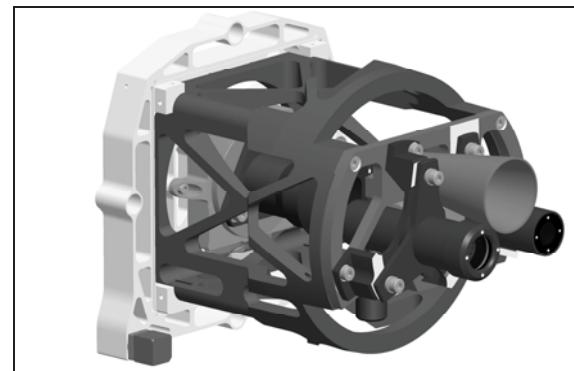


BILD 12. CAD Entwurf eines Sehfeldwechslers mit afokaler Voroptik und rotierenden Prismen

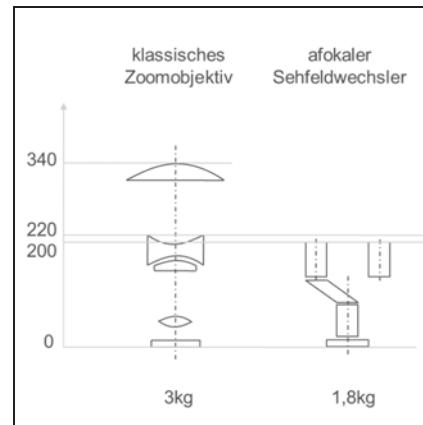


BILD 13. Vergleich Größe / Masse Zoomoptik mit fixer Gesamtlänge und dem Sehfeldwechsler mit afokaler Voroptik und rotierenden Prismen

Ein erster CAD Entwurf eines Sehfeldwechslers mit afokaler Voroptik und rotierenden Prisma zeigt das ausgehend von der Sternsensorarchitektur bei der Jena-Optronik GmbH vergleichbare kompakte moderne Zoomsensoren für die RvD Anwendung machbar sind, wobei die Sehfeldwechsler eine Robustheit ermöglichen, die mit Fixfokusoptiken vergleichbar ist. Die Massereduktion beträgt ca. 50% der ursprünglichen Fixfokusensoren (siehe BILD 13) Klassische Zoomlösungen mit einer größeren Flexibilität können mit größerem Volumen (Masse ~3kg <3.5kg ABSATZ 2.4.5) realisiert werden, wenn dafür geeignet stabile und Linearführungen entwickelt werden.

4. DANKSAGUNG

Die Studie wird gefördert von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50 RA 0915

5. SCHRIFTTUM

- [1] A.B. Hull, R. H. Arsenault, D.Hulan, W.F. Morgan, Design of a space-qualified zoom lens for the space station mobile servicing system video camera Proc. SPIE Vol. 2539, p. 37-63.
- [2] E.S. McVey, J.W. Lee. Some Accuracy and Resolution Aspects of Computer Vision Distance Measurements. IEEE Trans. Patt. Analysis and Mach. Intellig., 4 (6), 1982.
- [3] A. Verri, V. Torre. Absolute Depth Estimate in Stereopsis. J. Opt. Soc. Am. A, 3 (3), 1986.
- [4] S.D. Blostein, T.S. Huang. Error Analysis in Stereo Determination of 3-D Point Positions. IEEE Trans. Patt. Analysis and Mach. Intellig., 9 (6), 1987.
- [5] J.J. Rodríguez, J.K. Aggarwal. Stochastic Analysis of Stereo Quantization Error. IEEE Trans. Patt. Analysis and Mach. Intellig., 12 (5), 1990.
- [6] D.H. Ballard, C.M. Brown. Computer Vision. Prentice-Hall, 1982.