

**Analytische Betrachtung optisch abbildender
Sensorsysteme im Rahmen der
AsteroidFinder-Mission**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum naturalium
im Fach Informatik

eingereicht an der
Mathematisch-Wissenschaftlichen Fakultät II
Humboldt-Universität zu Berlin

von

Dipl.-Math. Ulrike Krutz, geb. Talbiersky
geboren am 06.12.1981 in Dorsten

Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin:
Prof. Dr. Jan-Hendrik Olbertz

Dekan der Mathematisch-Wissenschaftlichen Fakultät II:
Prof. Dr. Peter Frensch

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Gutachter:

1. Prof. Dr. Ralf Reulke
2. Prof. Dr. Herbert Jahn
3. Prof. Dr. Klaus Brief

Tag der Verteidigung: 11.05.2011

Krutz, Ulrike:

Analytische Betrachtung optisch abbildender
Sensorsysteme im Rahmen der AsteroidFinder-Mission
ISBN 978-3-941274-78-5

Alle Rechte vorbehalten

1. Auflage 2011, Göttingen

© Optimus Verlag

URL: www.optimus-verlag.de

Printed in Germany

Papier ist FSC zertifiziert (holzfrei, chlorfrei und säurefrei,
sowie alterungsbeständig nach ANSI 3948 und ISO 9706)

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes in Deutschland ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Abstract

This work outlines an analytical consideration of optical sensor systems applied to the satellite camera of the AsteroidFinder mission. The basic for this analysis is the question whether the optical sensor system of the AsteroidFinder mission supports a space-based detection of space debris which is defined as the secondary goal of the mission. The primary goal is the discovery of Inner Earth Objects. Aerospace has become more and more dangerous due to the increasing number of space debris. Thus, a deeper involvement in space debris investigations is required. Up to now, space debris is detected, observed and cataloged solely by ground-based optical or radar instruments. Here, the AsteroidFinder mission with its planned space-based detection will go a step further.

Assuming that a detection is possible, the image a space debris would create on the CCD was simulated by an IDL-program. As this image underlies all impairments caused by the optics, in this work the basics for a precise description of optoelectronic systems was elaborated with special regard to diffraction aspects. While derivating the total PSF of the system the thematic priority was given by the optics' PSF, especially by the comparison of the two diffraction integrals by Kirchhoff and Fresnel, where Fresnel is the quadratic approximation of the Kirchhoff's diffraction integral. With this approximation a lot of calculations concerning camera systems can be simplified. However, Fresnel approximations cannot be applied to arbitrary camera systems. For configurations with wide aperture, e.g., the usage of Fresnel is not possible without accepting an unagreeable deviation. In this work, investigations of the real and complex integrands lead to a formula from which the minimal F-number (respectively the maximum aperture radius) is derived, so that Fresnel approximations can be surely applied to a system. The analytical results are supported by numerical calculations and audited for three camera configurations outlined for remote sensing.

To answer the question whether the detection of space debris with the optical sensor of the AsteroidFinder mission is feasible at all, radiometrical and statistical analyses have been performed. For the radiometrical investigations a theory including the effects of diffraction and noise was developed and exemplified by an IDL-simulation. Based on the radiometrical results, statistical investigations have been performed in which the mean time-span could be determined which is needed to detect a space debris particle. The results indicate that it is well possible to detect space debris with the optical sensor system of the AsteroidFinder mission, although the mission itself is not optimally designed for this task.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt eine analytische Betrachtung optisch abbildender Sensorsysteme am Beispiel der Satellitenkamera der AsteroidFinder-Mission dar. Die Analyse unterliegt der Fragestellung, ob sich das optisch abbildende Sensorsystem der AsteroidFinder-Mission zur weltraumgestützten Detektion von Space Debris eignet, was als Zweitziel der Mission definiert wurde. Das Hauptziel ist die Entdeckung erdnaheer Asteroiden, deren Orbits vollständig im Erdorbit liegen. Weltraumschrott stellt eine akute und wachsende Gefahr für die Fortdauer der Raumfahrt dar und erfordert eine intensive Auseinandersetzung mit dem Thema. Derzeit werden zur Beobachtung und Katalogisierung von Weltraumschrott bodengestützte Radar- und optische Trackingsysteme verwendet. Die AsteroidFinder-Mission mit ihrer geplanten weltraumgestützten Beobachtung wird daher eine gewisse Vorreiterrolle spielen.

Unter der Annahme, dass eine Detektion möglich sei, wurde mit den vorliegenden Kameradaten anhand eines IDL-Programms simuliert, welches Abbild ein Weltraumschrottpartikel auf der CCD erzeugen würde. Da diese Abbildung sämtlichen Beeinträchtigungen durch die Optik unterliegt, wurden im Rahmen dieser Arbeit die Grundlagen zur adäquaten Beschreibung optoelektronischer Systeme unter besonderer Berücksichtigung der Beugung ausführlich dargelegt. Bei der Herleitung der Gesamt-PSF lag der Schwerpunkt auf der Optik-PSF, insbesondere auf dem Vergleich der Beugungsintegrale nach Kirchhoff und Fresnel, wobei Fresnel eine quadratische Näherung des Kirchhoff'schen Beugungsintegrals darstellt. Durch die Approximation lassen sich viele Rechnungen wesentlich vereinfachen, doch ihre Anwendung ist nicht immer zulässig. Insbesondere bei Kamerasystemen mit großer Apertur können die Ergebnisse mit einem nicht vernachlässigbaren Fehler behaftet sein. In dieser Arbeit konnte mittels eines direkten Vergleichs der reell- und imaginärwertigen Integranden eine mathematische Formel abgeleitet werden, die es ermöglicht, anhand einer Nullstellenbestimmung eine Aussage darüber zu treffen, bis zu welcher minimalen Blendenzahl bzw. bis zu welchem maximalen Aperturradius, eine Anwendung der Fresnel-Näherung ohne große Fehler möglich ist. Die analytischen Ergebnisse wurden durch numerische Berechnungen unterstützt und für drei für die Fernerkundung ausgelegte Kamera-Konfigurationen überprüft.

Um die Frage zu beantworten, ob ein Space Debris-Teilchen überhaupt von der Kamera detektiert werden kann, wurden radiometrische und statistische Untersuchungen durchgeführt. Für die radiometrische Analyse wurde eine Theorie abgeleitet, die Beugungseffekte und Rauschen berücksichtigt. Die Ergebnisse ließen sich mittels einer IDL-Simulation veranschaulichen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden statistische Untersuchungen durchgeführt, in welchen die durchschnittliche Zeit ermittelt wurde, die man benötigt, um ein Teilchen zu entdecken. Anhand der Resultate ließ sich schlussfolgern, dass eine Detektion von Weltraumschrott mit dem optischen Kamerasystem der AsteroidFinder-Mission möglich ist, auch wenn die Mission selbst nicht auf diese Aufgabe zugeschnitten ist.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Einordnung der Arbeit	4
1.3	Aufbau der Arbeit	5
2	Grundlagen: Optisch abbildende Sensorsysteme	9
2.1	Komponenten optisch abbildender Sensorsysteme	9
2.1.1	Optik	9
2.1.2	Detektoren	11
2.2	Parameter optisch abbildender Sensorsysteme	13
2.2.1	PSF	13
2.2.2	MTF	16
2.2.3	SNR	17
2.2.4	Auflösung	21
3	Bestimmung der Gesamt-PSF optisch abbildender Sensorsysteme	25
3.1	PSF der Optik	26
3.1.1	Vergleich: Kirchhoff – Fresnel	26
3.1.2	Vergleich dreier Kamerasystem-Konfigurationen	38
3.1.3	Variation über die Blendenzahl	46
3.1.4	Analytische Bestimmung der ersten Nullstelle vom Integranden	49
3.1.5	Übergang zu dimensionslosen Größen	53
3.1.6	Näherung einer gemessenen PSF	54
3.1.7	PSF der Optik bei veränderlicher Gegenstandsweite	55
3.2	PSF der Skanierung	56
3.2.1	Allgemeiner Fall der Bewegungsverschmierung	56
3.2.2	Anwendungsbeispiele	58
3.3	PSF des Detektors	61
3.4	Gesamt-PSF des Systems	61
3.4.1	Übergang zur OTF und MTF	62
3.4.2	Anwendungsbeispiel: Flugzeugkamera (MFC)	63
3.5	Abbildung eines bewegten Objekts auf der CCD	68

4	Analyse des Kamerasystems der AsteroidFinder-Mission	75
4.1	Die AsteroidFinder-Mission	75
4.2	Space Debris-Detektion	77
4.3	Möglichkeiten zur Analyse	80
4.3.1	Die ESA-Programme MASTER und PROOF	80
4.3.2	Begründung für eigenen Ansatz	81
4.4	Radiometrische Analyse	82
4.4.1	Modell	82
4.4.2	Grundlegende radiometrische Betrachtungen	84
4.4.3	Abschätzung der Strahlungsenergie nach einem Linsendurchgang	86
4.4.4	Bestimmung der Energie am Pixel	88
4.4.5	Bestimmung der Energie unter Einbeziehung der PSF	99
4.4.6	Simulation	100
4.5	Statistische Analyse	117
4.5.1	Grundlegende statistische Betrachtungen	117
4.5.2	Abschätzen der Teilchenzahl im Sichtbereich der Kamera	133
4.5.3	Abschätzen der Detektionszeit für ein Teilchen	136
4.6	Auswertung	139
5	Zusammenfassung und Ausblick	141
Anhang A		145
A.1	Einige mathematische Formeln	145
A.2	Strahlungsgrößen	149
A.2.1	Radiometrische Begriffe	149
A.2.2	Strahlungsgesetze	153
A.3	Nomenklatur zur statistischen Untersuchung	154
Anhang B		157
B.1	Die Geschichte der Kamera – Wie aus einer „dunklen Kammer“ eine Digitalkamera wurde	157
	Abkürzungsverzeichnis	163
	Literaturverzeichnis	165
	Abbildungsverzeichnis	175
	Tabellenverzeichnis	179

1 Einleitung

1.1 Motivation

Kameras üben seit Jahrhunderten einen Reiz auf Menschen aus. Anfang des 19. Jahrhunderts gelang es Joseph Nicéphore Niépce, der als Entdecker der Fotografie gilt, in einer Belichtungszeit von acht Stunden die weltweit erste Fotografie aufzunehmen [33]. Das Wissen um die faszinierende Möglichkeit, einen vergänglichen Moment für die Ewigkeit erhalten zu können, setzte eine Entwicklung in Gang, die in Bezug auf Tempo und Fortschritt ihresgleichen sucht. Insbesondere das zwanzigste Jahrhundert sollte für die Kamera zum Sprungbrett werden, das sie über die ganze Welt und sogar über diese hinaus katapultierte. Auch wenn der Satellit Sputnik 1 1957 ohne Kamera ins All geschossen wurde, noch im selben Jahr startete der erste mit Kamera ausgerüstete Satellit. Heutzutage ist beinahe jeder Satellit mit einer Kamera bestückt, deren unterschiedliche Zielsetzungen von militärischen Interessen bis zur Forschung reichen.

Das DLR¹ in Berlin-Adlershof verfügt über jahrzehntelange Erfahrungen auf den Gebieten der digitalen Signalverarbeitung, Stereobilderzeugung, und der Entwicklung optoelektronischer, bildgebender Systeme – angefangen bei der Theorie bis zur Realisierung. Spezialisierungen liegen insbesondere bei der Konzeptionierung digitaler Luftbild- und Satellitenkameras. Bereits Mitte der 80er Jahre, als die fotografische Technik durch die Digitalisierung eine Revolution erlebte, gab es mit EFAS² und TOMAS³ am damaligen IKF⁴ in Zusammenarbeit mit Carl Zeiss in Jena die ersten Projekte zur Entwicklung von Digitalen Luftbildkameras. 1988 wurde die WAOSS-Kamera⁵ (siehe Abbildung 1.1) konzipiert [77]. Diese sollte bei der Mission



Abbildung 1.1: WAOSS-Kamera

¹ DLR = Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

² EFAS = Experimentelles Fernerkundungsaufnahmesystem

³ TOMAS = Thematisch Orientiertes Multispektrales Aufnahmesystem

⁴ IKF = Institut für Kosmosforschung

⁵ WAOSS = Wide Angle Optoelectronic Stereo Scanner

1 Einleitung

Mars-94/96 der ESA⁶ den Mars global mit einer Bodenauflösung von einigen hundert Metern beobachten. Der Schwerpunkt sollte hier bei der Bilddatenerfassung liegen. Beim Kurswechsel zum Mars stürzte die Mission, die zuvor erfolgreich gestartet war, jedoch ab. Allerdings kommt die WAOSS später in einer anderen Mission zum Zuge: Gemeinsam mit einem bispektralen Infrarotsensorsystem wird die Kamera bei dem Projekt BIRD⁷ verwendet. BIRD ist ein Kleinsatellit, der am 22.10.2001 in einen 572 km hohen kreisförmigen Erdborbit gestartet ist. Seine spezielle Aufgabe ist es Brände auf der Erde zu erkennen und zu untersuchen [13, 34]. Es ist das erste Mal, dass sowohl die Ausdehnung wie auch die auftretenden Flammentemperaturen der Waldbrände vom Weltall aus bestimmt werden können [98].



Als eine Weiterentwicklung der WAOSS ist die elektronische, digitale Luftbildkamera für den Flugzeugeinsatz, die WAAC⁸, zu nennen [38]. Auf Basis dieser Kamera, die als Vorläufer einer neuen Generation von Messbild-Kameras gilt, wurde 1997 ein Kooperationsvertrag zwischen dem DLR und der Firma LH Systems⁹ geschlossen. Aus dieser Zusammenarbeit entstand die weltweit erste kommerzielle digitale Luftbildkamera: die ADS40¹⁰, welche im Jahr 2000 beim ISPRS-Kongress¹¹ in Amsterdam präsentiert wurde (siehe Abbildung 1.2).

Abbildung 1.2: ADS40-Kamera

Seit 2005 werden im DLR wieder verstärkt Weltraumprojekte verfolgt. Zu diesen gehören beispielsweise der Satellit Kompsat-3, ein koreanischer Erdbeobachtungssatellit, dessen vom DLR entwickelte Kamera eine Bodenauflösung von 75 cm aufweist. Ein anderes Projekt ist die AsteroidFinder-Mission. Bei dieser kommt eine Weiterentwicklung der im DLR-Institut für Planetenforschung entwickelten Matrix-CCD-Kamera der ROSETTA-Mission¹² zum Einsatz. Während ROSETTA sich derzeit auf Missionskurs zum Kometen 67P/Tschurjumow-Gerasimenko befindet, auf dem

⁶ ESA = European Space Agency

⁷ BIRD = Bispectral Infra-Red Detection

⁸ WAAC = Wide Angle Airborne Camera

⁹ LH-Systems ist ein Joint-Venture der Firmen Leica Geosystems-AG (Schweiz) und der BAE Systems

¹⁰ ADS = Airborne Digital Sensor

¹¹ ISPRS = International Society for Photogrammetry and Remote Sensing

¹² Der Name Rosetta bezieht sich auf den Stein von Rosetta. Dank diesem gelang die Entzifferung der ägyptischen Hieroglyphen. Nun soll Rosetta durch die Landung auf einem Kometen „entziffern“, wie das Sonnensystem während seiner Entstehung beschaffen war [2]

die Sonde 2014 landen soll [80], steht der Start der AsteroidFinder-Mission noch bevor.

In dieser Arbeit soll das Kamerasystem der AsteroidFinder-Mission unter der Fragestellung untersucht werden, ob es sich zur weltraumgestützten Detektion von Space Debris eignet. Weltraumschrott stellt eine akute und wachsende Gefahr für Satelliten und Raumfahrzeuge dar. Dieser Umstand erfordert eine intensive Beschäftigung und Untersuchung des Space Debris-Problems. Das menschengemachte Müllproblem im All begann zeitgleich mit der Eroberung des Weltraums durch Raketen und Satelliten. Durch Sprengungen von Oberstufen, Explosionen und Kollisionen ausgedienter Satelliten, freigesetzte NaK-Tröpfchen¹³ aus Reaktorkühlmitteln, oder Schlackeobjekte, erzeugt durch Feststofftriebwerke – um nur einen Teil der Quellen zu nennen – nimmt die Weltraumverschmutzung seither kontinuierlich zu [45, 84, 91]. Die Teilchen, die durch einen Rest an Luftwiderstand von niederen Orbits zurück in die Erdatmosphäre gezogen werden, verglühen meist und stellen keine Gefahr für die Erde dar, doch Teilchen in einer Höhe von 800 km benötigen dazu bereits Jahrhunderte, in einer Höhe von 1500 km sogar einige tausend Jahre. Derweil werden vielfach neue Teilchen generiert. Schätzungen aus dem Jahr 2006 zufolge existieren rund 110000 Objekte mit einem Durchmesser zwischen 1 und 10 cm und 35 Millionen Teilchen mit einem Durchmesser kleiner als 1 cm in den Erdorbits [35]. Mittels bodengestützter Radar- und optischer Tracking-Systeme lassen sich derzeit etwa 13000 Objekte permanent verfolgen – Teilchen mit einem Durchmesser größer als 5 cm im LEO¹⁴ bzw. mit einem Durchmesser größer als 50 cm im GEO¹⁵. Verglichen mit der enormen Anzahl des Schrotts, der sich tatsächlich im All befindet, ist dies nur ein Bruchteil.

Aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit von bis zu 15 km/s können selbst kleine Teilchen mit einem Durchmesser von einem Zentimeter einen Satelliten oder ein Raumfahrzeug schwer beschädigen, wenn nicht sogar zerstören [35, 90]. Die kinetische Energie eines solchen Teilchens entspricht bei einer Kollision der einer Handgranate [83]. Die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenstoßes ist derzeit noch gering. Zitiert man Heiner Klinkrad von der ESA Darmstadt, so „[...]erhält man als mittlere Dauer zwischen zwei Kollisionen mit zerstörender Wirkung einen Zeitraum von etwa 10 Jahren“ [24]. In Anbetracht des stetigen Wachstums der Weltraummüllpopulation und der Anzahl der Satelliten werden sich Ereignisse wie der Zusammenstoß des ausgedienten russischen Satelliten Kosmos 2251 mit dem aktiven Kommunikationssatelliten Iridium 33 der US-Firma Iridium Satellite am 10. Februar 2009, der erste in der Geschichte –

¹³ NaK-Tröpfchen bestehen aus einer Natrium-Kalium-Legierung

¹⁴ LEO = Low Earth Orbit, 200 bis 1200 km Höhe

¹⁵ GEO = Geostationary Earth Orbit, 35786 km Höhe

1 Einleitung

mehren. Bei der Kollision wurden beide Satelliten vollständig zerstört – und neuer Weltraummüll geschaffen [1, 44].



Abbildung 1.3: Space Debris Population im LEO-Bereich [65]

Zahl beläuft sich nach Bottke/Morbidelli auf etwa 1000 mit einem Durchmesser größer als 100 m [11]. Bekannt sind davon bis zu diesem Zeitpunkt lediglich 10. Diese Objekte sind äußerst schwierig von der Erde aus zu entdecken, da sie sich stets in Sonnennähe befinden. Das innere Sonnensystem ist demnach noch weitestgehend unerforscht.

Das DLR verfolgt mit der AsteroidFinder-Mission ein Weltraumprogramm, das erstmalig einen zur Kompaktklasse gehörenden DLR-Standard-Satellitenbus (SSB) verwenden wird. Die Mission befindet sich derzeit in Phase B mit einem geplanten Start für 2013. Hauptziel ist es IEOs zu entdecken. Das zweite Ziel soll zeigen, dass es möglich ist, Space Debris mit einem optischen Instrument direkt vom Weltraum aus zu detektieren. Die weltraumgestützte Beobachtung von Weltraummüll – eine Entwicklung, die sich momentan noch im Anfangsstadium befindet – soll helfen, vor allem die kleinen Teilchen aufzuspüren, die von den bodengestützten Beobachtungsmethoden übersehen werden. Bis zu diesem Zeitpunkt ist keine weitere Mission bekannt, die eine weltraumgestützte Beobachtung von Weltraummüll durchführt. Die AsteroidFinder-Mission wird hierbei also eine gewisse Vorreiterrolle spielen.

1.2 Zielsetzung und Einordnung der Arbeit

Die Zielsetzung der Arbeit ist die Analyse optisch abbildender Sensorsysteme angewendet auf die Satellitenkamera der AsteroidFinder-Mission. Damit baut

¹⁶ NEOdys = Near-Earth Objects Dynamic Site

¹⁷ NEO = Near-Earth Object

¹⁸ IEO = Inner-Earth Object

diese Arbeit auf den oben genannten jahrzehntelangen Erfahrungen des DLR in den Bereichen der Systemtheorie und der Entwicklung optoelektronischer, bildgebender Systeme auf. Zugleich wird mit der astronomischen Mission AsteroidFinder das Ziel des DLR, wieder verstärkt Weltraumprojekte zu verfolgen, unterstützt. Das System der AsteroidFinder-Mission wird konkret unter der Fragestellung untersucht, ob es sich zur weltraumgestützten Detektion von Space Debris eignet. Wie oben bereits dargelegt, stellt Weltraumschrott eine akute Gefahr für die Raumfahrt dar und erfordert zwingend die Detektion, Charakterisierung und Beobachtung der Teilchen. Die AsteroidFinder-Kamera ist dafür ausgelegt, NEOs und IEOs aufzuspüren. Dies ist das Hauptziel der Mission. In den „Beobachtungspausen“ – jenen Phasen, in denen eine Asteroiden-Beobachtung nicht möglich ist, soll jedoch das Zweitziel verfolgt werden, nämlich als eine der ersten Missionen überhaupt zu demonstrieren, dass die Detektion von Space Debris mit einem optischen Sensor vom LEO aus möglich ist – auch wenn die Kameraparameter für dieses Ziel nicht optimiert sind. Generell werden hohe Anforderungen an Satellitenkameras gestellt, wobei der jeweilige Anspruch missionsspezifisch ausfällt. Bei der Konzeptionierung müssen Beeinträchtigungen durch physikalische Gesetze berücksichtigt werden. Eine hohe Auflösung wird oft durch eine große Apertur erzwungen. Jedoch müssen hier Beugungserscheinungen unter verschiedenen Aspekten berücksichtigt werden. Es ist wichtig, Kenngrößen wie Gegenstandsweite, Brennweite und Aperturradius in ein der Anwendung entsprechend angemessenes Verhältnis zu setzen. Unter der Annahme, dass eine Weltraumschrott-Detektion möglich sei, wird die Abbildung eines Space Debris-Objekts auf der CCD simuliert. Die Abbildung weist hierbei sämtliche Beeinträchtigungen durch die in dieser Arbeit detailliert hergeleitete Gesamt-PSF optischer Systeme auf. Die Beantwortung der Frage, ob ein Weltraumschrottteilchen überhaupt detektiert werden kann, ist Bestandteil der radiometrischen und statistischen Analyse. Aus den Ergebnissen sollen Anforderungen abgeleitet werden, welche eine optimale Space Debris-Detektion ermöglichen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit liefert eine analytische Betrachtung optisch abbildender Sensorsysteme am Beispiel der Satellitenkamera der AsteroidFinder-Mission. Das Konzept klassischer Kamerasysteme mit den Komponenten Optik und Detektor wird in Kapitel 2 dargelegt. Zudem werden die maßgebenden Parameter dieser Komponenten eingeführt. Zu diesen gehören insbesondere die PSF, welche in dieser Arbeit schwerpunktmäßig betrachtet wird, das Rauschen in Strahlungsdetektoren und das Auflösungsvermögen.