

**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](http://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

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Zielsetzung und Einordnung der Arbeit . . . . .	4
1.3	Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Grundlagen: Optisch abbildende Sensorsysteme</b>	<b>9</b>
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
<b>3</b>	<b>Bestimmung der Gesamt-PSF optisch abbildender Sensorsysteme</b>	<b>25</b>
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

<b>4</b>	<b>Analyse des Kamerasystems der AsteroidFinder-Mission</b>	<b>75</b>
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
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>141</b>
<b>Anhang A</b>		<b>145</b>
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
<b>Anhang B</b>		<b>157</b>
B.1	Die Geschichte der Kamera – Wie aus einer „dunklen Kammer“ eine Digitalkamera wurde . . . . .	157
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>163</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>165</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>175</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>179</b>