

Ausbau von Simulationsverfahren zur Detektion von Weltraummüll

Gelhaus J.^a, Flegel S.^a, Möckel M.^a, Braun V.^a, Wiedemann C.^a, Krag H.^b, Klinkrad H.^b, Vörsmann P.^a

^a*Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme, Technische Universität Braunschweig ,
Hermann-Blenk-Str. 23, 38108 Braunschweig, Germany*

^b*Space Debris Office, ESA/ESOC, Robert-Bosch-Str. 5, 64293 Darmstadt, Germany*

Abstract

Seit mehr als zehn Jahren finden regelmäßig Messkampagnen mit Radarsensoren und optischen Teleskopen zur Detektion von Weltraummüll statt. Diese Messkampagnen werden genutzt, um Modelle zur Simulation der Weltraummüllumgebung zu erstellen. Ein Modell, das *Meteoroid and Space Debris Terrestrial Environment Reference Model* (MASTER), wird im Auftrag von ESA/ESOC durch das Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme (ILR) der Technischen Universität Braunschweig entwickelt. Dabei sind statistische Messungen der Weltraummüllumgebung eine wichtige Komponente zur Validierung des Modells. Um die Validierung der simulierten Population durchzuführen, wurde ein *Program for Radar and Optical Observation Forecasting* (PROOF) entwickelt, welches Sensormodelle beinhaltet, die in der Lage sind, die Messkampagnen unter Berücksichtigung der generierten Weltraummüllpopulation nachzusimulieren. Dieses Programm beinhaltet Sensormodelle, die einer detaillierten Simulation der Sensoren entsprechen.

In diesem Paper soll auf den Ausbau der Modelle eingegangen werden. Speziell soll in diesem Paper auf Resultate aus Studien eingegangen werden, die die Grundlagen für die Simulation von Infrarotsensoren legen. Die Methode der Detektion von Weltraummüll mittels Infrarotsensoren könnte dazu beitragen, die detektierbare Objektuntergrenze zu verringern. Die Ansätze der Umsetzung dieses neuen Simulationsverfahrens sollen vorgestellt und erste Ergebnisse präsentiert werden.

Keywords: Infrared, Sensor Simulation, Space Debris, PROOF

1. Einleitung

Das Thema Weltraummüll rückt immer mehr in den Vordergrund, wenn es um die Planung und Durchführung von bemannten und unbemannten Raumflügen im erdnahen Orbit geht. Seit Beginn der Raumfahrt vor mehr als 50 Jahren stieg die Anzahl der Raumfahrtrückstände kontinuierlich an. Eine genaue Kenntnis über diese Rückstände besteht heutzutage nur für hinreichend große Objekte. So sind im öffentlich zugänglichen Katalog des US Space Surveillance Networks zur Zeit ca. 16.000 Objekte enthalten mit etwa 10cm Minstdurchmesser. Modelle zur Simulation der Welt-

raumüllumgebung gehen von ca. 25.000 Objekten größer als 10cm aus und sogar von ca. 700.000 Objekten größer als 1cm.

Die Erfassung der großen Objekte größer als 10cm mittels Radar und Teleskop erfolgt also relativ umfangreich bis hin zu einer hinreichend genau bestimmten Bahn. Dies ist insbesondere daher wichtig, da Kollisionen zwischen Raumfahrzeugen und Objekten dieser Größe zu einem Verlust der Mission oder gar zu einer vollständigen Fragmentation des Raumfahrzeuges führen. Für den Kleinstteilbereich mit Objekten kleiner als 1mm ist eine so umfassende Kenntnis hingegen nicht notwendig, da in der Regel die äußere Satellitenstruktur das Eindringen dieser Partikel verhin-

Email address: j.gelhaus@tu-bs.de (Gelhaus J.)

dert. Zur Risikoabschätzung reicht somit die Betrachtung der statistischen Verteilung der Objekte aus. Diese Statistiken werden durch Analysen von zurückgeführten Oberflächen (LDEF, EURECA, HST) gestützt.

Allerdings besteht im Übergangsbereich zwischen den Kleinteilen und den erfassbaren Objekten ein Bereich, über den nur wenig bekannt ist, da die Objekte einerseits nicht erfasst werden können und der Objektfluss andererseits zu gering ist, als dass hinreichend belastbare Stützwerte für eine statistische Verteilung generiert werden können. Daher muss nach Methoden gesucht werden, mit denen es möglich ist, in diesen Bereich vorzudringen, um statistische Messungen durchzuführen.

2. Das IR-Modell

In diesem Paper sollen die benötigten Grundlagen vorgestellt werden, um ein Infrarot-Modell zur Detektion von Objekten im Übergangsbereich aufzubauen. Hierbei wird auf das Optische-Performance-Modell (OPM) der bewährten ESA-Software PROOF (Program for Radar and Optical Observation Forecasting) zurückgegriffen und um eine IR-Komponente (IPM) erweitert. Eine Detektion kann wie im sichtbaren Spektrum nur dann erfolgen, wenn das Objekt bzw. dessen Signatur auf dem Sensor deutlich stärker ist, als die des Hintergrundes. Dazu wird in einem ersten Schritt die Ermittlung der Signatur des Objektes (siehe Kapitel 3) und in einem zweiten Schritt wird die Signatur des Hintergrundes vorgestellt (siehe Kapitel 4). Erste Resultate werden in Kapitel 5 vorgestellt.

3. Debris-Signatur

Wie auch im sichtbaren Spektrum, so fungiert auch im Infraroten ein Objekt als eigenständige Strahlungsquelle und kann somit von IR-Sensoren detektiert werden. Im Infrarot sogar noch umso deutlicher, da ein jedes Objekt unabhängig von anderen Einflüssen im IR-Spektrum auf Grund seiner Eigentemperatur strahlt. Neben dieser Eigenstrahlung kommen aber auch noch Einflüsse durch äußere Strahlungsquellen hinzu, des-

sen IR-Strahlung an dem Objekt beispielsweise reflektiert wird. So können als die wesentlichen Bestrahlungs- und Wärmequellen die folgenden Arten identifiziert werden:

- Bestrahlung durch die Sonne
- Bestrahlung durch die Erde
- Bestrahlung durch die Mond
- Kosmischer Strahlungshintergrund
- Aerodynamische Aufheizung
- Wärmequellen im Objekt

In diesem ersten Ansatz der Modellierung werden die Einflüsse durch die Bestrahlung durch den Mond sowie durch die kosmische Hintergrundstrahlung vernachlässigt. Die aerodynamische Aufheizung wird nach [1] nur bis Bahnhöhen von 200km wirksam, wo sie in etwa 10% der Solarstrahlung beträgt, so dass auch dieser Einfluss zunächst nicht berücksichtigt wird. Ferner wird davon ausgegangen, dass die Objekte keine eigenen Wärmequellen besitzen, so dass schließlich die verbleibenden Einflüsse die "Bestrahlung durch die Sonne" und die "Bestrahlung durch die Erde" sind.

3.1. Bestrahlung durch die Sonne

Die Sonne absorbiert und emittiert im gesamten elektromagnetischen Spektrum und kann durch eine hohe Dichte benachbarter Absorptionslinien näherungsweise als Schwarzer Körper aufgefasst werden [2]. Es ergibt sich somit, dass die Temperatur der Sonne im thermischen Gleichgewicht zwischen der kosmischen Hintergrundstrahlung und dem Sonneninneren liegt und ca. $T_S = 5780K$ beträgt. Die Berechnung der Solarstrahlung, die ein Objekt in Erdnähe durch die Sonne erfährt, basiert auf dem PLANKSCHEN Strahlungsgesetz. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Solarstrahlung pro Fläche mit dem Quadrat des Abstandes vom Strahler (also der Sonne) abnimmt. So kann schließlich die Solarstrahlung durch

$$(1) \quad M_S(r_S) = \left(\frac{R_S}{r_S} \right)^2 \cdot \sigma \cdot T_S^4$$

bestimmt werden. Der jeweils aktuelle Wert für die Solarstrahlung hängt direkt von der Position der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne ab. Auch die Anzahl und Position der Sonnenflecken trägt zu einer Variation der Solarstrahlung bei, so dass sich in der Regel Werte zwischen 1325 W/m^2 und 1420 W/m^2 ergeben.

Die "World Meteorological Organisation" (WMO) legte im Jahr 1981 einen Mittelwert von 1367 W/m^2 fest [3]. Für einen Sonnenradius von $R_S = 696 \cdot 10^3 \text{ km}$ und eine Entfernung von $r_s = 1 \text{ AE} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$ kann nach Gleichung (1) mit Hilfe der STEFAN-BOLTZMANN-Konstante $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ der Wert der Solarstrahlung auf 1370 W/m^2 bestimmt werden, welcher dem Mittelwert sehr Nahe kommt, so dass für die Berechnungen im IR-Model auf den von der WMO festgelegten Mittelwert zurückgegriffen wird.

3.2. Bestrahlung durch die Erde

Nach der Solarstrahlung ist die aus Richtung der Erde auf ein Objekt im erdnahen Raum einfallende Strahlung die nächst größere. Allerdings teilt sich die aus Richtung der Erde einfallende Strahlung in zwei Komponenten: die *Erdalbedostrahlung*, die aus an der Erde reflektierter Solarstrahlung besteht, und die Eigenstrahlung der Erde, die *Erdthermalstrahlung*.

3.2.1. Erdthermalstrahlung

Für die Ermittlung der Erdthermalstrahlung wird die Erde als *grauer Strahler* angesehen. Solarstrahlung wird teilweise absorbiert und eine spezifische Erdthermalstrahlung emittiert. Zur Ermittlung der absorbierten Solarstrahlung wird von einer gleichverteilt eintreffenden Solarstrahlung ausgegangen werden, so dass als Absorptionsfläche der Kugelquerschnitt der Erde anzunehmen ist: $A_{abs} = \pi R_E^2$. Als emittierende Fläche muss hingegen die Kugeloberfläche der Erde verwendet werden: $A_{emi} = 4\pi R_E^2$. So ergibt sich auf Grund des thermischen Gleichgewichts das Verhältnis von absorbiert (Absorptionsgrad: α_S) und emittierter Strahlung zu:

$$(2) \quad \alpha_S \cdot M_S \cdot \pi \cdot R_E^2 = M_E \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_E^2$$

Unter Einbeziehung des planetaren Albedo a_E , welches nach dem KIRCHHOFFSCHEN Gesetz im Absorptionsgrad enthalten ist ($\alpha_S = 1 - a_E$), kann die von einem erdnahen Objekt empfangene Erdthermalstrahlung M_T unter Berücksichtigung der Entfernungsabhängigkeit ausgedrückt werden:

$$(3) \quad M_T = M_E \cdot \left(\frac{R_E}{r}\right)^2$$

mit $M_E = \frac{1}{4}(1 - a_E) \cdot M_S$. Das planetare Albedo der Erde wird in unterschiedlichen Quellen (vgl. [4] und [5]) mit Werten zwischen 0,30 und 0,39 angegeben. Mit einem Mittelwert von $a_E = 0,35$ beträgt die Austrahlung der Erde für $r = R_E$ nach Gleichung (3) $M_E = 219 \text{ W/m}^2$. Allerdings würde es hierdurch wegen der relativen Nähe der Objekte zur Erde zu einer Unterschätzung der Erdthermalstrahlung kommen. Die Angaben gelten nur für normal zum Strahlungsfeld stehende Flächen. Die Strahlenausbreitung kann hier aber nicht als gleichgerichtet und -verteilt betrachtet werden, wie es z.B. bei der Solarstrahlung durch die große Entfernung zwischen Strahler und Objekt der Fall ist. Nach [5] wird statt dessen die Erdthermalstrahlung nach Einführung des Sichtfaktors F_1 berechnet. Es gilt:

$$(4) \quad M_T = 8 \cdot \sigma \cdot T_E^4 \cdot F_1$$

mit

$$(5) \quad F_1 = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{R_E}{r}\right)^2}}{4}.$$

In Abbildung 1 wird der Unterschied zwischen beiden Berechnungsmethoden grafisch deutlich. Insbesondere in Erdnähe würde die Erdthermalstrahlung nach dem ersten Ansatz bis zu 50% zu gering berechnet werden.

3.2.2. Erdalbedostrahlung

Die Erdalbedostrahlung stellt den diffus reflektierten Anteil der Solarstrahlung dar. Dabei besteht eine Abhängigkeit von der Rückstrahlungsfähigkeit der Erde, dem Erdalbedo a_E . Um die am Objekt einfallende Erdalbedostrahlung zu bestimmen, ist die

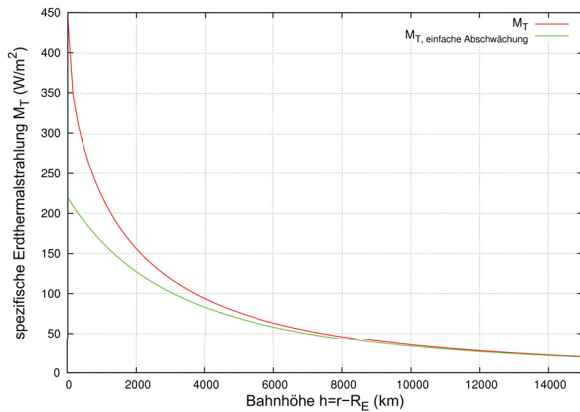


Abbildung 1: Unterschiede bei der Berechnung der Erdthermalstrahlung

relative Positionierung der drei Körper Objekt, Erde und Sonne zu betrachten. Es lässt sich leicht nachvollziehen, dass die Erdalbedostrahlung am größten ist, wenn das Objekt zwischen Erde und Sonne steht, und umgekehrt am kleinsten, wenn die Sonne von der Erde verdeckt wird. Hierzu wird der Winkel θ_S eingeführt, der in der Ebene Objekt-Erde-Sonne den geozentrischen Winkel zwischen Objekt und Sonne beschreibt.

Nach [6] kann die Erdalbedostrahlung mathematisch genau bestimmt werden. Dazu sind zwei Integrale, eines über die durch die Sonne beschienene Oberfläche und ein zweites über die vom Objekt aus sichtbare Oberfläche der Erde, gelöst werden. Diese mathematisch genaue Lösung ist allerdings sehr rechenintensiv und wird daher für die erste Implementierung des IR-Modells durch eine in [5] beschriebene Methode ersetzt. Demnach wird die Erdalbedostrahlung durch

$$(6) \quad M_A(\theta_S) = 8 \cdot M_S \cdot a_E \cdot F_2$$

angenähert werden, wobei der Sichtfaktor F_2 in Abhängigkeit des Winkels θ_S steht:

$$(7) \quad F_2 = \begin{cases} F_1 \cdot \cos(\theta_S) & \text{für } \cos(\theta_S) \geq 0 \\ 0 & \text{für } \cos(\theta_S) < 0 \end{cases}$$

wobei F_1 nach Gleichung (5) bestimmt ist. Das Reflexionsverhalten (siehe Abbildung 2) der Erde wird also durch eine LAMBERTSCHE Fläche

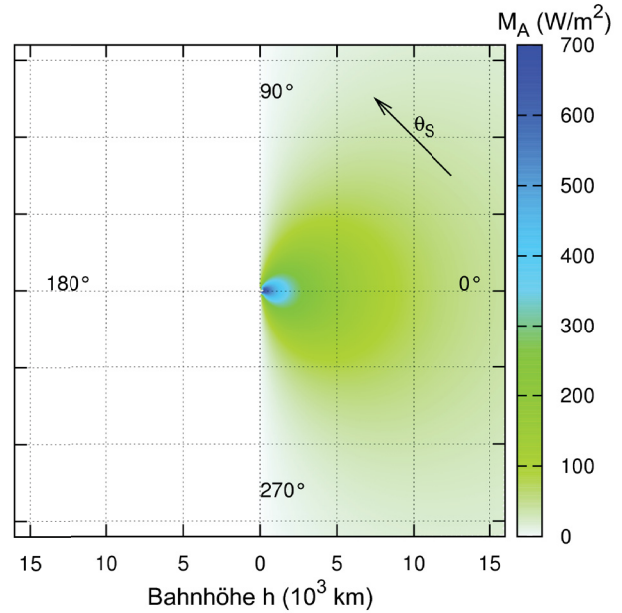


Abbildung 2: Erdalbedostrahlung als Funktion von h und θ_S

abgebildet. Diese Flächen haben die Eigenschaft, dass sie maximal in Normalenrichtung, hier also in Richtung der Sonne, reflektieren und in Abhängigkeit vom Kosinus des Abstandes von der Normalen zunehmend weniger Strahlung reflektieren. Die Abnahme der Strahlung mit zunehmender Höhe wird auf gleiche Weise wie schon bei der *Erdthermalstrahlung* berücksichtigt. Es ergibt sich eine maximale Erdalbedostrahlung von $M_A = 700 \text{ W/m}^2$ in 300 km Höhe.

3.3. Signatur des Objekts

In den Abschnitten 3.1 und 3.2 wurden die auf ein Objekt einstrahlenden Komponenten beschrieben. In diesem Abschnitt werden nun die Einzelkomponenten bestimmt, die zusammen die Gesamtsignatur des Objektes ergeben. Zum einen sendet das Objekt selber Strahlung aus (*Objekt-Thermalstrahlung*) zum anderen wird am Objekt ein Teil der einfallenden Strahlung reflektiert. Insbesondere zur Bestimmung des reflektierten Anteils ist die Gesamtkonstellation von Objekt, Erde, Sonne und Sensor zu berücksichtigen.

3.3.1. Emittierte Thermalstrahlung

Um die emittierte Thermalstrahlung des Objektes zu bestimmen, muss der Thermalhaushalt des Objektes betrachtet werden, welcher einem ständigen Wechsel der einstrahlenden Erdthermal-, Erdalbedo- und Solarstrahlung unterliegt. Zunächst soll aber zur vereinfachten Temperaturbestimmung davon ausgegangen werden, dass ein stationärer, isothermer Zustand am Objekt vorliegt. Allerdings werden hierdurch Fehler (vgl. auch [7]) erzeugt, die umso größer sind, je größer das Objekt (geringere Isothermie) ist und je näher der betrachtete Zustand einem Übergangsbereich ist (nicht stationär). Das thermische Gleichgewicht wird so zu

$$(8) \quad \sum \alpha_i \cdot A_{\alpha_i} \cdot M_i = \epsilon \cdot A_\epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

als Gleichgewicht aus absorbierte und emittierte Strahlung ausgedrückt. Es ergibt sich die Objekttemperatur zu

$$(9) \quad T = \sqrt[4]{\frac{C_{solar} + C_{albedo} + C_{thermal}}{\epsilon \cdot A_\epsilon \cdot \sigma}}$$

mit

$$\begin{aligned} C_{solar} &= \alpha_S \cdot A_{\alpha_S} \cdot M_S, \\ C_{albedo} &= \alpha_A \cdot A_{\alpha_A} \cdot M_A \text{ und} \\ C_{thermal} &= \alpha_T \cdot A_{\alpha_T} \cdot M_T. \end{aligned}$$

Der Anteil der am Sensor ankommenden, vom Objekt emittierten Thermalstrahlung einer bestimmten Wellenlänge kann mit Hilfe des PLANKSCHEN Strahlungsgesetzes in der Wellendarstellung zu

$$(10) \quad E_{\lambda,TH}(T) = \epsilon \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left[e^{\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right]} \cdot \left(\frac{R_{Objekt}}{r_{Sensor}} \right)^2$$

bestimmt werden, wobei r_{Sensor} die Entfernung von Objekt zum Sensor und R_{Objekt} den Radius eines kugelförmigen Objektes beschreibt. Die Einheit der emittierten Strahlung einer Wellenlänge ist somit $[W/(m^2 \cdot \mu m)]$.

3.3.2. Reflektierte Strahlung

Wie eingangs bereits erwähnt, ist für die Bestimmung der am Sensor eintreffenden reflektierten Anteile der Solar- Erdalbedo- und Erdthermalstrahlung die gesamte Konstellation von Sensor, Erde, Sonne und Objekt zu berücksichtigen. Die reflektierten Anteile unterliegen dabei einer Phasenfunktion $p(\theta_i)$, bei der der jeweilige Winkel θ der Winkel zwischen der am Objekt einfallenden Strahlung und dem Sensor ist. Es gilt:

$$(11) \quad p(\theta_i) = \frac{8}{3\pi} \cdot [\sin \theta_i + (\pi - \theta_i) \cdot \theta_i]$$

Um die Winkel mit Hilfe des Kosinussatzes zu ermitteln, sind vorab nur die Seitenlängen des Dreiecks Sensor-Objekt-Strahlungsquelle innerhalb der Simulationsumgebung zu bestimmen. Die vom Sensor empfangene, vom Objekt reflektierte Strahlung der drei genannten Strahlungsarten i berechnet sich zu:

$$(12) \quad E_{\lambda,i} = \frac{2}{3\pi} \cdot \left(\frac{R_{Objekt}}{r_{Sensor}} \right)^2 \cdot M_{\lambda,i} \cdot (1 - \alpha_i) \cdot [\sin \theta_i + (\pi - \theta_i) \cdot \theta_i]$$

Die drei Strahlungskomponenten $M_{\lambda,i}$ lassen sich ebenfalls mit Hilfe des PLANKSCHEN Strahlungsgesetzes ausdrücken. Für den Anteil der direkt von der Sonne auf das Objekt einfallende Solarstrahlung $M_{\lambda,S}$, den Strahlungsanteil für die Erdthermalstrahlung $M_{\lambda,T}$ und die Erdalbedostrahlung $M_{\lambda,A}$ ergibt sich demnach:

$$\begin{aligned} M_{\lambda,S} &= \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left[e^{\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T_S} \right)} - 1 \right]} \cdot \left(\frac{R_S}{r_{Objekt}} \right)^2 \\ M_{\lambda,T} &= 8 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left[e^{\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T_E} \right)} - 1 \right]} \cdot F_1 \\ M_{\lambda,A} &= 8 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left[e^{\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T_S} \right)} - 1 \right]} \cdot \left(\frac{R_S}{r_{Erde}} \right)^2 \cdot a_E \cdot F_2 \end{aligned}$$

4. Hintergrund-Signatur

Neben der in Kapitel 3 erläuterten Signatur eines Objektes, die auf einem Sensor abgebildet

wird, ist ferner auch die Signatur des Hintergrundes, vor dem das Objekt auf dem Sensor abgebildet wird, zu betrachten. Nur wenn die Signatur des Objektes größer ist als die des Hintergrundes, besteht die Möglichkeit einer erfolgreichen Detektion.

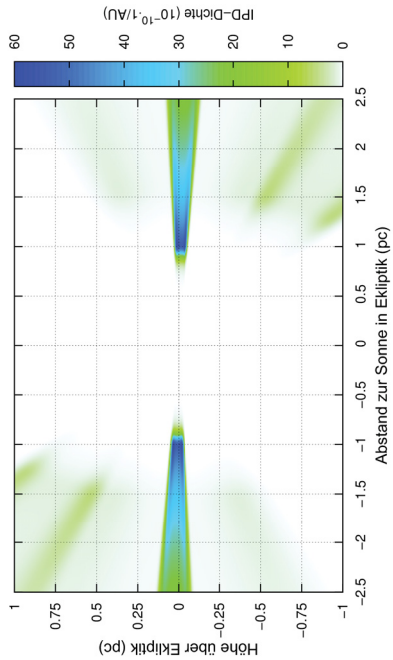
4.1. Zodiakallicht

Der Name *Zodiakallicht* besagt bereits, dass es sich hierbei um eine Strahlungsquelle handelt, welche in unmittelbarer Nähe zur Ekliptik, in der auch der Tierkreis (*Zodiak*) liegt, auftritt. Ursprung dieser Strahlung ist der interplanetare Staub, der aus dem Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter entsteht. Der Einfluss des solaren Strahlungsdruckes bewirkt ein Absinken der Partikel in Richtung der Sonne, was auch als POYNTING-ROBERTSON-Effekt bekannt ist [10]. Genau wie zuvor bei der Bestimmung der Signatur des Objektes, so ist die Signatur der Staubpartikel auch aus Thermalstrahlung und reflektierter Sonnenstrahlung zusammengesetzt, wobei die Thermalstrahlung dominiert [11]. Die Verteilung des interplanetaren Staubes beschränkt sich auf wenige astronomische Einheiten um die Sonne und prägt so eine diffuse Hintergrundstrahlung aus. Basierend auf den Daten der vierjährigen Vermessung des Zodiakallichtes (1989-1993) durch *DIRBE* (Diffuse Infrared Background Experiment) an Bord des Satelliten *COBE* (Cosmic Background Explorer), wurde eine Kartierung des Himmels durchgeführt. Zur Berechnung des Zodiakallichtes wird somit in Anlehnung an KELSALL auf das DIRBE-IPD-Modell zurückgegriffen (siehe auch [11]). Auf eine detaillierte Erläuterung soll daher an dieser Stelle verzichtet werden. Statt dessen werden die drei wesentlichen Quellen des Zodiakallichtes betrachtet. So hat sich gezeigt, dass neben einer *Hauptwolke*, drei *Staubbänder* und ein *zirkumsolarer Ring* aus interplanetarem Staub für die Entstehung des Zodiakallichtes verantwortlich sind. Die Hauptwolke besitzt eine Neigung gegen die Ekliptik von ca. $2,03^\circ$ mit dem aufsteigenden Knoten bei ca. $77,7^\circ$ und ist gegenüber den Staubbändern und dem zirkumsolaren Ring die dominierende Quelle des Zodiakallichtes. Wie in Abbildung 3 zu sehen, ist eines der drei Staubbänder deutlich

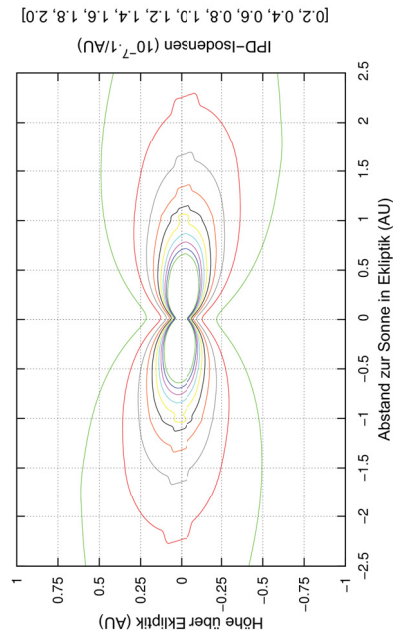
stärker ausgeprägt als die anderen beiden, wobei dieses Band in seiner Dichte immer noch um drei Größenordnungen unterhalb der Dichte der Hauptwolke liegt. Die Staubbänder sind darüber hinaus stärker gegen die Ekliptik geneigt. Der zirkumsolare Ring allerdings liegt sehr exakt in der Ekliptik, was dadurch begründet ist, dass die hierin enthaltenen Partikel von der Erde auf ihrer Bahn mitgezogen werden. Er hat daher die Form eines Torus, der sich in ca. 1 AU Entfernung von der Sonne auf der Erdbahn befindet und eine leichte Verdichtung hat, die der Erde im Abstand von ca. 10° ekliptischer Länge auf ihrer Bahn folgt. So ist zu erklären, dass bei Beobachtungen in tangentialer Richtung zur Erdbahn ein erhöhter Einfluss des Zodiakallichtes auftritt.

4.2. Interstellares Medium

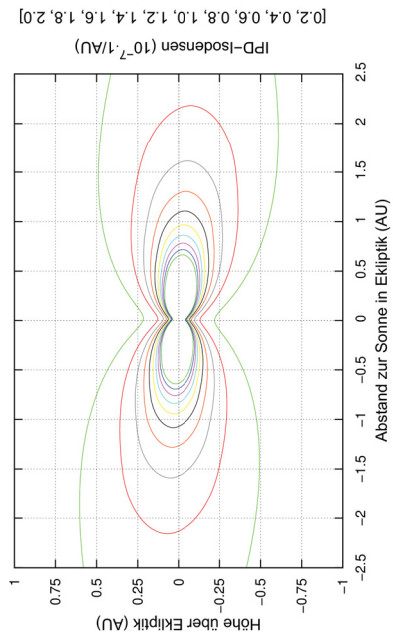
Analog zu den Partikeln, die sich zwischen den Planeten befinden und das *Zodiakallicht* verursachen, existiert auch zwischen den Sternen Materie, die als interstellares Medium (ISM) bezeichnet wird. In diesem Medium werden unterschiedliche Bereiche anhand ihrer Temperatur klassifiziert: 1) das kalte Medium ($T = 100\text{ K}$), 2) das warme Medium ($T = 10^4\text{ K}$) und 3) das heiße Medium ($T \geq 10^6\text{ K}$), welche genau wie der interplanetare Staub Strahlung streuen, absorbieren und emittieren. Nach [9] besteht das ISM hauptsächlich aus Gas [H_2 , H_I (neutral), H_{II} (ionisiert) und He], aber auch aus schwereren Elementen. Letztere streuen eher Strahlung aus der Umgebung während die Gase Strahlung eher emittieren (siehe auch Abschnitt 4.5) und absorbieren. Neben einer ungleichen Verteilung von Gasen und Molekülen unterschiedlichster Art und der generellen ungleichen Verteilung des ISM ist die Erstellung eines in sich geschlossenen, analytischen Modells an große Schwierigkeiten gebunden. Es wird daher ein vereinfachtes Modell verwendet [12]. Dieses Modell beinhaltet einige Vereinfachungen, die aber in diesem Zusammenhang akzeptiert werden, da die Signatur des ISM mit wenigen Ausnahmen von der des *Zodiakallichtes* überstrahlt wird. In Abbildung 4 (links) sind Messungen des ISM (vgl. [9] und [8]) zusammen mit den modellierten



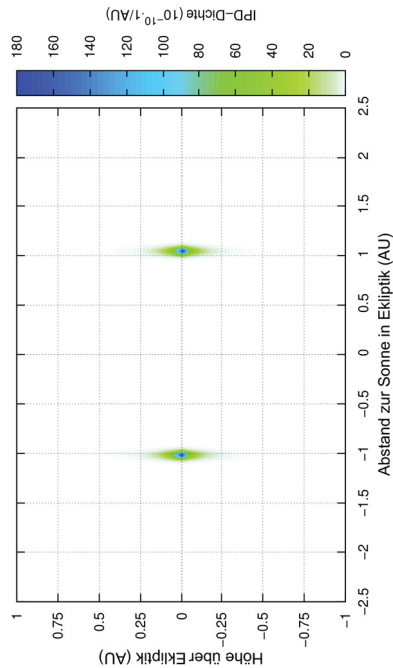
Staubbänder



Überlagerung von Hauptwolke, Staubbändern und zirkumsolarem Ring



Hauptwolke



zirkumsolarer Ring

Abbildung 3: Zusammensetzung der Dichteverteilung des Interplanetaren Staubs

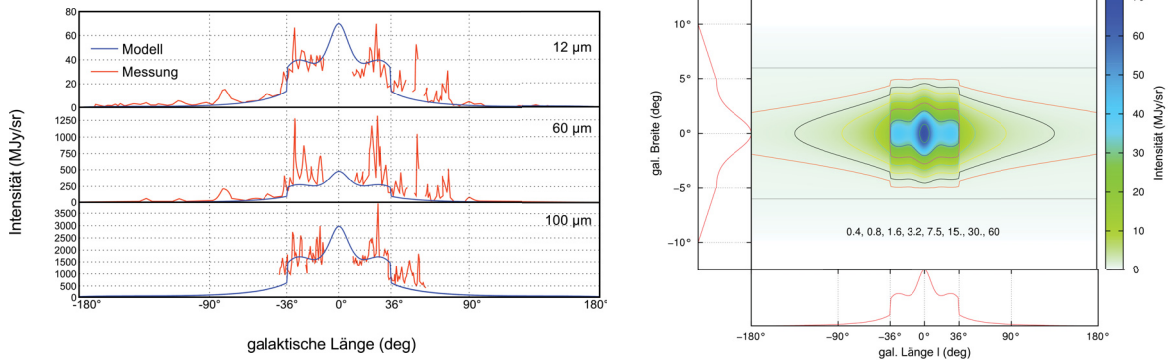


Abbildung 4: links: ISM in der galaktischen Ebene ($b = 0^\circ$), Messungen für $12\ \mu\text{m}$ [8], $60\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ [9]
rechts: ISM-Signatur der Milchstraße ($12\ \mu\text{m}$)

Werten abgebildet. Die Messdaten wurden durch DIRBE gewonnen und um die Anteile von Zodiaklicht und Sternenlicht gefiltert. Im Zentrum der Galaxie wird ein Maximum des ISM angenommen, was durch nicht vorhandene Messdaten in diesem Bereich allerdings nicht gestützt werden kann. Die Einheit, in der die Intensität des ISM bezogen auf einen Raumwinkel (Steradian, sr) angegeben wird, ist $[MJy/sr]$, wobei $1Jy = 10^{-26}W/(m^2 \cdot Hz)$ entspricht. Resultierend kann die ISM-Signatur der Milchstraße für unterschiedliche Wellenlängen basierend auf den Messdaten erstellt werden. In Abbildung 4 (rechts) ist exemplarisch der ISM-Signatur der Milchstraße für eine Wellenlänge von $12\ \mu\text{m}$ dargestellt.

4.3. Extragalaktische Hintergrundstrahlung

Die extragalaktischen Hintergrundstrahlung (im Infraroten speziell *Cosmic Infrared Background*) beinhaltet die gesamte elektromagnetische Strahlung aller extragalaktischen Quellen. Sie kann als diffus betrachtet werden und wurde durch das COBE-Experiment des IRAS-Satelliten vermessen. Aufgrund des geringen Anteils an der Gesamtstrahlung (weniger als 1%) kann es nur sehr schwer erfasst werden [10]. Dies ist auch der Grund, weswegen kein spezielles Modell zur Berechnung der extragalaktischen Hintergrundstrahlung implementiert wurde, sondern basierend auf einer Tabelle in Abhängigkeit der Wellenlängen die zu erwartenden Intensitäten ausgelesen und über das be-

$\lambda\ (\mu\text{m})$	$I_\lambda\ (\text{Jy/sr})$	$\lambda\ (\mu\text{m})$	$I_\lambda\ (\text{Jy/sr})$
1,25	$4,1 \cdot 10^3$	60	$4,4 \cdot 10^4$
2,2	$7,0 \cdot 10^3$	100	$1,3 \cdot 10^5$
3,6	$7,5 \cdot 10^3$	180	$2,4 \cdot 10^5$
6,7	$5,3 \cdot 10^3$	280	$2,5 \cdot 10^5$
12	$4,5 \cdot 10^3$	500	$1,8 \cdot 10^5$
25	$6,9 \cdot 10^3$	800	$9,3 \cdot 10^4$

Tabelle 1: Intensität des EBL in Abhängigkeit der Wellenlänge [13]

trachtete Spektrum integriert wird.

4.4. Planeten im Sonnensystem

Um die von den Planeten des Sonnensystems ausgehende diskrete Strahlung zu bestimmen, werden diese als schwarze Strahler abgebildet. Analog zum Vorgehen im optischen Performance Modell sollen auch im IR-Modell die Planeten nur ihre eigene Thermalstrahlung aussenden und keine Anteile von der Solarstrahlung oder anderen äußeren Einstrahlungen reflektieren. Eine vereinfachte Darstellung der Ausstrahlung der Planeten ist somit durch das PLANKSCHE Strahlungsgesetz unter Verwendung der Entfernung zwischen Planet und Sensor r , eines mittleren Planetenradius $R_{PL} = (R_{EQ} + R_{POL})/2$ und der effektiven Temperatur des Planeten möglich.

$$(13) \quad E_\lambda(T_{Eff}, r) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \left[e^{\frac{hc}{\lambda k T_{Eff}}} - 1 \right]} \cdot \left(\frac{R_{PL}}{r} \right)^2$$

Unter Verwendung der aus Tabelle 2 zu entnehmenden Werte lassen sich so die Ausstrahlungen der einzelnen Planeten berechnen [14].

Planet	$T_{Eff} (K)$	$R_{AQ} (km)$	$R_{POL} (km)$
Merkur	440	2439	2439
Venus	230	6051	6051
Mars	212	3397	3372
Jupiter	124,4	71462	66854
Saturn	95	60268	54364
Uranus	59,1	25559	24973
Neptun	59,3	24764	24341
Pluto	42	2390	2390

Tabelle 2: Effektivtemperaturen und Radien der Planeten des Sonnensystems

4.5. Stellarer Hintergrund

Die Sterne unserer Galaxie stellen neben den Planeten unseres Sonnensystems eine weitere diskrete Hintergrundstrahlung dar. Allerdings unterscheidet sich das Abbild unserer Galaxie im Infraroten deutlich von dem im sichtbaren Bereich. Während der IRAS-Mission wurde der IR-Himmel bei Wellenlängen von 12, 25, 60 und 100 μm vermessen und im IRAS *Point Source Catalog* zusammengefasst. Aus diesem Katalog wurde nach WAINSCOUT ein Modell zur statistischen Verteilung und Helligkeitsberechnung von 87 Sternklassen entwickelt [15] (siehe Abbildung 5). Zwar ist die Gültigkeit dieses Modells auf 8-25 μm beschränkt, doch ist eine Extrapolation unter geringen Abweichungen möglich. Insgesamt wird die Milchstraße in fünf Bereiche unterteilt:

- Galaktische Scheibe
- Bulge
- Spiralarme
- Molekularer Ring
- (Halo)

Das *Halo* wird im IR-Modell jedoch nicht weiter berücksichtigt. Das *interstellare Medium* schwächt

durch Absorption die von einem Sensor empfangene Strahlung des stellaren Hintergrundes insbesondere in der *galaktischen Scheibe* ab. Dabei ist die Absorption der eigentlichen Strahlung umso größer, je weiter der Weg der Strahlung durch das interstellare Medium ist. Dieser Vorgang wird nach [16] im Modell abgebildet.

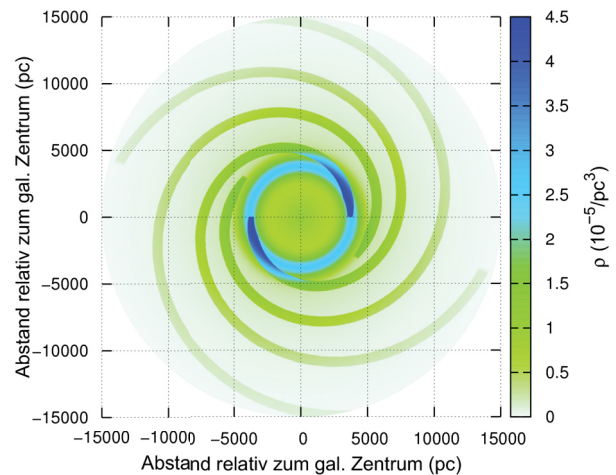


Abbildung 5: Verteilung der Sternanzahldichte einer von 87 Sternklasse (ohne Bulge)

5. Erste Resultate und Fazit

Erste Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Implementierung des IR-Modells erfolgreich verlaufen ist. Simuliert wurde ein orbitaler Sensor auf einer polaren Umlaufbahn mit von der Sonne abgewandtem Blick. Vergleiche zeigen eine Übereinstimmung bei den Objekten, die das Sensorblickfeld sowohl im zuvor simulierten sichtbaren Spektrum als auch im IR-Spektrum durchkreuzen. Ferner wird deutlich (vgl. Abbildung 6), dass durch das IR-Modell sowohl die Objekte erfasst wurden, die auch im sichtbaren Spektrum erfasst wurden, als auch Objekte von geringer Größe, die nicht durch im sichtbaren Spektrum erfassbar waren. Ein weiterer Vorteil eines IR-Sensors gegenüber einem Sensor, der im sichtbaren Bereich arbeitet, wird in Abbildung 7 deutlich. Hier sind besonders die Objekte hervorgehoben, die durch das IR-Modell erfasst wurden,

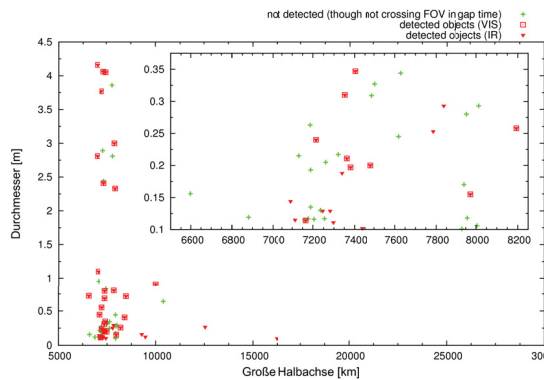


Abbildung 6: Vergleich der Sensormodelle für das sichtbare und infrarote Spektrum

während sie sich im Erdschatten befanden. In diesem Bereich besteht für einen Sensor im sichtbaren Spektrum keine Möglichkeit einer Detektion. Nach der somit im Ansatz erfolgreichen Im-

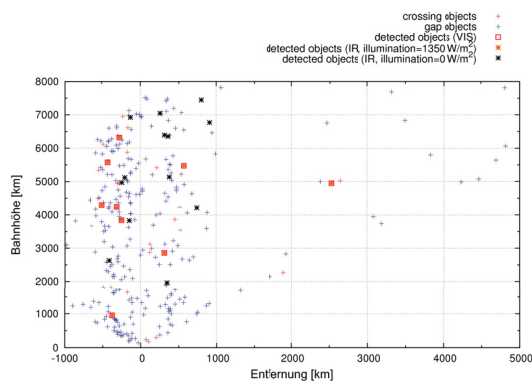


Abbildung 7: Erfassung von Objekten im Erdschatten

plementierung eines IR-Modells, muss dieses in weiteren Studien detailliert validiert werden. Sowohl das Modell als auch die verwendeten Objekteigenschaften (Absorptions- und Emissionskoeffizienten, etc.) für die unterschiedlichen Objektarten (Fragmente, Schlacke, NaK-Tropfen, etc.) müssen verifiziert werden. Es zeigt sich aber, dass ein IR-Sensor prinzipiell in der Lage zu sein scheint, eine größere Anzahl an kleineren Objekten erfassen zu können, als es mit optischen Sensoren im sichtbaren Spektrum der Fall ist.

6. Danksagung

Die diesem Paper zu Grunde liegenden Vorarbeiten entstanden in einer Diplomarbeit [12] und einer Studienarbeit [17] am Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme der Technischen Universität Braunschweig.

Literatur

1. **Messerschmid E., Fasoulas S.,** *Raumfahrtsysteme - Eine Einführung mit Übungen und Lösungen*, dritte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
2. **Wagemann H.-G.,** *Photovoltaik*, Teubner, 2007, pp. 7-18
3. **Baehr H.D., Stephan K.,** *Wärme und Stoffübertragung*, fünfte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, pp. 559-684
4. **Fourtescou P., Stark J., Swinerd G.,** *Spacecraft Systems engineering*, third edition, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, 2003
5. **Finch H.L., Sommerville D., Vogt R., Bland D.,** *A computer Program for calculating external thermal-radiation heat loads and temperatures of spacecraft orbiting the planets or the moon*, NASA TR R-278, Washington D.C., USA, 1968
6. **Cunningham F.G.,** *Earth reflected solar radiation input to spherical satellites*, NASA TN D-1099, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, USA, October 1961
7. **Lambert J., Morris R.,** *Space Surveillance Network Analysis Model (SSNAM Infrared Satellite Model)*, Boing, AFSPC Space Analysis Center
8. **Sodroski T.J., Odegard N., Arendt R.G., Dwek E., Weiland J.L., Hauser M.G.,** *A three-dimensional decomposition of the infrared emission from dust in the Milky Way*, The Astrophysical Journal, Volume 480, May 1997, pp. 173-187
9. **Sodroski T.J., Dwek E., Hauser M.G., Kerr F.J.,** *Dust energetics in the gas phases of the Interstellar Medium: The origin of the galactic large-scale Far-Infrared emission observed by IRAS*, The Astrophysical Journal, Volume 336, January 1989, pp. 762-779
10. **Murdin P.,** *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, Nature Publishing Group, 2001
11. **Kelsall T., Weiland J.L., Franz B.A., Reach W.T., Arendt R.G., Dwek E., Freudenreich H.T., Hauser M.G., Moseley S.H., Odegard N.P., Silverberg R.F., Wright E.L.,** *The COBE Diffuse Infrared Background Experiment Search for the Cosmic Infrared Background, II. Model of the Interplanetary Dust Cloud*, The Astrophysical Journal, Volume 508, November 1998, pp. 44-73
12. **Kopp A.,** *Infrarot-Detektion von Raumfahrtrückständen*, Diplomarbeit, Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme, Technische Universität Braunschweig, Mai 2008

13. **Franceschini A., Toffolatti L., Mazzei P., Danese L., de Zotti G.,** *Galaxy counts and contributions to the background radiation from $1\mu\text{m}$ to $1000\mu\text{m}$* , The Astrophysical Journal Supplement Series, 89, August 1991, pp. 285-310
14. **Lang K.R.,** *Astrophysical Data: Planets and Stars*, Springer-Verlag New York Inc., 1992
15. **Wainscoat R.J., Cohen M., Volk, K., Walker H.J., Schwartz D.E.,** *A model of the 8-25 micron point source infrared sky*, The Astrophysical Journal Supplement Series, 83, November 1992, pp. 111-146
16. **Mathis J.S.,** *Interstellar dust and extinction*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Volume 28, Palo Alto, California, 1990, pp. 37-70
17. **Schneider S.,** *Integrieren und Testen eine Infrarot-Modells zur Simulation von IR-Sensoren in PROOF*, Studienarbeit, Institut für Luft- und Raumfahrtssysteme, Technische Universität Braunschweig, Oktober 2009