

# Die Validierung der Space Debris Population von ESA-MASTER-2009

J. Gelhaus<sup>(1)</sup>, S. Flegel<sup>(1)</sup>, M. Möckel<sup>(1)</sup>, C. Wiedemann<sup>(1)</sup>, S. Stabroth<sup>(2)</sup>, M. Oswald<sup>(2)</sup>,  
H. Klinkrad<sup>(3)</sup>, P. Vörsmann<sup>(1)</sup>

- (1) Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme, Technische Universität Braunschweig,  
Hermann-Blenk-Str. 23, 38108 Braunschweig, Germany  
(2) Astrium GmbH - Satellites, 88039 Friedrichshafen  
(3) Space Debris Office, ESA/ESOC, Robert-Bosch-Str. 5, 64293 Darmstadt, Germany

## Abstract

In diesem Paper werden die Ansätze und Ergebnissen des Validierungsprozesses der MASTER-2009 Population auf Grundlage der bislang umfangreichsten Datenbasis aus dem vergangenen Jahrzehnt vorgestellt. So wurden erstmals Daten des EISCAT-Systems verwendet, um insbesondere spezielle Ereignisse in jüngerer Vergangenheit zu validieren. Weiterhin wurden die in MASTER-2005 zur besseren Validierung der realen Messwerte eingeführten künstlichen Ereignisse im Rahmen der Entwicklung von MASTER-2009 überarbeitet und aktualisiert. Neue Ereignisse wie z.B. die Kollision von Cosmos-2251 und Iridium-33 wurden zu den Ereignislisten hinzugefügt. Die Validierung der Kleinteil-Population wurde anhand von Resultaten durchgeführt, die aus der Analyse von aus dem Weltraum zurückgeführten Oberflächen gewonnen wurden. Beispielweise wurden die Solarflächen des Weltraumteleskops „Hubble“ durch die Missionen STS-61 und STS-109 zurückgeführt. Auch gab es spezielle Satelliten (LDEF, EuReCa), die den Bedingungen des Weltraums für eine gewisse Zeit ausgesetzt waren, und ebenfalls durch das Space Shuttle zur Erde zurückgeholt wurden.

## 1. Einleitung

Die Software MASTER-2009 (Meteoroid and Space Debris Terrestrial Environment Reference Model) wird das neue Referenzmodell der Europäischen Weltraumorganisation (ESA), um den Einfluss von Weltraummüll im Erdorbit darzustellen. Dieses Modell wird am Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme der Technischen Universität Braunschweig entwickelt und basiert auf der Simulation von Ereignissen und Prozessen, durch die Weltraummüll generiert wird. Diese Simulationsmodelle wurden im Einzelnen überprüft und verbessert, so dass eine möglichst genaue Simulation der Weltraummüllpopulation durchgeführt werden kann. Des Weiteren wurde eine neue Quelle eingeführt, welche

die Erzeugung von Objekten mit einem sehr hohen Flächen zu Massenverhältnis berücksichtigt. Die Validierung der Großteil-Population ist anhand von Resultaten aus Messkampagnen durchgeführt worden, die durch die Radaranlagen TIRA (Tracking and Imaging Radar) und EISCAT (European Incoherent Scatter) sowie durch das ESA Space Debris Telescope gewonnen wurden. Die Software PROOF (Program for Radar and Optical Observation Forecasting) wurde zu Validierungszwecken verwendet, um die Messkampagnen unter Einbeziehung der MASTER-2009 Population und entsprechenden Sensorparametern nachzusimulieren. Die Resultate der Simulation wurden schließlich durch die wahren Ergebnisse validiert.

## 2. Einführung in die Populationsgenerierung

Um die MASTER-Population zu erzeugen, so dass sie von der MASTER-Software verarbeitet werden kann, ist eine Vielzahl von kleinen und größeren Programmen notwendig, die die Informationen zu den Raumfahrtaktivitäten der vergangenen Jahrzehnte verarbeiten. Im Folgenden soll ein grober Einblick in diesen Prozess geben werden.

### 2.1 Datenquellen

Die MASTER-2009 Population basiert zum einen auf Daten von bekannten Objekten, die in unterschiedlichen Quellen gelistet sind, und auf simulierten Objekten, die anhand von Ereignislisten erzeugt werden. Bei den bekannten Objekten handelt es sich zum Großteil um Objekte des so genannten Two-Line-Element (TLE) Katalegs, der vom United States Strategic Command (USSTRATCOM) erstellt wird. Diese Daten werden benötigt, um die doppelt gemittelten Bahndaten bestimmter Objekte zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu erhalten. Des Weiteren werden der Satellite Situation Report (SSR) und Informationen aus ESAs DISCOS-Datenbank verwendet, um Objekte zu klassifizieren und die Objektgröße anhand des Radarquerschnitts abschätzen zu können. Aus Jonathan McDowell's Satellite Catalogue (SatCat) werden weiterhin Objektinformationen von Objekten gewonnen, die nicht im TLE-Katalog enthalten sind. Diese Datenbasis wird durch verschiedene Programme analysiert und schließlich werden die Informationen in zwei Dateien (\*.pop und \*.frx) pro Epoche zusammengestellt.

### Programm: tlegrep

Das Programm „tlegrep“ analysiert die TLE-Daten und den SSR und erzeugt Listen mit Objektinformationen zu Objekten, die zu den Epochen 1.Feb., 1.Mai, 1. Aug. und 1.Nov. eines jeden Jahres im Orbit waren.

### Programm: unknowns

Daten zu Objekten, die nicht im TLE-Katalog enthalten sind, generiert das Programm *unknowns*, sofern Daten im SatCat enthalten sind. Der Grund für das Fehlen der Objektdaten im TLE-Katalog kann zum Beispiel sein, dass diese Objekte erst sehr viel später nach ihrer Entstehung in den TLE-Katalog eingefügt worden sind.

### Programm: tleget

Dieses Programm fügt die bislang erzeugten Daten der Programme *tlegrep* und *unknowns* mit den Daten aus ESAs DISCOS-Datenbank zusammen. Die resultierenden Dateien werden dabei in dem so genannten „SIM-File“-Format erstellt.

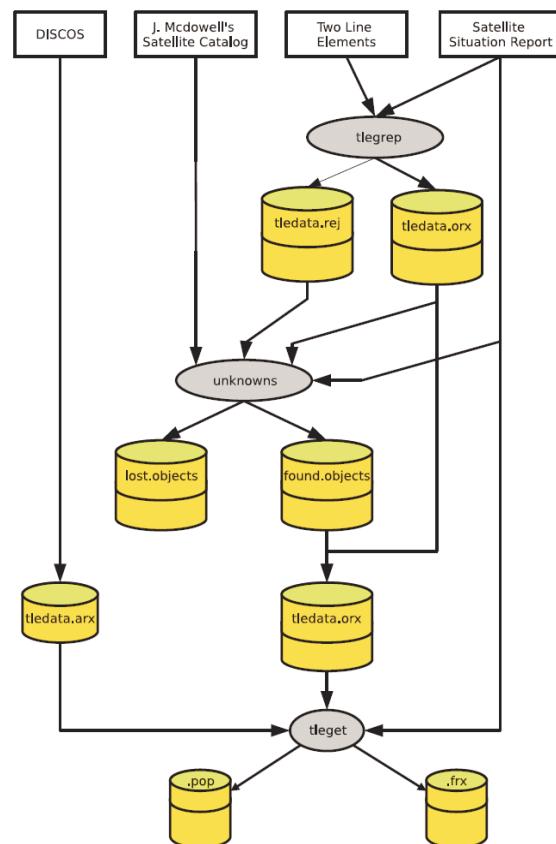


Abbildung 2-1: Verfahren zur Erstellung der Population bekannter Objekte

In diesem Format wird auch die Rohpopulation von den Modellen zur Weltraummüllerzeugung ausgegeben. In den Dateien werden zum einen die Start- und Missionsbedingten Objekte (\*.pop) und die Fragmente aus Explosionen und Kollisionen (\*.frx) gelistet.

## 2.2 Simulation und Finalisieren der Population

Die Modelle zur Erzeugung der einzelnen Arten des Weltraummülls sind in dem Programm POEM (Program for Orbital Environment Modeling) zusammengefasst. Es werden insgesamt zehn unterschiedliche Arten simuliert:

1. Explosionsfragmente
2. Kollisionsfragmente
3. Feststoffmotor-Staub
4. Feststoffmotor-Schlacke
5. Natrium-Kalium Tropfen
6. Farbpartikel, blättern durch Alterungsprozesse ab
7. Auswurfmateriale, hervorgerufen durch Einschläge von Kleinstpartikeln
8. Start- und Missionsbedingte Objekte
9. Fragmente von Mehrschichtisolationsfolien
10. Delamierte Mehrschichtisolationsfolie

Bevor diese Daten weiterverarbeitet werden können sind erneut einige kleinere Programme notwendig. Die Simulation der start- und missionsbedingten Objekte (LMRO) umfasst lediglich die Objekte des „Westford-Needles“-Projektes. Diese Resultate werden mit den \*.pop-Dateien des Programms *tleget* zusammengeführt. Die resultierenden \*.mrg-Dateien werden für die Simulation der Farbpartikel, des Auswurfmaterials und der delaminierten Mehrschichtisolationsfolie benötigt, da sie die Objekte enthalten, von denen sich Farbe oder Folie ablösen kann. Die Simulation der Explosions- und Kollisionsfragmente wird durch das Programm *tlecor* mit den Fragmenten aus den \*.frx-Dateien korreliert. Das bedeutet, dass die Daten von simulierten Objekten durch reale Objektdaten ersetzt werden, sofern sich die Bahnparameter nach einem zuvor festgelegten Muster ähneln. Die vier Quellen Feststoffmotor-Staub und -Schlacke, Natrium-Kalium Tropfen sowie Fragmente von Mehrschichtisolationsfolie können direkt anhand von Ereignislisten simuliert werden.

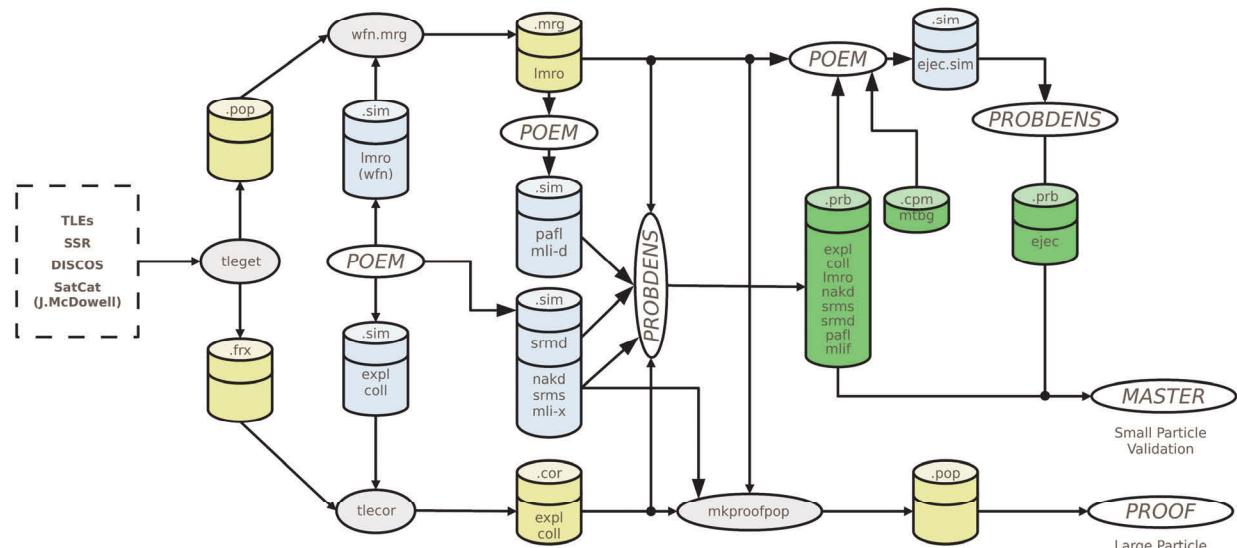


Abbildung 2-2: Prozess zur Generierung der MASTER-Population

### 2.3 Erstellen von Wahrscheinlichkeitstabellen

Das Erstellen von Wahrscheinlichkeitstabellen ist notwendig, um die simulierten Daten mit Hilfe von MASTER verarbeiten zu können. Dabei ist die Erstellung der Wahrscheinlichkeitstabellen bereits im Rahmen der Populationserzeugung notwendig. Die noch ausstehende und komplexeste Simulation muss für die Quelle des Auswurfmaterials durchgeführt werden. Hierzu ist es notwendig, zunächst mit dem Programm PROBDENS aus den bisher simulierten Quellen Wahrscheinlichkeitstabellen zu erzeugen. Diese enthalten die Wahrscheinlichkeiten, mit denen sich die einzelnen Objekte in bestimmten Bereichen, in die das Volumen um die Erde aufgeteilt ist, aufhalten. (Für weitergehende Informationen sei hier auf den Abschlussbericht der MASTER-Software verwiesen [3].). Dieser Schritt ist notwendig, um MASTER innerhalb von POEM für jedes einzelne LMRO-Objekt aufzurufen. Hierbei wird ein Partikelfluss ermittelt, der für die Erzeugung des Auswurfmaterials benötigt wird. Je größer der Partikelfluss desto mehr Material wird ausgeworfen.

## 3. Aktualisierung der Ereignislisten

Wie schon angesprochen basieren die Modelle, mit denen die Simulationen zur Erzeugung des Weltraummülls durchgeführt werden, auf Ereignislisten. Diese wurden im Rahmen von MASTER-2009 erweitert und aktualisiert. Neben neuen Ereignissen, die seit 2005 stattfanden, wurden auch Parameter von älteren Ereignissen im Rahmen des Validierungsprozesses angepasst.

### 3.1 LMRO-Population (\*.pop)

Für MASTER-2009 wurde die gesamte Historie der LMRO-Objekte neu zusammengestellt. Hierdurch konnte unter anderem der in Abbildung 3-1 gezeigte Sprung im Jahr 2001 aus MASTER-2005 behoben werden. Dieser Sprung kam zustande, da für MASTER-2005 lediglich die seit der

vorletzten Version MASTER-2001 neu entstandenen LMRO-Objekte hinzugefügt wurden. Weiterhin wurden kleinere Ungenauigkeiten im Rahmen der Erstellung der LMRO-Population behoben.

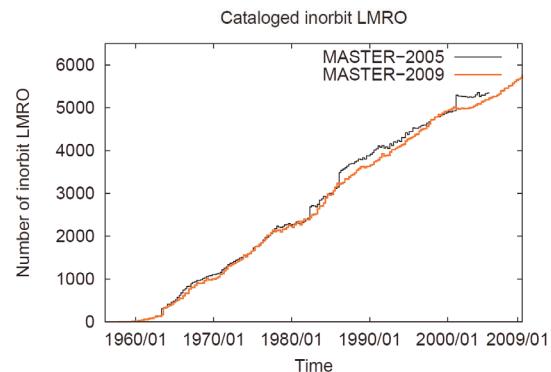


Abbildung 3-1: Verlauf der historischen LMRO-Population

### 3.2 Fragmentations-Population (\*.frx)

Auch die Fragmentations-Population wurde für den gesamten Zeitraum seit 1957 überarbeitet und um 32 neue Fragmentationen erweitert. Kleinere Ungenauigkeiten wurden behoben, so dass sich der jetzige Verlauf der Anzahl der Fragmentations-Objekte pro Epoche relativ deutlich von dem Verlauf aus MASTER-2005 unterscheidet. Der wesentliche Unterschied ist darin begründet, dass einige Fragment-Gruppen als initiales Datum das Start-Datum nicht aber das Datum der Fragmentation zugewiesen bekamen. Der deutliche Anstieg der Fragmente pro Epoche ab 2007 ist auf das Feng-Yun-Ereignis [4] zurückzuführen.

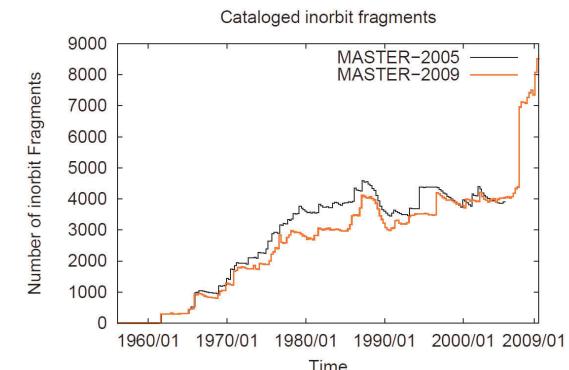


Abbildung 3-2: Verlauf der historischen Fragment-Population

### 3.3 Feststoffmotorzündungen

Die Liste der Feststoffmotorzündungen wurde basierend auf einer ESA-Liste von 2001-2009 für den Zeitraum von 2001-2005 überarbeitet und um die Ereignisse seit 2005 erweitert. Weiterhin wurden Zündungen von russischen Feststoffmotoren von Wiedereintrittskapseln erstmals berücksichtigt [1]. In Abbildung 3-3 sind für die jeweiligen Epochen die Zündungshöhen aufgetragen.

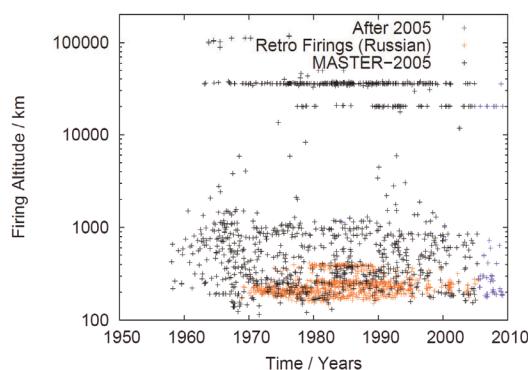


Abbildung 3-3: Zeitpunkt und Höhe von historischen Feststoffmotorzündungen

Es ist deutlich zu sehen, dass zwischen 1970 und Mitte der 90er Jahre eine große Anzahl (843 Zündungen) an russischen Feststoffmotorzündungen stattgefunden hat. So werden für MASTER-2009 insgesamt 1965 Feststoffmotorzündungen berücksichtigt.

## 4. Validierung der MASTER-2009 Population

Zunächst soll kurz auf das Validierungskonzept eingegangen werden. Es kann in zwei Teile unterteilt werden. Zum einen in die Großteil-Validierung, die mit Hilfe der Software PROOF durchgeführt wird, und zum anderen in die Kleinteil-Validierung, bei der MASTER selbst angewendet werden kann. Grundlage für beide Schritte sind die Modelle zur Simulation der Weltraummüll-Population. Wie in Abbildung 2-2 und Abbildung 4-1 dargestellt werden hiermit zwei unterschiedlich formatierte Referenz-Populationen erzeugt, die auf der einen Seite durch PROOF und auf der anderen Seite durch MASTER analysiert

werden. Während PROOF Informationen über die Detektion eines Objektes durch das Nachbilden von Sensoren bereitstellt und diese Resultate mit den Ergebnissen realer Messkampagnen verglichen werden, erzeugt MASTER Informationen über den Partikelfluss auf die Oberflächen eines Raumfahrzeugs, die auf Grundlage der Analysen von zurückgeführten Oberflächen (LDEF, HST, EuReCa) validiert werden.

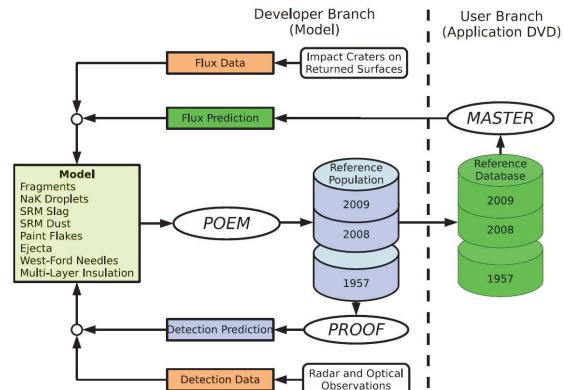


Abbildung 4-1: Validierungsprozess für die MASTER-Population

Einige Iterationsschritte mit kleinen Änderungen sind ggf. notwendig, um eine zufrieden stellende Population zu erzeugen.

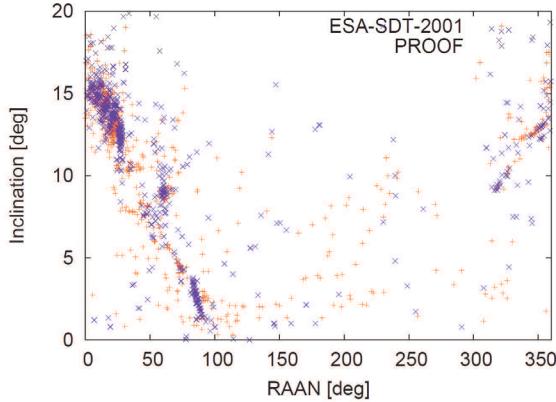
### 4.1 Großteilvalidierung

Die Großteilvalidierung erfolgte anhand von Messkampagnen, die in den letzten zehn Jahren von drei Sensoren durchgeführt wurden. Dabei handelt es sich zum einen um das Großradar TIRA des jetzigen Fraunhofer-FHR, um das Space Debris Telescope der ESA und um verschiedene Sensoren des EISCAT-Netzwerkes. Die Untergrenze der hiermit detektierten Objekte liegt bei ca. 5 cm in LEO und bei ca. 50 cm in GEO.

### ESA-SDT

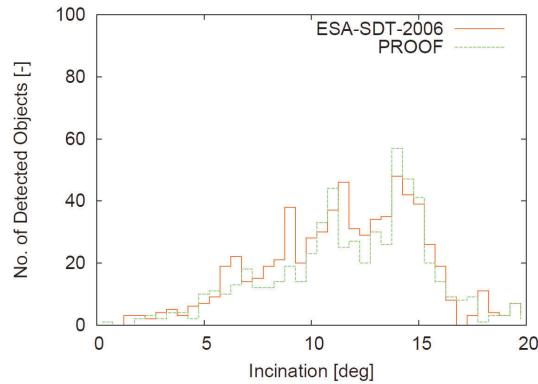
Anhand der Daten, die durch das ESA-Space Debris Telescope (ESA-SDT) ab dem Jahr 2001 erzeugt wurden, konnte die Validierung der GEO und GTO Population durchgeführt werden. Das ESA-Teleskop ist ein 1m Zeiss Teleskop mit einem Blickfeld von 0.7° und einer CCD mit 4096x4096 Pixel. In Abbildung 4-2,

Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4 sind einige Grafiken des Validierungs-Prozesses abgebildet. Dabei sind jeweils die realen Messdaten und die mittels PROOF simulierten Messdaten zusammen aufgetragen.



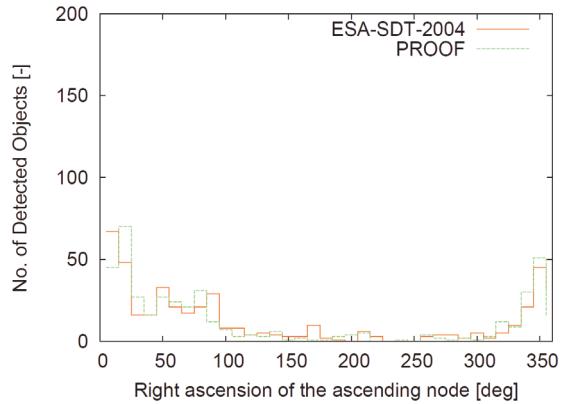
**Abbildung 4-2:** Validierungsresultate für ESA-SDT Messungen des Jahres 2001 (Inklination über der Rektaszension des aufsteigenden Knotens)

Im Streudiagramm in Abbildung 4-2 ist eine gute Abdeckung zu erkennen. Einige Events sind als zusammenhängende Wolken zu erkennen. In den Messdaten zeigt sich diese Kompaktheit nicht in der Deutlichkeit, da unter anderem nur eine grobe Bahnbestimmung für die detektierten Objekte durchgeführt werden kann.



**Abbildung 4-3:** Validierungsresultate für ESA-SDT Messungen des Jahres 2006 (Anzahl der Detektionen über der Inklination)

Ebenfalls wird der Bereich zwischen  $100^\circ$  und  $300^\circ$  Rektaszension des aufsteigenden Knotens durch die Weltraummüllquelle der Mehrschichtisolationsfolien mit Objekten mit hohen Flächen zu Massen Verhältnissen statistisch abgedeckt.

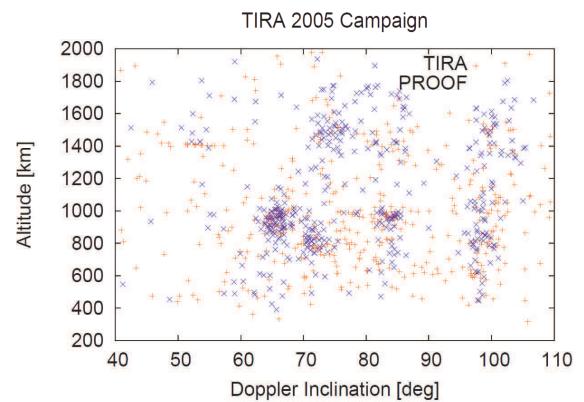


**Abbildung 4-4:** Validierungsresultate für ESA-SDT Messungen des Jahres 2004 (Anzahl der Detektionen über der Rektaszension des aufsteigenden Knotens)

In Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4 sind exemplarisch zwei Histogramme für zwei Epochen abgebildet. Auch hier zeigt sich eine gute statistische Abdeckung der gemessenen Population.

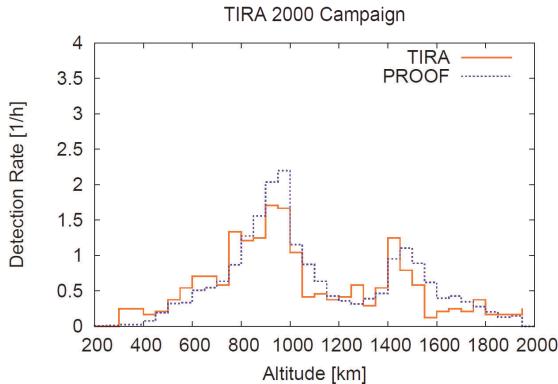
## TIRA

Für die Validierung der Weltraummüll-Population auf niedrigen Bahnen werden Messkampagnen des Großradars TIRA verwendet. Dieses führt seit mehr als zehn Jahren so genannte Beam-Park-Experimente durch, bei denen das Radar für 24 Stunden bei hoher Elevation in Richtung Osten ausgerichtet ist. Für die Validierung wurden Resultate von acht Messkampagnen verwendet.



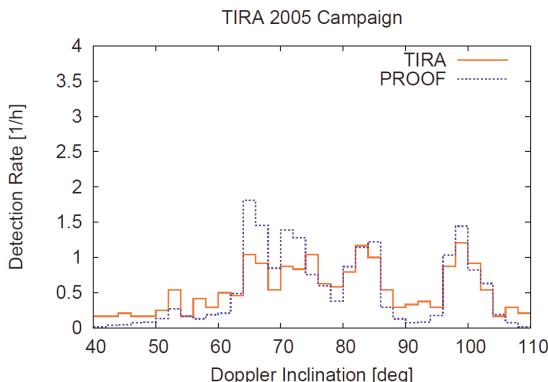
**Abbildung 4-5:** Validierungsresultate für TIRA Messungen des Jahres 2005 (Höhe über Doppler-Inklination)

Bei allen Messkampagnen war das Blickfeld  $0,5^\circ$  und die Sendefrequenz lag bei 1,33 GHz.



**Abbildung 4-6:** Validierungsresultate für TIRA Messungen des Jahres 2000 (Mittlere Anzahl der Detektionen pro Stunde über der Höhe der Detektion)

In Abbildung 4-6 ist die mittlere Anzahl der Detektionen über der Höhe des Objektes zum Zeitpunkt der Detektion dargestellt. Es sind sehr gut die zwei Regionen bei ca. 900km und bei ca. 1400 km zu erkennen, in denen die größte Ansammlung an Weltraummüll vorliegt. Der Verlauf der aus den TIRA Messungen gewonnenen Kurve wird durch die PROOF-Simulationen der MASTER-2009 Population sehr gut nachgebildet. Ebenso zeigt sich in Abbildung 4-7, in der die mittlere Anzahl der Detektionen pro Stunde über der gemessenen Doppler Inklination aufgetragen ist, dass auch diese Messwerte durch die Simulation sehr gut nachgebildet werden können.

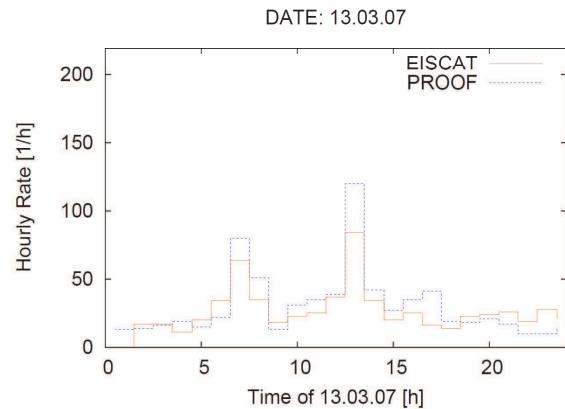


**Abbildung 4-7:** Validierungsresultate für TIRA Messungen des Jahres 2005 (Mittlere Anzahl der Detektionen pro Stunde über der Doppler-Inklination)

## EISCAT

Erstmals wurden für die Validierung einer MASTER-Population umfangreiche Daten des EISCAT-Netzwerkes verwendet. Ins-

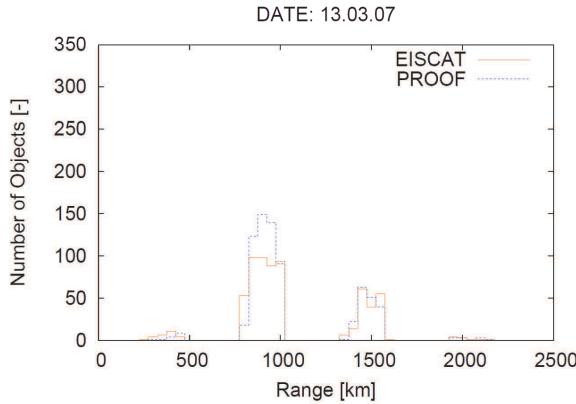
gesamt standen Daten aus mehr als 2.400 Stunden Beobachtungszeit zur Verfügung [5]. In den folgenden Abbildungen wurde beispielhaft der 13.03.2007 aus der Vielzahl von Datensätzen gewählt. Dieses Datum liegt zudem nur kurze Zeit nach dem chinesischen Antisatelliten-Test. Dieser konnte im Rahmen von MASTER-2009 wie kein anderes Ereignis zuvor validiert werden, da über das gesamte Jahr 2007 eine Vielzahl von Messkampagnen durchgeführt wurden.



**Abbildung 4-8:** Validierungsresultate für EISCAT Messungen vom 13.03.2007 (Anzahl der Detektionen über der Zeit)

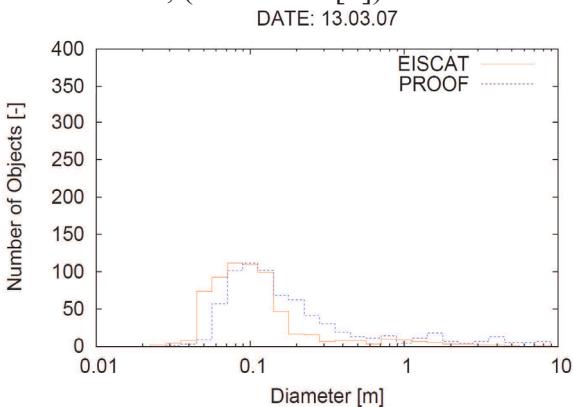
Abbildung 4-8 zeigt die Anzahl der Detektionen pro Stunde über der Zeit für den 13.07.2007. Neben der guten Abdeckung der Messdaten ist im Detail auch die Trümmerwolke des zerstörten Feng-Yung Satelliten [4] bei 7 Uhr und 13 Uhr durch eine erhöhte Detektionsrate zu erkennen. Die vermeintlich zu hohe Anzahl an Detektionen in der Simulation ist hierbei kein Fehler, sondern resultiert daraus, dass ein Radarsensor die Trümmer einer jungen, noch kompakten Trümmerwolke nicht einzeln auflösen und detektieren kann. In der Simulation wird hingegen jedes Objekt einzeln auf seine Detektierbarkeit hin untersucht. Daher ist die Anzahl der Trümmer, die bei dem Ereignis entstanden sind, angemessen simuliert. So wird es auch bei der Berücksichtigung von Messdaten zu einem späteren Zeitpunkt deutlich. In Abbildung 4-9 ist die Anzahl der Detektionen über der gemessenen Entfernung aufgetragen. Auch hier zeigt sich eine gute Abdeckung der Messwerte durch die Simu-

lation. Ebenfalls ist die scheinbar zu hohe Anzahl an Detektionen im Bereich von 900 km zu erkennen. Diese Entfernung entspricht der des chinesischen Antisatelliten-Tests.



**Abbildung 4-9:** Validierungsresultate für EISCAT Messungen vom 13.03.2007 (Anzahl der detektierten Objekte über der Entfernung)

Abbildung 4-10 stellt die Größenverteilung der detektierten Objekte dar. Der prinzipielle Verlauf kann sehr gut nachgebildet werden. Jedoch ist ein leichter Versatz zu größeren Durchmessern in den Simulationsergebnissen zu erkennen. Allerdings ist die Ermittlung des Objektdurchmessers immer mit Ungenauigkeiten behaftet, da zum einen taumelnde Objekte mal eine größere, mal eine kleinere Radarquerschnittsfläche haben, und zum anderen der wahre Durchmesser aus der Radarquerschnittsfläche auch nur annähernd ermittelt werden kann, (siehe auch [2]).

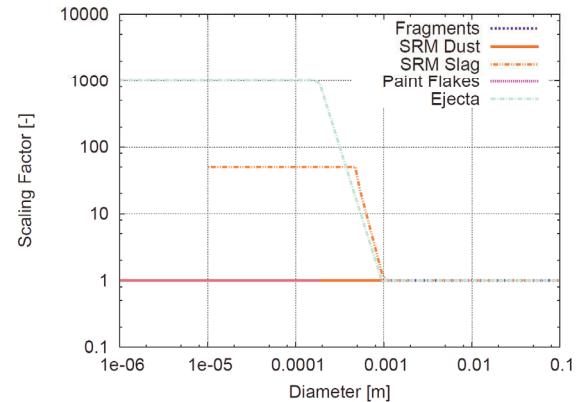


**Abbildung 4-10:** Validierungsresultate für EISCAT Messungen vom 13.03.2007 (Anzahl der detektierten Objekte über dem Objektdurchmesser)

Dennoch ist das Ergebnis der simulierten Größenverteilung ein gutes Abbild der realen Messungen.

## 4.2 Kleinteilvalidierung

Die Kleinteilvalidierung kann für Partikel kleiner 1mm durchgeführt werden. Als Grundlage dienen Oberflächen, die in der Vergangenheit den Bedingungen des Weltraums ausgesetzt waren und anschließend wieder zur Erde zurückgeholt wurden. Um die Ergebnisse des Validierungsprozesses zu erzeugen, wie sie in den folgenden Abschnitten gezeigt werden, wurden einige Weltraummüllarten skaliert, wie auch bei vorangegangenen MASTER Versionen.



**Abbildung 4-11:** Skalierungsfaktoren für MASTER-2009

Diese Skalierungsfaktoren konnten allerdings sowohl für Feststoffmotor-Schlacke (SRM slag) als auch für die Auswurpartikel (Ejecta) reduziert werden. Für alle anderen Arten ist eine Skalierung nicht notwendig.

## LDEF

Die wichtigste Datenquelle für die Validierung des Kleinteilbereiches sind die Ergebnisse der LDEF (Long Duration Exposure Facility) Mission. LDEF war von April 1984 bis zum Januar 1990 auf einer erdnahen Umlaufbahn zwischen 300 und 600 km. Nicht zuletzt anhand der Daten dieser Mission konnten die Parameter der zusätzlichen russischen Feststoffmotorzündungen (vgl. Kapitel 3.3) validiert werden. Der Satellit LDEF hatte eine Vielzahl unterschiedlicher Außenflächen und war gravitationsgradientenstabilisiert. Dadurch ist es möglich den Richtungseinfluss von Partikeleinschlägen zu berücksichtigen. In Abbildung 4-12 sind die Partikelflüsse auf

die LDEF Südseite für MASTER-2005 (oben) und MASTER-2009 (unten) über dem ballistischen Limit aufgetragen. Das ballistische Limit ist dabei die Dicke einer Platte, die die einschlagenden Partikel maximal durchschlagen würden. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch die Berücksichtigung der zusätzlichen 843 russischen Feststoffmotorzündungen eine erhebliche Verbesserung im Kleinstteilbereich erreicht werden konnte.

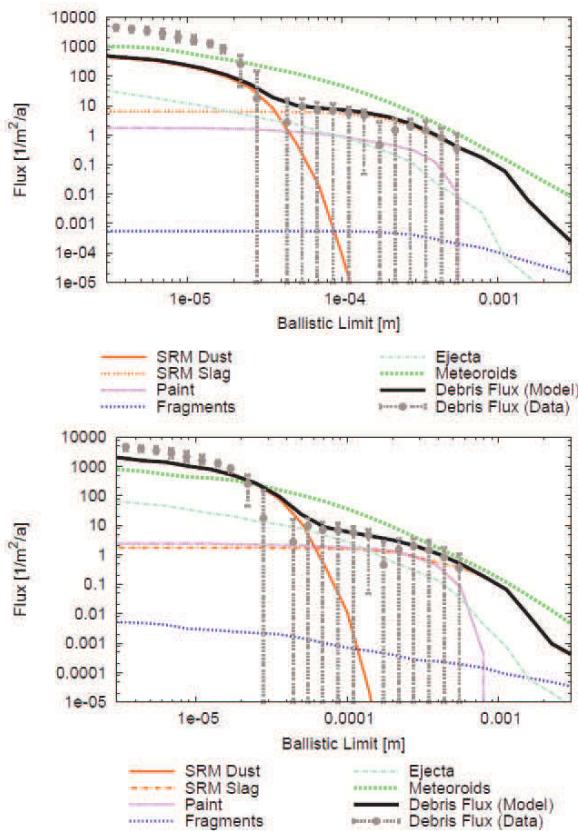


Abbildung 4-12: Partikelfluss über dem ballistischen Limit für die Südseite von LDEF (oben: MASTER-2005, unten: MASTER-2009)

Allerdings haben die zusätzlichen Zündungen keinen Einfluss auf die heutige Weltraummüllpopulation, da die freigesetzten Teilchen binnen weniger Monate in der Erdatmosphäre verglühten. Jedoch kann anhand der historischen Daten das Modell zur Erzeugung von Klein- und Kleinstteilen validiert werden, so dass angenommen werden kann, dass die heutige Population in guter Näherung nachsimuliert wird.

## HST

Das Hubble-Space-Telescope wurde während seiner mehr als 20-jährigen Missionsspanne für mehrere Wartungsmissionen durch das Space Shuttle angeflogen. Dabei wurden unter anderem im Jahr 1993 und 2002 die Solar-Arrays ausgetauscht und zur Erde zurückgebracht. Die Auswertung der von 1993 bis 2002 im Orbit befindlichen Solar-Arrays ist in Abbildung 4-13 zu sehen.

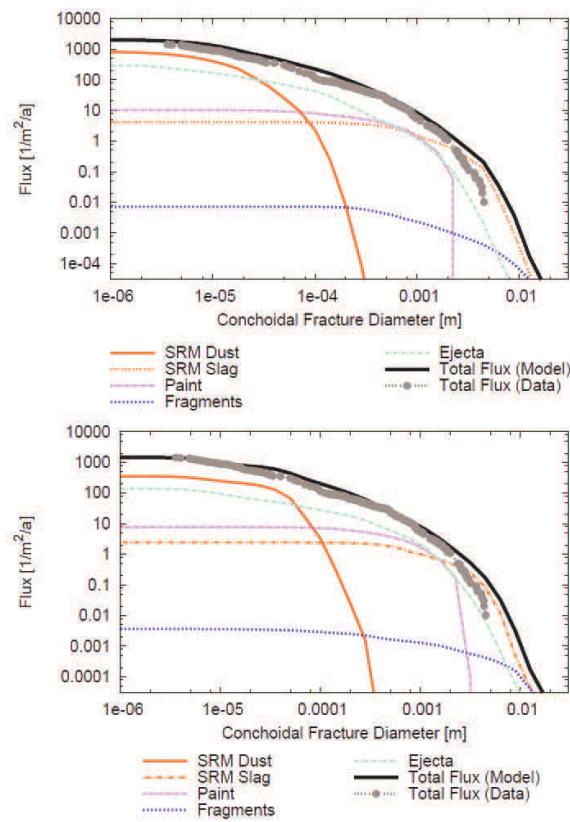


Abbildung 4-13: Partikelfluss über dem Kraterrand für die Solarzellen (1993-2002) des HST (oben: MASTER-2005, unten: MASTER-2009)

Ein Vergleich mit den Ergebnissen von MASTER-2005 zeigt, dass keine wesentlichen Veränderungen auftreten. Ein Einfluss der zuvor schon angesprochenen zusätzlichen Feststoffmotorzündungen ist wie erwartet nicht zu erkennen. Der gemessene (graue Punkte) und der simulierte (schwarze Linie) Gesamtfluss stimmen weiterhin sehr gut überein.

## EuReCa

Als dritte Quelle für die Kleinteilvalidierung stehen Daten der EuReCa (European Retrievable Carrier) Mission (1992-1993) zur Verfügung. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-14 dargestellt. Erneut ist eine gute Abdeckung der realen Messdaten zu erkennen. Leichte Unterschiede in der Modellierung einzelner Weltraummüllquellen führen nicht zu einer deutlichen Änderung des Gesamtflusses.

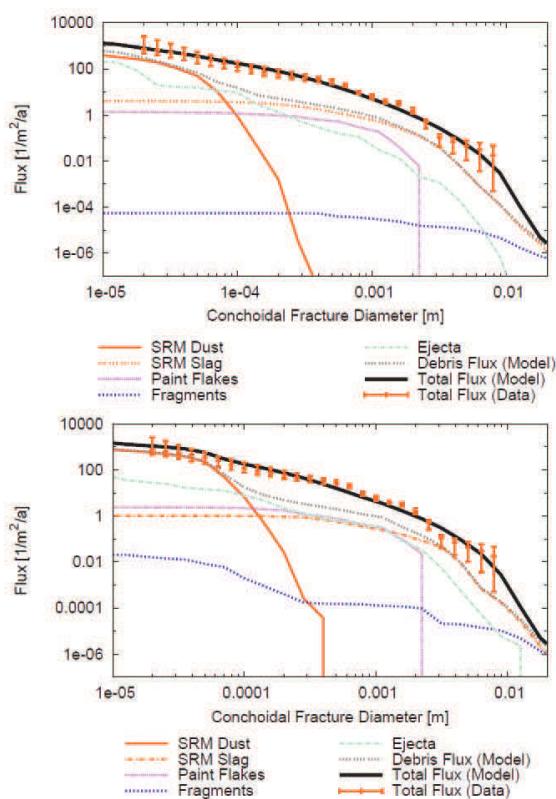


Abbildung 4-14: Partikelfluss über dem Kradurchmesser der EuReCa Mission (oben: MASTER-2005, unten: MASTER-2009)

## 5. Zusammenfassung

Die Prozesse der Populationserzeugung und -validierung wurden in den ersten Abschnitten aufgezeigt. Eine Vielzahl von Quellen wird verwendet, um zunächst eine Population der bekannten Objekte und dann eine Population der simulierten Objekte auf Grundlage von Ereignislisten zu erstellen und schließlich beide miteinander zu verbinden. Die so erstellte Gesamtpopulation wird auf zwei unterschiedliche Arten validiert. Zum einen werden die größeren Objekte ( $> 1\text{cm}$ ) anhand von Daten aus

Messkampagnen mit Teleskopen und Radaren validiert. Dabei werden die Messkampagnen detailliert mit Hilfe eines speziellen Programms (PROOF) nachsimuliert. Zum anderen wird der Kleinteilbereich ( $< 1\text{mm}$ ) anhand von Ergebnissen aus der Analyse von zurückgeführten, dem Weltraum ausgesetzten Oberflächen durchgeführt.

Es wurde gezeigt, dass durch die komplette Neuerstellung der Datengrundlage und der Erweiterung und Aktualisierung der Ereignislisten eine Population erstellt werden konnte, die die reale Weltraummüllumgebung sehr gut nachbilden sollte.

## Danksagungen

Die in diesem Paper vorgestellten Ergebnisse und Verfahren sind im Rahmen des ESA-Projektes „Maintenance of the ESA MASTER model“ (Kontrakt-Nr.: 21705/08/D/HK) entstanden.

## Literaturangaben

- [1] S. Stabroth, „Dust Particle Impacts due to Re-entry Firings of Solid Rocket Motors“, Shaker Verlag, 2009, Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme, Technische Universität Braunschweig, ZLR-Forschungsbericht 2009-06
- [2] S. Flegel, P. Krisko, et al., „Modeling the Space Debris Environment with MASTER-2009 and ORDEM2010“, COSPAR 2010 in Bremen, PEDAS1-0012-10
- [3] M. Oswald, S. Stabroth, C. Wiedemann, P. Wegener, C. Martin, H. Klinkrad, „Upgrade of the MASTER Model - Final Report“, ESA Kontrakt Nummer 18014/03/D/HK(SC), April 26, 2006
- [4] C. Wiedemann, S. Stabroth, M. Oswald, P. Vörsmann, „Der chinesische Satellitenabschuss und seine Folgen“, Raumfahrt Concret 1/2007, S. 24
- [5] <http://www.eiscat.com/spade/index.html>, Zugriff im Oktober 2009