

SPACE DEBRIS PARTIKELFLUSSANALYSEN MIT MASTER-2005

C. Wiedemann^{*1}, M. Oswald¹, S. Stabroth¹, H. Klinkrad², P. Vörsmann¹

¹Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme, ILR, Technische Universität Braunschweig,
Hermann-Blenk-Str. 23, 38108 Braunschweig

²Space Debris Office, ESA/ESOC, Robert-Bosch-Str. 5, 64293 Darmstadt

1. ÜBERSICHT

Es werden die Ergebnisse von Flussanalysen für Weltraummüllpartikel und Meteoriten auf Satelliten auf verschiedenen Umlaufbahnen präsentiert. Das Ziel ist, die Analyse des Einschlagsrisikos mit einer Schätzung der Durchschlagswahrscheinlichkeit für einen bestimmten Wandaufbau zur verknüpfen. Die Einschlagswahrscheinlichkeit ist ein Ergebnis des Flusses von Weltraummüllpartikeln auf einer bestimmten Umlaufbahn, zuzüglich des natürlichen Meteoritenflusses. Für die Bestimmung des Partikelflusses wird das europäische MASTER (Meteoroïd and Space Debris Terrestrial Environment Reference) Modell verwendet. Die neueste Version dieses Modells, MASTER-2005, wurde von einem Konsortium unter ESA/ESOC-Vertrag entwickelt. Das Konsortium wurde vom Institut für Luft- und Raumfahrtssysteme der Technischen Universität Braunschweig geleitet. MASTER-2005 wurde in Kooperation mit QinetiQ (UK) entwickelt, unterstützt durch die Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften FGAN und das Astronomische Institut der Universität Bern AIUB (Schweiz). MASTER-2005 basiert auf einer validierten Debris-Population, die alle Partikel auf Erdumlaufbahnen mit einem Durchmesser größer als einem Mikrometer berücksichtigt. Die Ergebnisse der mit MASTER durchgeföhrten Flussanalysen zeigen, dass auf erdnahen Umlaufbahnen mit zahlreichen Einschlägen von Kleinstpartikeln auf Satellitenoberflächen zu rechnen ist. Mit Hilfe von Schadensgleichungen wird die Anzahl der Durchschläge bestimmt. Diese Schadensgleichungen gelten für sehr spezielle Wand- und Oberflächenstrukturen. Wände können aus einfachen Blechen oder Sandwich-Strukturen bestehen. Es werden die Auswirkungen des Wandaufbaus und der gewählten Umlaufbahn auf die Anzahl der zu erwartenden Durchschläge diskutiert.

2. EINFÜHRUNG

Das MASTER-Modell basiert auf der Simulation von Ereignissen, bei denen *Space Debris* erzeugt wurden und der anschließenden Propagation der entstandenen Teilchenwolken zu einer Referenzepoch. Die Erzeugungereignisse werden mit Hilfe von mathematischen Algorithmen beschrieben, die für verschiedene Ereignisklassen geeignete Größen-, Geschwindigkeits- und Richtungsverteilungen für die einzelnen Objekte einer Partikelwolke vorgeben. Dieses Vorgehen bezeichnet man als Modellierung der Weltraummüllumgebung. MASTER greift auf eine

Datenbank zu, die alle historischen Ereignisse, wie z. B. orbitale Explosionen, Kollisionen, NaK-Flüssigmetallaustritte und Feststoffmotorzündungen enthält. Die Datenbank liefert Informationen über den Ort, die Zeit und das Ausmaß des Ereignisses. Diese Datenbank wird kontinuierlich verbessert und erweitert. Die historische Population, die von MASTER modelliert wird, umfasst Objekte bis herab zu einer Größe von 1 µm. Dieses Konzept von MASTER, das dynamische Verhalten der Weltraummüllumgebung zu modellieren, erlaubt es, eine Validierung des Modellansatzes anhand von Messdaten, wie zurückgeführten Oberflächen oder bodengestützten Radar- und Teleskopbeobachtungen, vorzunehmen, auch wenn diese nur einen Ausschnitt der Gesamtpopulation repräsentieren [1]. Die Verteilung des Weltraummülls auf Erdumlaufbahnen ist in BILD 1 dargestellt.

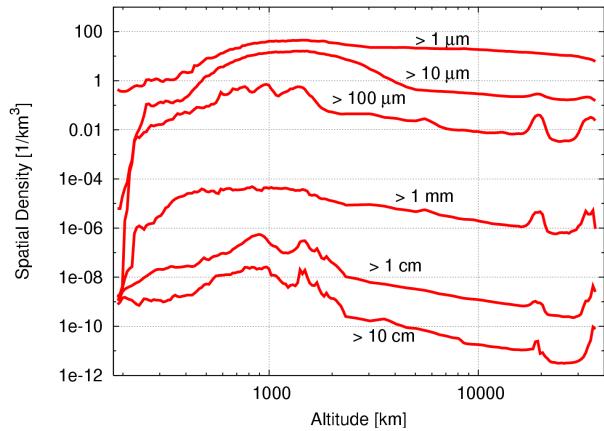


BILD 1. Die räumliche Dichte der Weltraummüllobjekte über der Bahnhöhe nach MASTER-2005, gültig für den 1. Mai 2005.

Der Weltraummüll umfasst neben den ca. 10.000 größeren Objekten des Radarkataloges zahlreiche kleinere Objekte wie Fragmentationstrümmer, NaK-Flüssigmetalltropfen aus Kernreaktoren, Schlackepartikel und Aluminiumoxid-Staub aus Feststoffmotoren, Auswurftpartikel (Ejecta) und Farbpartikel. Ferner werden von MASTER auch die natürlichen Meteoriten berücksichtigt [2-4, 7]. Insgesamt befinden sich heute ca. 150 Millionen Objekte größer als ein Millimeter und ca. 600.000 Objekte größer als ein Zentimeter auf allen Erdumlaufbahnen. Die Aufteilung der einzelnen Beiträge für Objekte größer als einen Zentimeter ist in BILD 2 dargestellt.

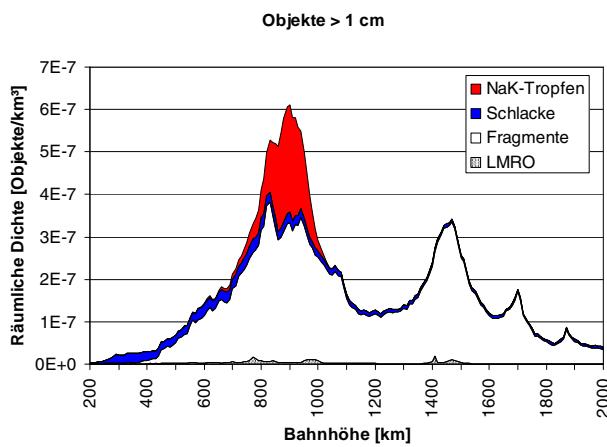


BILD 2. Die räumliche Dichte der Weltraummüllobjekte größer als einen Zentimeter für niedrige Bahnhöhen nach MASTER-2005, gültig für den 1. Mai 2005.

Die Population der Objekte größer als einen Zentimeter umfasst vier unterschiedliche Beiträge. Neben den Fragmenten gibt es NaK-Tropfen mit einem maximalen Durchmesser von ungefähr 5,5 cm und Schlackepartikel mit einem maximalen Durchmesser von ca. 3 cm. Den größten Beitrag auf niedrigen Erdumlaufbahnen liefern die Fragmente. Ferner sind start- und missionsbedingte Objekte (LMRO) vorhanden, die im Radarkatalog enthalten sind. Unter LMRO versteht man Bauteile, wie z. B. Spannbänder, Sprengbolzen und Abdeckkappen, die bei operationellen Vorgängen, wie Stufentrennung oder Inbetriebnahme von optischen Sensoren und Triebwerken auf Erdumlaufbahnen freigesetzt worden sind. Die Verteilung der NaK-Tropfen aus Kernreaktoren ist auf die Bahnhöhen zwischen 800 km bis 1.000 km beschränkt, in denen die Tropfen ursprünglich erzeugt wurden [6]. BILD 1 und 2 verdeutlichen, dass auf Bahnhöhen nahe 900 km die höchste Objektdichte vorliegt. Diese Bahn- höhe wird für sonnensynchrone Erdbeobachtungssatelliten verwendet und ist auch als Abklingumlaufbahn für ausgediente Kernreaktoren im Gebrauch. Fragmente und Schlacke dagegen sind in allen Höhenbereichen, bis hin zur geostationären Bahn anzutreffen.

3. FLUSSANALYSEN

Die Flussanalyse wird für zwei Beispiele durchgeführt. Ein Satellit befindet sich auf einer polaren Umlaufbahn mit hoher Debris-Dichte; der andere Satellit ist auf einer geostationären Umlaufbahn positioniert. Der hier verwendete Referenzsatellit hat eine *Beginning of Life* (BOL) Masse von 3 t. Es wurde eine Umlaufbahn mit einer Bahnhöhe von 900 km und einer Inklination von 90° ausgewählt. In dieser Bahnhöhe weist die Anzahl der künstlichen Objekte (Raumfahrtrückstände) ein Maximum auf. Die Lebensdauer des Satelliten wird in beiden Fällen auf 7 Jahre festgelegt. Die Satellithülle wird als einfache Honeycomb- (Sandwich-) Struktur mit oder ohne Mehrschichtisolierung (MLI) modelliert. Die Flussanalyse wird für die in Flugrichtung zeigende Seite durchgeführt.

Beide Satelliten sind erdorientiert. Die Fläche der Solarzellen und Antennen wird vernachlässigt, da Einschläge in diese Elemente nicht zu einem Verlust des Satelliten führen. Nur Einschläge auf den Satellitenkörper werden berücksichtigt. Dieses Konzept ist in BILD 3 dargestellt.

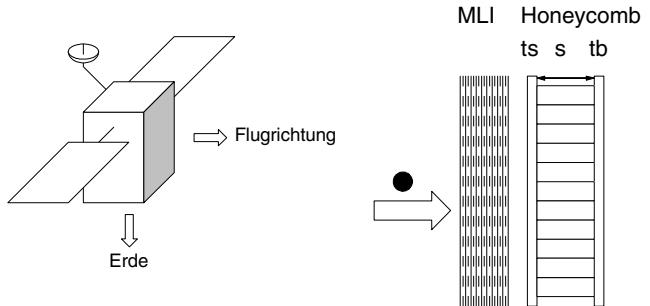


BILD 3. Die Flussanalyse wird für die Frontfläche eines erdorientierten Beispielsatelliten durchgeführt. Die Satellitenwand besteht aus einer einfachen Honeycomb-Struktur mit oder ohne MLI.

3.1. Polare Umlaufbahn

Der Funktionsumfang von MASTER erlaubt eine hochauflöste Flussanalyse auf ausgewählte Satellitenflächen. Im folgenden werden die Ergebnisse einer solchen Analyse für die Frontfläche eines typischen Satelliten auf einer erdnahen, polaren Umlaufbahn dargestellt und diskutiert.

BILD 4 zeigt den kumulativen Partikelfluss in Anzahl der Einschläge pro Flächeneinheit [m^2] und Zeit [Jahr] über dem Teilchendurchmesser für die Frontfläche des Satelliten. Die Darstellung beschränkt sich auf Objekte größer als 100 Mikrometer. Grundsätzlich ist MASTER in der Lage, Partikel bis zu einer Größe von einem Mikrometer Durchmesser zu berücksichtigen. Allerdings sind nur 100 Mikrometer große Objekte unter gewissen Umständen in der Lage, sehr dünne Satellitenwände zu durchschlagen. MASTER erlaubt die Aufschlüsselung und Darstellung der einzelnen Beiträge. Dazu gehören Fragmente, die entweder durch Explosionen oder Kollisionen erzeugt werden, start- und missionsbedingte Objekte (LMRO), NaK-Tropfen, Schlackepartikel aus Feststoffmotoren (SRM), Farbpartikel (*Paint Flakes*), Ejecta und Meteoriten. (Der Aluminiumoxid-Staub, der ebenfalls aus Feststoffmotoren austritt, hat Partikelgrößen, die unterhalb von 100 Mikrometern liegen und befindet sich daher außerhalb des Darstellungsbereiches der Grafik.) Auf der gewählten polaren Umlaufbahn dominieren unterschiedliche Teilchenklassen in unterschiedlichen Größenbereichen. Im Kleinteilbereich dominieren die Ejecta, welche die natürlichen Meteoriten um mehr als eine Größenordnung übersteigen. Meteoriten überwiegen nur im Größenbereich nahe bei einem Millimeter Durchmesser. Oberhalb dieses Bereiches dominieren die Explosionsfragmente. Kollisionsfragmente machen nur einen geringen Anteil der Trümmerstücke aus, da es in der Geschichte der Raumfahrt nur wenige Kollisionen gegeben hat. Erst

im größeren Dezimeterbereich spielen LMRO eine wichtige Rolle. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass der Fluss mit zunehmender Objektgröße deutlich abnimmt. Die Kollisionswahrscheinlichkeit für Raumfahrzeuge ist im Kleinteilbereich besonders hoch. Für die spätere Analyse der Durchschlagswahrscheinlichkeit bedeutet dies, dass insbesondere die Einschläge von Ejecta untersucht werden müssen.

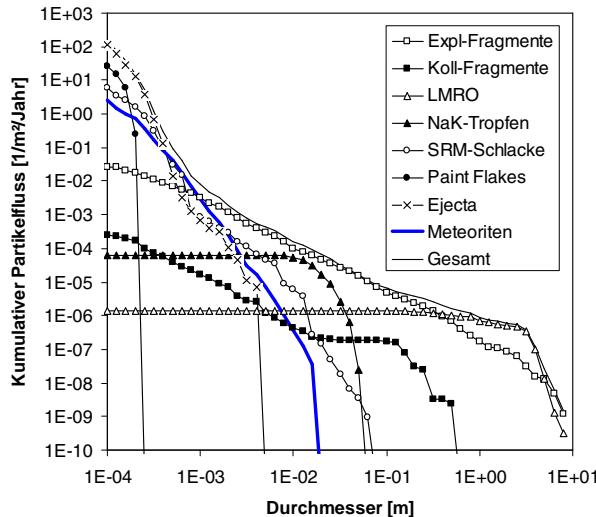


BILD 4. Kumulativer Fluss der einschlagenden Objekte größer als $100 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit vom Durchmesser auf die Frontfläche eines erdorientierten Satelliten auf einer 900 km hohen polaren Umlaufbahn nach MASTER-2005 (1. Mai 2005).

BILD 5 zeigt den Partikelfluss in Anzahl der Einschläge pro Flächeneinheit [m^2] und Zeit [Jahr] über den Einschlagswinkel für die Frontfläche des Satelliten. Ein Einschlagswinkel von null Grad bezeichnet einen Einschlag senkrecht auf die Fläche. Demzufolge endet die Skala für die orientierte Fläche bei 90° . Auf gewählten polaren Umlaufbahn dominiert der Partikelfluss künstlicher Objekte. Dieser Fluss zeigt eine Vorzugsrichtung. Die meisten Partikel schlagen nahezu senkrecht auf die Frontfläche ein. Diese hängt damit zusammen, dass die Frontfläche auf einer polaren Umlaufbahn (Inklination = 90°) die größte Wahrscheinlichkeit hat, mit Trümmerstücken zu kollidieren, die sich ebenfalls in Umlaufbahnen mit hoher Inklination befinden. Begegnen sich Objekten, die beide eine Inklination von 90° aufweisen, führt dies zu einem Frontalzusammenstoß. Für die spätere Analyse der Durchschlagswahrscheinlichkeit bedeutet dies, dass die Richtungsabhängigkeit und damit die Höhe der Einschlagsgeschwindigkeit bei der Anwendung von Schadensgleichungen berücksichtigt werden muss.

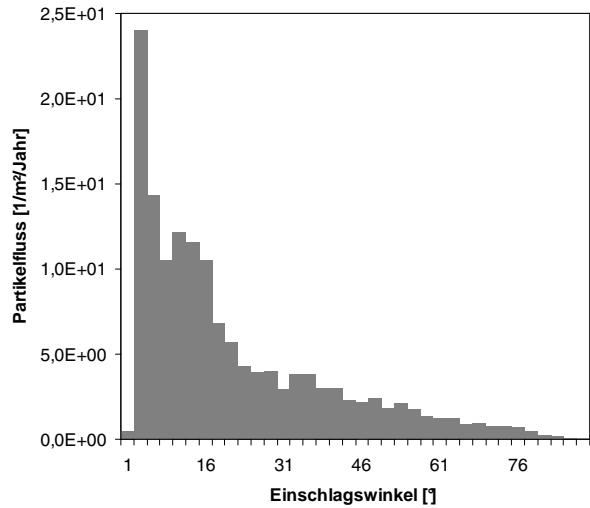


BILD 5. Fluss der einschlagenden Objekte größer als $100 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit vom Einschlagswinkel auf die Frontfläche eines erdorientierten Satelliten auf einer 900 km hohen polaren Umlaufbahn nach MASTER-2005 (1. Mai 2005).

BILD 6 ist BILD 5 ähnlich und zeigt den Partikelfluss über dem Einschlagsazimut für die Frontfläche des Satelliten, bezogen auf die lokale Horizontebene. Ein Azimut von null Grad steht für senkrechte Einschläge auf die Fläche. Die Grafik zeigt, dass bei einer erdnahen, polaren Umlaufbahn hauptsächlich mit Frontaleinschlägen zu rechnen ist.

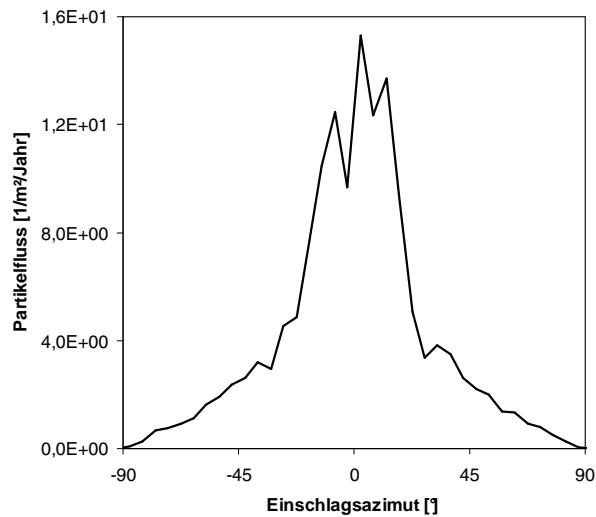


BILD 6. Fluss der einschlagenden Objekte größer als $100 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit vom Einschlagsazimut auf die Frontfläche eines erdorientierten Satelliten auf einer 900 km hohen polaren Umlaufbahn nach MASTER-2005 (1. Mai 2005).

BILD 7 zeigt den Partikelfluss über der Einschlagselevation für die Frontfläche des Satelliten, bezogen auf die lokale Horizontebene. Die Grafik sagt aus, dass bei einer erdnahen, polaren Umlaufbahn hauptsächlich mit Frontal-

einschlägen aus einer Richtung parallel zur Horizontebene zu rechnen ist. Begründen lässt sich das damit, dass die Nähe der Erde nur Kollisionen mit Objekten zulässt, die sich auf Umlaufbahnen in derselben Bahnhöhe befinden wie der Satellit. Andere Objektbahnen scheiden aus, da der Abschattungseffekt der Erde diese Bahnen verbieten würde. Ein Objekt mit einer nennenswert von null abweichenden Elevation würde nach dem Passieren der 900 km Höhenschale unweigerlich mit der Erde kollidieren und in den oberen Schichten der Atmosphäre verglühen. Seine Aufenthaltsdauer und der Höhenschale des Satelliten wäre so gering, dass es zu keiner nennenswerten Kollisionswahrscheinlichkeit mit dem Satelliten kommen würde.

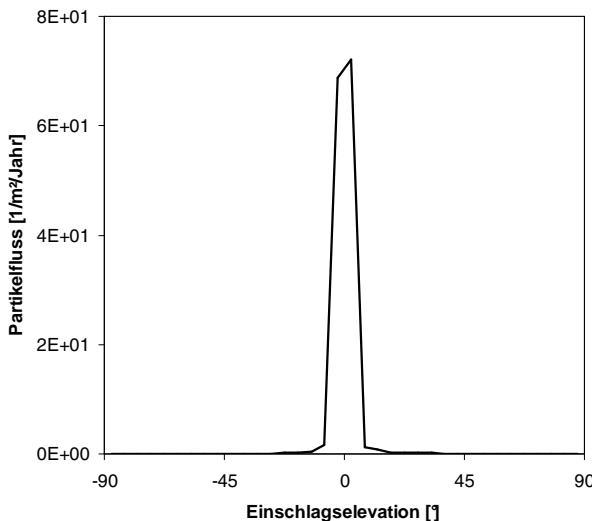


BILD 7. Fluss der einschlagenden Objekte größer als 100 μm in Abhängigkeit von der Einschlagselevation auf die Frontfläche eines erdorientierten Satelliten auf einer 900 km hohen polaren Umlaufbahn nach MASTER-2005 (1. Mai 2005).

BILD 8 zeigt die Herkunft der *Debris*-Objekte, die auf die Frontfläche des Satelliten einschlagen. Die meisten Partikel weisen ebenso wie der Satellit eine hohe Inklination auf.

BILD 9 gibt die Aufteilung des Flusses in künstliche und natürliche Objekte. Die Grafik zeigt, dass die beiden Beiträge völlig unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche abdecken. Die Einschlagsgeschwindigkeit künstlicher Objekte kann mit ca. 16 km/s maximal das Doppelte der Bahngeschwindigkeit erreichen. (Bei exzentrischen Umlaufbahnen, bei denen das Perigäum in 900 km Höhe liegt, können höhere Einschlagsgeschwindigkeiten auftreten. Aufgrund der sehr geringen Aufenthaltswahrscheinlichkeit in der Höhenschale des Satelliten ist die Kollisionswahrscheinlichkeit gering.) Die Einschlagsgeschwindigkeit der Meteoriten ist höher und liegt im Mittel bei 20 km/s. Meteoriten können aber sehr viel höhere Geschwindigkeiten erreichen. Diese Unterschiede in der Geschwindigkeit müssen bei der Analyse der Durchschlagswahrscheinlichkeit berücksichtigt werden.

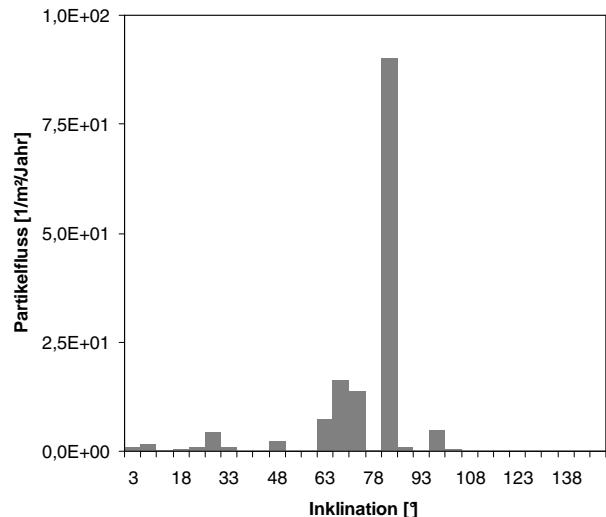


BILD 8. Fluss der einschlagenden Objekte größer als 100 μm in Abhängigkeit von der Inklination der Objekte auf die Frontfläche eines erdorientierten Satelliten auf einer 900 km hohen polaren Umlaufbahn nach MASTER-2005 (1. Mai 2005).

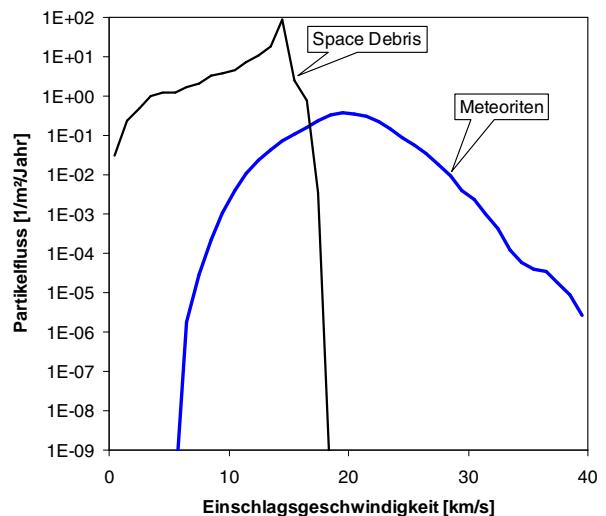


BILD 9. Fluss der einschlagenden Objekte größer als 100 μm in Abhängigkeit von der Einschlagsgeschwindigkeit der Objekte auf die Frontfläche eines erdorientierten Satelliten auf einer 900 km hohen polaren Umlaufbahn nach MASTER-2005 (1. Mai 2005).

3.2. Geostationäre Umlaufbahn

Für den Besatzen Satelliten wird eine Flussanalyse für die geostationäre Umlaufbahn unter denselben Bedingungen durchgeführt. BILD 10 zeigt den kumulativen Partikelfluss in Anzahl der Einschläge pro Flächeneinheit [m^2] und Zeit [Jahr] über dem Teilchendurchmesser für die Frontfläche des Satelliten. Es treten dieselben Beiträge zur Weltraummüllumgebung auf wie auf LEO mit Ausnahme der NaK-Tropfen, die auf niedrige Erdumlaufbahnen beschränkt sind. Auf der geostationären Umlaufbahn ist der Beitrag der künstlichen Objekte wesentlich geringer

als auf LEO. Dies hängt mit den geringeren Raumfahrtaktivitäten auf GEO zusammen. Unterhalb einer Teilchengröße von etwa einem Zentimeter dominieren die natürlichen Meteoriten. Der höchste künstliche Anteil besteht in Schlackepartikeln, die aus Feststoffmotoren ausgetreten sind. Die Umlaufbahnen von Schlackepartikeln sind ähnlich zu den angestrebten Zielorbits nach dem Manöver, da die Schlacke hauptsächlich in einer späten Phase des Abbrandes kurz vor dem Brennschluss austritt. Feststoffmotoren werden überwiegend für den Übergang von niedrigen Umlaufbahnen zur geostationären Bahn eingesetzt. Dies hat dazu geführt, dass die Schlackepartikel besonders in zwei Bereichen einen großen Beitrag zum Weltraummüll liefern. Der eine Bereich liegt bei niedrigen Bahn zwischen 200 km bis 800 km Höhe. In diesem Bereich werden Feststoffmotoren gezündet, um Satelliten auf elliptische Transferbahnen zu befördern. Der andere Bereich liegt nahe bei 36.000 km Höhe. Hier erfolgt der Einschuss von der Transferbahn in die geostationäre Bahn. Dort kommt es deshalb ebenfalls zu einer starken Anhäufung von Objekten. In dieser Höhe liefern die Schlackepartikel den überwiegenden Beitrag zum Weltraummüll.

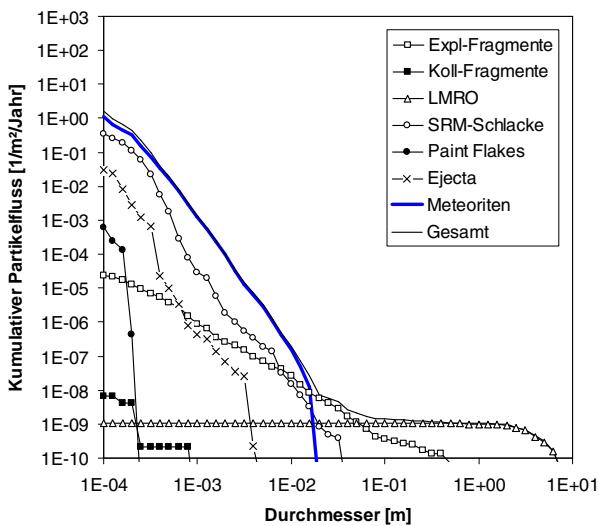


BILD 10. Kumulativer Fluss der einschlagenden Objekte größer als $100 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit vom Durchmesser auf die Frontfläche eines erdorientierten Satelliten auf einer geostationären Umlaufbahn nach MASTER-2005 (1. Mai 2005).

BILD 11 zeigt den Partikelfluss in Anzahl der Einschläge pro Flächeneinheit [m^2] und Zeit [Jahr] über den Einschlagswinkel für die Frontfläche des Satelliten. Auf der geostationären Bahn dominieren die natürlichen Meteoriten, die aus allen Raumrichtungen auf die betrachtete Fläche einschlagen. Darüber hinaus gibt es einige ausgezeichnete Peaks, die bestimmten Quellen zuzuordnen sind, wie bspw. die Schlackepartikel.

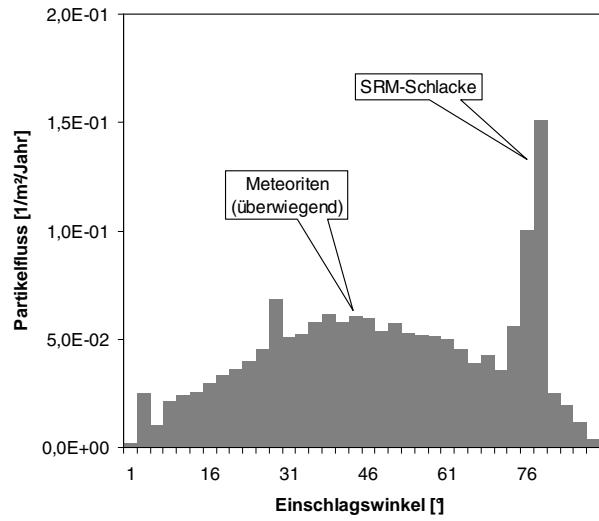


BILD 11. Fluss der einschlagenden Objekte größer als $100 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit vom Einschlagswinkel auf die Frontfläche eines erdorientierten Satelliten auf einer geostationären Umlaufbahn nach MASTER-2005 (1. Mai 2005).

BILD 12 ist BILD 11 ähnlich und gibt den Partikelfluss über dem Einschlagsazimut für die Frontfläche des Satelliten, bezogen auf die lokale Horizontebene. Die Grafik zeigt, dass bei einer geostationären Umlaufbahn überwiegend mit Einschlägen von Meteoriten zu rechnen ist, die aus allen Richtungen eintreffen.

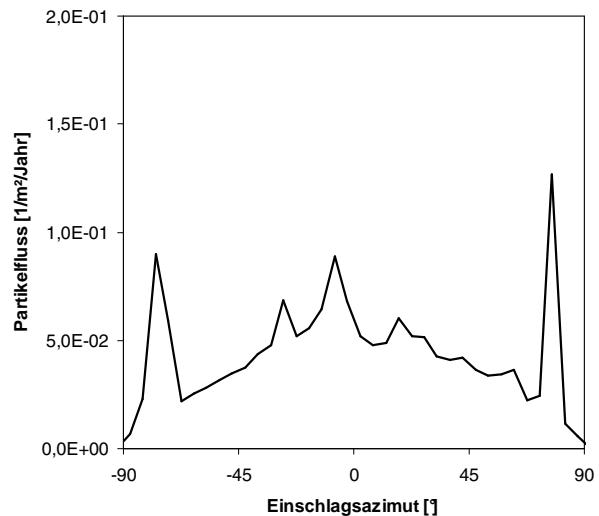


BILD 12. Fluss der einschlagenden Objekte größer als $100 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit vom Einschlagsazimut auf die Frontfläche eines erdorientierten Satelliten auf einer geostationären Umlaufbahn nach MASTER-2005 (1. Mai 2005).

BILD 13 gibt den Partikelfluss über der Einschlagselevation für die Frontfläche des Satelliten, bezogen auf die lokale Horizontebene. Die Grafik zeigt, dass auf einer geostationären Umlaufbahn, in welcher der Meteoritenfluss dominiert, Einschläge aus allen Richtungen erfolgen

können.

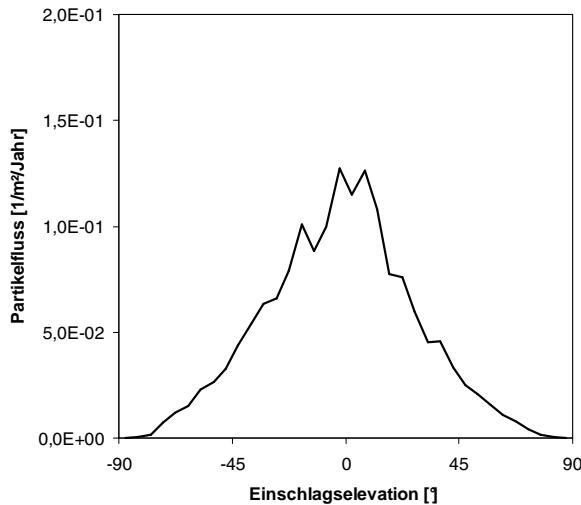


BILD 13. Fluss der einschlagenden Objekte größer als $100 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit von der Einschlagselevation auf die Frontfläche eines erdorientierten Satelliten auf einer geostationären Umlaufbahn nach MASTER-2005 (1. Mai 2005).

BILD 14 zeigt die Herkunft der Objekte, die auf die Frontfläche des Satelliten einschlagen. Die meisten Debris-Objekte weisen Inkination nahe null Grad auf. Dies hängt damit zusammen, dass alle Satelliten, die auf GEO platziert werden, zunächst über dem Äquator liegen. Bahnstörungen oder Zusatzgeschwindigkeiten, wie bspw. beim Austritt von Schlacke oder bei der Explosion von Oberstufen, können zu Abweichungen von dieser Bahnneigung führen.

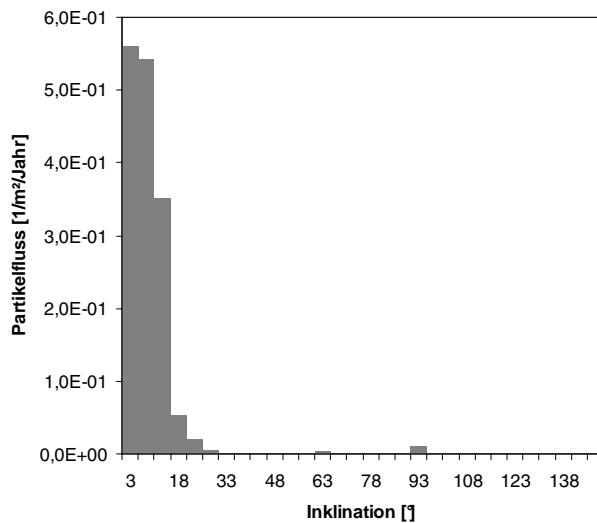


BILD 14. Fluss der einschlagenden Objekte größer als $100 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit von der Inkination der Objekte auf die Frontfläche eines erdorientierten Satelliten auf einer geostationären Umlaufbahn nach MASTER-2005 (1. Mai 2005).

Vergleicht man die Einschlagsgeschwindigkeiten auf LEO

und GEO miteinander, so ergeben sich deutliche Unterschiede. BILD 15 zeigt, dass die Einschlagsgeschwindigkeiten künstlicher Objekte auf GEO sehr gering sind und nur wenige Kilometer pro Sekunde betragen. Die Durchschlagswahrscheinlichkeit ist viel geringer als bei den Objekten auf LEO. Verursacht wird diese dadurch, dass auf GEO alle künstlichen Objekte sich annähernd auf einer Bahn in eine Vorzugsrichtung bewegen. Die durch Bahnstörungen oder Zusatzgeschwindigkeiten hervorgerufenen Relativgeschwindigkeiten zwischen dem Satelliten und Weltraummüllobjekten sind gering. Frontalzusammenstöße wie auf polaren Umlaufbahnen sind ausgeschlossen.

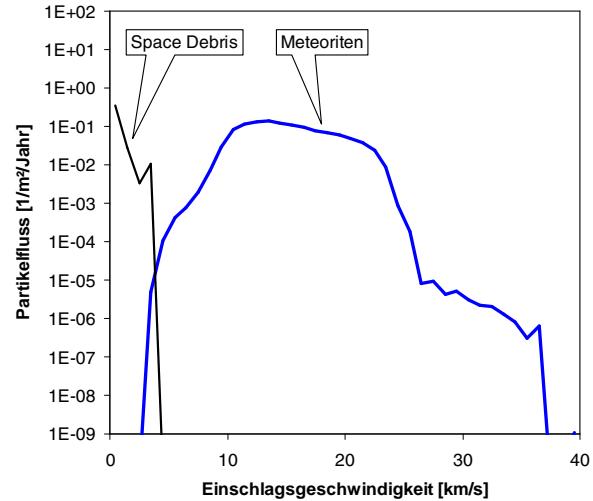


BILD 15. Fluss der einschlagenden Objekte größer als $100 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit von der Einschlagsgeschwindigkeit der Objekte auf die Frontfläche eines erdorientierten Satelliten auf einer geostationären Umlaufbahn nach MASTER-2005 (1. Mai 2005).

4. PENETRATION EINER SATELLITENWAND

Der Fluss von einschlagenden Partikeln auf eine Satellitenoberfläche sagt noch nichts über das Risiko einer Beeinträchtigung der Satellitenfunktionen aus. Ein wichtiges Kriterium für die Bestimmung dieses Risikos ist die Wahrscheinlichkeit des Durchschlages eines Partikels. Dringt ein Partikel in einen Satelliten ein, besteht die Möglichkeit, dass Subsysteme mechanisch beschädigt werden können. Hier ist besonders die Bordelektronik sehr anfällig, da viele dieser Komponenten auf der Innenseite der Satellitewände angebracht sind. Unter Verwendung von Schadensgleichungen für *Single Honeycomb* (SHC) Strukturen kann der minimale durchschlagende Partikeldurchmesser (kritischer Durchmesser) bestimmt werden [5]. Dabei wird die Richtung und die Geschwindigkeit des Einschlags berücksichtigt. Im folgenden wird Anzahl der Durchschläge für die o. g. polare und geostationäre Umlaufbahnen für unterschiedliche Wandstrukturen berechnet. Es wird eine typische Aluminiumwand von 0,8 mm Dicke mit SHC Strukturen verglichen, bei denen beide Wände jeweils eine Stärke von 0,4 mm aufweisen,

wobei der Abstand zwischen den Blechen variiert wird. Die Ergebnisse sind in TAB. 1 bis 4 dargestellt.

Satelliten-wände (ohne MLI)	Anzahl der Einschläge (> 100 µm)	Anzahl der Durchschläge				
		Wand- stärke 0,8mm	SHC (ts=tb=0,4mm)			Spacing s
			1cm	3cm	5cm	
Fragmente	3		2	1	1	1
Ejecta	27.126	1.663	55	4	1	
Schlacke	1.004	154	29	3	1	
Paint Flakes	4.866	1.005	0	0	0	
Meteoriten	391	71	23	7	4	
Gesamt	33.390	2.895	108	15	7	

TAB. 1. Anzahl der Einschläge und Penetrationen von Objekten größer als 100 µm auf die Frontfläche (ohne MLI) eines erdorientierten Satelliten auf einer 900 km hohen polaren Umlaufbahn (1. Mai 2005).

Satelliten-wände (mit MLI)	Anzahl der Einschläge (> 100 µm)	Anzahl der Durchschläge				
		Wand- stärke 0,8mm	SHC (ts=tb=0,4mm)			Spacing s
			1cm	3cm	5cm	
Fragmente	3		1	1	1	1
Ejecta	27.126	616	32	1	1	
Schlacke	1.004	81	16	2	1	
Paint Flakes	4.866	301	0	0	0	
Meteoriten	391	45	15	5	3	
Gesamt	33.390	1.044	64	9	6	

TAB. 2. Anzahl der Einschläge und Penetrationen von Objekten größer als 100 µm auf die Frontfläche (mit MLI) eines erdorientierten Satelliten auf einer 900 km hohen polaren Umlaufbahn (1. Mai 2005).

Satelliten-wände (ohne MLI)	Anzahl der Einschläge (> 100 µm)	Anzahl der Durchschläge				
		Wand- stärke 0,8mm	SHC (ts=tb=0,4mm)			Spacing s
			1cm	3cm	5cm	
Fragmente	0		0	0	0	0
Ejecta	4		0	0	0	
Schlacke	64		0	0	0	
Paint Flakes	0		0	0	0	
Meteoriten	500	105	20	5	3	
Gesamt	568	105	20	5	3	

TAB. 3. Anzahl der Einschläge und Penetrationen von Objekten größer als 100 µm auf die Frontfläche (ohne MLI) eines erdorientierten Satelliten auf einer geostationären Umlaufbahn (1. Mai 2005).

Satelliten-wände (mit MLI)	Anzahl der Einschläge (> 100 µm)	Anzahl der Durchschläge				
		Wand- stärke 0,8mm	SHC (ts=tb=0,4mm)			Spacing s
			1cm	3cm	5cm	
Fragmente	0		0	0	0	0
Ejecta	4		0	0	0	
Schlacke	64		0	0	0	
Paint Flakes	0		0	0	0	
Meteoriten	500	61	13	4	2	
Gesamt	568	61	13	4	2	

TAB. 4. Anzahl der Einschläge und Penetrationen von Objekten größer als 100 µm auf die Frontfläche (mit MLI) eines erdorientierten Satelliten auf einer geostationären Umlaufbahn (1. Mai 2005).

Die Werte der TAB. 1 bis 4 gelten für eine Frontfläche

von 20 m² und eine Missionsdauer von sieben Jahren. Der Vergleich zeigt, dass die Anzahl der Einschläge auf der 900 km hohen erdnahen Umlaufbahn rund sechzig mal höher ist als auf der geostationären Bahn. Den höchsten Anteil auf LEO machen die Ejecta aus. Mit zunehmendem Abstand (Spacing) zwischen den beiden Wänden einer SHC Struktur steigt die Schutzwirkung beträchtlich an. Die Penetrationswirkung hängt neben dem Einschlagwinkel von der Teilchengröße, -dichte und -geschwindigkeit ab. Bei zunehmendem Spacing schaffen es hauptsächlich die Meteoriten aufgrund ihrer sehr hohen Geschwindigkeit, eine Satellitenwand zu durchschlagen. Das zusätzliche Anbringen von MLI erhöht die Schutzwirkung. Bei der geostationären Umlaufbahn kann der Einfluss von künstlichen Objekten vernachlässigt werden, da ihre Anzahl zu gering ist.

5. STÖRUNG DER SATELLITENFUNKTION

Der Kleinteilbereich von Space Debris und Meteoriten wird bisher bei der Risikoanalyse im Vorfeld einer Satellitenmission nicht berücksichtigt. Aufgrund der sehr kleinen Partikeldurchmesser besteht die Gefahr solcher Einschläge nicht im Totalverlust einer Satellitenmission durch einen Satellitenwanddurchschlag. Die Vielzahl der Einschläge ist vielmehr in der Lage, eine spezifische Mission nachhaltig zu stören. Die Auswirkungen und möglichen Konsequenzen solcher Vorfälle müssen deshalb im Vorfeld einer Satellitenmission bedacht werden. Hierbei können verbesserten Partikelflussmodelle wie MASTER wertvolle Unterstützung bei der Risikoanalyse geben. Die möglichen Beeinträchtigungen der Satellitenfunktion sollen im folgenden erwähnt werden.

Degradation. Einschläge von Kleinstpartikeln führen zu einer stärkeren Degradation von Optiken und dem Thermalschutz, die dem Partikelfluss direkt ausgesetzt sind. So ist derzeit aufgrund eines möglichen Mikrometeoriteinschlags der Verlust einer CCD sowie Pixelschäden auf weiteren CCDs des astrophysikalischen Satelliten XMM-Newton zu beklagen.

Electro-Static Discharge. Im Zusammenhang mit der Erzeugung von Plasma durch Partikeleinschläge können diese zudem eine spontane elektrostatische Entladung auslösen. Wenn ein Mikrometeorit oder ein Weltraummüllobjekt mit hoher Geschwindigkeit auf eine Satellitenoberfläche einschlägt, zerbricht das Partikel. Während eines Hochgeschwindigkeitseinschlags wird ein gewisser Anteil des Projektil- und des Targetmaterials verdampft und ionisiert. Es wird eine elektrisch leitfähige Plasma-wolke erzeugt, die eine elektrostatische Entladung hervorruft. Dies führt zu einem Lichtbogen, der sensitive Elektronik beschädigen kann.

Elektromagnetische Strahlung. Die elektromagnetische Strahlung, die von einer durch einen Einschlag erzeugten Plasmawolke hervorgerufen wird, ist zwar nicht geeignet, Subsysteme eines Satelliten zu zerstören. Die Strahlung

kann jedoch den regulären Satellitenbetrieb beeinträchtigen, indem sie das lokale Rauschen unterhalb des Mikrowellenfrequenzbereiches übertrifft und den Empfangs- und Sendebetrieb stört.

Impulsübertragung. Einschläge von Partikeln können außerdem zu Störungen im Satellitenbetrieb führen, die aufgrund des Impulses entstehen, der durch ein einschlagendes Partikel übertragen wird. Hierbei wird nur ein geringer Anteil der Energie absorbiert, andererseits werden Auswurfparkteile erzeugt, die eine Reaktion auf den Satelliten hervorrufen. Die hohe Anzahl der Einschläge besonders im niedrigen Erdorbit wäre dabei in der Lage, sensitive Satellitenmissionen im Hinblick auf hochpräzise Erdgravitationsmessungen oder den Einsatz von Solar Sails zu beeinträchtigen.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurden Flussanalysen für Weltraummüll- und Meteoriten-Hochgeschwindigkeitseinschläge auf einen typischen Satelliten durchgeführt. Das MASTER-2005 Modell wurde verwendet, um den Partikelfluss auf einen Satellitenkörper vorherzusagen. Die wissenschaftlichen Modelle zur Darstellung der Weltraummüllumgebung erlauben eine realistische Beschreibung des Partikelflusses auf Erdumlaufbahnen bis herunter zu einem Partikel-durchmesser von 1 µm. Die Kollisionswahrscheinlichkeit kann als hochauflöster Partikelfluss auf orientierte Satellitenflächen bestimmt werden. Auf niedrigen Erdumlaufbahnen ist mit zahlreichen Einschlägen im Kleinteilbereich zu rechnen. In diesem Fall sind Satelliten mit dünnen Wänden hauptsächlich durch Debris-Objekte gefährdet. Auf der geostationären Umlaufbahn müssen nur die natürlichen Meteoriten berücksichtigt werden. Die Anzahl der durchschlagenden Partikel ist von der gewählten Umlaufbahn, der Einschlagsgeschwindigkeit und -richtung sowie der Orientierung der Fläche abhängig. Diese Parameter müssen bei einer realistischen Abschätzung des Risikos berücksichtigt werden.

7. DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde von der Europäischen Union unterstützt.

8. LITERATUR

- [1] **Oswald, M., Stabroth, S., Wiedemann, C., Vörsman, P., Klinkrad, H., Validation of the ESA MASTER-2005 Orbital Debris Model, 2005 AMOS Technical Conference, Wailea, HI, USA.**
- [2] **Oswald, M., Wegener, P., Stabroth, S., Wiedemann, C., Vörsman, P. A Revised Approach for Modelling On-Orbit Fragmentations, Astrodynamics Specialist Conference, AIAA-2004-5221, 2004, Providence, RI, USA.**
- [3] **Stabroth S., Wegener P., Oswald M., Wiedemann C., Klinkrad H., Vörsman P., Implementation of a Surface Degradation Model into ESA MASTER, paper SPACE2005-A-00106, Fourth European Conference on Space Debris 2005, Darmstadt, Germany.**
- [4] **Stabroth, S., Wegener, P., Oswald, M., Wiedemann, C., Klinkrad, H., Vörsman, P., Modellierung der Größenverteilung der durch den Einsatz von Feststoffraketenmotoren auf Erdumlaufbahnen erzeugten Kleinpartikel, paper, DGLR-Jahrestagung 2004, Dresden.**
- [5] **Turner, R., et al., Cost effective honeycomb and multi-layer insulation debris shields for unmanned spacecraft, International Journal of Impact Engineering, Vol. 26, 2001, pp. 785-796.**
- [6] **Wiedemann, C., Oswald, M., Stabroth, S., Klinkrad, H., Vörsman, P., Die Modellierung des Austritts von NaK-Tropfen auf Erdumlaufbahnen, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2004, paper DGLR-JT2004-117.**
- [7] **Wiedemann, C., Oswald, M., Stabroth, S., Vörsman, P., Verwundbarkeit von Satelliten: Hochgeschwindigkeitseinschläge von Weltraummüll, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2005, paper DGLR-JT2005-157.**

9. ABKÜRZUNGEN

BOL	Beginning Of Life
GEO	Geo-stationary Orbit
LEO	Low Earth Orbit
LMRO	Launch and Mission Related Objekts
MASTER	Meteoroid and Space Debris Terrestrial Environment Reference Model
MLI	Multilayer Insulation
NaK	Natrium-Kaliumlegierung
SHC	Single Honeycomb
SRM	Solid Rocket Motor